

SIMULAÇÃO DE SEQUÊNCIAS DIÁRIAS DE ENERGIA SOLAR

ISAIAS DE CARVALHO¹ e THAIS TREVAS MACIEL²

RESUMO - É proposto e testado um modelo de simulação para sequências diárias de energia solar; o modelo considera a dependência estatística do tempo entre dias consecutivos, tratando a sequência como uma cadeia de Markov em dois estágios, "tempo bom" e "tempo ruim", definidos arbitrariamente em função do número relativo de horas de sol no dia, n/N . Desta forma as probabilidades de transição podem ser calculadas rapidamente para cada região e estação do ano. Hipóteses para a distribuição de energia direta em dias de "tempo bom" e "tempo ruim" são feitas e as sequências de energia direta são geradas com as probabilidades de transição e estas hipóteses; correlações modificadas de LIU e JORDAN são usados para determinar a energia global. Os resultados são analisados e a possibilidade de completar o modelo coerentemente com a simulação diária de chuva, umidade relativa e temperatura média é discutida.

DAILY SIMULATION OF SOLAR ENERGY

ABSTRACT - A simulation model for daily series of incident solar energy is proposed and tested; it takes into account the statistical dependency of the weather in consecutive days, treating the series as a Markov chain in two stages, "good" and "bad" weather, arbitrarily defined as a function of n/N . Transitional probabilities can be easily estimated for each region and season; they are used, together with some hypothesis for the direct energy distribution in "good" and "bad" days, to generate the series of daily direct energy. Modified LIU and JORDAN correlations are used to obtain the global energy.

-
1. Prof. Titular, Depto. Eng. Mecânica, FEC, UNICAMP. 13100 - Campinas, SP.
 2. Curso de Pós-Graduação, IMECC, UNICAMP. 13100 - Campinas - SP.

Results are analysed and the possibilities of including the simulation of daily rainfall, relative humidity and average temperature are discussed.

INTRODUÇÃO

A previsão do comportamento de sistemas e componentes que dependam da distribuição temporal de energia solar é feita com níveis de precisão variáveis; por exemplo, o dimensionamento de áreas de coletores solares ou fotocélulas pode utilizar a média anual de insolação local, as médias sazonais ou, com maior precisão, as médias mensais. Em outros casos torna-se evidente que a unidade de tempo máxima aceitável é um dia, sendo conveniente ter em conta as flutuações dia a dia do nível de energia: isto ocorreria, por exemplo, no dimensionamento do acumulador (armazenador térmico ou baterias) para os coletores ou fotocélulas, considerando uma demanda diária de energia. Um caso interessante onde os dados diários são relevantes é a simulação do crescimento de plantas, em particular quando a energia solar incidente é um parâmetro importante ROSE (1981). Para a cana-de-açúcar, por exemplo, a previsão de "stress" por falta de água no solo necessitaria de dados diários de energia solar, chuva, umidade relativa e temperatura média.

Idealmente sequências reais medidas por vários anos para cada região seriam utilizadas; infelizmente na grande maioria dos casos estes dados não são disponíveis. Para a energia global diária têm sido usadas variações aleatórias em torno da média, ou sobre uma distribuição experimental "universal". Estes modelos falham essencialmente por desprezarem a dependência estatística do tempo entre dias consecutivos LESTIENNE (1978).

O objetivo deste trabalho é propor e testar um modelo simples que considere esta dependência e permita incorporar coherentemente a simulação diária de chuva, umidade relativa e temperatura média. A motivação principal foi o estabelecimento de uma base de dados para a simulação do crescimento de cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo de simulação proposto é desenvolvido em duas partes: a primeira é a geração de sequência de dias de "tempo bom" e "tempo ruim" e na segunda determina-se os valores da energia solar global e direta atribuída a cada dia da sequência. Comenta-se em seguida a possibilidade de completar a simulação, coerentemente, com valores de chuva, umidade relativa e temperatura média.

Geração de sequência de dias com "tempo bom" ou "tempo ruim".

O fato de que o tempo em um certo dia não é estatisticamente independente do tempo no dia precedente tem sido analisado de diversas formas; uma maneira relativamente simples consiste em utilizar um modelo onde a sequência de dias é considerada como uma cadeia de Markov em dois estágios: "tempo bom" e "tempo ruim" LESTIENNE (1978). Um determinado dia tem "tempo ruim" se neste dia n/N é maior ou menor que 0,5, respectivamente, onde n é o número de horas de sol no dia e N a duração do dia astronômico. Esta definição permite calcular com facilidade as probabilidades de transição de um dia de tempo bom ($b \rightarrow b$, probabilidade α) ou de ruim para ruim ($r \rightarrow r$, probabilidade δ). A análise das variações temporais (estações do ano) e espaciais (regiões diferentes) de α e δ e sua aplicação na previsão de sequências de dias, assim como a verificação experimental do modelo, foram realizadas recentemente (LESTIENNE, 1978; LESTIENNE, 1979 e LESTIENNE, 1980) com os seguintes resultados; o modelo prevê satisfatoriamente a proporção de dias "bons" e "ruins" e a repartição da duração de sequências de dias do mesmo tipo.

Para utilizar este modelo, determinamos no litoral, centro e oeste de São Paulo RABL & PEREIRA (1979), os valores indicados na Tabela 1, para 1979. Nos testes foram usadas médias sazonais. As determinações para períodos longos, em qualquer localidade, podem ser rapidamente feitas com os dados heliográficos disponíveis.

No texto, J refere-se ao dia do ano ($J: 1 \rightarrow 365$); i re

fere-se ao mês ($i: 1 \rightarrow 12$) e K refere-se à estação ($K: 1 \rightarrow 4$).

A geração da sequência de dias é feita sorteando um número aleatório R , entre 0 e 1, para cada dia.

se $R \leq \text{Prb}(K)$ o dia é bom.
se $R > \text{Prb}(K)$ o dia é ruim.

Para os outros dias:

se o dia $(J-1)$ é bom $R \leq \alpha(K) \rightarrow$ dia (J) é bom
 $R > \alpha(K) \rightarrow$ dia (J) é ruim

se o dia $(J-1)$ é ruim $R \leq 1 - \alpha(K) \rightarrow$ dia (J) é ruim
 $R > 1 - \alpha(K) \rightarrow$ dia (J) é bom

onde $\text{Prb}(K)$ é a probabilidade (limite) de que um dia seja bom, na estação K , dada por:

$$\text{Prb}(K) = (1 - \delta(K)) / (2 - \alpha(K) - \delta(K))$$

Determinação da energia global e direta diária

A atribuição de valores de energia solar global aos dias "bons" e "ruins" gerados pela metodologia acima pode utilizar diversos critérios; optamos por trabalhar separadamente com as componentes direta e difusa, uma vez que a definição de "bom" e "ruim" foi feita a partir do número de horas de sol direto, mantendo portanto uma correlação mais forte com a energia direta que com a global. O procedimento foi:

- 1) Separar as médias mensais de radiação global, $\text{MEG}(i)$, nas componentes direta, $\text{MED}(i)$ e difusa $\text{MEF}(i)$.
- 2) Separar a média mensal de energia direta em duas partes, válidas para os dias bons e ruins, respectivamente $\text{MEDB}(i)$ e $\text{MEDR}(i)$. Adotar distribuições para a energia direta em dias bons e ruins, e sortear os valores, de acordo com estas distribuições, para cada dia.
- 3) Com a energia direta no dia, $\text{ED}(J)$, usar uma correlação universal para obter a energia global diária, $\text{EG}(J)$ e por diferença a difusa $\text{EF}(J)$. As hipóteses e equações utilizadas em cada item foram:
 - a) Trabalha-se com a correlação clássica de LIU e JORDAN mo-

dificada por RABL & PEREIRA (1979):

$$\frac{MEF(i)}{MEG(i)} = 0,775 + 0,347 \left(\omega(i) - \frac{\pi}{2} \right) - [0,505 + 0,261 \times \left(\omega(i) - \frac{\pi}{2} \right)] - \cos \left[2 \left(\frac{MEG(i)}{HO(i)} - 0,9 \right) \right] \quad x$$

onde:

$$\omega(i) = -\tan L \tan d \quad (\text{ângulo solar, no por do sol})$$

$$d = 23.45 \sin\left(\left(\frac{284 + J}{365}\right) \cdot 360^\circ\right) \quad (\text{declinação solar no dia J})$$

$$HO(i) = \frac{24}{\pi} \cdot I_0 (\cos L \cdot \cos d \cdot \sin \omega + \omega \cdot \sin L \cdot \sin d) \quad (\text{projeção horizontal da radiação extra-terrestre; } I_0 \text{ é a constante solar})$$

ção horizontal da radiação extra-terrestre; I_0 é a constante solar)

$HO(i)$ e $\omega(i)$ são calculados no dia 15 de cada mês, e o valor é usado para todo o mês.

$$MED(i) = (MEG(i) - MEF(i)) \quad (2)$$

b) A análise de grande número de valores para a energia direta em dias bons e ruins [2] levou à proposição de distribuições razoáveis para os dois casos. Com base nestes estudos, algumas hipóteses básicas foram utilizadas para este fim:

- Nos dias de "tempo ruim" $ED(J)/HO(i)$ tem uma repartição exponencial decrescente. Nos dias de "tempo bom" esta repartição é gaussiana.
- A média da repartição gaussiana (dias bons) é cerca de cinco vezes maior que a média da exponencial (dias ruins) e o desvio padrão é de 1.2 vezes a média da exponencial ($\sigma_b = (1.2) MEDR(i)$).

Por outro lado, usando a probabilidade de ocorrência de dias bons, podemos calcular as médias de energia direta em dias bons, $MEDB(i)$, e em dias ruins, $MEDR(i)$:

$$\text{MEDB}(i) = \text{MED}(i) \cdot \frac{5}{1 + \text{Prb}(k)} \quad (3)$$

$$\text{MEDR}(i) = \text{MEDB}(i)/5 \quad (4)$$

Com estas médias e as hipóteses acima pode-se, uma vez definido se o dia é bom ou ruim, sortear valores para a energia direta, ED(J). Nos dias de tempo ruim, ED(J) é sorteada de acordo com a lei de probabilidades:

$$\text{PR}(ED) = \frac{1}{\text{MEDR}(i)} \exp \left(- \frac{ED}{\text{MEDR}(i)} \right)$$

e nos dias de tempo bom:

$$\text{PR}(ED) = \frac{1}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{(ED - \text{MEDB}(i))^2}{2 \sigma_b^2} \right\}$$

Para evitar valores extremos das distribuições, que não teriam sentido físico, o valor sorteado para os dias ruins é limitado a um máximo de $2 \cdot \text{MEDR}(i)$. Para os dias bons a distribuição gaussiana era truncada fazendo-se:

$$\text{se } R < 0,15 \rightarrow R = 0,15$$

$$\text{se } R > 0,85 \rightarrow R = 0,85$$

c) A determinação de energia difusa diária, EF(J) (ou da global, EG(J) deve obedecer em princípio à correlação existente entre elas e a direta (ED(J), já sorteada) e às médias mensais MEF(i) e MEG(i). Optamos por adaptar a correlação de LIU & JORDAN entre EG(J) e EF(J), na versão corrigida por RABL [4], transformando-a para obter EG(J) em função de ED(J). O resultado final é:

$$\text{se } A > 0,6 \rightarrow B = (1,21)A$$

$$\text{se } A < 0,02 \rightarrow B = 0,08$$

$$\text{Se } 0,02 \leq A \leq 0,6 \rightarrow \frac{B}{0,94} = 0,1972 + 3,5366A - 19,0044A^2 + 61,2599A^3 - 95,6489A^4 + 57,3946A^5$$

onde:

$$A = ED(J)/HO(i) \quad e \quad B = EG(J)/HO(i)$$

Para os valores extremos de A, a correlação foi estabelecida por nós a partir de considerações físicas; para $0,02 \leq A \leq 0,6$ a aproximação polinomial corresponde exatamente à correlação de RABL & PEREIRA (1979) a menos do fator 0,94 que foi introduzido para corrigir valores sistematicamente superiores obtidos (já em simulação) para as médias dos valores diários em relação às médias mensais. Esta diferença já existe entre as duas correlações de LIU & JORDAN, mensal e diária, e vem provavelmente do procedimento de cálculo das médias.

Uma vez obtida EG(J), calcula-se:

$$EF(J) = (EG(J) - ED(J))$$

Simulação coerente de chuva, temperatura média e umidade relativa

A partir de médias mensais de chuva ($L(i)$, mm H_2O /dia) temperatura ($T(i)$; são disponíveis, em geral, médias mensais dos valores mínimos, máximos e médios diários) e umidade relativa, $UR(i)$, vários procedimentos podem ser usados para a simulação de valores diários que sejam coerentes com a simulação de energia global. O nível de sofisticação do procedimento dependerá do nível de detalhamento e precisão requeridos dos resultados.

Por exemplo, um procedimento simples seria obtido a partir das seguintes hipóteses:

- a) Chove em todos os "dias ruins", e somente neles.
- b) Nestes dias, a temperatura média é $5^{\circ}C$ inferior à dos "dias bons" e a umidade relativa é 0,9.

Com estas hipóteses os valores diários de chuva e temperatura nos "dias ruins" seriam:

$$LR(i) = L(i)/(1 - Prb(K))$$

$$TR(i) = T(i) - 5 \cdot Prb(K)$$

e a umidade relativa em um "dia bom" seria:

$$URB(i) = \frac{UR(i) - (0,9) (1 - Prb(K))}{Prb(K)}$$

Com a mesma facilidade é possível, por exemplo, limitar a chuva aos dias em que $ED(J) < (0,2)HO(i)$.

RESULTADOS, DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O modelo foi utilizado para gerar várias sequências de 365 dias para a cidade de Campinas, SP. Os dados básicos (horas de sol direto, energia global no plano horizontal: valores diários e médias mensais, para 1979) foram obtidos do Instituto Agrônomo de Campinas. Valores das probabilidades de transição foram calculados, tomando-se as médias por estação (Tabela 2).

As simulações de cinco anos foram analisadas calculando-se as médias mensais de energia direta, global e difusa e as probabilidades limite de dias bons e ruins.

As observações principais são as seguintes:

a) Com relação à sequência de dias bons e ruins, verificou-se apenas a convergência dos valores simulados com as probabilidades limite calculadas a partir dos α e δ medidos. Os resultados indicam que para 5 anos de simulação a aproximação é suficiente (Tabela 3).

b) Com relação aos valores de energia simulados, testou-se a convergência dos valores das médias mensais simuladas, ano a ano, para os valores de entrada de $MED(i)$ calculados pela correlação LIU & JORDAN. Os resultados estão na Tabela 4; a última coluna ($\Delta\%$) é a média dos modelos dos desvios mensais, ficando em 5% para cinco anos. A média algébrica para cinco anos é zero, não havendo um desvio sistemático na simulação. Já as médias de energia global calculadas pela correlação proposta em c.1 apresentaram um desvio sistemático, com a correlação superestimando em cerca de 6% as médias calculadas pela correlação mensal de LIU & JORDAN. Uma discussão sobre o procedimento para o cálculo das médias dos dois casos RABL & PEREIRA (1979), indica que é possível haver esta diferença já nas correlações origi-

TABELA 1: Valores de α e δ em São Paulo, 1979.

| | α anual | δ anual |
|--------------------|----------------|----------------|
| Litoral (1 cidade) | 0,67 | 0,70 |
| Centro (4 cidades) | 0,78 | 0,53 |
| Oeste (2 cidades) | 0,73 | 0,57 |

TABELA 2: Valores sazonais de α e δ , Campinas (1979).

| | α | δ |
|-----------|----------|----------|
| Jan - Fev | 0,76 | 0,46 |
| Mar - Mai | 0,84 | 0,59 |
| Jun - Ago | 0,74 | 0,48 |
| Set - Dez | 0,75 | 0,67 |

TABELA 3: Probabilidades limites de dias ruins: calculadas e simuladas em 3 e 5 anos.

| | $Prr = \frac{1-\alpha}{2-\alpha-\delta}$ | Prr, simulação 5 anos | Prr, simulação 3 anos |
|-----------|--|--------------------------|--------------------------|
| Jan - Fev | 0,31 | 0,31 | 0,33 |
| Mar - Mai | 0,28 | 0,25 | 0,30 |
| Jun - Ago | 0,33 | 0,32 | 0,29 |
| Set - Dez | 0,43 | 0,43 | 0,46 |

TABELA 4: Comparação entre médias mensais

| MED (i) | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | $\Delta\%$ |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| Liu e Jordan (entrada) | 3,14 | 3,08 | 2,88 | 2,52 | 1,98 | 2,35 | 2,39 | 2,53 | 2,52 | 2,68 | 2,73 | 2,17 | |
| Simulação 5 anos | 3,02 | 3,38 | 2,84 | 2,62 | 2,06 | 2,28 | 2,52 | 2,53 | 2,22 | 2,58 | 2,61 | 2,12 | 5 |
| Simulação 4 anos | 3,09 | 3,28 | 2,80 | 2,60 | 2,06 | 2,12 | 2,60 | 2,72 | 2,26 | 2,60 | 2,51 | 2,08 | 5,7 |
| Simulação 3 anos | 3,18 | 3,31 | 2,64 | 2,54 | 1,95 | 2,11 | 2,53 | 2,78 | 2,29 | 2,55 | 2,35 | 1,99 | 6,5 |

nais; para nossos propósitos, a introdução do fator 0,94 corrige o problema dentro do nível de precisão requerido, mantendo a estrutura básica (coerente) da distribuição de energia difusa e sua média.

c) Finalmente, é conveniente verificar visualmente a natureza das distribuições de energia global geradas. Isto foi feito para um grande número de casos e exemplos típicos são mostrados nas Figuras 1 e 2. A Figura 1 mostra, para o primeiro trimestre ao ano, a distribuição real de EG(J) (medida pelo Instituto Agrônomo de Campinas, 1979) uma simulação com o modelo proposto e uma simulação simplificada (valores correspondentes a uma geração aleatória entre 0 e 1, truncada abaixo de 0,2 e acima de 0,8) que ignora a interdependência dia a dia. A Figura 2 mostra resultados análogos para o terceiro trimestre do ano.

Embora seja possível aprofundar muito os testes do modelo proposto, parece-nos que as bases físicas do procedimento e as avaliações feitas dos resultados são suficientes para, juntamente com a simplicidade da utilização com um microprocessador, torná-lo atraente para o dimensionamento de acumuladores de energia solar e para uso na simulação de crescimento de plantas. A possibilidade de obter rapidamente vários anos de meteorologia simulada obedecendo a médias determinadas abre perspectivas interessantes para esta modelagem. Os dados necessários são disponíveis, a menos de valores locais de α e δ que podem ser determinados com facilidade dos registros heliográficos.

Por outro lado, mantida a característica essencial da interdependência do tempo entre dias consecutivos, o modelo pode ser facilmente simplificado ou modificado para descrever com maior precisão alguma variável mais importante para o problema tratado.

REFERÊNCIAS

- LESTIENNE, R. Modèle Markovien simplifié de météorologie à deux états. La Météorologie 12. 1978. p.53.

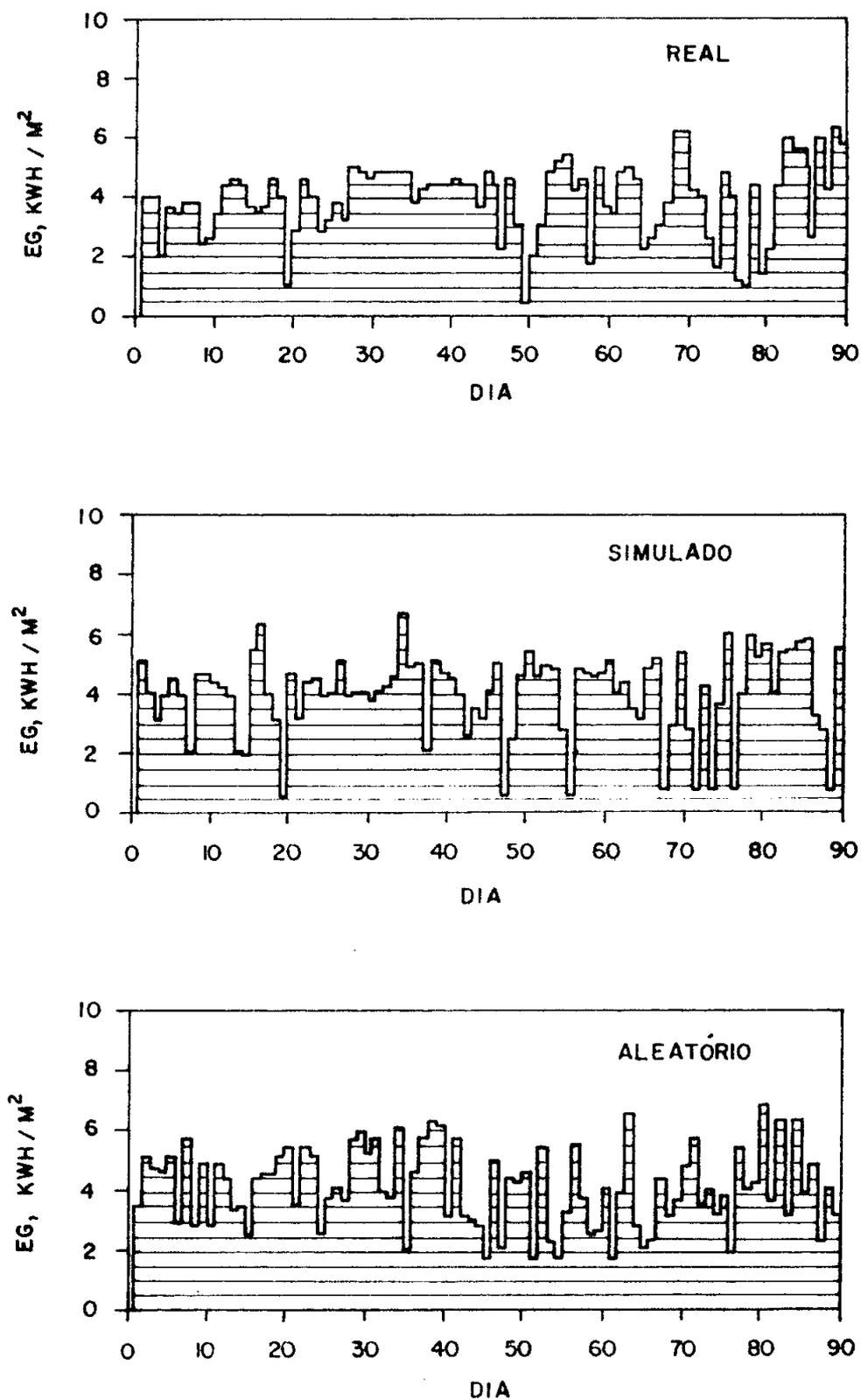


FIGURA 1. Distribuição real, simulação proposta e distribuição aleatória - Campinas 1979

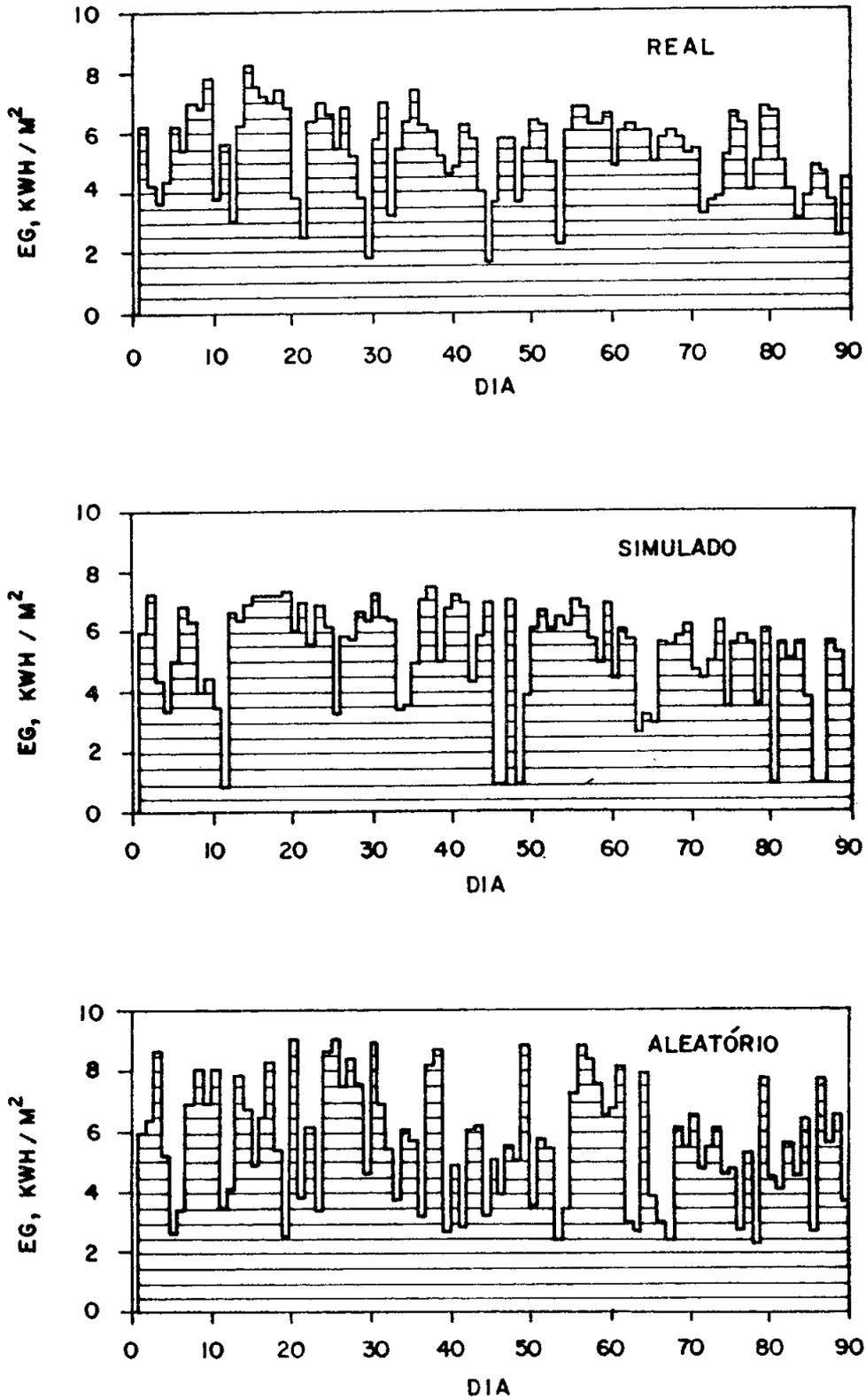


FIGURA 2. Distribuição real, simulação proposta e distribuição aleatória - Campinas 1979 - Jul/Set.

- LESTIENNE, R. Application du modèle Markovien simplifié à l'étude du comportement du Stockage d'une centrale solaire .
Revue de Physique Appliquée, 14, Jan, 1979, p.139.
- LESTIENNE, R. Analyse temporelle et cartographie de la matrice stochastique pour le modèle Markovien dans le Midi de la France. CNRS, PIRDES, 1980.
- RABL, A & PEREIRA, M.C. The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. Solar energy, vol. 22. p.155. 1979.
- ROSE, D.A. & CHARLES-EDWARDS, D.A. Mathematics and Plant Physiology. Academic Press, 1981.