

RE/GPO/10

V SEMINÁRIO NACIONAL DE
PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GRUPO VII

PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO
ECONÔMICA
DE SISTEMAS ELÉTRICOS

(G P O)

MODELO DE ANÁLISE DE
GARANTIA DE SUPRIMENTO

Autores : Engº Mario Veiga Ferraz Pereira
Engº Leslie Afrânio Terry
Engº Jerson Kelman

Empresa : CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Autor : Engº José Rosenblatt

Empresa : ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

Recife - PE - Brasil

1 9 7 9

1- INTRODUÇÃO

O modelo de análise de garantia (MOANGA), que está sendo desenvolvido pelo CEPEL com participação do DENE/ELETRORBRÁS, tem como objetivo calcular índices estatísticos sobre o desempenho futuro do sistema de geração hidrotérmico. Entre os valores fornecidos pelo programa incluem-se probabilidade de deficit ou vertimento, frequência de deficit, valor esperado de geração térmica, etc... Ele será incorporado ao modelo a sistema equivalente, cujo desenvolvimento foi iniciado há alguns anos na Diretoria de Planejamento e Engenharia da ELETRORBRÁS [1].

Um trabalho conjunto CEPEL/DEOP (da Diretoria de Operação da ELETRORBRÁS) aperfeiçoou posteriormente os critérios de operação baseados diretamente no histórico (curva-limite e simulação das séries históricas) e introduziu as políticas de operação por programação dinâmica estocástica e simulação da operação do sistema para séries de energias sintéticas [2].

O MOANGA corresponde a uma nova etapa na evolução deste modelo. Ele baseia-se no fato de que uma vez definida a política de operação, a evolução do sistema depende das energias afluentes ao reservatório equivalente. Como esta componente aleatória é suposta depender unicamente da energia afluyente durante o mês anterior, o comportamento do sistema pode ser representado por uma cadeia de Markov. Este conceito permite fazer todos os balanços "possíveis", isto é, calcular a matriz de transição entre estados do sistema e, conseqüentemente, a distribuição da energia armazenada, bem como outras variáveis de interesse.

O capítulo 2 descreve de maneira resumida os programas já existentes e em particular a obtenção da política ótima de operação térmica por programação dinâmica estocástica. O capítulo 3 apresenta a estrutura do MOANGA e o capítulo 4 descreve um exemplo de utilização a partir do plano de operação 79/83 do GCOI.

Outras companhias vêm também desenvolvendo pesquisas na área de modelos a sistema equivalente e é importante ressaltar a contribuição pioneira de FURNAS.

2- O MODELO A SISTEMA EQUIVALENTE

A metodologia de representação do reservatório a sistema equivalente já está bem estabelecida [1]. A representação do modelo gerador de energias naturais afluentes e a recursão da programação dinâmica estocástica são apresentadas sumariamente em seguida. Descrições mais detalhadas podem ser encontradas no Manual do Usuário do Modelo a Sistema Equivalente [2].

2.1 O Modelo Estocástico de Energia Afluente

A metodologia segue em linhas gerais as recomendações de Yevjevich [3] para a análise estrutural de dados hidrológicos. O modelo é do tipo autoregressivo e obedece à seguinte equação:

$$EAF_k = a_k \exp [\mu_k + \sigma_k \cdot \tau] + b_k EAF_{k-1} + c_k$$

onde:

a_k , b_k , c_k , μ_k , σ_k são parâmetros que variam ciclicamente ao longo do ano e que dependem das médias, auto-covariâncias e coeficientes de assimetria das energias afluentes. Eles são estimados a partir da série histórica de energias naturais. τ é uma variável aleatória $N(0,1)$.

Sendo a periodicidade do processo hidrológico originada basicamente pelo ciclo astronômico anual, espera-se que os parâmetros do modelo estocástico variem suavemente ao longo do ano. Ao serem estimados, entretanto, estes parâmetros apresentam variações bruscas devido ao pequeno tamanho da amostra. Com o objetivo de "suavizar" a forma de onda correspondentes aos valores amostrais ao longo do ano, substitui-se estes valores pelo seu desenvolvimento truncado em séries de Fourier de acordo com a descrição detalhada em [2].

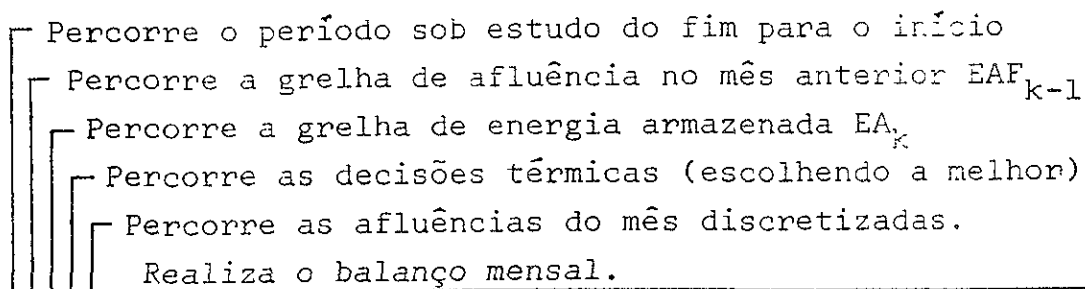
operação de custo mínimo, o princípio da otimalidade nos permite afirmar que a decisão ótima associada cada estado no mês k , $f_k^*(EA_k, EAF_{k-1})$, é dada por:

$$f_k^*(EA_k, EAF_{k-1}) = \min_{t_{k,j}} f_k(EA_k, EAF_{k-1}, t_{k,j})$$

Conhecidas as decisões ótimas para cada estado $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$ no mês k este procedimento pode então ser feito recursivamente até a data de início da operação. O problema do horizonte do planejamento, isto é, o período futuro que é necessário incluir na recursão de modo a não distorcer os resultados no período de interesse, está discutido em [2].

No modelo discretiza-se todas as variáveis supostas contínuas no desenvolvimento anterior: a variável EA_k é discretizada em intervalos equidistantes e EAF_{k-1} em equiprováveis. A avaliação de f_{k+1} cria uma dificuldade computacional pois o estado resultante de um balanço a partir de um certo estado inicial pode não ser um dos pontos discretizados. Nestes casos é feita uma interpolação entre os valores dos estados mais próximos.

Em resumo, o processo de obtenção da política ótima é o seguinte:



3- O MODELO DE ANÁLISE DE GARANTIA (MOANGA)

3.1 Introdução

O modelo de análise de garantia pode ser utilizado no cálculo da probabilidade de ocorrência de algum evento específico, por exemplo, "probabilidade de ocorrência de

algum déficit entre 1985 e 1987". Pode também fornecer o valor esperado de algumas variáveis aleatórias de interesse para o planejamento, como "custo esperado de geração térmica entre 1985 e 1987". Ele utiliza como dados de entrada as tabelas de decisões térmicas ótimas fornecidas pelo modelo de programação dinâmica e os parâmetros do modelo estocástico de energias afluentes. Estes dois elementos permitem calcular probabilidades de transição entre estados de energia armazenada e portanto aplicar conceitos de cadeias de Markov.

O modelo de análise de garantia calcula os resultados em duas etapas:

A primeira, denominada recursão direta, parte de uma distribuição de probabilidade fornecida para o mês inicial ($k=1$) e calcula, para cada mês k do período em estudo, a probabilidade do sistema estar em cada estado $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$.

A segunda etapa é a recursão inversa. Ela é executada no sentido inverso do tempo e fornece o valor esperado ou probabilidade de ocorrência de eventos de interesse em meses posteriores a qualquer mês k dado que o sistema está no estado $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$ no próprio mês k .

O resultado final desejado é em geral o valor esperado de uma variável a partir de algum mês k dado que o sistema está em um estado pré-determinado no primeiro mês. Este resultado é facilmente obtido, pois a recursão inversa fornece para todo i , o valor esperado desta variável dado que o sistema está no estado i no mês k (isto é, uma distribuição de valores condicionada pelo estado i) e a recursão direta fornece a probabilidade de se atingir cada estado i no mês k a partir do estado inicial. O valor desejado é portanto:

$$g_k = \sum_i p_k(i) \times g_k(i)$$

onde:

- i - i -ésimo estado discretizado $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$ no mês k .
- g_k - valor esperado da variável g a partir do mês k .
- $P_k(i)$ - probabilidade do sistema atingir o estado i no mês k a partir de um estado conhecido no primeiro mês.
- $g_k(i)$ - valor esperado da variável g a partir do mês k dado que o sistema está no estado i no mês k .

3.2 O Balanço Estocástico

Como foi visto anteriormente, o balanço direto determina o estado do sistema no início do mês $k+1$, isto é o par $\{EA_{k+1}, EAF_k\}$ a partir do conhecimento do armazenamento inicial EA_k e da afluência EAF_k durante o mês.

Também foi visto que a energia afluenta EAF_k no mês k é uma variável aleatória que depende da energia afluenta EAF_{k-1} do mês $k-1$. É possível dizer, portanto, que o sistema fez uma transição do estado $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$ para o estado $\{EA_{k+1}, EAF_k\}$. Desta forma, todas as transições possíveis a partir de $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$ serão conhecidas se forem feitos os balanços correspondentes a cada realização de EAF_k . A probabilidade de transição é exatamente a probabilidade de cada realização de EAF_k dado EAF_{k-1} .

A ilustração 3.2-1 representa um sistema simplificado com posto de apenas 3 estados caracterizados também por simplicidade apenas pelas suas respectivas energias armazenadas: o estado 1 é o mais cheio e o 3 o mais vazio. Também são representadas as transições a partir do estado 2: as setas indicam o resultado de cada balanço, e δ_1 e δ_2 as probabilidades de ocorrência das energias afluentes correspondentes. Como por hipótese só existem duas realizações, $\delta_1 + \delta_2 = 1$.

Como foi mencionado em 2.2, o balanço pode levar a estados intermediários entre dois estados de energia armazenada. Na ilustração 3.2-1, por exemplo, a transição de pro-

babilidade δ_1 leva uma energia armazenada entre os estados 1 e 2. Em casos como este é feita uma interpolação, e o estado resultante é representado como uma combinação convexa dos estados vizinhos 1 e 2.

Na transição de probabilidade δ_2 , que leva ao deficit, o modelo registra a ocorrência deste deficit e coloca o sistema no estado de menor energia armazenada (no caso, o estado 3).

3.3 A Recursão Direta

Uma matriz de transição T_k (não representada explicitamente no programa) poderia ser introduzida como uma matriz quadrada $T_k(i,j)$ de dimensão igual ao número de estados e tal que contivesse a probabilidade de transição do estado i no mês k para o estado j no mês $k+1$. Se P_k é o vetor $\{p_i^k\}$, onde p_i^k é a probabilidade de se estar em cada estado i do mês k , então: $P_{k+1} = T_k P_k$. Como em geral $T_k \neq T_{k+1}$ devido às mudanças de configuração e às variações sazonais, não é possível aproveitar-se as vantagens computacionais da forma $P_n = T^n P_0$, não sendo portanto vantajoso calcular-se explicitamente T_k .

A ilustração 3.3-1 representa o mesmo sistema da ilustração 3.2-1 onde o balanço de probabilidade δ_2 (que leva ao deficit) foi dirigido para o estado de menor energia armazenada.

A probabilidade de se atingir o estado 3 no mês $k+1$ a partir do estado 2 no mês k é $p_2^k \times \delta_2$. Como a transição de probabilidade δ_1 leva a um estado intermediário, a probabilidade de se atingir os estados 1 e 2 será ponderada pela distância a cada um destes estados vizinhos de maneira análoga à interpolação dos custos na recursão de programação dinâmica. A probabilidade de atingir o estado 1 no mês $k+1$ a partir de 2 no mês k é portanto $\lambda \delta_1 p_2^k$. Da mesma forma, a probabilidade de se atingir 2 no mês

$k+1$ a partir de 2 no mês k é $(1-\lambda)\delta_1 p_2^k$.

O algoritmo geral é portanto o seguinte:

Percorre o período sob estudo do início para o fim

Percorre a grelha de energia armazenada $\{EA_k\}$ no mês k

Percorre a grelha de energias afluentes no mês $k-1$ $\{EAF_{k-1}\}$
(a probabilidade de se atingir o estado $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$
é $P_k(EA_k, EAF_{k-1})$ (calculada no mês anterior $k-1$)).

Percorre a grelha de energias afluentes possíveis $\{EAF_k\}$ a
partir do estado $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$ (a probabilidade de ca-
da afluência EAF_k é $\phi(EAF_k)$ conhecida a partir de
 EAF_{k-1} e do modelo estocástico)).

Realiza o balanço e chega ao estado $\{EA_{k+1}, EAF_k\}$. Acu-
mula na matriz P_{k+1} a probabilidade de se atingir es-
te estado:

$$P_{k+1}(EA_{k+1}, EAF_k) = P_{k+1}(EA_{k+1}, EAF_k) + \\ \phi(EAF_k) \times P_k(EA_k, EAF_{k-1})$$

3.4 Recursão Inversa

A ilustração 3.4-1 representa o mesmo sistema simplifica-
do utilizado para exemplificar a recursão direta.

O valor g_i^{k+1} representa neste caso o valor esperado de
geração térmica no futuro se o sistema estiver no estado
 i no estágio $k+1$. A partir destes valores é fácil calcu-
lar, por exemplo, g_2^k .

$$g_2^k = g_2^{*k} + \lambda \delta_1 g_1^{k+1} + (1-\lambda)\delta_1 g_2^{k+1} + \delta_2 g_3^{k+1}$$

Onde:

g_2^{*k} é a geração térmica que a política ótima de operação
associa ao estado 2 no mês k , e as parcelas restantes re-
presentam o valor esperado de geração térmica no futuro.

Cabe observar que a parcela devida à transição de probabilidade δ_1 é novamente aqui estimada por interpolação dos valores vizinhos.

No caso de cálculo da probabilidade de ocorrência de algum evento, a única modificação refere-se à ocorrência do evento no próprio mês. Se na mesma ilustração ao invés das quantidades g_i^k , estivessem representados os valores d_i^k significando probabilidade de algum deficit a partir do mês k , dado que o sistema está no estado i , ter-se-ia:

$$d_2^k = \lambda \delta_1 d_1^{k+1} + (1 - \lambda) \delta_1 d_2^{k+1} + \delta_2 \times 1$$

A última parcela representa o fato de haver ocorrido um deficit na transição δ_2 (a probabilidade a ele associada é naturalmente igual a 1).

O algoritmo abaixo resume o processo.

— Percorre o período sob estudo do fim para o início

— Percorre a grelha de energia armazenada $\{EA_k\}$ no mês k

— Percorre a grelha de energias afluentes no mês $k-1$ $\{EAF_{k-1}\}$

— Percorre a grelha de energias afluentes $\{EAF_k\}$ possíveis a partir do estado $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$ (a probabilidade da energia afluente EAF_k é $\phi(EAF_k)$)

Realiza o balanço e atinge o estado $\{EA_{k+1}, EAF_k\}$ (O valor esperado da geração térmica (ou outra variável de interesse) a partir do estado $\{EA_{k+1}, EAF_k\}$ é $g_{k+1}(EA_{k+1}, EAF_k)$).

Acumula no valor esperado de geração térmica do estado $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$ os valores relativos a este balanço:

$$g_k(EA_k, EAF_{k-1}) = g_k(EA_k, EAF_{k-1}) + \phi(EAF_k) \times g_{k+1}(EA_{k+1}, EAF_k)$$

3.5 Obtenção dos Resultados Finais

Um resultado típico seria por exemplo o valor esperado da geração térmica a partir de um determinado mês futuro, dado que o estado do mês inicial é conhecido.

Este valor é facilmente obtido: ele é o somatório dos produtos das gerações térmicas esperadas a partir do mês k dado que o sistema está em cada estado $\{EA_k, EAF_{k-1}\}$ pelas respectivas probabilidades do sistema vir a estar efetivamente em cada um destes estados. As gerações térmicas esperadas são as calculadas pela recursão inversa, enquanto a recursão direta fornece a probabilidade do sistema estar em cada estado para qualquer mês a partir de um estado pré-fixado no primeiro mês.

É importante observar que para analisar-se várias variáveis em um dado período, basta realizar uma única recursão direta, já que a probabilidade de atingir cada estado independe da variável em estudo. Este resultado pode ser posteriormente combinado com o de várias recursões inversas. Também é interessante notar que não é necessário realizar a recursão inversa para todo o período de recursão direta, o que permite analisar subperíodos pré-escolhidos.

3.6 Aspectos Computacionais

A execução do programa é dividida em duas partes:

- Cálculo da recursão direta
- Cálculo da recursão inversa

Para a primeira fase é necessário especificar o período de estudo (por exemplo, janeiro de 1979 a outubro de 1987) e o estado inicial do sistema (para o mesmo exemplo, o estado do reservatório no início de janeiro de 1979 e a energia afluente no mês anterior). A probabilidade associada ao ponto inicial é 1.

Na segunda parte deseja-se calcular algumas propriedades relativas aos intervalos fornecidos, por exemplo, probabilidade de algum deficit no ano de 1987. Subentende-se aqui que o sistema em janeiro de 1979 parte do estado \underline{i} inicial especificado na primeira fase. O usuário deve fornecer então este intervalo de interesse e a propriedade a ser avaliada.

Estão disponíveis as seguintes funções:

1 - Probabilidade de algum deficit $> \alpha \times M$

onde:

α - uma proporção especificada

M - demanda mensal

2 - Probabilidade de algum vertimento $> \alpha \times M$, onde α , M como acima.

3 - Valor esperado do número de deficits.

4 - Proporção do tempo em que a térmica \underline{i} está na base.

5 - Valor esperado do número de vertimentos.

6 - Valor esperado do deficit.

7 - Valor esperado da energia vertida.

8 - Valor esperado da geração da térmica \underline{i} .

9 - Valor esperado do custo de deficit.

10 - Valor esperado do custo da geração da térmica \underline{i} .

11 - Valor esperado da geração térmica em P.U.

4- APLICAÇÕES

As tabelas 4-1 a 4-5 comparam resultados obtidos pelo MOANGA e por simulação a partir de 5000 séries sintéticas de ener-

guas afluentes. O caso utilizado é o plano de operação 79/83 do GCOI para a região Sudeste [4]. A única diferença está no custo de deficit: o valor arbitrado pelo GCOI (350 vezes o custo da térmica mais cara) leva a probabilidades de deficit muito pequenas, o que dificulta a avaliação dos modelos neste aspecto. Decidiu-se, portanto, utilizar um custo mais baixo (20 vezes o da térmica mais cara).

As tabelas 4-1 e 4-2 mostram distribuições de energia armazenada ao final de outubro de 1983 para ambos os modelos. O resultado é bastante preciso e se repete para os outros meses de simulação.

As tabelas 4-3 e 4-4 apresentam, respectivamente, os valores esperados de geração térmica e vertimento a cada ano. Embora haja diferenças na ordem de 10% em alguns casos, as aproximações parecem razoáveis em termos práticos.

As probabilidades de deficit anual apresentadas na tabela 4-5 também mostram alguma diferença: os valores obtidos pelo MOANGA são menores do que os fornecidos pela simulação. Este fato reflete o efeito das discretizações no modelo: número de estados, intervalos equidistantes, interpolação entre estados, etc.. É importante observar que a recursão inversa do MCANGA é muito semelhante à da programação dinâmica e que a sensibilidade à discretização seria, portanto, igual para ambos os modelos. Como o deficit é componente crucial nas tabelas de decisão do modelo de programação dinâmica estocástica, a importância de uma "calibração" cuidadosa se torna evidente. Os estudos nesta linha terão continuidade e provavelmente levarão a modificações na estrutura destes modelos.

BIBLIOGRAFIA

- (1) GOMES F.B., NYAMOTO A., TERRY L.A., COLÓ A., CARVALHO M.A., EYER L. - Modelo de Simulação de Usinas Hidroelétricas e Térmicas a Sistema Equivalente, 2º SNPTEE - B.H. - 1973.
- (2) CEPEL (DPST) e ELETROBRÁS (DEOP) - Manual do Usuário do Modelo a Sistema Equivalente, Relatório Técnico CEPEL nº144 de 18.07.77.
- (3) YEVJEVICH, V. - Structural Analysis of Hydrologic Time Series Hydrology Paper nº 56 - Colorado State University.
- (4) GCOI - Plano de Operação para 1979, SCEN-SE 07/78, Setembro/78

AGRADECIMENTO

Os autores desejam agradecer à eficiente colaboração do engenheiro Álvaro V. Filho e da estagiária Leontina M. Viana Crazindio Pinto na elaboração dos programas e testes.

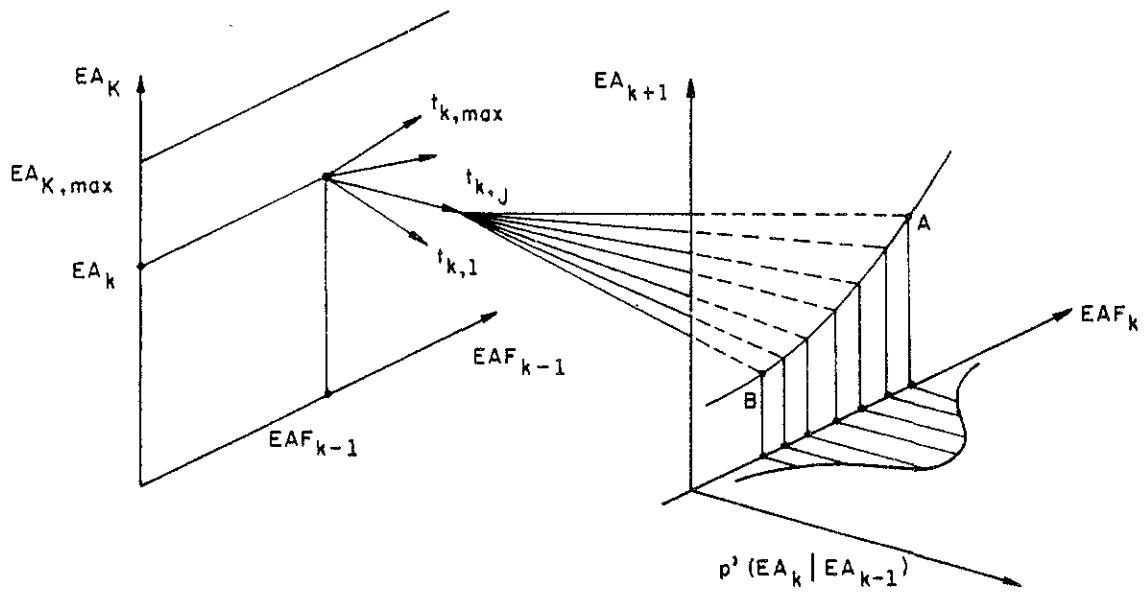


ILUSTRAÇÃO 2.2-1

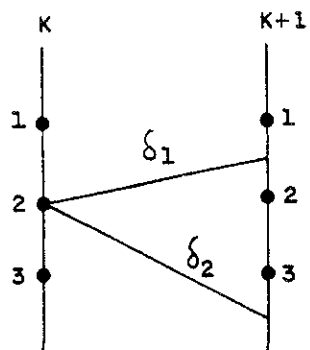


ILUSTRAÇÃO 3.2-1
BALANÇO ESTOCÁSTICO

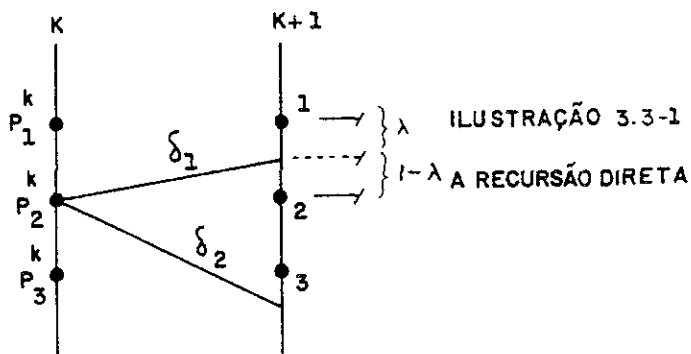


ILUSTRAÇÃO 3.3-1
A RECURSÃO DIRETA

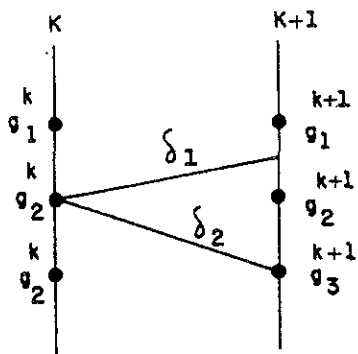
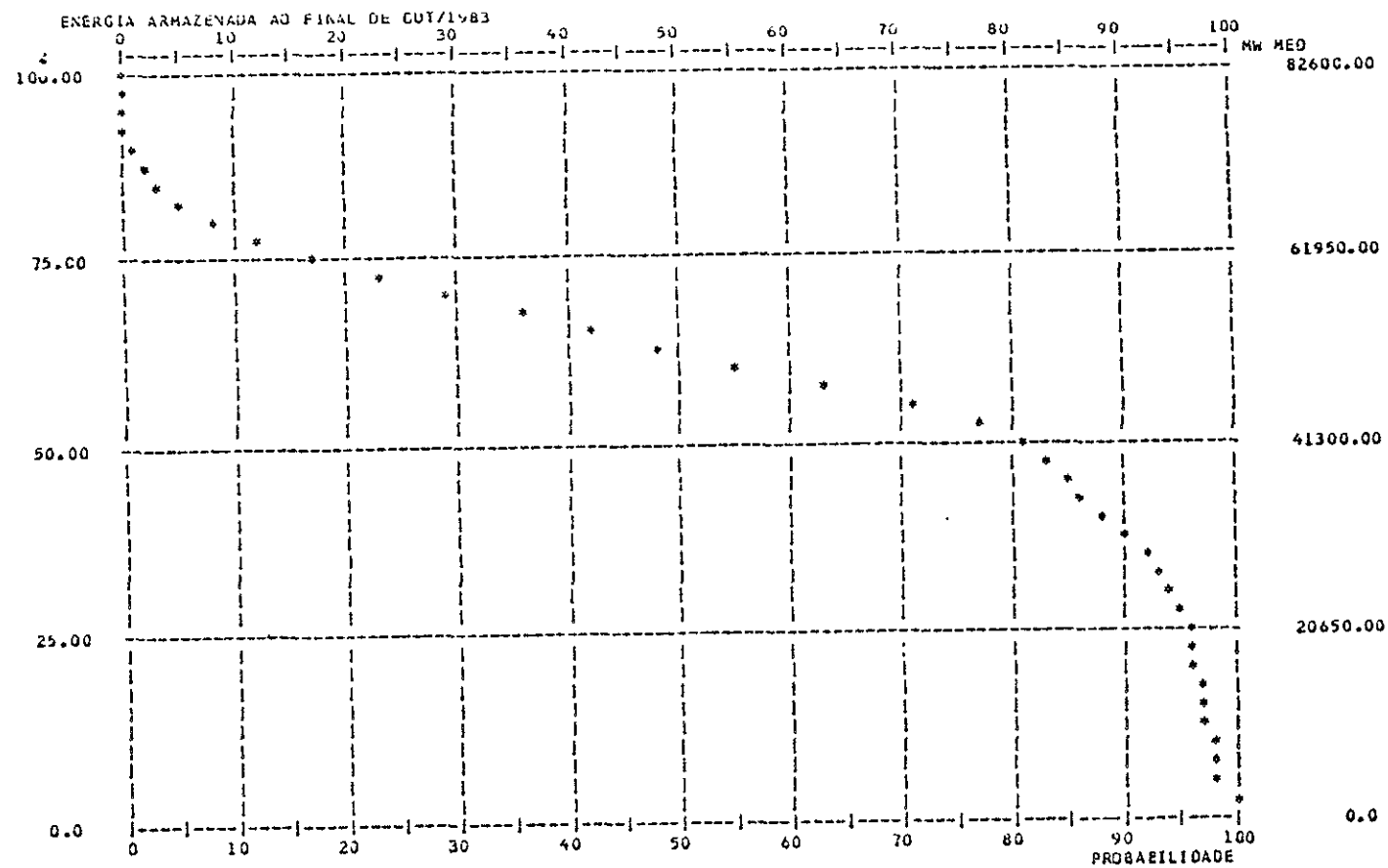


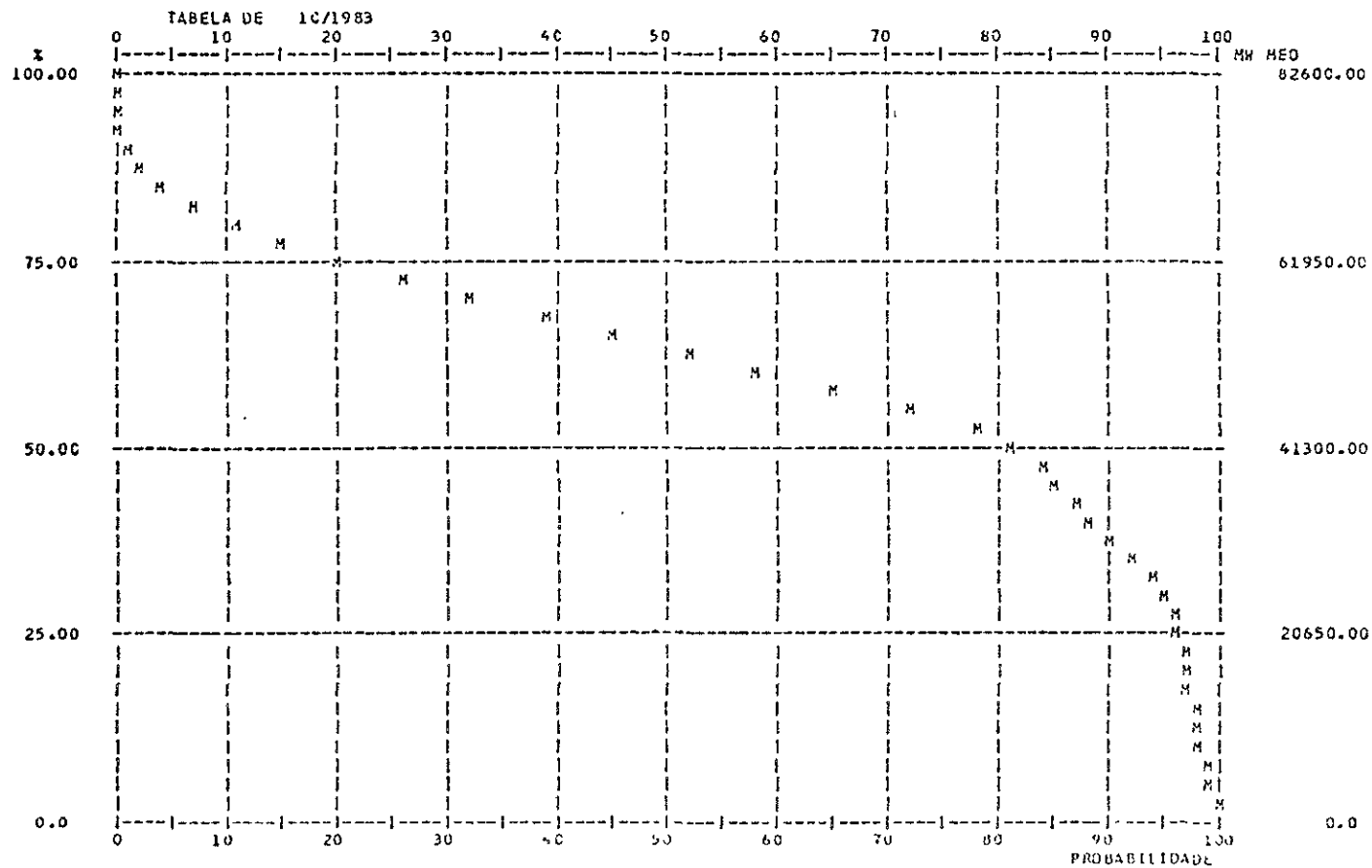
ILUSTRAÇÃO 3.4-1
A RECURSÃO INVERSA



RE/GPO/10

MÉDIA = 47537.20 D.PADRÃO = 14074.32

TABELA 4-1 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ARMAZENADA AO FINAL DE OUT/83
SIMULAÇÃO PARA 5000 SÉRIES



MEDIA = 47475.46 D. PADRAO = 13927.97

TABELA 4-2 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ARMAZENADA AO FINAL DE OUT/83
 MODELO DE ANÁLISE DE GARANTIA

ANO	MOANGA	SIMULAÇÃO 5000 SÉRIES
1980	654	630
1981	929	959
1982	1049	1058
1983	827	861

TABELA 4-3 VALOR ESPERADO DE GERAÇÃO TÉRMICA (\bar{M}_w) A CADA ANO

ANO	MOANGA	SIMULAÇÃO 5000 SÉRIES
1980	2238	2028
1981	1951	2210
1982	1295	1424
1983	1386	1429

TABELA 4-4 VALOR ESPERADO DE VERTIMENTO (\bar{M}_w) A CADA ANO

ANO	MOANEA	SIMULAÇÃO SÉRIES
1980	1.4 %	0.96
1981	1.0 %	1.42
1982	1.0 %	1.42
1983	1.3 %	1.86

TABELA 4-5 PROBABILIDADE DE DEFICIT ANUAL (%)