

- a) Calcular as forças  $[C] \{Q\}$  desenvolvidas nos elementos pelas forças exteriores, supondo que, para cada força, o deslocamento nodal correspondente é o único diferente de zero. O anulamento dos restantes é conseguido através da introdução das forças de fixação  $[D] \{Q\}$ .
- b) Procurar anular os efeitos das forças de fixação aplicando à estrutura forças iguais e de sinal contrário,  $-[D] \{Q\}$ .  
As forças  $[C] (-[D] \{Q\})$ , que aquelas desenvolvem nos elementos, constituem o primeiro vetor corretivo.
- c) Às forças consideradas na alínea anterior novas forças de fixação vão corresponder e são iguais  $[D] (-[D] \{Q\})$ . Novamente aplicam-se à estrutura forças iguais e de sinais contrários,  $[D] [D] \{Q\}$ . As forças  $[C] ([D] [D] \{Q\})$ , que aquelas desenvolvem nos elementos, constituem o segundo vetor corretivo. Procedimento análogo deve ser realizado até chegar-se a solução final do problema estrutural.
- Este é o método de CROSS, normalmente apresentado como instrumento de resolução de estruturas reticuladas, mas que na realidade é um método geral da Análise Estrutural, podendo portanto ser aplicado a estruturas

contínuas. Saliente-se que a convergência do método é garantida por ser a matriz  $[K]$  positiva definida.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 — OLIVEIRA, E.R.A. — "Introdução à Teoria das Estruturas de Comportamento Linear", Instituto Superior Técnico, Lisboa, Dezembro, 1966.
- 2 — ZURMUHL, R. — "Matrizen and Ihre Technischen Anwendungen", Berlin, Springer, 1961.
- 3 — LUSTGARTEN, P. — "Fundamentos Matemáticos para la Resolución de Sistemas de Ecuaciones Lineales por Iteración. Los Métodos Iterativos en la Solución del Problema Estructural." Monografía 236 del Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1963.

# MODELO PARA OPERAÇÃO SIMULADA DE UMA REPRESA COM DADOS SINTÉTICOS

Jean Marie Fritsch (\*)

## DEFINIÇÃO

Simular com um modelo matemático a operação de uma represa é fazer um balanço entre as entradas e as saídas de água a cada período de tempo pré-determinado:  
Os termos do balanço são:  
- os termos dependendo do meio ambiente:  
— Vazão afluente  
— Precipitações diretas sobre a lagoa  
— Evaporação  
- os termos propostos pelo homem que são as diversas utilizações da água. (Fig 1)

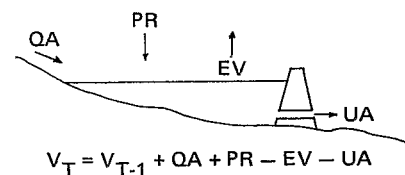


FIG. 1 — BALANÇO HIDROLÓGICO

A finalidade de todo modelo é de calibrar os fornecimentos em função de critérios de operação, de maneira a otimizar ao máximo a utilização da água.

Basicamente tais modelos pertencem a dois grupos:

### MODELOS OPERADOS COM DADOS NATURAIS HISTÓRICOS

Para operar este tipo de modelo precisa-se fornecer ao programa uma sequência histórica de dados CHUVA, VAZÕES e EVAPORAÇÃO que foram realmente observadas ou determinadas a partir de séries observadas (extensão de dados). Se os consumos são bem conhecidos para o mesmo período, estes oferecem uma boa oportunidade para verificar o bom funcionamento do modelo. Depois pode-se operar o modelo variando a quantidade e a repartição das demandas de água.

As vantagens destes modelos são:  
- a possibilidade de operá-los com um passo de tempo muito reduzido, por exemplo a nível diário.

- portanto, pelo fato de serem totalmente deterministas, estes modelos têm uma precisão e uma objetividade muito grande nos resultados por eles fornecidos.

Daf surge também a limitação mais importante que é a impossibilidade de testar hipóteses de fornecimentos com dados naturais diferentes das observações históricas, isto é, não se pode prever o comportamento do sistema em condições mais extremas que as já conhecidas.

O próprio fato de se dispor de uma série cronológica de boa qualidade, de duração razoável (10 anos no mínimo) e sem lacunas pode também ser encarada como uma desvantagem desses modelos.

Em conclusão, este primeiro grupo de modelos destina-se principalmente ao acompanhamento e controle de operação na fase de execução de um projeto de irrigação ou de geração de energia, por exemplo.

### MODELOS OPERADOS COM DADOS NATURAIS SINTÉTICOS

O enfoque deste segundo grupo, ao qual pertence o nosso modelo, é diferente pois não funciona com dados observados, mas sim com dados hidrológicos gerados por um processo matemático qualquer. Essas técnicas permitem construir séries extensas, por exemplos 100, 500 ou 1000 anos cuja repartição é compatível com as observações mas incluindo eventos de frequência rara para os quais pode se verificar qual seria o comportamento do sistema em tais casos.

As duas técnicas mais usadas são a correlação serial, (processos de cadeia de MARKOV), na qual se determina o dado de ordem N em função do dado de ordem anterior N-1 e de uma distribuição marginal de N em função de N-1.

No segundo procedimento, usa-se a inversão de uma lei de probabilidade pré-determinada, para uma população de frequência tendo uma repartição contínua e uniforme no segmento ]0,1[ Esta é a técnica conhecida como método de MONTE CARLO que vai ser usada em nosso modelo.

### CONSTITUIÇÃO DE UMA SÉRIE FICTÍCIA DE DADOS NATURAIS PARA OPERAÇÃO DE UM MODELO A PASSO MENSAL.

#### 1) — DESCARGAS

Pretendemos operar a simulação para 300 anos. Portanto, após amostragem de 300 módulos a partir da lei de probabilidade estes vão ser subdivididos por formas em 12 descargas mensais. A escolha da forma é feita aleatoriamente dentro de uma amostra das formas observadas pois concluímos a ausência de relação significativa com módulo. Na prática o modelo dispõe em memória de 50 repartições mensais diferentes sorteadas nos dados da bacia do Jaguaribe. (Fig. 2)

A partir daí podemos pensar em operar um modelo de simulação a nível mensal pois temos um dos termos, o mais importante, dos dados naturais que são as descargas afluentes à represa.

#### 2) — EVAPORAÇÃO

O segundo termo é a evaporação do lençol d'água. Este fenômeno desenvolve um papel de grande importância no balanço de um açude. A lâmina mensal evaporada ao longo de um ano é bastante variável, bem como o valor anual em função da região considerada, mas felizmente para nós, num mesmo lugar o fenômeno é muito constante de um ano para outro. Portanto, não pode ser considerada uma aproximação exagerada o fato de operar o modelo com uma só sequência de 12 evaporações mensais para todos os anos de simulação.

A sequência pode ser determinada a partir das observações de um tanque evaporimétrico instalado na região do projeto com coeficiente de passagem tanque-água livre apropriado ou então a partir de observações reais de níveis num açude

(\*) — Pesquisador do ORSTOM. Apresentou este trabalho ao Seminário de Hidrologia do Nordeste, realizado em agosto de 1977, em Fortaleza.

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° 32764  
Cote B

situado em condições físico-climáticas semelhantes.

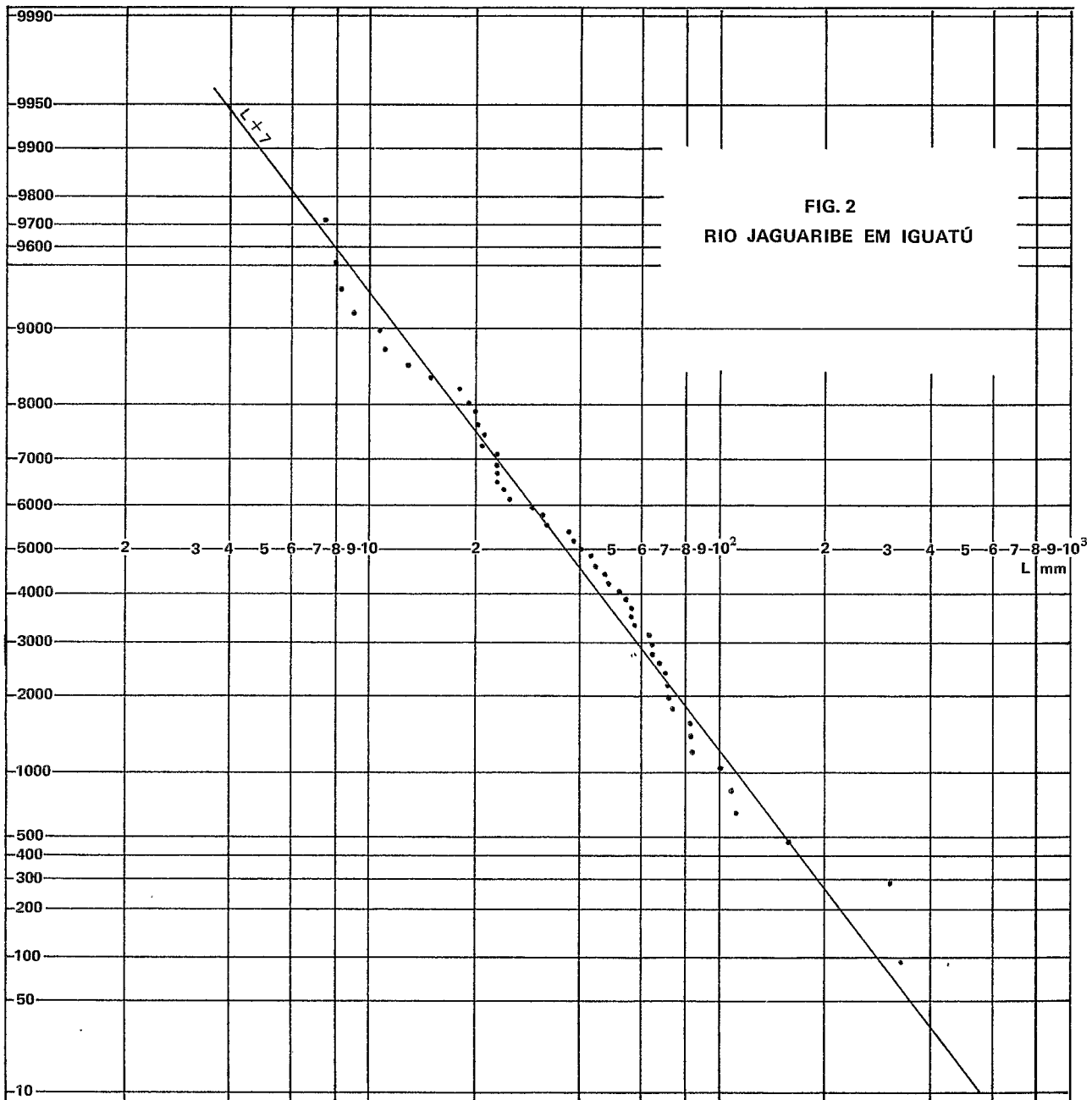


FIG. 2  
RIO JAGUARIBE EM IGUATÚ

### 3) - CHUVAS SOBRE A REPRESA

Se tentarmos avaliar a importância do termo chuva sobre a represa (PR) o lado da alimentação pelos deflúvios (L) temos:  
Volume precipitado  $V_{PR} = P_R \times A$

A : Área da bacia hidráulica

Volume escoado  $V_L = P \times K_E \times S$

$K_E$  : coeficiente de rendimento da bacia hidrográfica

S : área de drenagem

P : chuva sobre a bacia hidrográfica

Admitindo um rendimento anual da ordem de 10%, e uma mesma altura de chuva nas bacias hidráulica e hidrográfica, teríamos:

$$\frac{V_L}{V_{PR}} = 0,1 \times \frac{\dot{S}}{A}$$

A quantidade  $S/A$ , característica própria a cada açude, foi estudada por R. PIOGER e varia de 10 (Açude CEDRO) a 830 (Aç. QUIXERAMOBIM), apresentando maioria dos casos valores da ordem de 50 a 100. (Fig. 3)

No caso específico do ORÓS  $S/A = 94$  na cota 200 e as precipitações sobre a lagoa representam apenas uma contribuição da ordem de 11% da vazão afluente.

Por isto passaremos a operar o modelo com uma só sequência anual de 12 meses de precipitação. Esta pode ser a média interanual, ou melhor a chuva mensal e anual de frequência 0,5.

No entanto, uma simulação feita sobre açudes com coeficiente  $S/A$  menor do que 50, para os quais as chuvas passariam a representar mais de 20% dos aflúvios, deverá ser feita e interpretada com reservas.

FUNCIONAMENTO DO MODELO A

### PASSO DE TEMPO MENSAL

#### - DETERMINAÇÃO DA CURVA COTA-VOLUME

A curva cota-volume característica da geometria da represa deve ser fornecida ao modelo, sob a forma de uma tabela.

As evaporações e as chuvas entram no balanço diretamente em lâminas, portanto, não há necessidade de fornecer ao programa também a relação cota-área.

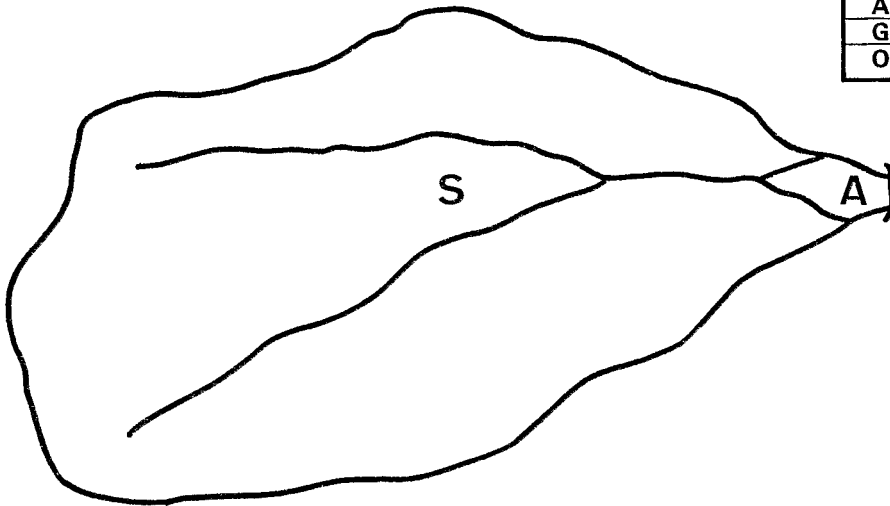
#### - BALANÇO MENSAL

No início de cada mês soma-se à cota da represa a altura  $(CHUVA - EVAPORAÇÃO)/2$ . Depois verifica-se se pode fornecer a metade da demanda mensal ou pelo menos, um percentual da demanda, sendo critério a chegada do nível a uma cota limite inferior HMIN fixada pelo usuário. No meio do mês são introduzidos os volumes afluentes e o programa percorre as mesmas iterações para a segunda quinzena.

FIGURA 3 – CONTRIBUIÇÃO DA CHUVA SOBRE A REPRESA

S – ÁREA DA BACIA HIDROGRÁFICA  
A – ÁREA DA BACIA HIDRÁULICA

AÇUDES	S/A
VÁRZEA DO BOI	120
RIACHO DO SANGUE	190
PENTECOSTE	50
AIRES DE SOUZA	70
GEN. DUTRA	200
ORÓS (COTA 200)	94



ALIMENTAÇÃO POR ESCOAMENTO (BACIA HIDROGRÁFICA)  $V_L = P \times K_E \times S$   
ALIMENTAÇÃO DIRETA (BACIA HIDRÁULICA)  $V_P = P \times A$

$$\frac{V_L}{V_P} = K_E \times \frac{S}{A}$$

Para cada mês é feita uma contagem das deficiências a nível quinzenal e o cálculo do grau de deficiência bem como do volume que passou pelo sangradouro quando isto ocorreu. (Fig. 4)

– DEFINIÇÃO DE UMA POLÍTICA DE OPERAÇÃO

A parte de um modelo de simulação que se refere às demandas, é a: mais objetiva e só é limitada pelo realismo e imaginação do planejador e às vezes pela capacidade e o desempenho do computador utilizado.

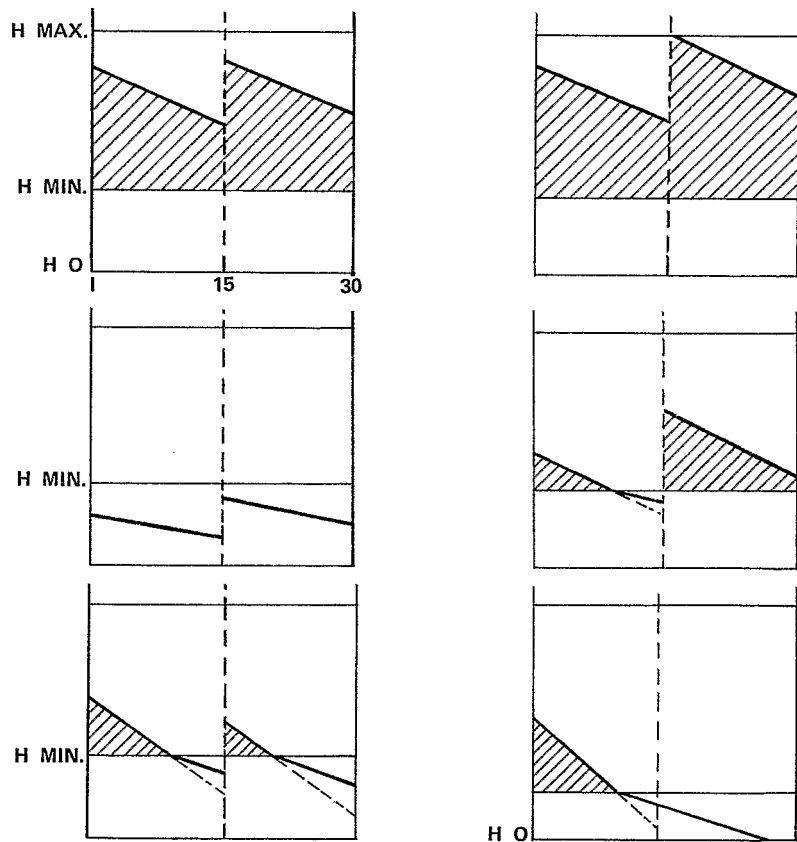
A opção mais simples seria de determinar uma demanda única a ser satisfeita sem restrição até a cota mínima da tomada de água. O resultado de uma tal simulação, considerando a demanda como único parâmetro variável, permite estimar o volume total de água disponível por diversas freqüências e é uma primeira etapa necessária para estimar o potencial do sistema de regularização.

Mas em geral o problema de aproveitamento dos recursos hídricos é mais complexo pois quase sempre são previstas utilizações múltiplas do manancial, o que conduz à possibilidade de conflitos entre usuários.

Isto leva a determinar os termos de uma política de operação da represa com estabelecimento de critérios de prioridades, e redução da satisfação até um nível mínimo tolerável. Devem ser definidas também as alternativas possíveis para o aproveitamento bem como as que estão fora da cogitação para limitar a pesquisa da otimização num domínio compatível com a realidade sócio-econômica.

Exemplos de políticas de aproveitamento:

FIGURA 4 – FUNCIONAMENTO DO MODELO DURANTE UM MÊS



- irrigação objetivando o máximo de produção a longo prazo.
- irrigação objetivando a maior estabilidade sócio-econômica.
- geração de energia prioritária sob os outros aproveitamentos.
- atividades de lazer prioritárias sob to-

dos os outros aproveitamentos.

A complexidade dos esquemas possíveis faz com que não exista modelo de simulação universal que se adapte a todos os pedidos. Por isto, é provável que a parte do programa que diz respeito às demandas poderá ser reescrita ou adaptada

para esta ou aquela situação específica.

No entanto, as regras de operação foram escolhidas de maneira a proporcionar ao modelo aqui apresentado a versatilidade mais ampla possível no âmbito do planejamento da utilização da água da represa. (Fig. 5).

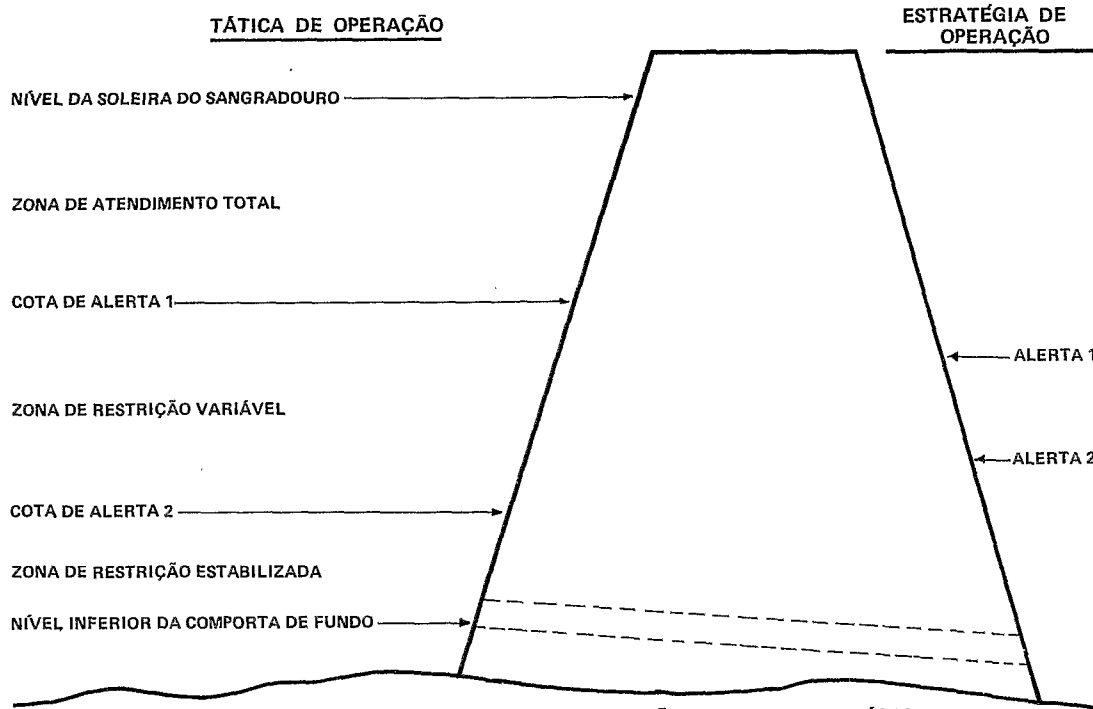


FIGURA 5 - EXEMPLO DA GESTÃO DE UM RESERVATÓRIO

#### A OPÇÕES DE DEMANDAS DO MODELO

Todos os elementos que vão ser descritos mais adiante constituem as variáveis da simulação.

##### - COTAS HMAX e HMIN

HMAX : cota de sangria do açude.

HMIN: cota abaixo da qual param todos os fornecimentos, podendo ser:

- cota do fundo do açude (aproveitamento da água por bombeamento).
- cota da tomada de água (aproveitamento por gravidade).
- qualquer cota a partir da qual o açude só pode baixar por efeito da evaporação (fins recreativos - piscicultura).

##### - FORNECIMENTO PRIORITÁRIO

- F1

Esta demanda é a primeira a ser aten-

dida, sem restrição, entre as duas cotas HMAX e HMIN. Depois o fornecimento pára completamente.

Este valor é fornecido ao programa a nível mensal.

##### - FORNECIMENTO SECUNDÁRIO - F2

A demanda é satisfeita, se for possível, após o fornecimento prioritário. Esta demanda pode ser relacionada com duas cotas H ALERTA 1 e H ALERTA 2 pelos critérios seguintes:

- cota do açude acima de ALERTA 1: demanda satisfeita.

- cota do açude baixando de ALERTA 1 à ALERTA 2: a demanda é reduzida proporcionalmente ao volume restante no açude até o valor percentual limite C.R., fixado pelo usuário.

cota do açude baixando de ALER-

TA 2 até HMIN: fornecimento limitado a C.R.% da demanda.

Tanto a demanda secundária como a prioritária são definidas a nível mensal.

##### - REDUÇÃO ANUAL DA SUPERFÍCIE IRRIGADA

Se o fornecimento secundário se destina a fins agrícolas o programa prevê a possibilidade de uma ação a nível anual, isto é, redução da superfície a ser irrigada.

Se no começo da estação cultural o nível da represa for abaixo de uma cota H CULT. 1 a área irrigada, isto é, o volume anual da demanda, será reduzido proporcionalmente ao volume restante no açude até uma cota H CULT. 2 a partir da qual a área irrigada permanecerá a CRC % do valor inicial.

A tabela 1 ilustra uma operação simulada do Açude ORÓS.

TEBELA 1 - OPERAÇÃO SIMULADA DO AÇUDE ORÓS

DEMANDA 1 DEMANDA 2	157,680HM <sup>3</sup> ou 5m <sup>3</sup> /S 360,000Hm <sup>3</sup> ou 18000HA				126,144HM <sup>3</sup> ou 4m <sup>3</sup> /S 360,000Hm <sup>3</sup> ou 18000HA				94,608HM <sup>3</sup> ou 3m <sup>3</sup> /S 360,000Hm <sup>3</sup> ou 18000HA				63,072HM <sup>3</sup> ou 2m <sup>3</sup> /S 360,000Hm <sup>3</sup> ou 18000HA			
	1100	2100	3100	4100	1200	2200	3200	4200	1300	2300	3300	4300	1400	2400	3400	4400
SIMULAÇÃO NO.	199,5	207	199,5	207	199,5	207	199,5	207	199,5	207	199,5	207	199,5	207	199,5	207
H MAX.	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
H MINI	187	187	190	190	187	187	190	190	187	187	190	190	187	187	190	190
H ALERTA 1	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187
H ALERTA 2	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187
FORNECIMENTO MÍNIMO	0	0	60%	60%	0	0	60%	60%	0	0	60%	60%	0	0	60%	60%
REDUÇÃO MÁXIMA DE ÁREA NA COTA	-	-	0,75	0,75	-	-	0,75	0,75	-	-	0,75	0,75	-	-	0,75	0,75
SATISFAÇÃO DEMANDA 1(%)	100	100	97,5	98,9	100	100	98,5	99,5	100	100	99,4	99,7	100	100	99,8	99,9
SATISFAÇÃO DEMANDA 2(%)	83,5	91,2	73,2	85,5	86,6	93,9	76,6	88,3	89,6	95,9	79,7	91,3	92,1	97,4	83,0	42,2
0,75 ≤ REDUÇÃO < 1 (%)	-	-	4,3	2,2	-	-	4,6	2,7	-	-	4,9	2,6	-	-	4,8	2,0
0,50 ≤ REDUÇÃO < 0,75 (%)	-	-	13,4	7,3	-	-	11,9	6,0	-	-	9,9	4,6	-	-	8,9	3,0
0,25 REDUÇÃO 0,50 (%)	-	-	6,3	3,9	-	-	5,3	2,6	-	-	4,9	1,8	-	-	3,1	0,6
0 REDUÇÃO 0,25 (%)	-	-	0,0	0,0	-	-	0,0	0,0	-	-	0,0	0,0	-	-	0,0	0,0
LIMITAÇÃO COMPLETA (%)	16,5	8,8	2,5	1,1	13,4	6,1	1,5	0,5	0,6	0,3	7,9	2,6	0,2	0,1	-	-
REDUÇÃO DE ÁREA IRRIGADA	-	-	0,96	0,98	-	-	0,97	0,98	0,97	0,99	-	-	-	-	0,98	1,00



# *engenharia*

ANO III

Nº 5

Fortaleza – 1977

