

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS  
DE MODELOS HIDROLÓGICOS

CARLOS EDUARDO M. TUCCI

MAIO 1975

PORTO ALEGRE — R.S



PROGRAMA  
DAS NAÇÕES UNIDAS PARA  
O DESENVOLVIMENTO  
— U N D P —



UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS  
HIDRÁULICAS



ORGANIZAÇÃO DAS  
NAÇÕES UNIDAS PARA  
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA  
E CULTURA  
— UNESCO —

## CENTRO DE HIDROLOGIA APLICADA

TELEG. "HIDROCENTRO"  
TELEFONE : 23-33-94

CAIXA POSTAL 530  
PORTO ALEGRE - BRASIL

SUA REF. :

NOSSA REF. :

### OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE MODELOS HIDROLÓGICOS

TRABALHO APRESENTADO COMO PARTE DOS REQUISITOS

PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

M E S T R E E M C I Ê N C I A S E M

H I D R O L O G I A A P L I C A D A

OPÇÃO: HIDROLOGIA

AUTOR: CARLOS EDUARDO MORELLI TUCCI

ORIENTADOR: PROFESSOR HÉCTOR RAÚL MUÑOZ ESPINOSA

EXAMINADORES: PROF. JOSÉ LLAMAS

PROF. ANTONIO EDUARDO LEÃO LANNA

PROF. HÉCTOR RAÚL MUÑOZ ESPINOSA

DATA DO EXAME: 06/06/75

Aprovação: \_\_\_\_\_

Presidente da Banca

ErrataPágina 12

Acrescentamos no pé da página:

Este fluxograma foi elaborado baseado no fluxograma apresentado na publicação:

Craurford Norman H. e Linsley Ray K. Digital Simulation in Hydrology: Stanford watershed Model IV, July 1966.

Página 20

Na figura 3.3b, a curva passa por um máximo e depois intercepta o eixo t, este ponto e na figura 3.3c o ponto de máximo devem corresponder na figura 3.3a à intersecção das duas curvas (dois hidrogramas).

Página 22

A equação 3.4 passa a ser

$$S = \sum_{n=1}^N a_{n-1} (I, 0) \frac{d^n O}{dt^n} + \sum_{m=1}^M a_{m-1} (I, 0) \frac{d^m I}{dt^m}$$

Página 26

A equação 3.13 passa a ser

$$S = TS.O \quad (3.13)$$

Página 27

A equação 3.16 fica

$$O_2 = O_1 + \frac{\Delta t}{TS^* + \frac{\Delta t}{2}} \left( \frac{I_1 + I_2}{2} - O_1 \right) \text{ onde } TS^* = (I-n)TS$$

Página 31

A primeira equação do conjunto de equações passa a ser

$$\Delta Q_j = Q_j - Q_{j-1}$$

Página 45

As equações dessa página passam a ser

$$F_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i(\text{calc}) - Q_i(\text{obs})|$$

$$F_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i(\text{calc}) - Q_i(\text{obs})|^3$$

$$F_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{1}{Q_i(\text{calc})} - \frac{1}{Q_i(\text{obs})} \right|^2$$

$$F_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i(\text{calc}) - Q_i(\text{obs})|^2$$

Página 48

No primeiro parágrafo acrescentamos uma frase:

4.2.4 - Problemas de Função

Ibbitt e O'Donnell indicaram que existem três problemas básicos que podem ...

Página 49

Onde está escrito

4.2.4.2 - Postos de Sela fica 4.2.4.2 - Pontos de Sela.

No terceiro parágrafo, segunda linha, a referência bibliográfica passa de 4 para 12.

À meus pais.

AGRADECIMENTOS

Manifestamos nosso agradecimento a todas as pessoas e instituições que colaboraram para que este trabalho fosse realizado.

## SUMÁRIO

Este trabalho apresenta as técnicas de otimização iterativas aplicada a modelos de simulação hidrológica. Para tanto utilizamos os modelos de propagação do tipo "descarga-descarga", descrevendo três desses modelos e utilizando num problema prático dois deles, otimizando seus parâmetros pelas técnicas apresentadas em detalhe. No trabalho é utilizado um programa de computador onde é descrita a sua estrutura e como deve ser usado.

## Índice

1 - <u>Introdução</u>	
1.1 - Generalidades .....	7
1.2 - Objetivos do trabalho .....	8
1.3 - Organização da apresentação dos assuntos .....	9
2 - <u>Simulação</u>	
2.1 - Definição .....	10
2.2 - Simulação de sistemas hidrológicos .....	12
2.2.1 - Introdução .....	12
2.2.2 - Componentes de um modelo pluvio-hidrométrico.	12
3 - <u>Modelos de propagação de descargas</u>	
3.1 - Definição .....	16
3.2 - Tratamento teórico .....	17
3.3 - Tratamento hidrológico .....	19
3.3.1 - Modelo Muskingum .....	22
3.3.2 - Modelo SSAAR .....	26
3.3.3 - Modelo Kulandswamy .....	30
4 - <u>Técnicas de otimização</u>	
4.1 - Conceitos básicos .....	32
4.2 - Função objetiva .....	40
4.2.1 - Introdução .....	40
4.2.2 - Condições de máximo e mínimo .....	41
4.2.3 - Escolha da função objetiva .....	44
4.2.4 - Problemas da função .....	48
4.2.4.1 - Ótimos locais .....	48
4.2.4.2 - Pontos de sela .....	49
4.2.4.3 - Vales .....	50
4.3 - Métodos iterativos de otimização .....	50

4.3.1 - Método univariacional .....	50
4.3.1.1 - Apresentação .....	50
4.3.1.2 - Direção de pesquisa .....	50
4.3.1.3 - Comprimento dos passos .....	51
4.3.1.4 - Inconvenientes do método .....	52
4.3.1.5 - Fluxograma do algoritmo .....	55
4.3.2 - Método da rotação das coordenadas .....	56
4.3.2.1 - Apresentação .....	56
4.3.2.2 - Comprimento dos passos .....	57
4.3.2.3 - Direção de pesquisa .....	58
4.3.2.4 - Fluxograma do algoritmo .....	61
4.4 - Minimização das tentativas .....	60
4.4.1 - Apresentação .....	60
4.4.2 - Minimização quadrática .....	62
4.4.3 - Métodos univariacional e rotação das coordenadas com minimização quadrática .....	66
4.4.3 - Algoritmos .....	70
5 - <u>Aplicação prática</u>	
5.1 - Dados .....	72
5.2 - Metodologia .....	73
5.2.1 - Introdução .....	73
5.2.2 - Contribuição em percurso .....	74
5.2.3 - Hidrogramas isolados .....	77
5.2.4 - Análise da influência dos parâmetros .....	80
5.2.5 - Período completo .....	83
5.2.6 - Análise de sensibilidade do modelo Kulands-wany .....	84
5.3 - Conclusão .....	85
6 - <u>Conclusões finais e recomendações</u> .....	88
7 - <u>Descrição do programa "otimiza"</u>	
7.1 - Introdução .....	108

7.2 - Subprogramas .....	108
7.3 - Descrição dos cartões de dados .....	109
7.4 - Variáveis utilizadas no programa .....	114
7.5 - Fluxograma do programa e subprograma .....	118
<u>Bibliografia</u> .....	123
Anexo .....	126

## 1 - Introdução

### 1.1 - Generalidades

A engenharia moderna não admite desperdício, seja no dimensionamento das obras civis, ou na disponibilidade humana e material usado, para chegar aos resultados de projeto. A tendência é procurar um resultado suficientemente ótimo, através de técnicas e meios de custos otimizados.

A avaliação de um sistema através de um modelo que simula o problema real, utilizando de técnicas versáteis como a simulação digital, é uma ferramenta que tem apresentado resultados satisfatórios. A simulação digital utiliza algoritmos matemáticos para representar o funcionamento de cada sub-sistema. Muitas vezes o ajuste desses algoritmos a uma determinada aplicação, acarreta em muitos testes e avaliações visuais, aumentando o custo e o tempo de trabalho.

Foram desenvolvidos métodos matemáticos para que a análise dos problemas, na engenharia, a medida que se tornavam complexos, pudessem ter soluções ótimas e não estimativas na base de um bom senso, que proporcionavam custos maiores. Técnicas como programação linear, programação dinâmica e otimização não-linear, são comumente usadas para achar a melhor solução ou o melhor resultado para as variáveis representativas de um sistema.

O hidrólogo antigamente dispunha como todos, somente da régua de cálculo e a caneta. Com essas ferramentas o seu trabalho era, muitas vezes estimativo, pois de nada adiantava obter séries enormes de dados, se sua capacidade de utilizá-los era restrita. Com as técnicas geradas pela

grande velocidade de cálculo do computador, como a simulação e as técnicas matemáticas de otimização, o hidrólogo tem auxiliares valiosos para ficar mais próximo da realidade física, facilitando a análise do problema, para uma conclusão mais econômica e segura.

## 1.2 - Objetivos do Trabalho

Normalmente na simulação hidrológica, quando se deseja ajustar um modelo a uma bacia particular, o problema está na procura dos valores dos parâmetros que melhor representem o comportamento físico da mesma. Tradicionalmente, o método de ajuste é a tentativa. As tentativas são feitas, tomando como referência uma função objetiva e o comportamento da curva calculada em relação a observada. Modifica-se um parâmetro e observa-se o comportamento da função e das curvas, até que depois de sucessivas tentativas chega-se a uma proximidade para as curvas e a um valor máximo ou mínimo para a função objetiva. Este trabalho é exaustivo e dispendioso.

Apresentamos neste trabalho as técnicas de otimização, utilizadas aqui para procurar automaticamente, através de um programa de computador, os valores dos parâmetros matematicamente ideais. Isso não quer dizer que o hidrólogo é dispensável, pois o resultado matemático pode não ser o resultado físico procurado. Essas técnicas são utilizadas para que o hidrólogo chegue mais rápido ao resultado que procura, por um custo menor.

Os objetivos desse trabalho, são os de descrever alguns desses métodos e utilizá-los num problema prático da hidrologia. No caso utilizamos a propagação de vazões, um estudo clássico na hidrologia, que tem aplicações práticas

importantes, tal como o estudo de cheias de um curso d'água, a análise de vazão disponível em diferentes seções de um rio para o planejamento desse recurso hídrico, aproveitamento hidroenergético, abastecimento d'água, irrigação, etc. Dentro de cada uma dessas finalidades, o comportamento dessas descargas é o fator básico para análise e planificação dessas obras. Como esses projetos são notadamente de grande envergadura, onde grandes somas de dinheiro são empregadas, os métodos e a otimização na obtenção de resultados que economize e dê a segurança desejada ao projeto, devem ser pesquisados e usados.

### 1.3 - Organização da apresentação dos assuntos

Inicialmente damos uma noção breve sobre simulação, aplicação da simulação na hidrologia. Entrando propriamente no trabalho, apresentamos no capítulo 3, os modelos de propagação de vazão e no capítulo seguinte as técnicas de otimização. Dentro desse último capítulo apresentamos uma análise sobre as funções objetivas.

No capítulo que segue, descrevemos a aplicação das técnicas anteriormente detalhadas, descrevendo a metodologia usada e no capítulo 6 concluímos o trabalho, indicando futuras pesquisas, para no último capítulo transcrevermos o uso dos programas para computador usados.

## 2 - Simulação

### 2.1 - Definição

Os métodos de simulação têm de representar o comportamento de um sistema(\*), através de processos que procuram retratar o que realmente ocorre no mesmo, sem atingi-lo, proporcionando com isso o estabelecimento de um mecanismo onde se pode estudar os resultados e fenômenos, dando condições ao projetista de resolver seus problemas com maior segurança e economia.

Pode-se simular um sistema através de dois tipos gerais de modelos de simulação: analógicos e matemáticos. Quando os modelos matemáticos utilizam o computador digital são ditos também modelos digitais. Seja qual for o tipo de modelo utilizado dificilmente pode-se chegar a realidade, pois diferentes simplificações são necessárias para sua elaboração.

Os modelos digitais, aos quais se reporta esse trabalho, são modelos expressos a partir de leis matemáticas, que representam aproximadamente os fenômenos inerentes do sistema modelado. Esse tipo de simulação possui a vantagem da versatilidade, pois pode-se facilmente modificar a lógica do modelo, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas, além da

---

(\*) - Um sistema pode ser definido como um conjunto de objetos ligados por uma forma de iteração ou interdependência (Webster's Collegiate Dictionary).

grande velocidade de processamento dos dados pelo computador. A desvantagem desses modelos é que os processos devem ser estabelecidos matematicamente, o que, muitas vezes é inconveniente, pois em determinadas áreas de estudo não se conseguiu ainda estabelecer funções matemáticas que representem os fenômenos físicos. Nesse caso o problema é resolvido, normalmente, por funções simplificadas.

Esses modelos de simulação digital podem ser classificados em determinísticos e estocásticos. Os modelos determinísticos são aqueles em que para uma determinada entrada, com igualdade de condições iniciais, obtemos sempre a mesma saída, enquanto que nos modelos estocásticos, para uma determinada entrada existe a probabilidade de se obter diferentes respostas, pois são fundamentados na teoria das probabilidades.

Nos modelos determinísticos, as expressões matemáticas utilizadas são constituídas de variáveis, que são usadas para representar a quantidade física, por exemplo, precipitação, vazão, etc., e de parâmetros, que são constantes usadas para caracterizar a interação das variáveis entre si. Por exemplo a capacidade de saturação de um solo, no estudo hidrológico de uma bacia hidrográfica. Estabelecido um modelo para um determinado sistema, os parâmetros devem ser ajustados quando se muda de uma aplicação para outra. Por exemplo, no caso de um modelo pluvio-hidrométrico, para cada bacia deve-se ajustar os parâmetros.

## 2.2 - Simulação de sistemas hidrológicos

### 2.2.1 - Introdução

Na hidrologia, a caracterização de um sistema hidrológico através de um modelo de simulação digital, é a técnica mais apurada que dispõe o hidrólogo para figurar e resolver seus problemas.

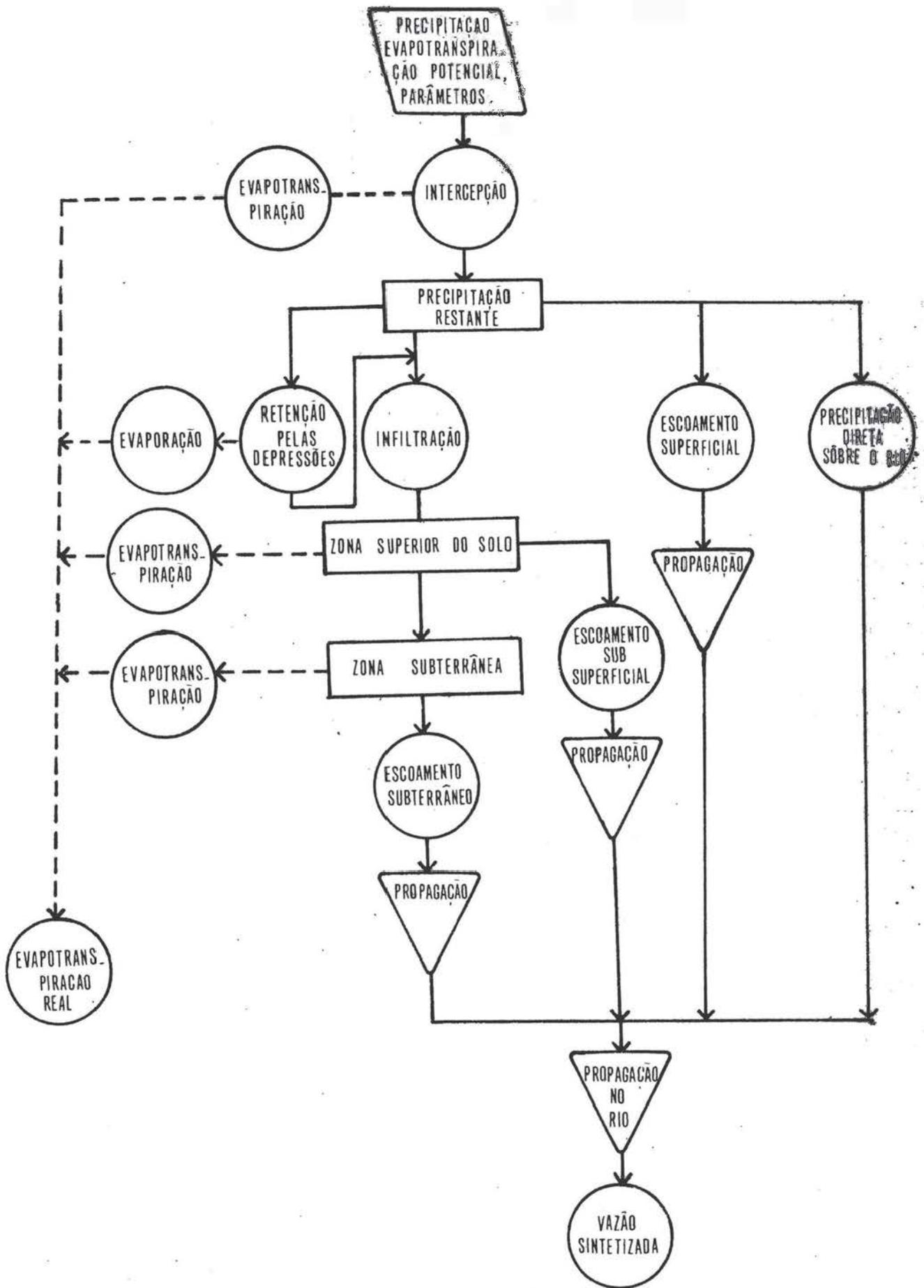
Um modelo pluvio-hidrométrico é um modelo estabelecido para transformar precipitação em descarga. Os fenômenos envolvidos no processo são conhecidos qualitativamente, mas o que interessa ao hidrólogo é obter valores quantitativos, ou estabelecer funções definidas dos fenômenos. Esse tipo de modelo procura, dar uma aproximação do comportamento dos processos, que envolvem a transferência da água através da superfície e camada do solo e sua mudança de estado. São modelos dinâmicos, onde os processos anteriores (no tempo  $t$ ), influem no comportamento dos resultados seguintes (no tempo  $t + 1$ ).

### 2.2.2 - Componentes de um modelo pluvio-hidrométrico

Um modelo pluvio-hidrométrico procura simular parte do ciclo hidrológico. Na figura 2.1 apresentamos um fluxograma da estrutura geral desse tipo de modelo.

A entrada do modelo deve ser a precipitação, evapotranspiração potencial e os parâmetros.

Parte da precipitação é retida pela cobertura vegetal, que devolve esta água pela evapotranspiração quando as condições climáticas permitem. A este fenômeno dá-se o no



FLUXOGRAMA DE UM MODELO PLUVIO-HIDROMETRICO

FIGURA 2.1

me de intercepção.

A água que não é interceptada pelos vegetais, chega ao solo e pode ser retida pelas depressões do mesmo, infiltrar ou escoar superficialmente.

Após ser retida pela depressão do solo, parte se infiltra e parte é evaporada.

A infiltração é uma das fases mais importantes do processo, e a mais difícil de ser avaliada. Os modelos variam no estabelecimento dos critérios quantitativos de separação da precipitação, que gera o escoamento superficial e da parcela que se infiltra, apesar de estarem baseados nos mesmos critérios qualitativos.

Quando ocorre uma chuva, ao chegar ao solo a água tende a se infiltrar de acordo com a umidade que o solo contém. Aceitando que o solo está inicialmente seco, a capacidade de infiltração no início da precipitação é grande, diminuindo a medida que a chuva se prolonga. Essa diminuição se assemelha a uma função exponencial, que é normalmente utilizada nos modelos.

A evapotranspiração ocorre a partir da cobertura vegetal, que interceptou parte da precipitação, ou pela transpiração desses vegetais. Ocorre evaporação da água retida nas depressões do solo, da água que se escoou na superfície livre do curso d'água. A evaporação retira também água do solo já que esse retém uma certa umidade.

Existem dois tipos de propagação: no solo e no rio. A propagação no solo pode ser superficial, sub-superficial ou subterrânea. A superficial corresponde a propaga-

ção da precipitação que não se infiltrou, até o curso d'água. A sub-superficial é a devido ao escoamento que se dá junto às raízes das plantas, enquanto que a subterrânea é a propagação da água do lençol freático até o rio.

A propagação da vazão do rio, ao qual se reporta este trabalho, corresponde ao cálculo das vazões de uma seção à jusante de um rio, a partir das vazões de uma seção à montante. Essa propagação dita "descarga-descarga" faz parte do modelo pluvio-hidrométrico, mas em certas aplicações este estudo pode ser feito isoladamente, como é o caso desse trabalho.

### 3 - Modelos de Propagação de Descarga

#### 3.1 - Definição

A propagação de descarga, é basicamente o cálculo dos hidrogramas de uma seção de um curso d'água, a partir dos hidrogramas de outra seção à montante, mais a contribuição existente entre essas seções dentro dos mesmos períodos de tempo.

Na figura 3.1 o hidrograma da seção 2 é obtido pela propagação das vazões da seção 1 e a contribuição no percurso entre as duas seções.

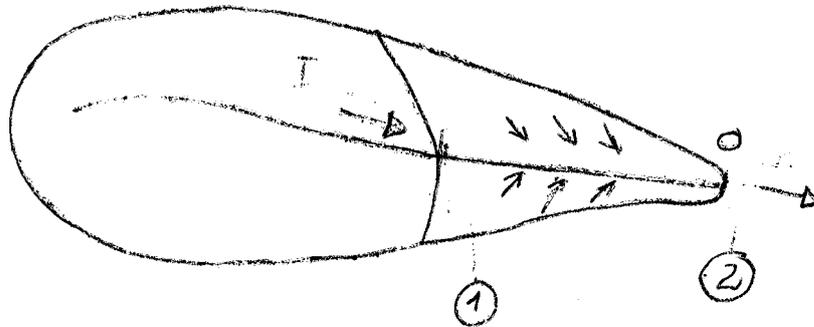


figura 3.1

Quando entre as duas seções existe uma contribuição em percurso que modifique substancialmente a forma do hidrograma de montante ou que o volume de contribuição é pre

ponderante, a área contribuinte deve ser analisada por um modelo pluvio-hidrométrico adicionando-se o hidrograma resultante ao hidrograma propagado de montante, respeitando os períodos de cada hidrograma.

Quando a referida contribuição não é importante a análise pode ser simplificada, estabelecendo-se uma estimativa para essa contribuição, função das precipitações ou mesmo da vazão de montante. Evidentemente, que esse último caso se aplica para seções próximas.

No caso da existência de afluente entre as duas seções, as vazões desse seriam adicionadas nas vazões da seção de montante e depois propagadas ou a vazão do afluente pode ser adicionada na seção de jusante, de acordo com a proximidade do ponto de contribuição desse afluente no rio principal, com relação as seções em estudo.

### 3.2 - Tratamento teórico

As equações apresentadas por Saint Venant para a gradual variação em escoamentos variáveis, no caso de simples propagação, são a equação de continuidade (3.1) e a equação dos efeitos dinâmico (3.2).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\alpha V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\beta}{g} \frac{\partial V}{\partial t} = S_o - S_f \quad (3.2)$$

$\frac{\partial Q}{\partial x}$  - variação da vazão função do percurso.

- $\frac{\partial A}{\partial t}$  - variação da área da seção em função do tempo.
- $\frac{\partial y}{\partial x}$  - variação do nível função do percurso.
- $\frac{\alpha V}{g} \frac{\partial V}{\partial x}$  - variação da velocidade, função do percurso, onde  $V$  é a velocidade,  $g$  a aceleração da gravidade,  $x$  o deslocamento e  $\alpha$  coeficiente de Coriolis.
- $\frac{\beta l}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  - variação da velocidade no tempo,  $\beta$  coeficiente de Boussinesq.
- $S_0$  - declividade do fundo do canal.
- $S_f$  - declividade da linha de energia.

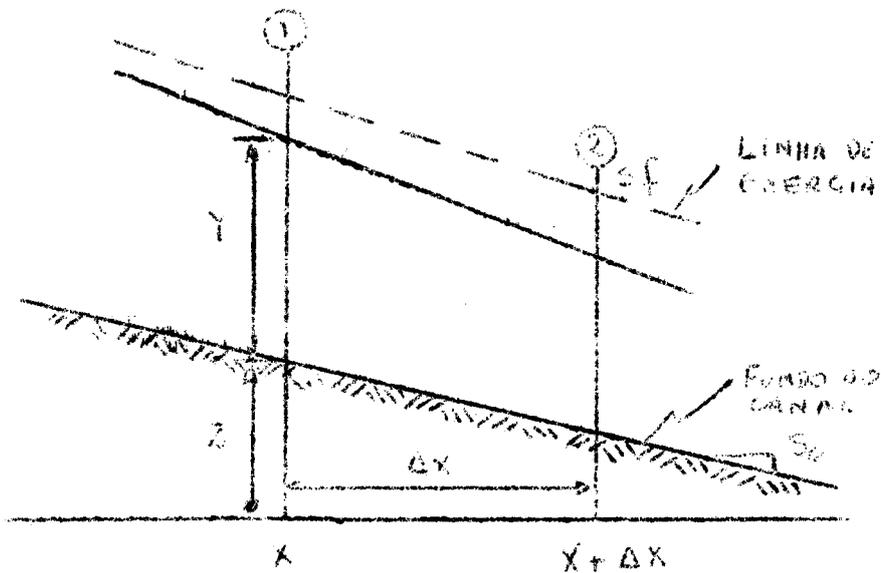


figura 3.2

### 3.3 - Tratamento Hidrológico

As equações 3.1 e 3.2 são de difícil aplicação prática, portanto para solução do problema existem vários métodos que utilizam dessas equações, mas com simplificações que dentro de um grau de aproximação, podem-se obter resultados satisfatórios, para alguns problemas da hidrologia.

Os métodos utilizados normalmente na hidrologia se baseiam na equação da continuidade, caracterizando a variação do volume de armazenamento no trecho considerado, através de uma relação entre o armazenamento e a descarga de saída. Portanto deixam de considerar os efeitos dinâmicos expressados através dos termos de inércia, da equação 3.2.

A equação da variação do volume de armazenamento é:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (3.3)$$

obtida da equação 3.1, onde  $dS/dt$  é a variação do volume de armazenamento  $S$  dentro de um período de tempo.  $I(t)$  são as vazões de entrada, ou seja, as vazões do posto de montante, enquanto que  $O(t)$  são as vazões de saída, as do posto de jusante.

Com relação ao armazenamento, na figura 3.3a, estão os hidrogramas de entrada  $I(t)$  e de saída  $O(t)$  de um trecho de um curso d'água, retirada a contribuição em percurso.

Observamos na referida figura que existe uma atenuação da onda de cheia devido ao armazenamento no leito. A medida que a onda se desloca no rio, esta preenche o leito

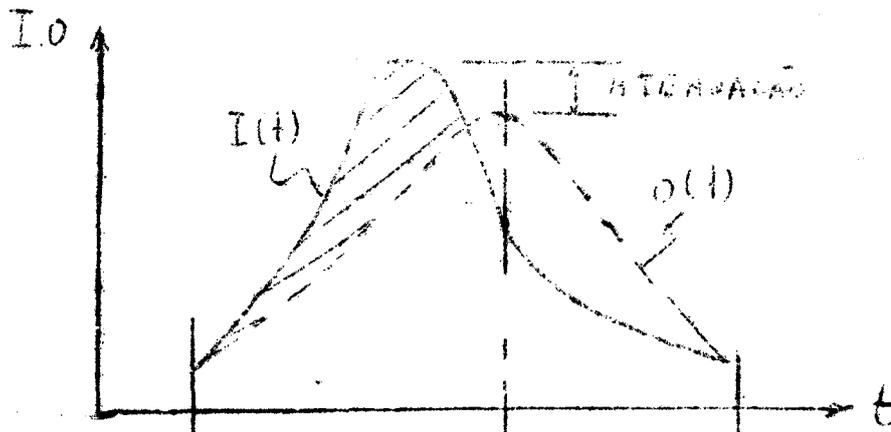


Figura 3.3a

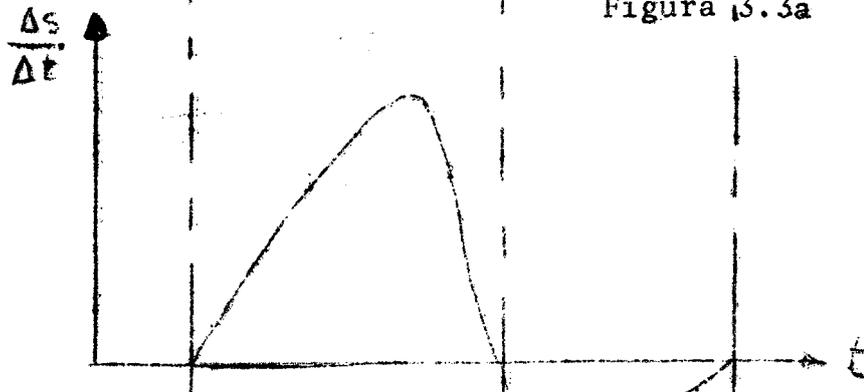


Figura 3.3b

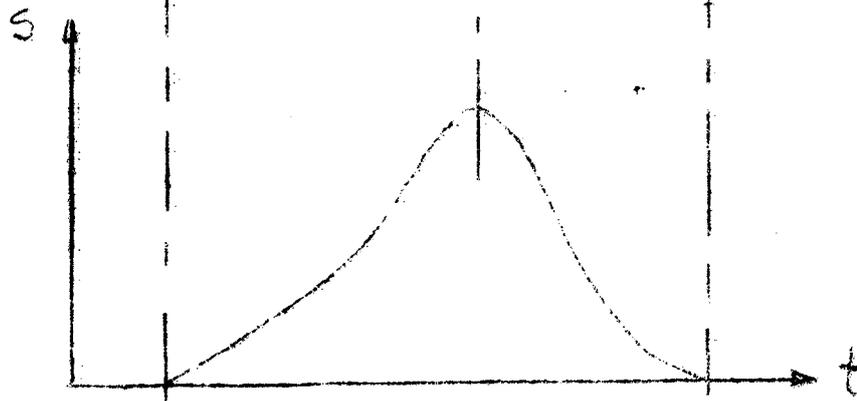


Figura 3.3c

do mesmo, amortecendo o seu pico. Evidentemente que em certos casos essa atenuação pode ser mascarada por uma contribuição em percurso preponderante.

A diferença de volume entre o que entra e o que sai representa um armazenamento naquele período, que somado ao anterior identifica o volume total armazenado no período. O volume definido pela parte hachurada na figura indica o armazenamento acumulado pela passagem da onda de cheia, que deve ser igual, se não houver contribuição ou subtração de vazão, ao volume representado pela parte não hachurada entre os dois hidrogramas da referida figura.

A figura 3.3b mostra a variação, em cada  $\Delta t$ , do armazenamento, enquanto que a figura 3.3c identifica a variação do armazenamento acumulado no trecho em estudo.

Pode-se observar nas figuras 3.3 que no ponto em que a vazão de entrada é igual a vazão de saída, o volume de armazenamento é máximo.

Correlacionando a vazão de saída com o armazenamento acumulado, obtém-se uma ligação como mostra a figura 3.4. Identifica-se que o armazenamento acumulado é maior pa-

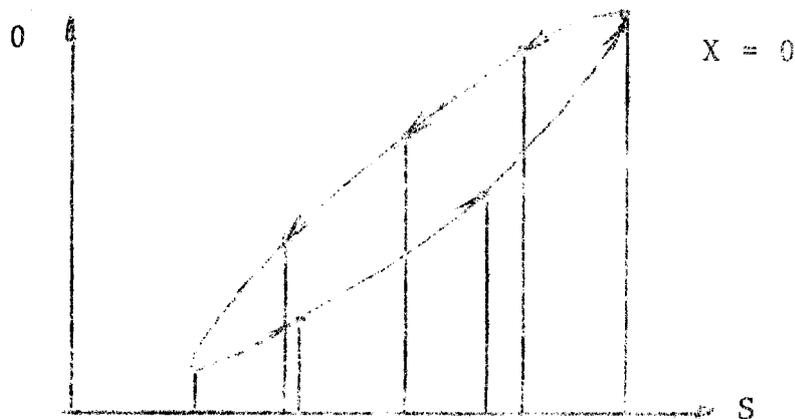


Figura 3.4

ra os níveis crescentes do que para os níveis que correspondem ao esvaziamento do armazenamento acumulado. Isto decorre devido a cunha de armazenamento formada pela inclinação da linha d'água durante a variação das vazões.

Ven Te Chow e Kulandaiswamy (5) apresentaram uma equação geral para armazenamento como sendo

$$S = \sum_{n=1}^N a_n (I, O) \frac{d^n O}{dt^n} + \sum_{m=1}^M b_m (I, O) \frac{d^m I}{dt^m} \quad (3.4)$$

onde  $a_n$  e  $b_m$  são coeficientes que dependem das vazões de entrada  $I$  e de saída  $O$ , onde  $n = 0, 1, 2, \dots, N$  e  $m = 0, 1, 2, \dots, M$  são as ordens das derivadas ou seja  $M$  e  $N$ . Representam de que ordem são as influências das vazões passadas, tanto de saída como de entrada no valor do armazenamento.

Pode-se demonstrar que as diversas equações de armazenamento usadas nos tratamentos hidrológicos do problema da propagação "descarga-descarga", são casos particulares da equação 3.3.

Todos os ditos métodos hidrológicos, baseiam-se na equação da continuidade e numa equação de armazenamento. As diferentes equações de armazenamento é que dão origem aos diferentes modelos de propagação.

### 3.3.1 - Modelo de Muskingum

Considerando como equação de armazenamento

$$S = \frac{b}{a} (x I^{m/n} + (1-x) O^{m/n}) \quad (3.5)$$

onde  $S$  é o armazenamento,  $a$  e  $n$  são constantes que caracterizam a relação nível-descarga das seções através da equação  $Q = ay^n$ , sendo  $Q$  a vazão e  $y$  o nível.  $b$  e  $m$  são constantes que caracterizam a relação nível-armazenamento do trecho em consideração através da equação  $S = by^m$ .

O modelo Muskingum foi desenvolvido por McCarthy que simplificou a equação 3.5 estabelecendo  $K = b/a$  e  $m/n = 1$ , resultando

$$S = K(XI + (1 - X)O) \quad (3.6)$$

A constante  $X$  representa o grau de influência das vazões de entrada. Na figura 3.4  $X = 0$ , para valores maiores que 0, a laçada tende a se fechar. O valor ideal de  $X$  será aquele que melhor aproximar a laçada de uma curva bi-unívoca. Obtido o melhor  $x$  deve-se interpolar uma curva nesta laçada.

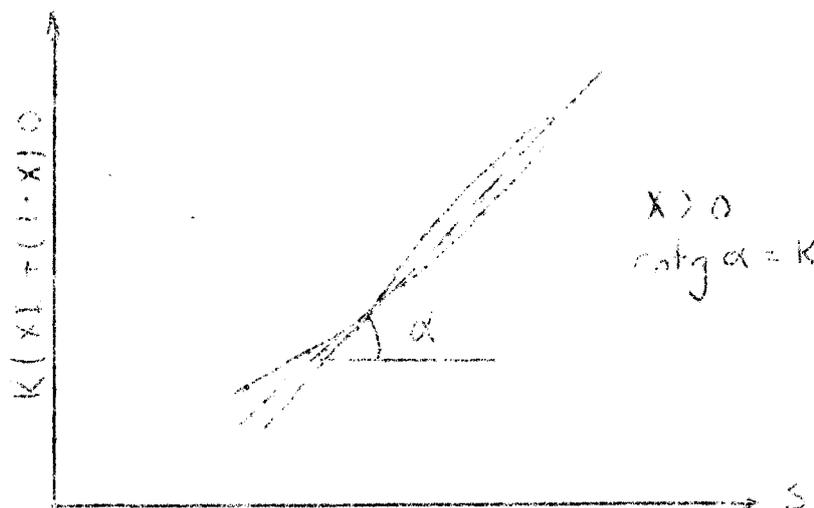


Figura 3.5

No caso de reservatório,  $x = 0$ , pois o mesmo caracteriza um plano d'água, e em consequência a função ....  
 $0 = f(S)$  será uma função bi-unívoca.

A variação de  $x$  está entre 0 e 0,5, mas nos cursos d'água, normalmente  $x$  varia entre 0 e 0,3.

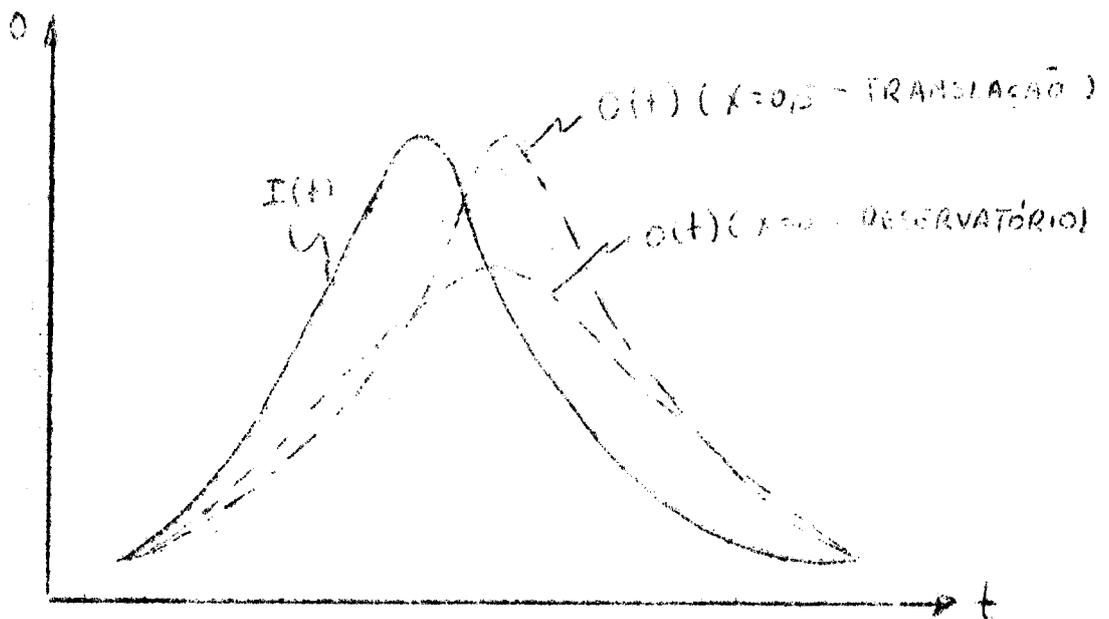


figura 3.6

Na figura 3.6 pode-se observar que para  $K$  fixo, aumentando-se  $x$  diminui o amortecimento do pico.

O parâmetro  $K$  representa a relação entre o tempo de deslocamento da onda no trecho em estudo e o intervalo de tempo unitário  $\Delta t$ .

$$K = \frac{S}{XI + (1-X)0} \quad (3.7)$$

$$K = \frac{0,5\Delta t \{(I_2 + I_1) - (O_2 + O_1)\}}{X(I_2 - I_1) + (1-X)(O_2 - O_1)} \quad (3.8)$$

onde o índice 1 indica a vazão no início do período, 2 indica a vazão do fim do período e  $\Delta t$  representa o intervalo de tempo.

Na figura 3.5  $K$  é definido pela inclinação da função biunívoca estabelecida num determinado ponto. Na prática esta função biunívoca pode ser uma reta ou trechos de retas, cada qual representando um valor diferente de  $K$ .

Quando  $K = \Delta t$  e  $X = 0,5$  o hidrograma de entrada é transladado para a seção de jusante.

Normalmente a variação do intervalo de tempo  $\Delta t$  deve estar no intervalo

$$2Kx < t < K$$

Para se obter a vazão de saída em cada intervalo utiliza-se da equação

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{(I_1 + I_2)}{2} - \frac{(O_1 + O_2)}{2} \quad (3.9)$$

e da equação 3.6, obtendo-se

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (3.10)$$

onde

$$C_0 = \frac{KX - 0,5 \Delta t}{K - KX + 0,5 \Delta t}$$

$$C_1 = \frac{KX + 0,5 \Delta t}{K - KX + 0,5 \Delta t} \quad (3.11)$$

$$C_2 = \frac{K - KX - 0,5 \Delta t}{K - KX + 0,5 \Delta t}$$

e

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad (3.12)$$

### 3.3.2 - Modelo SSARR\*\*

Este modelo foi desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos e é a abreviatura de "Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation".

O modelo completo trata do comportamento pluvio-hidrométrico de uma bacia, aqui apresentaremos a parte do modelo que trata da propagação de descargas em canais.

O método considera o trecho em estudo sub-dividido em N trechos suficientemente pequenos, para que a função de armazenamento seguinte seja válida

$$S = TS - O \quad (3.13)$$

onde S representa o armazenamento em cada um dos N reservat<sup>o</sup>rios e TS é o tempo necessário para que o reservat<sup>o</sup>rio se esvazie para uma descarga constante Q.

---

\*\* Este modelo é descrito, porque é uma das opções do programa detalhado no capítulo 7.

Portanto TS é função da vazão

$$TS = f(Q) \quad (3.14)$$

Admite-se que a função da equação acima é do tipo

$$TS = \frac{KTS}{Q^n} \quad (3.15)$$

onde n e KTS são constantes que devem ser ajustadas para cada trecho em estudo.

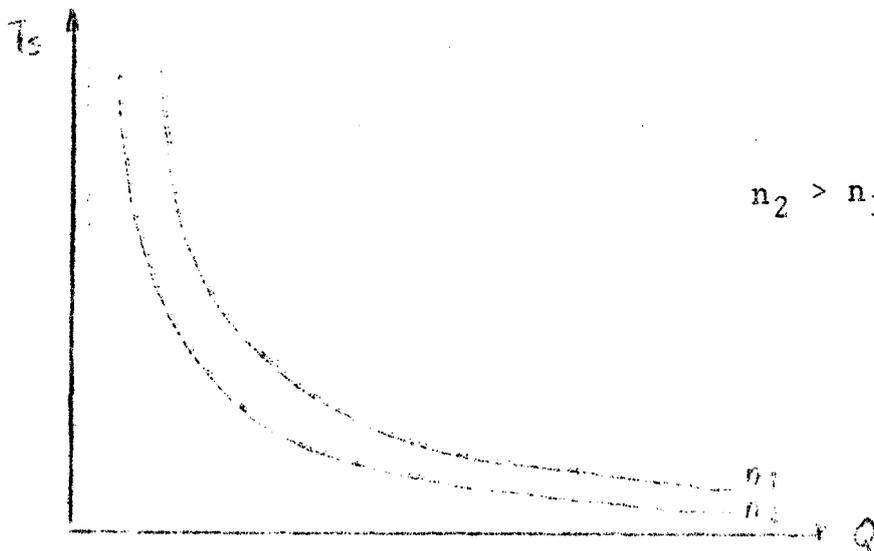


figura 3.7

Combinando as equações 3.15, 3.9 e a derivada em relação ao tempo da equação 3.13, obtém-se a equação

$$O_2 = O_1 + \frac{\Delta t}{TS + \frac{\Delta t}{2}} \left( \frac{I_1 + I_2}{2} - O_1 \right) \quad (3.16)$$

ALGORITMO

O cálculo é iniciado com valores arbitrados para as vazões dos  $N$  reservatórios ou sub-trechos do período de partida  $t_1$ ,  $O_{1,i}$ \* para  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Para o cálculo dos valores do tempo  $t_2$ ; e  $O_{2,i}$ , utiliza-se a equação 3.16, iniciando com os tres primeiros valores conhecidos  $O_{1,0}$ ,  $O_{1,1}$  e  $O_{2,0}$  que correspondem na referida equação a  $I_1$ ,  $O_1$  e  $I_2$ , respectivamente. Calcula-se  $O_{2,1}$  ( $O_2$ ), passando após para o cálculo do reservatório 2, calculando-se  $Q_{2,2}$  e assim sucessivamente até  $O_{2,N}$ .

$\begin{matrix} \rightarrow L \\ \downarrow t \end{matrix}$	0	1	2	...	N
$t_1$	$Q_{1,0}$ $I_1$	$Q_{1,1}$ $Q_1$	$O_{1,2}$	...	$O_{1,n}$
$t_2$	$Q_{2,0}$ $I_2$	$Q_{2,1}$ $O_2$	$O_{2,2}$	...	$O_{2,N}$
...	...	...	...	...	...
$t_m$	$O_{M,0}$	$O_{M,1}$	$O_{M,2}$	...	$O_{M,N}$

figura 3.9

---

\* O índice 1 indica o período e i o reservatório.

Propagadas as vazões do tempo  $t_2$ , repete-se para o tempo  $t_3$ , até o último período M.

Na figura 3.9 apresentamos uma tabela caracterizando o processo.

### VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS

Fixando os parâmetros KTS e o número de reservatórios e variando  $n$ , na figura 3.10 pode-se observar que diminuindo  $n$  o pico é amortecido.

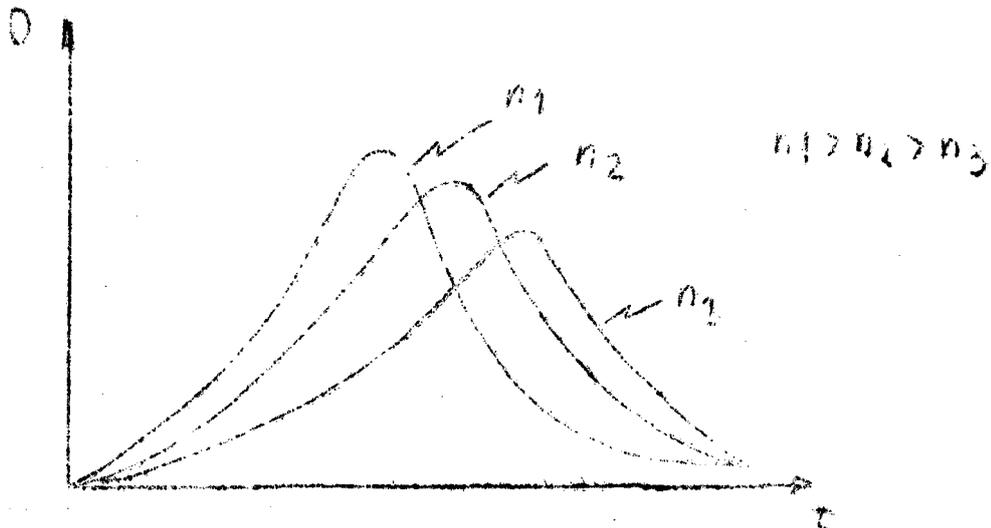


figura 3.10

Avariação de  $n$  é

$$0 \leq n \leq 0.5$$

Aumentando KTS e fixando  $n$  e o número de reservatórios, o hidrograma é amortecido, o mesmo ocorre quando fixos KTS e  $n$  aumenta-se o número de reservatórios.

### 3.6 - Modelo de Kulandswamy

Este modelo foi introduzido por Kulandswamy e outros em 1967 (16).

Partiu da equação 3.4 simplificando para

$$S = \sum_{m=1}^M a_{m-1} \frac{d^{m-1}O}{dt^{m-1}} + \sum_{n=1}^N b_{n-1} \frac{d^{n-1}I}{dt^{n-1}} \quad (3.17)$$

a simplificação estabelecida é que os coeficientes  $a_{m-1}$  e  $b_{n-1}$ , são independentes da vazão de entrada e de saída.

A equação 3.17 derivada em relação ao tempo e combinada com a equação 3.9, resulta numa equação geral em que a vazão de saída para o fim do período depende dos coeficientes referidos das vazões de entrada e saída dos períodos anteriores. A influência é definida pela ordem das derivadas M e N.

O autor utiliza  $M = 2$  e  $N = 1$ , obtendo resultados satisfatórios. Sendo assim a equação de armazenamento fica

$$S = a_0 O + a_1 \frac{dO}{dt} + b_0 I \quad 3.18$$

Derivando a equação 3.18 em relação a t fica

$$\frac{dS}{dt} = a_0 \frac{dO}{dt} + a_1 \frac{d^2O}{dt^2} + b_0 \frac{dI}{dt} \quad (3.19)$$

Utilizando de diferenças finitas

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = a_0 \frac{\Delta O}{\Delta t} + a_1 \frac{\Delta^2 O}{\Delta t^2} + b_0 \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3.20)$$

Combinando com a equação 3.9 e utilizando de

$$\Delta Q_j = Q_j - Q_{j-1}$$

$$\Delta^2 Q_j = Q_j - 2Q_{j-1} + Q_{j-2} \quad (3.21)$$

$$\Delta I_j = I_j - I_{j-1}$$

obtem-se

$$Q_j = A Q_{j-1} + B Q_{j-2} + C I_j + D I_{j-1} \quad (3.22)$$

onde

$$A = \frac{2a_1 + a_0 \Delta t - \frac{1}{2} \Delta t^2}{a_1 + a_0 \Delta t + \frac{1}{2} \Delta t^2} \quad (3.23)$$

$$B = \frac{-a_1}{a_1 + a_0 \Delta t + \frac{1}{2} \Delta t^2} \quad (3.24)$$

$$C = \frac{-b_0 \Delta t + \frac{1}{2} \Delta t^2}{a_1 + a_0 \Delta t + \frac{1}{2} \Delta t^2} \quad (3.25)$$

$$D = \frac{b_0 \Delta t + \frac{1}{2} \Delta t^2}{a_1 + a_0 \Delta t + \frac{1}{2} \Delta t^2} \quad (3.26)$$

#### 4 - Técnicas de Otimização

##### 4.1 - Conceitos Básicos

Entende-se por otimização como sendo a busca do valor de uma variável ou de  $n$  variáveis, que proporcionem o melhor resultado para uma função dependente dessas variáveis, dentro de um objetivo, como por exemplo maximizar a vazão de um canal, sendo esse dependente das dimensões da seção transversal trapezoidal, estando fixada a área.

$$q = f(B, H, \alpha) \quad (4.1)$$

A vazão  $q$  é função da base  $B$ , da altura  $H$  e do ângulo  $\alpha$

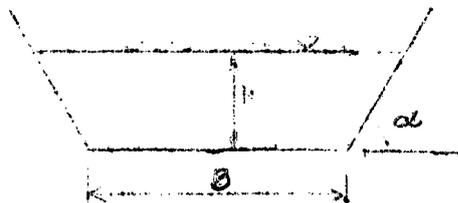


figura 4.1

A equação 4.1 é a função objetiva para o exemplo. A função objetiva é portanto a função a ser otimizada, através da procura dos valores ideais para as variáveis  $B$ ,  $H$  e  $\alpha$ , que produzam a maior vazão para uma área fixa  $A$ .

Nos diferentes problemas de engenharia, a parte fundamental da otimização é o estabelecimento da função objetiva. Esse assunto será discutido num próximo item.

Um método ou técnica de otimização é um con-

junto de regras que permitem sistematizar a sequência de operações necessárias, para se obter um objetivo procurado.

De acordo com o tipo de função, linear ou não linear, existem diferentes métodos para avaliá-la. Para a otimização de funções lineares existe a programação linear, que não será aqui tratada.

No caso das funções não lineares existem dois tipos básicos de métodos: técnicas clássicas e técnicas iterativas. Um exemplo de função não linear é o exemplo do canal, onde a equação 4.1, após o uso da fórmula de Manning para a velocidade fica:

$$q = \frac{I^{1/2} A^{5/3}}{N P^{2/3}} \quad (4.2)$$

sendo  $N$  o coeficiente de Manning,  $I$  a declividade,  $A$  a área, parcelas fixas da fórmula, e  $P$  o perímetro molhado da seção, variável segundo:

$$P = B + \frac{2 \cdot H}{\text{sen } \alpha} \quad (4.3)$$

As técnicas clássicas normais são: cálculo diferencial, multiplicadores de Lagrange (máximos e mínimos condicionados), Teoria de Kuhn-Tucker e programação geométrica. Essas técnicas não serão tratadas neste trabalho. A ênfase dessa pesquisa está nas técnicas iterativas, pois a aplicação desses métodos nos problemas de simulação hidrológica é facilitado porque alguns dos métodos não necessitam de que a função seja explícita em relação às suas variáveis independentes, o que normalmente ocorre nestas simulações.

Os métodos iterativos procuram o valor ótimo das variáveis através de tentativas, determinadas por critérios que cada método estabelece, procurando convergir o mais rapidamente possível para a solução ideal, que pode estar dentro de uma precisão pré-estabelecida.

Esses métodos se desenvolveram mais com o advento do computador digital, já que o volume de cálculos que eles necessitam é, em geral muito grande.

Os métodos iterativos basicamente tem dois itens: determinação da direção de pesquisa e o comprimento dos passos em cada direção.

A direção de pesquisa se refere ao caminho em que as variáveis serão modificadas, enquanto que o comprimento dos passos é a proporção na qual as variáveis serão modificadas na direção estabelecida.

Além desses dois itens básicos, os métodos estabelecem os critérios para mudança de direção e para interromper o processo, adotando o valor ótimo.

Nos métodos iterativos a otimização do número de tentativas, para se chegar ao ótimo é muito importante, pois aumenta o tempo de computação e o custo do trabalho, portanto normalmente são utilizadas técnicas para minimizar o número de tentativas.

Apresentamos a seguir um resumo de alguns dos mais difundidos métodos iterativos de otimização não linear.

### Método univariacional (Univariate method)

O método procura o valor ideal da função através de tentativas sucessivas, modificando uma variável e mantendo as demais constantes até que a função não diminua (aumente no caso de maximização) mais.

Depois que todas as variáveis forem otimizadas nas suas respectivas direções, completa-se um "ciclo". Um novo "ciclo" é iniciado com os últimos valores otimizados das variáveis, até que, entre um ciclo e outro, essas variáveis não sofram substanciais modificações.

### Método da rotação de coordenadas

O primeiro ciclo deste método é igual ao anterior, para cada ciclo seguinte o método estabelece um novo eixo, definido pela reta que liga o primeiro e o último ponto do ciclo anterior, e as modificações das variáveis são feitas nas direções normais entre si, tomando como referência de partida o novo eixo.

O mesmo critério do item anterior, para aceitar o ponto ótimo pode ser usado neste método.

### Método univariacional e rotação das coordenadas com minimização quadrática

A modificação desses métodos em relação aos apresentados está no comprimento dos passos e na localização do ótimo em cada direção pré-estabelecida. O comprimento dos passos pode ser definido por espaçamentos constantes ou por espaçamentos que aumentam numa determinada proporção enquan-

to a função estiver melhorando. Quando ocorrer um aumento (diminuição no caso de maximização) da função após sucessivas tentativas, este critério procura o ponto ótimo ajustando aos tres últimos pontos, uma função quadrática e calcula o ponto ideal. É evidente que trata-se de uma aproximação que será tão melhor quanto mais próxima estiver a função verdadeira de uma função quadrática.

### Método Simplex\*

Para uma função de N variáveis, o método trabalha com N + 1 vértices (pontos). O método procura o mínimo através do movimento dos vértices através de três operações: reflexão, contração e expansão.

Considerando  $P_{max}$  o ponto em que a função é maior dentre o N + 1 pontos, e  $P_{med}$  o ponto médio, não utilizando  $P_{max}$  para esse cálculo.

O método utiliza de três operações básicas: reflexão, contração e expansão. A reflexão é calculada pela fórmula

$$P_r = (1 + \alpha) P_{med} - \alpha P_{max}$$

sendo  $\alpha$  o coeficiente de reflexão, e  $P_r$  a reflexão de  $P_{max}$  segundo a linha que liga esse a  $P_{med}$ . A expansão é calculada por

$$P_e = (1 - \gamma) P_{med} + \gamma P_r$$

sendo  $\gamma$  coeficiente de expansão e  $P_e$  o ponto expandido. A

---

\* Não deve ser confundido com o método simplex da programação linear.

contração é calculada por

$$P_c = \beta P_{\max} + (1 - \beta) P_{\text{med}}$$

onde  $\beta$  é o coeficiente de contração e  $P_c$  o ponto de contração.

Utilizando dessas três expressões dentro de uma determinada sequência, o método aceita o ponto ótimo quando não houver mais diminuição dentro de uma série de tentativas.

Na figura 4.2 apresentamos uma representação no caso bidimensional.

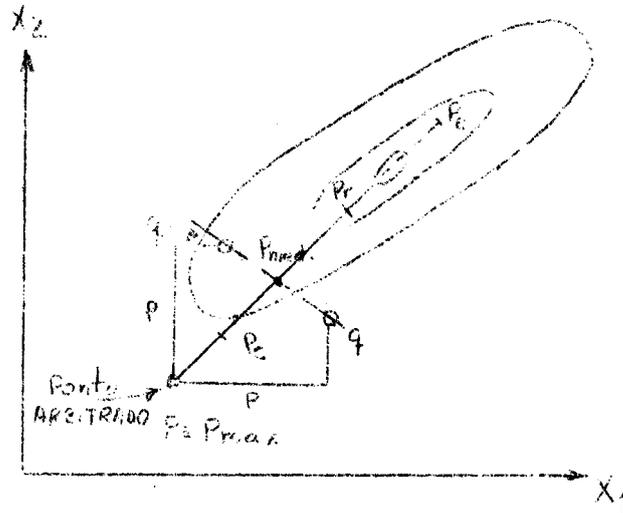


figura 4.2

Método das direções mutuamente conjugadas

Este método admite que a função objetiva é uma função quadrática. Considerando uma função  $F$  bi-dimensional e admitindo que seus contornos no plano formado pelas variáveis independentes  $x_1$  e  $x_2$  sejam elipses concêntricas (figura 4.3). Avaliando a função objetiva numa série de pontos ao longo de uma linha arbitrária tal como  $L_1$ , pode-se encontrar um ponto ótimo. Este será o ponto de tangência com uma das elipses, na figura 4.3,  $T_1$ . Repetindo o raciocínio para  $L_2$  encontramos  $T_2$ . A reta que une  $T_1$  e  $T_2$  deve passar pelo centro da família de elipses, isto é, pelo ponto em que a função é mínima (minimização). Esta é uma propriedade válida para as elipses e para qualquer família das curvas quadráticas. Este método então aproveita desta propriedade.

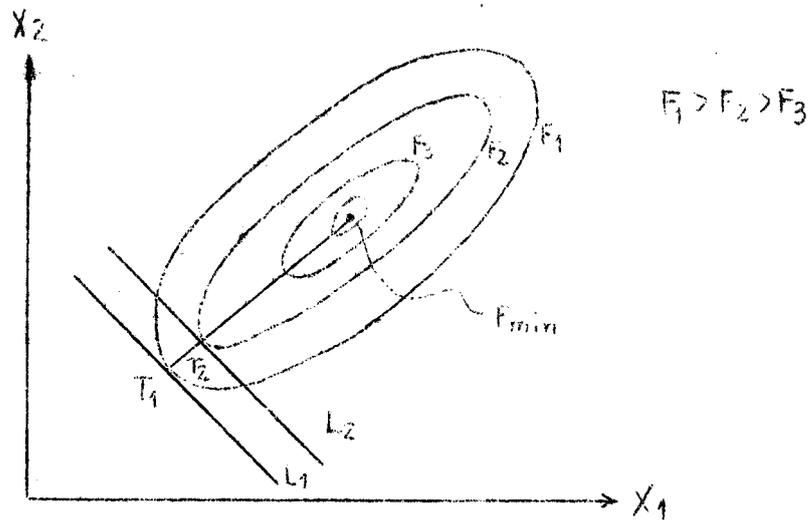


figura 4.3

### Método de Hooke e Jeeves

Este método procura eliminar algumas desvantagens do método univariacional. O método trabalha estabelecendo pontos bases e deslocando de um valor constante, nas direções paralelas aos eixos definidos pelas variáveis independentes, no sentido positivo e negativo em relação a este ponto base. É feito somente um deslocamento em cada sentido. O ponto que produz a menor função (minimização) é escolhido. Repete-se o processo para as n direções (variáveis) e após procura-se um novo ponto através de um deslocamento na direção que liga o primeiro e o último ponto do "ciclo", repetindo-se o processo anterior. Os deslocamentos em relação a um ponto base é feito sempre nas direções paralelas aos eixos coordenados.

O método procura assim minimizar as tentativas.

Em nosso trabalho são descritos os métodos univariacional e Rotação das Coordenadas na sua elaboração original e no ítem minimização das tentativas esses métodos são apresentados utilizando da minimização quadrática. Escolhemos estes por estarem entre os mais citados e de terem apresentado bons resultados na simulação hidrológica.

Tanto os métodos aqui citados como outros não mencionados poderão ser consultados nos textos Optimization Methods for Engineering design (Fox) e Optimization Theory and Practice (Beveridge & Schechter), já que a aplicação e descrição de todos os métodos seria um trabalho muito extenso para a finalidade proposta.

Nesse trabalho, não é tratado o caso em que as variáveis possuem limites.

## 4.2 - Características das Funções

### 4.2.1 - Introdução

Consideremos uma função

$$F(x_i) \text{ para } i = 1, 2, \dots, n$$

de n variáveis independentes. Em termos gráficos somente é possível representar uma função de duas variáveis  $F(x_1, x_2)$ , portanto durante a descrição deste trabalho iremos ilustrar o texto com uma função de duas variáveis.

Na figura 4.4 apresentamos uma superfície de uma função objetiva no espaço e sua projeção sobre o plano formado pelos dois eixos, representando as duas variáveis independentes.

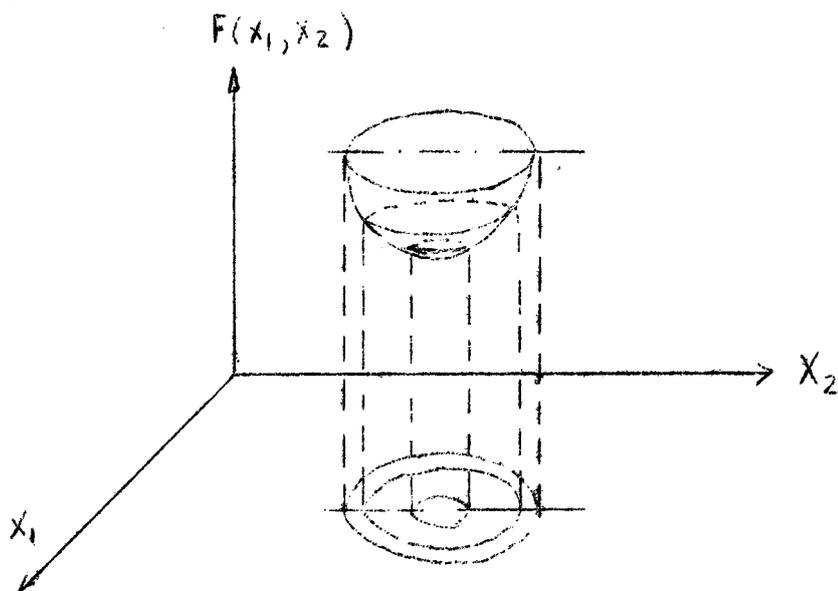


figura 4.4

Para cada par de valores  $x_1, x_2$  a função é avaliada, obtendo-se um ponto. Portanto trabalhando somente no plano formado pelas variáveis independentes, traçam-se as curvas sobre a qual o valor da função é o mesmo, representando as superfícies do contorno da função. (Como por exemplo uma planta topográfica).

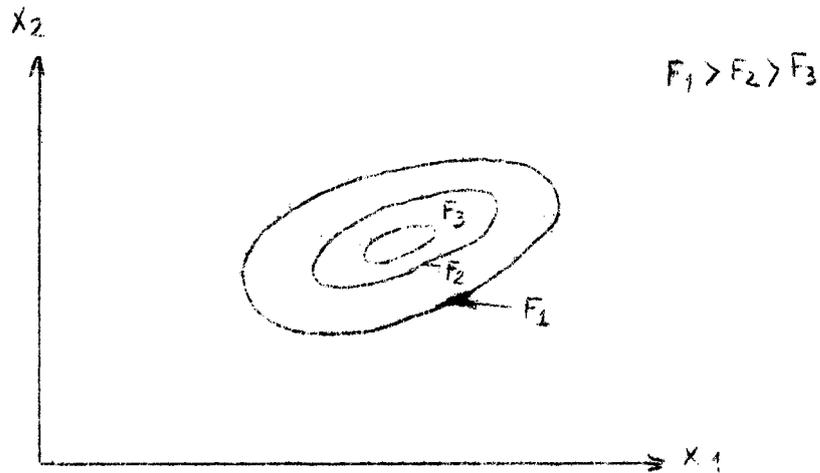


figura 4.5

A diminuição dos contornos representa a proximidade de um mínimo ou de um máximo. No exemplo da figura 4.4 e 4.5 temos um mínimo.

#### 4.2.2 - Condições de Máximo e Mínimo

Para que a função  $F(x_i)$  tenha um máximo ou um mínimo num ponto  $P(x_i)$  é necessário que

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

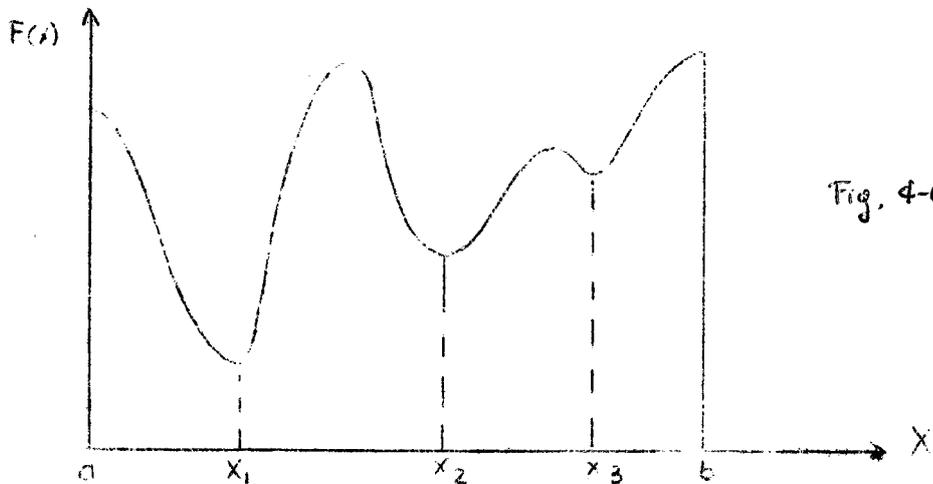
e suficiente que o determinante da matriz

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_1 x_2} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial x_1 x_n} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \frac{\partial^2 F}{\partial x_n x_1} & \frac{\partial^2 F}{\partial x_n x_2} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 F}{\partial x_n^2} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

também chamada matriz Hessiana da função F, seja positivo no caso de mínimo e negativo no caso de máximo.

Essas condições são suficientes para se obter um mínimo ou um máximo relativo da função. Entende-se por mínimo relativo ao menor valor dentro da função de uma vizinhança da variação da mesma.

Na figura 4.6  $F(x_1)$ ,  $F(x_2)$  e  $F(x_3)$  são mínimos relativos da função  $F(x)$  dentro do intervalo  $(a,b)$ , enquanto que  $F(x_1)$  é o mínimo global dentro do intervalo. O mínimo global é portanto o menor valor da função para todas as variações das variáveis independentes, dentro do intervalo.



Além das condições já apresentadas para que se tenha um mínimo, é necessário que as derivadas puras de segunda ordem da função em relação as variáveis sejam positivas (negativas para o máximo\*) para que se tenha um mínimo global. Entende-se por derivada pura como a derivada da função em relação a uma só variável.

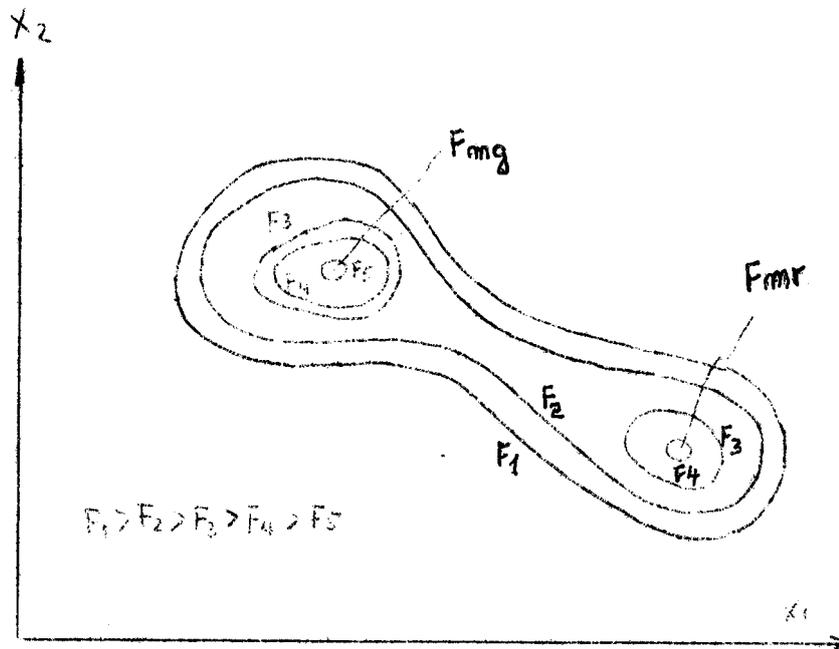


figura 4.7

Na figura 4.6 apresentamos o caso de vários mínimos, um dos quais é o mínimo global, numa função dependente de uma variável, e na figura 4.7 o caso de dois mínimos para uma função dependente de duas variáveis.

---

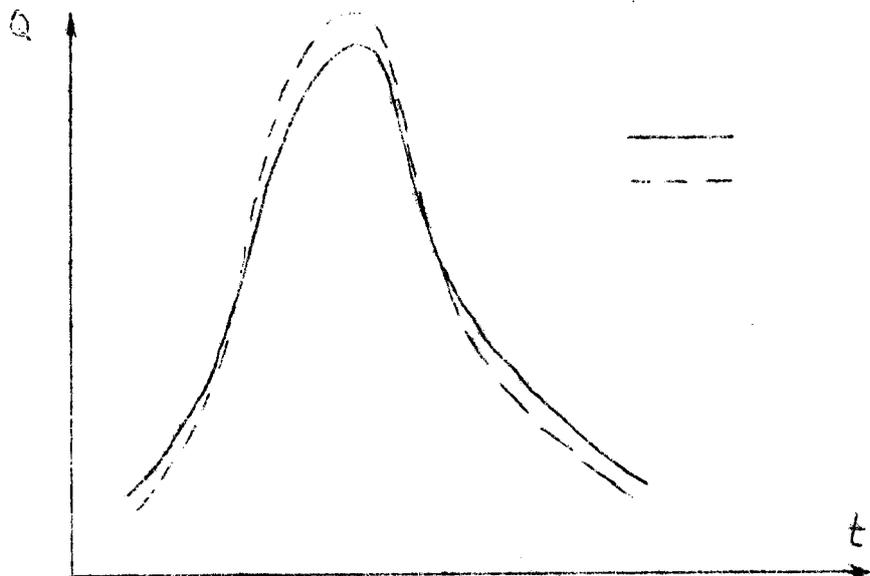
\* Hadley G. E., Non-linear and Dynamic Programmings Addison Wesley.

Quando uma função possui um mínimo (ou máximo) ela é dita unimodal, ou seja, a superfície que corresponde a função, possui apenas um ponto extremo na região considerada.

#### 4.2.3 - Escolha da função objetiva

A escolha da função a qual se deseja minimizar ou maximizar está na razão direta do objetivo do problema. No exemplo do canal o objetivo do problema era maximizar uma vazão, sendo esta dependente de certas variáveis.

Nos problemas de engenharia nem sempre ocorre que a função seja explícita em relação às suas variáveis, portanto é necessário adotar critérios, ou estabelecer uma função que otimize o objetivo desejado. Porém esta escolha será sempre um parecer subjetivo de cada usuário.



O caso da simulação de hidrogramas é um exemplo. Nessa simulação tem-se uma curva observada e uma curva obtida por síntese a partir de um modelo. O objetivo é que as curvas se aproximem com um mínimo de discrepância. Portanto, a função objetiva deve ser uma medida das discrepâncias entre as vazões observadas e as simuladas.

O problema consiste, assim, em procurar o conjunto de valores para os parâmetros do modelo, que conduz ao mínimo valor da função.

Diversos índices podem ser utilizados como função objetivo no caso de simulação de hidrogramas. Entre outros podemos mencionar os seguintes:

$$F_1 = \sum_{i=1}^N |Q_i(\text{calc}) - Q_i(\text{obs})|$$

$$F_4 = \sum_{i=1}^N (Q_i(\text{calc}) - Q_i(\text{obs}))^2$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^N |Q_i(\text{calc}) - Q_i(\text{obs})|^3$$

$$F_3 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{Q_i(\text{calc})} - \frac{1}{Q_i(\text{obs})} \right)^2$$

onde N é o número de ordenadas,  $Q_i(\text{calc})$  é a vazão calculada,  $Q_i(\text{obs})$  é a vazão observada e F a função objetivo.

As quatro funções mencionadas são funções ob-

jetivo que devem ser minimizadas. A função  $F_2$  dá maior ênfase para as grandes discrepâncias, geralmente associadas às vazões de pico. A  $F_3$  dá maior ênfase nas discrepâncias das vazões baixas, geralmente associadas aos períodos de estiagem. Enquanto que  $F_1$  procura minimizar as discrepâncias em volume dando ênfase a valores médios juntamente com  $F_4$ .

Como o hidrograma simulado é o resultado da aplicação de um modelo que é representação aproximada do sistema natural, é evidente que funções objetivo diferentes poderão conduzir a valores diferentes para os parâmetros do modelo. Sendo assim, o usuário deve ter grande cuidado na escolha adequada da função objetivo, de modo que os resultados estejam mais próximos do problema a ser resolvido.

Exemplificando o comportamento das funções objetivos, tomamos um hidrograma\* de entrada num trecho de um rio e propagamos até a seção de saída do referido trecho, obtendo-se um hidrograma simulado. A propagação foi feita utilizando o modelo desenvolvido por Kulandaiswamy. A otimização se fez usando o método de rotação das coordenadas e como função objetivo usou-se as funções  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ . Os resulta-

---

\* O exemplo foi obtido da bibliografia (21).

# SIMULAÇÃO DE UM HIDROGRAMA UTILIZANDO 3 FUNÇÕES OBJETIVAS

$F_1, F_2, F_3$



FIGURA 4.9

dos obtidos e o hidrograma observado na seção de saída são apresentados na figura 4.9.

#### 4.2.4 - Problemas da função

Existem três problemas básicos que podem ocorrer quanto a superfície de resposta da função, devido aos quais os métodos iterativos podem conduzir a resultados diferentes do ótimo ou demorar demasiadamente para achar o resultado ideal. Os três problemas básicos são: a existência de mínimos relativos, a existência de pontos de sela e a existência de vales.

##### 4.2.4.1 - Ótimos locais

Quando uma função não é explícita em relação as suas variáveis, temos que utilizar os métodos iterativos para obter o mínimo global. Mas se a função não é unimodal e o ponto arbitrado de partida estiver num "vale"\* de mínimo relativo, o método admitirá como ótimo global esse mínimo relativo.

Na figura 4.7 se o ponto arbitrado de partida for  $P_0(x_1,0, x_2,0)$  e  $F_{mr}$ ,  $F_{mg}$ , sendo  $F_{mr}$  um mínimo relativo e  $F_{mg}$  um mínimo global, os métodos iterativos convergiriam para  $F_{mr}$ , ou seja, obtendo um ponto diferente do ideal.

Para solucionar este tipo de problema é necessário executar o processo dos métodos iterativos repetidas vezes com pontos de partida diferentes.

---

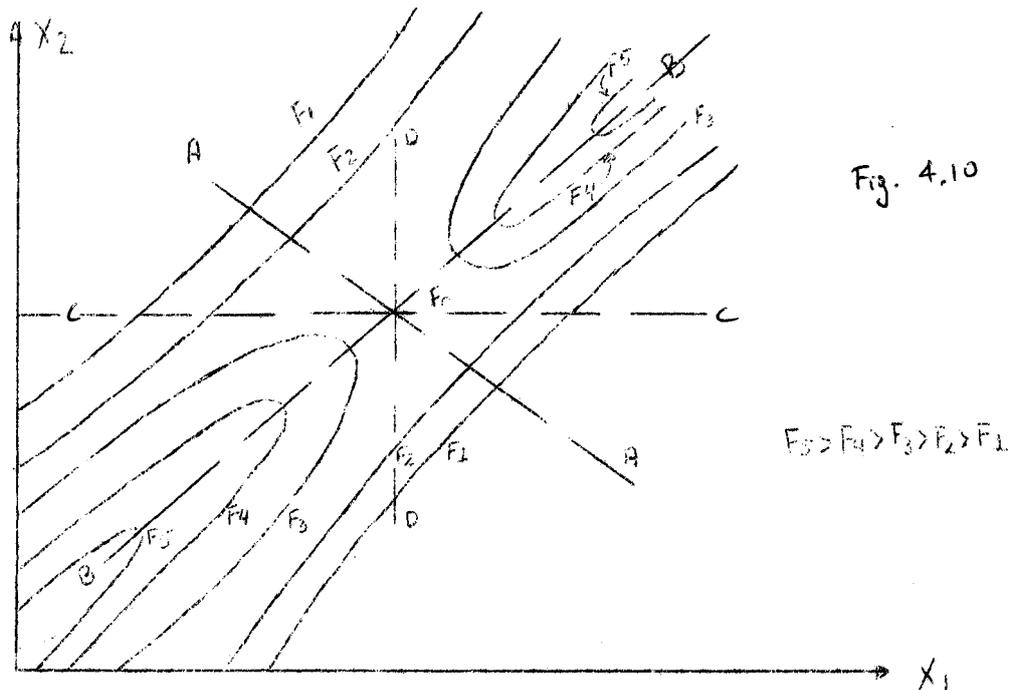
\* Entende-se por "vale" como sendo uma superfície que possui um valor extremo.

Evidentemente que de acordo com a precisão que se deseja dos resultados, a solução deste tipo de problema pode ser mais uma pesquisa do que uma racionalização prática para uma solução cabível economicamente.

Na hidrologia os erros de estimativa ou de medição podem cobrir em certos casos a precisão com que foi obtida a função, não tendo sentido econômico testar novos pontos de partida, desde que os valores encontrados para os parâmetros do modelo sejam fisicamente aceitáveis.

#### 4.2.4.2 - Postos de sela

Este problema foi descrito por Ibbitt e O'Donnell(4). Para funções bi-dimensionais, os pontos de sela se manifestam como tendo um máximo ao longo de uma direção (por exemplo AA na figura 4.10) e um mínimo ao longo de outra direção (por exemplo BB na figura 4.10). Isto significa que pesquisando na direção AA,  $F_0$  será declarado como um máximo e se a pesquisa se faz na direção BB o mesmo ponto será declarado como um mínimo.



Se as direções de pesquisa são trocadas, por exemplo CC e DD na figura 4.10, em ambas direções  $F_0$  será considerado como um máximo, no entanto este é um máximo relativo da função F.

#### 4.3.4.3 - Vales

O problema ocorre de acordo com a disposição dos vales em relação aos eixos representativos de cada variável. Este problema é tratado no ítem que descreve o método univariacional.

### 4.3 - Métodos iterativos de otimização

#### 4.3.1 - Método univariacional

##### 4.3.1.1 - Introdução

O método univariacional é um método quase que intuitivo da procura do melhor valor. Beard(2) apresenta o método e sua utilização na Análise de Sistemas de Recursos Hídricos.

##### 4.3.1.2 - Direção de pesquisa

Para uma função  $F(X_i)$  dependente das  $i=1,2..n$  variáveis que definem os  $n$  eixos ortogonais, o método estabelece como direção de pesquisa os eixos referidos, ou seja modificando uma variável e mantendo as demais constantes a cada vez.

#### 4.3.1.3 - Determinação do comprimento dos passos

O processo inicia ao se arbitrar um ponto

$$P_0(x_{i,0}) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

Mantendo-se fixos os valores das variáveis e modificando somente uma delas através de

$$X_i = X_{iant} + S_i \quad (4.10)$$

onde

$o$  - índice correspondente ao primeiro ponto

$i$  - identifica a variável

$X_i$  - novo valor da variável

$X_{iant}$  - antigo valor da variável

$S_i$  - acréscimo ou decréscimo (arbitrado) a ser dado a variável.

Se o acréscimo da variável produz uma diminuição na função (minimização), deve-se continuar acrescendo o valor da variável.

Se no primeiro passo a variável acrescida não produz uma diminuição na função, o processo é desenvolvido no sentido de diminuir a variável, utilizando o mesmo processo descrito.

Quando o acréscimo ou decréscimo de uma dada variável não produzir mais diminuição na função objetiva passa-se para a variável seguinte, sempre fixando o valor das demais.

Depois que todas as variáveis forem otimiza-

das nas suas respectivas direções, repete-se o processo até que a função não diminua mais ou que para o problema em estudo se tenha obtido a precisão desejada.

#### 4.3.1.4 - Inconvenientes do método

Este método é de fácil aplicação, mas pode apresentar certos inconvenientes. Quando, por exemplo, o número de variáveis é relativamente grande conseqüentemente o número de avaliações da função é muito elevado, tornando em certos casos impraticável o seu uso.

Na figura 4.11 apresentamos o exemplo de uma função de duas variáveis. Os pontos brancos identificam os pontos em que a função calculada é menor que a anterior e os pontos pretos indicam um aumento da função. A figura permite visualizar como opera o método univariacional na procura do F ótimo.

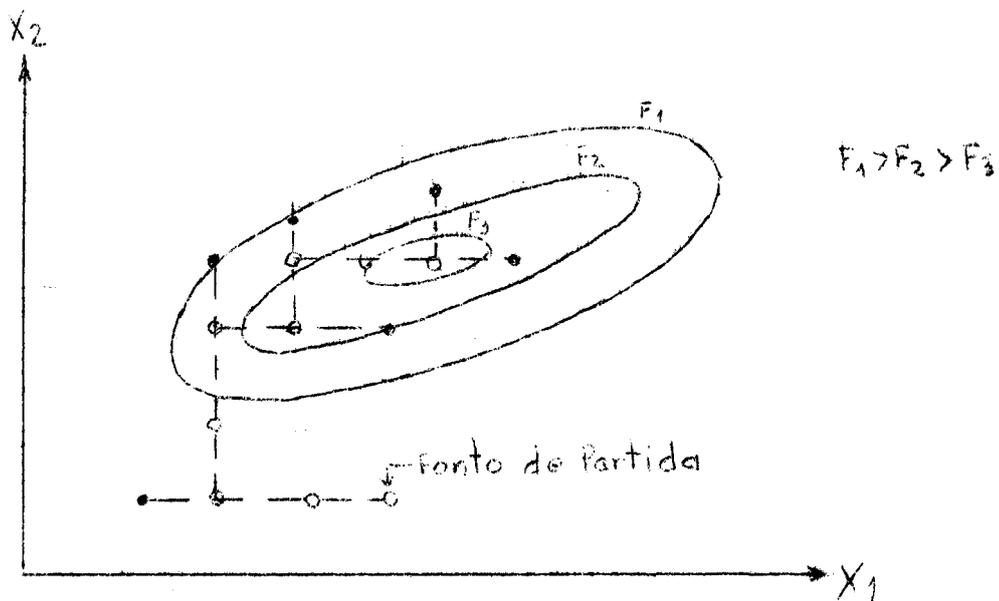


figura 4.11

O método univariacional pode apresentar alguns problemas, dependendo do contorno da função objetiva pois quando este apresentar a forma de um longo e estreito cume, inclinado em relação aos eixos, o método progride vagarosamente, como mostra o exemplo da figura 4.12.

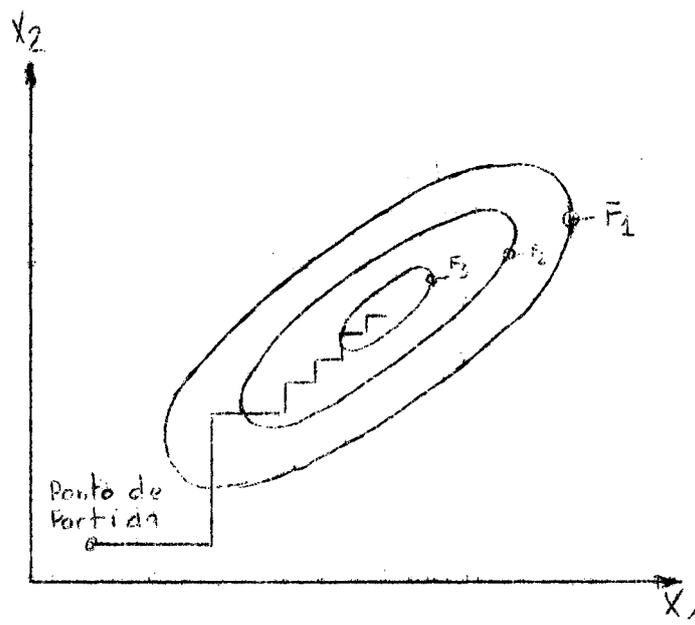


figura 4.12

Outro problema que pode ocorrer, é o apresentado na figura 4.13, onde por tentativas o método chegou ao ponto P, que é aceito como mínimo, já que tanto num sentido como no outro a função tende a aumentar. No entanto o mínimo se encontra no ponto O. Este problema é resolvido com o método de rotação das coordenadas que apresentamos a seguir.

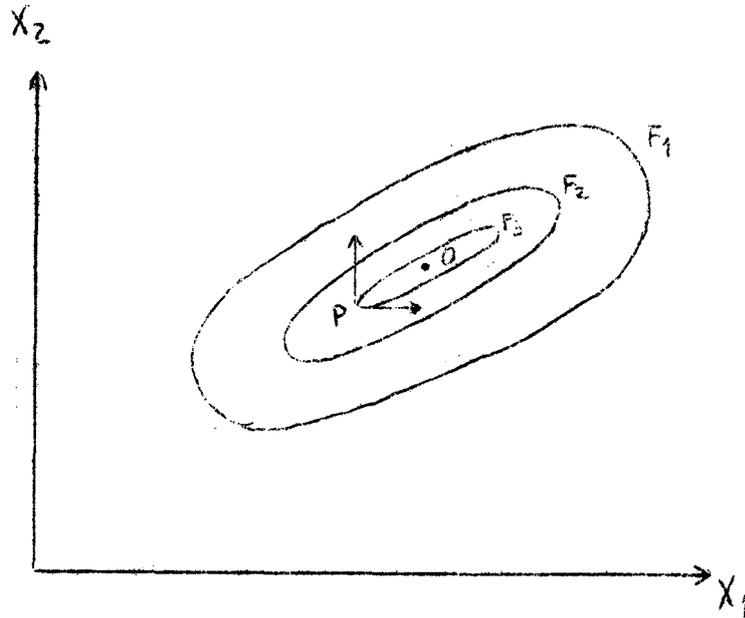
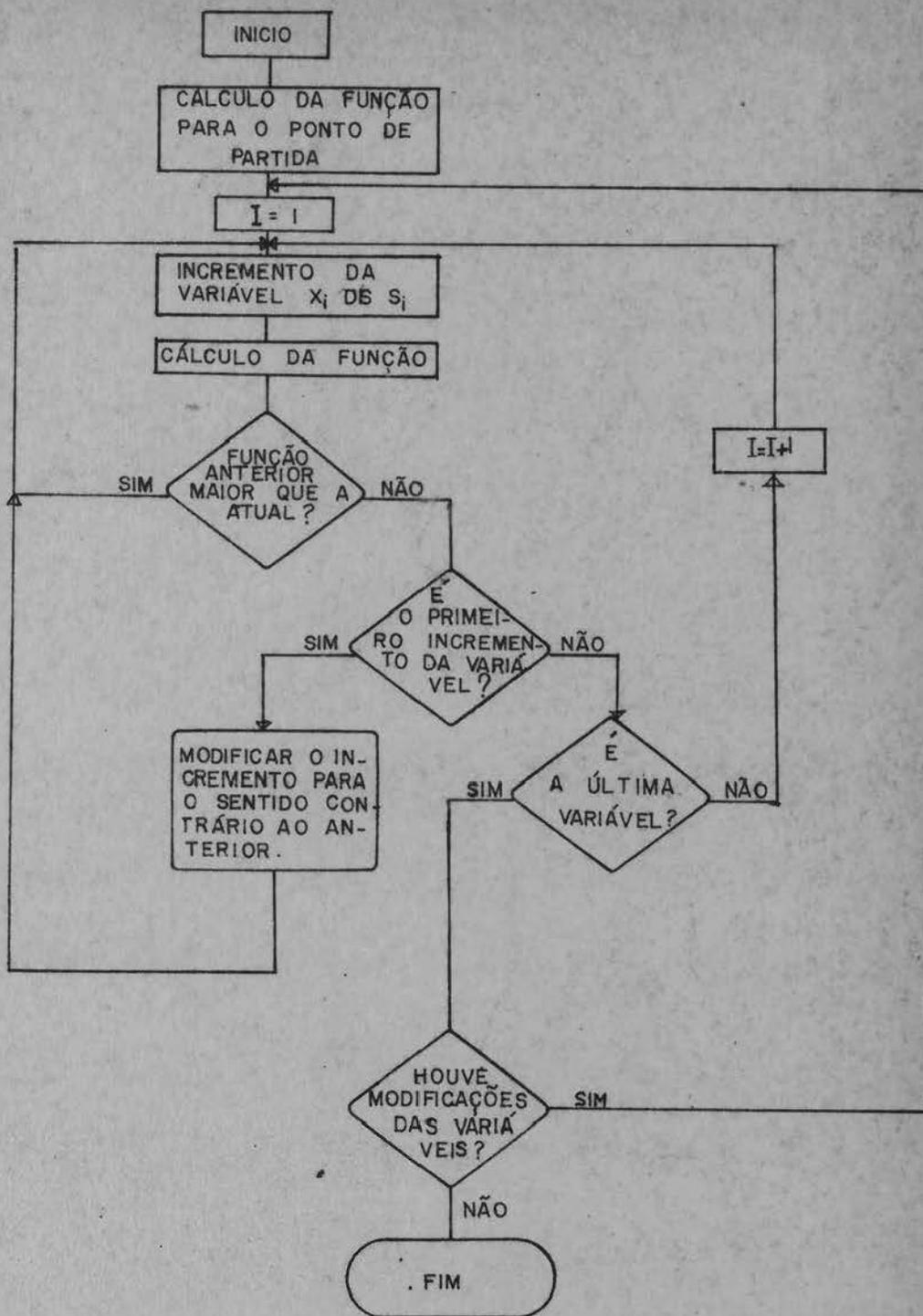


figura 4.13

Observação: Todos os fluxogramas que apresentaremos, partem do princípio que o objetivo é minimizar a função.

# FLUXOGRAMA DO ALGORITMO



#### 4.3.2 - Método da rotação de coordenadas

##### 4.3.2.1 - Introdução

O método da rotação de coordenadas foi apresentado por Rosebrock em 1960 (22). Trata-se de uma modificação de método univariacional. O método procura através da modificação dos eixos coordenados, representativos das  $n$  variáveis em estudo, otimizar a busca do mínimo (minimização) da função objetivo. Essa variação procura evitar os problemas que o método univariacional apresenta (figuras 4.12 e 4.13). Na figura 4.14 apresentamos a solução da figura 4.12 pelo método de Rosebrock.

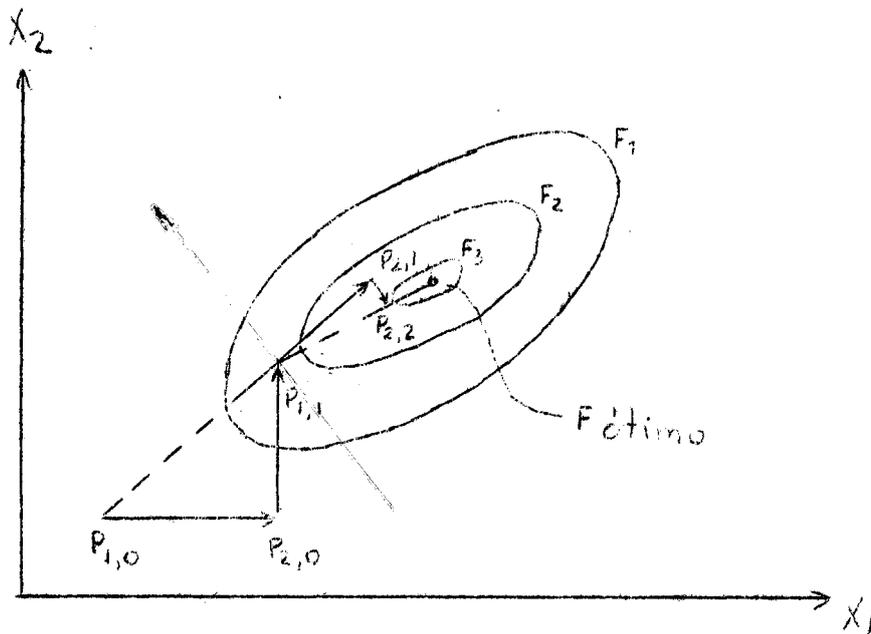


figura 4.14

O primeiro "ciclo" do método é igual ao método univariacional, ou seja, utilizando das direções dadas pelos eixos coordenados. Entende-se por um "ciclo" quando pelo menos um "sucesso" e uma "falha" tenha ocorrido em todas as direções no caso do mínimo valor da função. Um "sucesso" ocorre quando a função anteriormente calculada é maior que a calculada após um incremento da variável. Uma "falha" é quando ocorre o inverso.

O processo inicia, arbitrando-se um ponto.

$P_{1,0}(X_{i,0})$ , para  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  variáveis

O índice 0 identifica o primeiro "ciclo" e 1 indica que é o primeiro ponto do mesmo.

Como foi mencionado, as direções de pesquisa para o primeiro "ciclo", são no sentido dos n eixos ortogonais, portanto o processo modifica uma variável a cada vez, mantendo as demais constantes.

#### 4.3.2.2 - Comprimento dos passos

Na determinação do comprimento dos passos de pesquisa, são usados dois parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ . Estes parâmetros multiplicarão um incremento  $S_i$  constante para cada variável ( $S_i$  é arbitrado), de acordo com o resultado da função.

Se a função anterior for maior que a calculada, ou seja, ocorreu um "sucesso", como a função está diminuindo (minimização), o próximo incremento será  $S_i \alpha$ , onde  $\alpha > 1$ .

Se a função anterior for menor que a calculada,

da, o próximo incremento da variável será  $-S_i\beta$ , onde  $0 < \beta < 1$

Após o primeiro "ciclo" o ponto de partida será formado pelas coordenadas mínimas nas  $n$  direções.

$$P_{1,1} (x_{i,1}) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

#### 4.3.2.3 - Determinação da direção de pesquisa

Na obtenção das  $n$  direções ortogonais para o "ciclo" seguinte, o método considera como direção de partida o vetor que liga os pontos  $P_{1,0}$  e  $P_{1,1}$  ( $P_{n,0} = P_{1,1}$ ), sendo as direções seguintes ortogonais a anterior.

$$\vec{A}_1 = d_1 \cdot \vec{e}_1^0 + d_2 \cdot \vec{e}_2^0 + \dots + d_n \cdot \vec{e}_n^0 \quad (4.11)$$

é o vetor que liga os pontos referidos e passa a ser a nova direção de pesquisa. Os  $\vec{e}_i^j$  são os vetores unitários nas direções dos eixos coordenados das  $x_i$  variáveis independentes e cada coeficiente  $d_i$  é a soma algébrica de todos os comprimentos dos passos com "sucesso" na direção dos respectivos  $\vec{e}_i^j$ .

$$\vec{e}_1^1 = \frac{\vec{A}_1}{|\vec{A}_1|} \quad (4.11)$$

A direção seguinte deve ser normal a anterior portanto o vetor

$$\vec{A}_2 = d_1 \cdot \vec{e}_1^0 + d_3 \cdot \vec{e}_3^0 + \dots + d_n \cdot \vec{e}_n^0 \quad (4.12)$$

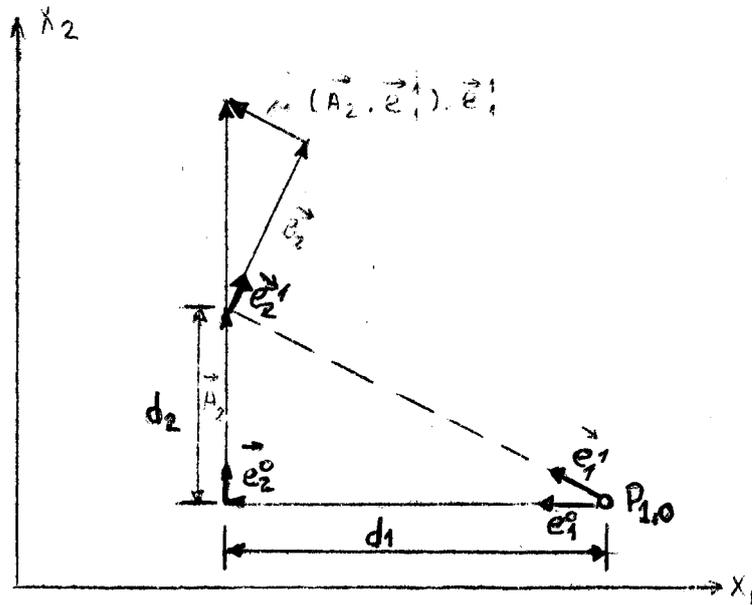


figura 4.15

produz a nova direção  $\vec{e}_2^1$

$$\vec{B}_2 = \vec{A}_2 - (\vec{A}_2 \cdot \vec{e}_1^1) \cdot \vec{e}_1^1$$

$$\vec{e}_2^1 = \frac{\vec{B}_2}{|\vec{B}_2|}$$

O enésimo elemento fica

$$\vec{B}_n = \vec{A}_n - \sum_{j=1}^{N-1} (\vec{A}_n \cdot \vec{e}_j^1) \cdot \vec{e}_j^1$$

$$\vec{e}_n^1 = \frac{\vec{B}_n}{|\vec{B}_n|}$$

Obtidas as novas direções das variáveis, o processo se repete. A pesquisa do mínimo (minimização) é interrompida quando for obtida precisão desejada, ou se não ocorrer mais modificações nas variáveis, podendo ser interrompida quando um certo número de iterações for ultrapassado como segurança ao custo e ao elevado tempo de computador que porventura venha a ocorrer.

Na figura 4.15 apresentamos o caso de uma função com duas variáveis, e uma demonstração gráfica dos vetores e procedimentos apresentados nas equações 4.11 a 4.17.

Na figura 4.12 também em duas dimensões apresentamos as várias etapas do processo até encontrar o mínimo (minimização).

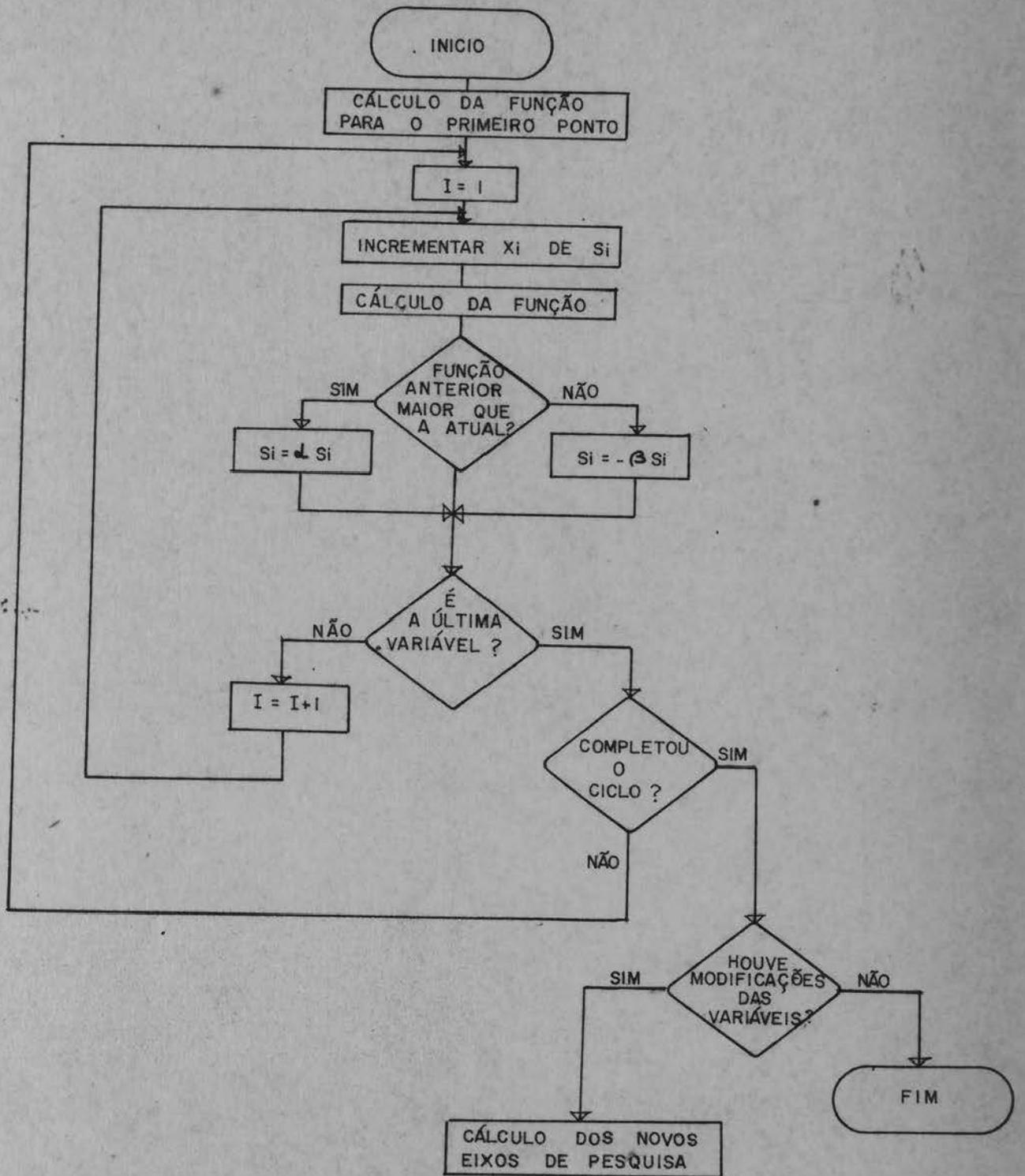
#### 4.4 - Minimização das tentativas

##### 4.4.1 - Introdução

Fox (8) apresenta a minimização quadrática e Beard (2) utiliza o método iterativo de Newton-Raphson para otimizar o número de tentativas numa direção. Neste trabalho utilizamos somente a interpolação quadrática que descreveremos a seguir.

Na figura 4.14 apresentamos o caso de uma função objetivo dependente de duas variáveis  $X_1$  e  $X_2$ . Se considerarmos a direção  $X'X$ , a figura 4.14b apresenta o corte feito nesta direção, tomando como referência um ponto  $P_0(t_0)$ , sendo  $t$  a variável nessa direção e  $F$  a função objetivo. Portanto nesse corte procura-se estudar a variação da função objetivo segundo uma determinada direção.

# FLUXOGRAMA DO ALGORITMO



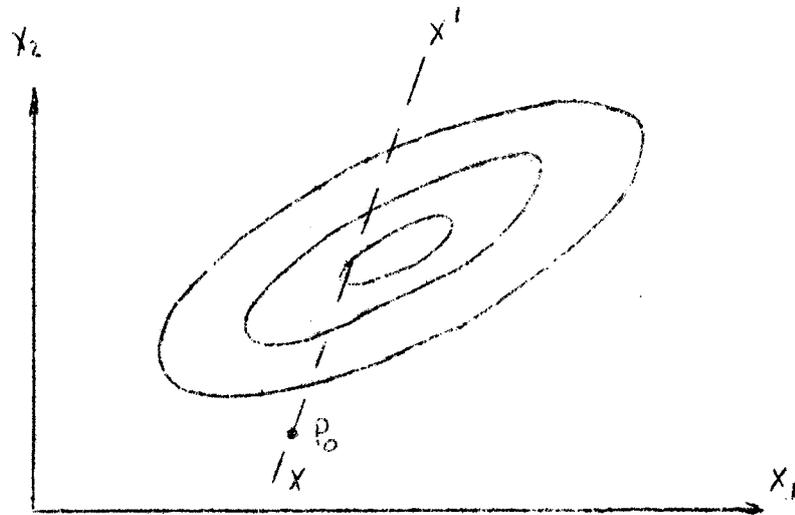


figura 4.14a

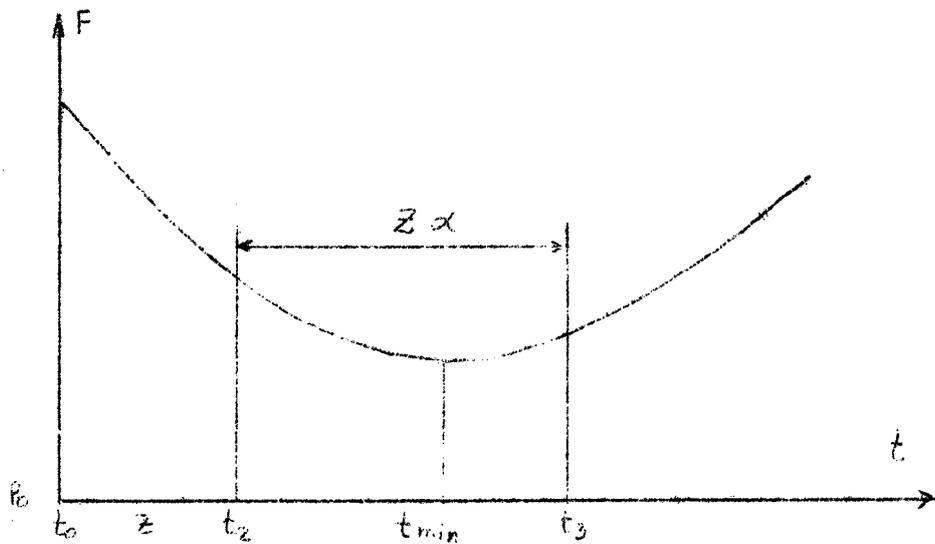


figura 4.14b

#### 4.4.2 - Minimização quadrática

Quando a procura do mínimo se faz numa determinada direção, as variáveis são acrescidas ou decrescidas

de um valor.

Considerando  $t$  como o deslocamento numa determinada direção, poderá existir um valor  $t_{\min}$  que proporciona um mínimo de  $F$  nessa direção. Se admitirmos que a função  $F(t)$  é por aproximação

$$F = a + bt + ct^2 \quad (4.18)$$

então  $t_{\min}$  será obtido pelas seguintes condições

$$\frac{dF}{dt} = 0$$

$$\frac{dF}{dt} = b + 2ct = 0$$

$$t_{\min} = \frac{-b}{2c} \quad (4.19)$$

A condição para  $t_{\min}$  produzir  $F_{\min}$  é de que a segunda derivada de  $F$  deve ser positiva

$$\frac{d^2F}{dt^2} = 2c > 0$$

portanto a condição é de que  $c > 0$

Se consideremos três avaliações da função  $F_1$  de abcissa  $t_1$ ;  $F_2$  para uma abcissa  $t_2 = t_1 + z$ ; e  $F_3$  para uma abcissa  $t_3 = t_2 + \alpha z$  com  $\alpha > 1$ .

Com esses valores da função avaliados obtemos o sistema de equações

$$F_1 = a + bt_1 + ct_1^2$$

$$F_2 = a + bt_2 + ct_2^2 \quad (4.20)$$

$$F_3 = a + bt_3 + ct_3^2$$

Se considerarmos  $t_1$  como a abcissa de referên-  
cia temos que  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = z$  e  $t_3 = z(1 + \alpha)$

Substituindo no sistema de equações 4.20, fi-  
ca

$$F_1 = a$$

$$F_2 = a + bz + cz^2 \quad (4.21)$$

$$F_3 = a + bz(1 + \alpha) + c(1 + \alpha)^2 z^2$$

Os valores dos parâmetros depois de resolvido  
o sistema de equações são:

$$a = F_1$$

$$b = \frac{(1 + \alpha)^2 F_2 - \alpha(2 + \alpha) F_1 - F_3}{z(1 + \alpha)\alpha} \quad (4.22)$$

$$c = \frac{F_3 + \alpha F_1 - (1 + \alpha) F_2}{z^2 (1 + \alpha) \alpha}$$

A condição do mínimo para a aproximação é de  
que  $c > 0$ , portanto a seguinte relação deve ser obedecida

$$F_3 + \alpha F_1 > (1 + \alpha) F_2 \quad (4.23)$$

o  $t_{\min}$  será obtido por substituição na equação (4.19)

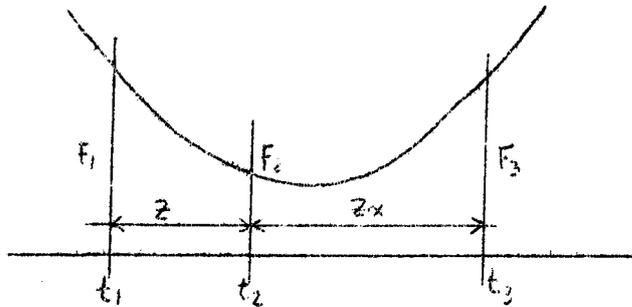
$$t_{\min} = \frac{(1 + \alpha)^2 F_2 - \alpha(2 + \alpha) F_1 - F_3}{2(F_3 + \alpha F_1 - (1 + \alpha)F_2)} \cdot z \quad (4.24)$$

se usarmos  $\alpha = 1$  as equações 4.23 e 4.24 ficam

$$F_3 + F_1 > 2F_2 \quad (4.25)$$

$$t_{\min} = \frac{4F_2 - 3F_1 - F_3}{4F_2 - 2F_1 - 2F_3} \cdot z \quad (4.26)$$

Nos sub-programas ROSEM e INVA, em que a otimização pelo método da Rotação das coordenadas foi utilizado quando da minimização por este critério, adotou-se como origem a abscissa de  $F_2$ , portanto



as equações ficam

$$F_2 = a$$

$$F_1 = a - bz + cz^2$$

$$F_3 = a + b\alpha z + \alpha^2 z^2 c$$

e  $t_{\min}$  fica

$$t_{\min} = \frac{F_1 \alpha^2 - F_2(\alpha^2 - 1) - F_3}{2(F_3 + \alpha F_1 - (1+\alpha) F_2)}$$

#### 4.4.3 - Métodos univariacional e rotação das coordenadas com minimização quadrática

A utilização da minimização quadrática nos métodos univariacional e rotação das coordenadas pode ser feita através de dois critérios. Um deles seria o de calcular a função somente para três pontos numa determinada direção e satisfeitas as condições do mínimo, calculá-lo, passando depois para outra direção. Sem dúvida este critério faz com que as tentativas sejam reduzidas, mas pode prejudicar a precisão do resultado.

Outro critério é o de pesquisar o mínimo através de acréscimos sucessivos sobre as variáveis, numa direção, através de uma progressão geométrica. Enquanto a modificação das variáveis estiver produzindo uma diminuição da função objetiva a progressão deve continuar, mas quando ocorrer entre duas avaliações da função um aumento da mesma, calcule-se o mínimo através da aproximação quadrática, usando das três últimas avaliações da função dentro das condições de mínimo.

A modificação numa certa direção é feita segundo o seguinte critério.

Os valores de  $t$  são obtidos segundo uma progressão geométrica de razão  $\alpha$ .

$$t_j = t_1 \alpha^{j-1} \quad (4.27)$$

E a modificação de cada variável é obtido por

$$R_i = R_i(a) + \vec{e}_i \vec{z} \quad (4.28)$$

$$X_i = X_i(a) \cdot R_i$$

o índice a indica que corresponde a um valor anteriormente a validado.

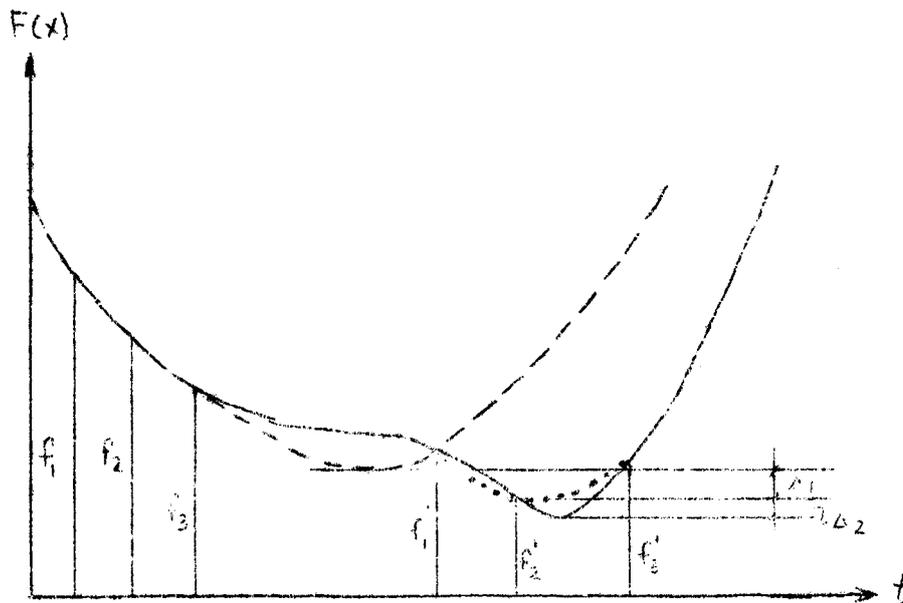


figura 4.15

- Curva verdadeira
- primeira hipótese
- .... segunda hipótese

$\Delta_1$  - erro da aproximação da primeira hipótese

$\Delta_2$  - erro da aproximação da segunda hipótese em relação a verdadeira

t - (variação numa direção)

para  $i = 1, 2, \dots, n$  variáveis onde  $\vec{Z}$  é o vetor que liga o ponto em que a função objetiva foi anteriormente avaliada e o novo ponto estabelecido para cálculo da função;  $\vec{e}_i \cdot \vec{Z}$  é a projeção desse acréscimo segundo a variável  $i$ , onde  $\vec{e}_i$  é o vetor unitário com a direção dessa variável.  $R_i$  é o fator que modifica percentualmente a variável e  $R_{ia}$  é o valor anterior de  $R_i$ , sendo  $X_i$  a variável a ser acrescida.

Enquanto a função objetiva estiver crescendo o módulo de  $\vec{Z}$  é calculado por

$$|\vec{Z}| = \alpha |\vec{Z}_a| \quad (4.29)$$

sendo  $\alpha$  o coeficiente de aceleração (razão da progressão geométrica de pesquisa), apresentado no item anterior.  $|\vec{Z}_a|$  antigo valor do módulo de  $\vec{Z}$ .

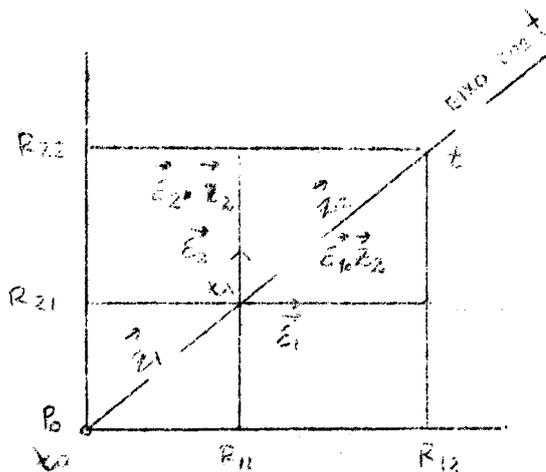
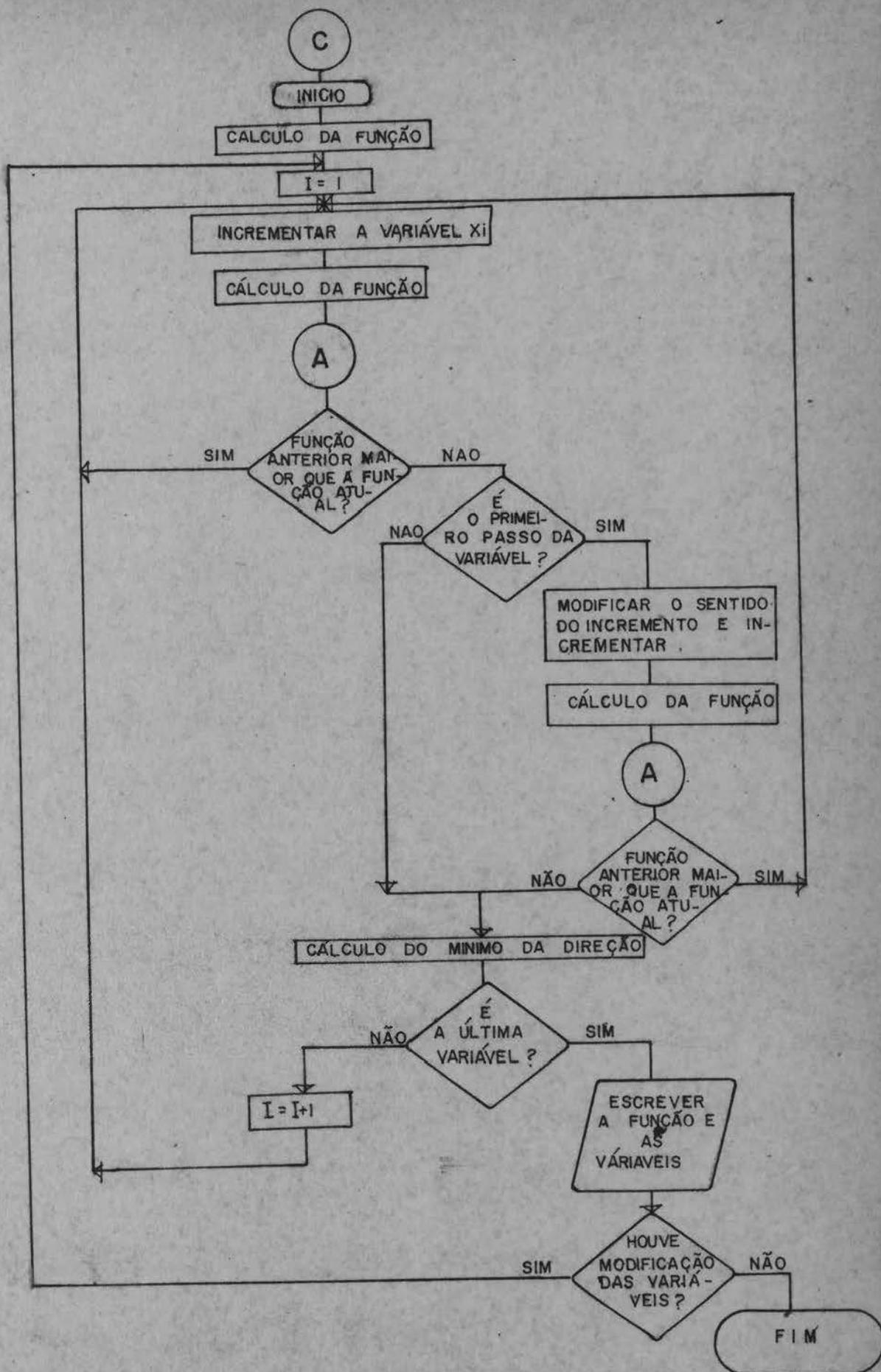


figura 4.16

Exemplificando a modificação das variáveis na figura 4.16 apresentamos um exemplo deste critério, no caso de uma função de duas variáveis. Na figura,  $P_0$  é o ponto de partida da pesquisa, nesta direção, portanto os valores de  $R$  tomam como referência este ponto. Em primeiro lugar calcula-se o novo valor de  $t$  através da equação 4.27, após calcula-se a projeção desse deslocamento para cada variável, através das equações (4.28). Modificadas as variáveis recalcula-se a função.

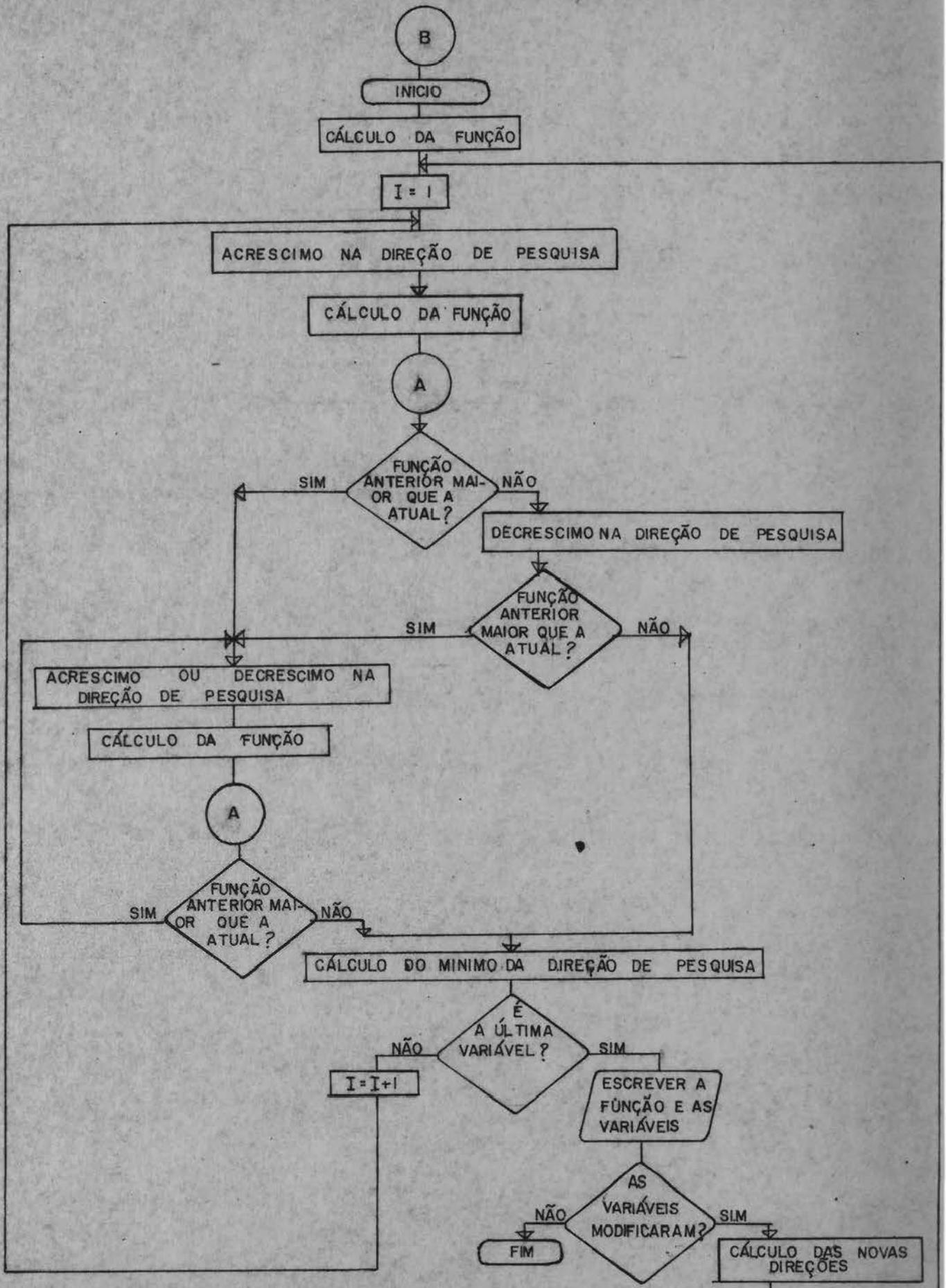
No caso do método univariacional, como a pesquisa se dá paralela aos eixos, existirá somente uma projeção a cada vez.

# DIAGRAMA DE BLOCOS DO ALGORITMO DO MÉTODO UNIVARIACIONAL UTILIZANDO MINIMIZAÇÃO QUADRÁTICA



O SUBPROGRAMA QUE USOU ESTE ALGORITMO É INVA

DIAGRAMA DE BLOCOS CORRESPONDENTE AO ALGORITMO DO MÉTODO DAS ROTAÇÕES DAS COORDENADAS COM MINIMIZAÇÃO QUADRÁTICA



O SUBPROGRAMA ROSEM ELABORADO PARA APLICAÇÃO PRÁTICA DO MÉTODO UTILIZOU DESTA VERSÃO DO MÉTODO. ESTE SUBPROGRAMA FOI BASEADO NO SUBPROGRAMA ENCONTRADO NA BIBLIOGRAFIA. (

## 5 - Aplicação Prática

### 5.1 - Dados

Utilizamos, para aplicação dos modelos e técnicas de otimização apresentados nos capítulos anteriores, dados correspondentes a um trecho do Rio Bogotá (Colombia).

O trecho em estudo, compreende os postos de Florencia (montante) e Tocancipa (juzante), apresentando um comprimento de 16,5 km e uma área de contribuição de 67 km<sup>2</sup> entre as referidas seções. A área de contribuição total para a seção Tocancipa é de 1018 km<sup>2</sup>.

Os referidos postos estão situados em região montanhosa, com altitude da ordem de 2550 m, e uma declividade de pequena (0,0003 m/m) no trecho em estudo, sendo que no curso à montante de Florencia a declividade é crescente até a nascente onde apresenta grande declividade.

Existe uma predominância de precipitação orográfica devido as altas montanhas.

A superfície apresenta como características principais, uma vegetação do tipo arborea nas montanhas e nas zonas planas, pastos e cultivos.

Os postos referidos utilizam para registros, pluviômetros Stevens tipo F de registro semanal. De acordo com a fonte desses dados (19), estes registros são confiáveis.

A nossa preocupação foi de encontrar dados já

analisados, pois o trabalho de análise é extenso, fugindo dos objetivos principais desse trabalho. Portanto utilizamos os dados apresentados no trabalho de tese de Carlos Naranjo (19), onde o mesmo descreve as características principais da referida bacia. Outro fator importante no uso desses dados, é a contribuição em percurso entre as duas seções, para os dois anos disponíveis (1968 e 1969), é da ordem de 16%, o que facilita a análise da propagação.

Infelizmente os postos pluviométricos que dispunhamos não são suficientes para retratar o comportamento hidrológico do referido trecho.

## 5.2 - Metodologia

### 5.2.1 - Introdução

Nesse estudo nos propomos utilizar dois métodos de propagação: Muskingum e Kulandswamy, e ajustá-los aos dados através do auxílio de dois métodos de otimização: Univariacional e Rotação das Coordenadas, procurando caracterizar o quanto é viável o uso dessas técnicas.

Para tanto utilizamos a seguinte sequência de estudo:

- a) Estabelecer um critério para retirar a contribuição em percurso, com o objetivo de analisar o simples processo de propagação.
- b) Isolar alguns hidrogramas, para procurar estabelecer a influência dos parâmetros, com o intuito de melhor ajustar o período de dois anos.
- c) Ajustar esses hidrogramas isolados através de diferentes

tentativas de partida dos parâmetros, escolhendo os melhores.

- d) Ajustar o período de dois anos, também com diferentes pontos de partida, e escolher o que proporcionar o melhor resultado.
- e) A sequência anterior parte do princípio que o método utilizado para otimizar é o de rotação das Coordenadas e a função objetiva é  $F_1$ , definida no capítulo 4.23. Portanto após obtido o resultado ideal, utilizando o citado método, devemos testar com o método univariacional, a tentativa que proporcionou o melhor resultado.
- f) Para caracterizar a influência dos parâmetros deve ser observada a sensibilidade dos modelos com relação a variação dos parâmetros.

Nesta sequência de estudo, analisamos o modelo Kulandswamy e utilizamos o Muskingum para comparar resultados.

### 5.2.2 - Contribuição em Percorso

Como o estudo se prende basicamente na análise da propagação de descargas, procuramos retirar a contribuição em percurso, para efetuar a análise. Para isso consideramos duas possibilidades:

- a) A contribuição é predominantemente à montante, ou seja deve ser propagada junto com a vazão da seção de entrada do trecho. Para isso as vazões do posto referido são multiplicadas pelo coeficiente

$$\text{Coef} = 1 + \left( \frac{\sum_{i=1}^{\text{KONT}} Q_i - \sum_{i=1}^{\text{KONT}} I_i}{\sum_{i=1}^{\text{KONT}} Q_i} \right)$$

KONT - número de descargas

$Q_i$  - vazão da seção de juzante

$I_i$  - vazão da seção de montante

- b) A contribuição é predominantemente à juzante, para isso deve-se retirar a contribuição em percurso da vazão de saída, ajustar o modelo e somar essa contribuição aos hidrogramas calculado e observado.

Para retirar a contribuição em percurso deve-se multiplicar as descargas de juzante pelo coeficiente.

$$\text{Coef} = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^{\text{KONT}} Q_i - \sum_{i=1}^{\text{KONT}} I_i}{\sum_{i=1}^{\text{KONT}} Q_i} \right)$$

Procedendo desta forma admite-se que a contribuição em percurso é linearmente proporcional ao hidrograma de montante, o que é uma simplificação.

Para definirmos qual é o melhor, simulamos os dois anos pelos dois critérios. Na tabela 5.1 apresentamos os resultados.

Tabela 5.1

	KULANDSWAMY			MUSKINGUM			
	$A_0$	$A_0$	$B_0$	função objetiva	K	X	função objetiva
<b>Critério a</b>	17,639	-60,771	2,79	0,726	18,67	0,113	0,732
<b>Critério b</b>	18,27	-77,17	2,89	0,625	17,87	0,08	0,632

Como a função objetiva para o critério b apresenta um resultado melhor, devemos utilizar este critério. Em termos globais (dois anos de dados), parece indicar que há uma predominância na contribuição próxima a seção jusante.

### 5.2.3 - Hidrogramas Isolados

Foram isolados 10 hidrogramas, do período de dois anos (1968, 1969), para constatar o comportamento dos parâmetros em diferentes cheias.

O critério adotado para selecionar os mesmos, foi o de separar hidrogramas de entrada e saída de tal forma que os mesmos se cruzem tanto no início como no fim, isto representa que o volume de entrada saiu do trecho, dentro do período isolado, abstendo-se do problema da contribuição em percurso, além disso procurou-se hidrogramas que possuissem um percentual pequeno da referida contribuição. Nos picos maiores a referida contribuição é grande, o que nos obrigou a selecionar mesmo assim esses hidrogramas.

Na tabela 5.2 apresentamos um resumo dos resultados e as principais características dos hidrogramas selecionados.

Na figura 5.1 plotamos os valores da função objetiva, cálculo obtido utilizando do modelo Kulandswamy, contra a diferença percentual de volume entre o hidrograma de saída e o de entrada, o que representa a contribuição em percurso. Cada ponto indica um hidrograma. Observa-se na referida figura uma tendência da função objetiva aumentar com a contribuição em percurso, o que indica que a medida que es

ta torna-se representativa o resultado tende a ser ruim. A curva a procura a tendência dos pontos, para a propagação do hidrograma de entrada sem considerar a contribuição em percurso. A curva b procura a tendência dos pontos, considerada a contribuição em percurso pelo critério b. Pode-se observar nesta última curva que os pontos acima de 20% se encontram muito dispersos, o que parece indicar que o critério b, para hidrogramas que apresentam diferenças maiores que a indicada, nem sempre é válida, o que é normal, já que esta influência não é necessariamente uma função linear das vazões de entrada, como o estabelecido pela simplificação.

Portanto para continuar a análise, utilizamos somente dos hidrogramas que apresentam contribuição em percurso menor que 20 %. Na tabela 5.3 apresentamos o resultado dos hidrogramas selecionados para os modelos Muskingum e Kullandswamy. Esses resultados foram obtidos depois de otimizados os hidrogramas, através de dois testes com partidas diferentes para os parâmetros. Adotamos em cada hidrograma o conjunto de parâmetros que produziu a menor função objetiva. Observamos que somente no hidrograma H2, a função objetiva calculada através do modelo Muskingum é inferior ao obtido pelo modelo de Kullandswamy.

Nas figuras 5.2 a 5.7 plotamos os hidrogramas isolados, apresentando as curvas calculadas pelos modelos mencionados e a curva observada retirada a contribuição em percurso.

Tabela 5.2

Hidrograma	Período	Volume hidrog. saída m <sup>3</sup> /s	Volume hidrog. entrada m <sup>3</sup> /s	Contribuição em percurso %	Vazão máxima de entrada m <sup>3</sup> /s	Vazão* máxima de saída m <sup>3</sup> /s	Função objetiva	
							c/contribuição (m <sup>3</sup> /s)	s/contribuição (m <sup>3</sup> /s)
H 1	1968 1/1 a 1/10	31,72	32,75	-3,25	6,42	5,43	0,167	0,229
H 2	1968 21/6 a 28/6	47,43	39,77	16,10	12,43	12,54	0,283	0,932
H 3	1968 16/1 a 28/1	91,63	86,76	5,31	9,81	10,43	0,146	0,447
H 4	1969 23/4 a 30/4	46,58	36,02	22,67	11,63	9,65	0,372	1,101
H 5	1969 23/5 a 1/6	53,95	48,59	9,94	10,89	10,73	0,262	0,413
H 6	1969 7/9 a 20/9	70,60	60,64	14,10	10,71	8,56	0,359	0,857
H 7	1968 7/7 a 20/7	113,49	70,72	37,70	16,18	13,84	0,615	2,864
H 8	1968 1/8 a 28/8	332,78	248,76	25,25	23,87	22,67	0,656	1,700
H 9	1969 19/7 a 31/7	93,24	79,19	15,07	13,50	11,40	0,391	0,632
H 10	1969 13/10 a 21/10	64,52	42,87	33,60	11,40	12,56	0,284	1,192

\* Os valores de vazão máxima estão reduzidos segundo o critério b

#### 5.2.4 - Análise da influência dos parâmetros

A equação de armazenamento (3.4), apresentada por Ven Te Chow e Kulandswamy admite que os parâmetros que multiplicam as vazões e suas derivadas, tanto de entrada como de saída, dependam dessas vazões. O modelo Kulandswamy (16) simplifica a equação mencionada, considerando esses parâmetros  $A_i$  e  $B_j$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  e  $j = 1, 2, \dots, M$ , constantes para qualquer hidrograma dentro de um mesmo trecho, isto representa que os parâmetros dependem apenas das características físicas do trecho.

Na análise dos hidrogramas isolados pelo modelo Kulandswamy, plotamos os parâmetros  $A_0$ ,  $A_1$  e  $B_0$ , função da vazão máxima do hidrograma de saída (figuras 5.8, 5.9 e 5.10), e constatamos que existem tendências bem definidas nestes gráficos, apesar do reduzido número de pontos. Portanto para cada hidrograma teremos valores diferentes dos parâmetros, e para se obter resultados melhores é necessário pesquisar as "funções-parâmetros" que esboçamos.

Para analisar a variação de cada parâmetro em particular utilizamos do hidrograma H2 a figura 5.11 apresentamos a variação do parâmetro  $A_0$ , onde fixamos os outros dois e variamos  $A_0$ . Pode-se observar que a medida que o parâmetro diminui, o pico do hidrograma aumenta tornando-se agudo, enquanto que ao aumentar o valor do parâmetro o pico do hidrograma é abatido. Por exemplo no caso de  $A_0 = 5$  o hidrograma sobe rapidamente e desce da mesma forma acusando uma sensibilidade grande.

Ao diminuir o parâmetro  $A_1$  existe uma pequena tendência a aumentar o pico, mas a característica principal

Tabela 5.3

Hidrograma	Kulandswamy			Muskingum		Função objetiva (m <sup>3</sup> /s)		Diferença entre os métodos (%)			
	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	X	K	Kul.	Musk.	Volume 1	F.Objet 2	Picos 3	
										Kul.	Musk.
H1	17,13	-84,80	5,10	0,111	13,18	0,167	0,183	0,50	9,4	0	0
H2	8,56	7,63	1,90	0,074	11,60	0,283	0,242	-0,82	-14,5	2,85	1,62
H3	8,54	-22,16	5,87	0,398	14,88	0,146	0,147	0,02	18,4	4,20	4,30
H5	8,60	-51,70	3,33	0,085	10,59	0,262	0,386	2,55	36,6	0,60	10,00
H6	17,66	-54,30	3,90	0,226	21,93	0,359	0,395	0,84	9,1	0,20	0
H9	10,51	18,80	2,87	0,234	14,87	0,391	0,399	0,13	2,0	1,00	3,80

Observações da tabela 5.3 estão na página seguinte.

$$1 - \text{Volume} = \left( \frac{\text{F.O.M.} - \text{F.O.K.}}{\text{V.O.}} \right) \cdot 100$$

$$2 - \text{F. Objet.} = \left( \frac{\text{F.O.M.} - \text{F.O.K.}}{\text{F.M.}} \right) \cdot 100$$

$$3 - \text{Picos} = \left| \frac{Q_{\text{CAL}} - Q_{\text{OB}}}{Q_{\text{OB}}} \right| \cdot \text{MAX}$$

F.O.M. - função objetiva calculada com o modelo Muskingum

F.O.K. - função objetiva calculada com o modelo Kulandswamy

N - número de dias do Hidrograma

F.M. - o maior valor da função objetivo entre os modelos para cada hidrograma.

$Q_{\text{CAL}}$  - vazão máxima calculada

$Q_{\text{OB}}$  - vazão máxima observado

do parâmetro é de deslocar o hidrograma. No caso da diminuição o hidrograma é adiantado, enquanto que a medida que este parâmetro aumenta, a tendência é de atrasar o hidrograma. (figura 5.12).

No caso do parâmetro  $B_0$ , que tem influência sobre o hidrograma de entrada, produz com o aumento deste valor um deslocamento do hidrograma, atrasando o mesmo. No caso do exemplo da figura 5.13 observamos que com o aumento do parâmetro o pico à esquerda diminui, enquanto que o pico da direita tende a aumentar, ilustrando um deslocamento do volume para a direita.

#### 5.2.5 - Período completo

Adotado o critério b de análise, foram feitos 4 testes com diferentes valores de partida para os parâmetros, tanto do modelo de Kulandswamy como o Muskingum. Esses testes foram efetuados otimizando o período de dois anos de dados, através do método de otimização rotação das coordenadas.

Na tabela 5.4 apresentamos um resumo dos testes, onde pode-se observar uma pequena variação da função objetiva, no resultado final das diferentes tentativas. Não apresentamos maior precisão no resultado da função objetiva, pois seria muito preciosismo, já que a simplificação estabelecida cobriria uma melhor precisão.

Testamos o método univariacional de otimização com o melhor resultado obtido pelos quatro testes anteriores, e como se observa na referida tabela os resultados estão bem próximos, não apresentando neste caso uma grande di-

ferença entre os métodos, o que possivelmente ocorrerá quando o número de parâmetros para ser ajustado aumentar, sendo neste caso mais aconselhável o uso do método da rotação das coordenadas, aconselhado pela bibliografia.

O resultado obtido pelo método de Kulandswamy é melhor que o de Muskingum, mas em termos de função objetiva a precisão de um modelo em relação ao outro representa somente 0,15% do volume total observado.

#### 5.2.6 - Análise de sensibilidade do modelo Kulandswamy

Utilizando do hidrograma H2, testamos a sensibilidade do modelo Kulandswamy, modificando percentualmente um parâmetro no sentido negativo e positivo, em relação ao valor ótimo obtido, mantendo os demais constantes. A partir desses resultados plotamos nas figuras 5.14 e 5.15 a variação da função objetiva em relação às variações percentuais.

Na figura 5.14 são apresentadas as variações da função objetivo em relação aos parâmetros  $A_0$  e  $B_0$ , enquanto que na figura 5.15 apresentamos a variação em relação a  $A_1$ .

Pode-se observar claramente que o modelo é grandemente sensível ao parâmetro  $A_0$ , principalmente quando diminui em relação ao resultado ótimo, pois a medida que este parâmetro se aproxima de um valor negativo os resultados tendem a valores absurdos fisicamente, ou seja vazões negativas. No caso do parâmetro  $B_0$  a tendência é semelhante, mas menos acentuada, apresentando-se uma sensibilidade menor. O parâmetro  $A_1$  influe muito pouco no comportamento do modelo, pois enquanto o parâmetro é reduzido em 500% a variação da

função objetiva é de apenas 50%. No sentido positivo da variação do parâmetro em relação ao ótimo, a curva é mais suave ou seja com menos sensibilidade. No ramo esquerdo da figura observa-se uma brusca inclinação da curva quando o decréscimo encontra-se entre 1000% e 2000%, isso decorre do fato já mencionado de que o parâmetro começa a provocar resultados absurdos nos valores das vazões.

### 5.3 - Conclusão

O critério normal de análise de propagação pelo modelo de Muskingum é o de isolar hidrogramas e ajustar o valor do parâmetro  $X$ , relacionando a vazão calculada com o armazenamento nos diferentes intervalos de tempo, procurando o valor do parâmetro que aproximasse mais convenientemente as duas laçadas da curva resultante, como figurado quando da descrição do modelo. Ajustado o conveniente valor de  $X$ , as diferentes inclinações da curva interpoladora definem um ou mais valores do parâmetro  $K$ . Ao adotar esse critério estamos admitindo que todo o período a ser propagado utilizará dos mesmos parâmetros, o que pode não ser conveniente, dependendo do objetivo a ser seguido. Quando o problema é a prevenção contra cheias o objetivo é a determinação de um bom ajuste para os hidrogramas de cheias, mas quando o objetivo é procurar uma situação média como foi o nosso caso neste trabalho, ao isolar os hidrogramas e determinar os parâmetros estes estão sendo influenciados pelas vazões altas que é predominância de um pico. Procuramos ajustar o período completo utilizando as técnicas citadas, observando, após o resultado obtido a aderência entre as curvas, procurando dar um retoque final. O resultado obtido pela otimização fortuitamente apresentou uma conveniente aderência entre as curvas, não sendo possível melhorar o resultado. Os resultados dos dife-

rentes testes apresentados na tabela 5.4 pouco diferem em termos gráficos, principalmente os dois primeiros e o último. Adotamos como resultado o correspondente ao teste 2, já que se aproxima mais dos resultados obtidos pelos hidrogramas isolados. Nas figuras 5.16 e 5.17 apresentamos os hidrogramas calculado e observado para o período referido de dois anos. O hidrograma calculado é o obtido pelo modelo Kulands wany, já que a grande proximidade entre este hidrograma e o obtido por Muskingum impossibilitou o traçado do último.

Tabela 5.4

	R E S U L T A D O S							P A R Â M E T R O S   D E   P A R T I D A				
	K U L A N D S W A M Y				M U S K I N G U M			K U L A N D S W A M Y			M U S K I N G U M	
	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	F.O	X	K	F.O	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	X	K
Teste 1	18,27	-77,17	2,89	0,625	0,080	17,874	0,632	10,0	80,0	2,0	0,2	20,0
Teste 2	17,78	-73,43	2,83	0,625	0,075	17,747	0,632	18,0	-70,0	2,9	0,5	24,0
Teste 3	19,209	-84,98	3,00	0,626	0,085	17,874	0,632	30,0	-100,0	15,0	1,0	30,0
Teste 4	16,345	1,023	1,525	0,632	0,085	17,902	0,632	1,0	1,0	1,0	0,7	15,0
Teste univariacinal	18,00	-75,6	2,9	0,625	0,085	18,096	0,632	18,0	-70,0	2,9	0,7	15,0

## 6 - Conclusões finais e recomendações

Este trabalho mostrou que as técnicas de otimização podem ser úteis na análise de um trabalho hidrológico. A vantagem principal dessas técnicas é a quantidade de testes dirigidos a um mínimo que podem ser feitas, sem que tenhamos que realimentar novamente o computador, pois um dos problemas maiores quando tentamos ajustar um modelo, observando o resultado a cada tentativa, é o tempo de acesso a um computador, que aumenta muito o tempo total do ajuste do modelo. Essas técnicas podem levar o hidrólogo a um ponto do ajuste do modelo que diminua o tempo utilizado para isso e melhore os resultados.

É muito importante num trabalho dessa natureza, a qualidade dos dados, pois dados muito discrepantes podem levar o resultado do ajuste para um resultado irreal já que o processo matemático não distingue um dado bom de um ruim. Nesse caso a observação do hidrólogo deve conduzir o ajuste a um resultado prático correto.

A desvantagem desses métodos é que ao procurar um mínimo o método procura diminuir uma função que dificilmente retrata todas as nuances do problema hidrológico, por isso que é importante junto com o trabalho efetuado por esses métodos que o hidrólogo analise os resultados, pois em certos casos o resultado matemático pode convergir para uma solução hidrológica absurda. Para resolver esse problema deve-se fazer novas tentativas.

Com relação ao modelo Kulandswamy, na aplicação que fizemos do mesmo, mostrou que a maior precisão dos resultados em relação ao modelo Huskingum é muito pequena,

sendo muito caro o preço para introduzir um parâmetro a mais para resolver este problema, no entanto como a nossa aplicação se restringiu a um caso, essa não deve ser uma conclusão definitiva, mas sim um caminho para outros testes onde se poderá concluir da validade de se melhorar a equação de armazenamento, mesmo introduzindo as funções dos parâmetros indicadas no item 5.2.4. A diferença entre os modelos nos hidrogramas isolados é apresentada na tabela 5.3, onde o resultado mais discrepante em volume indica uma diferença de 2,55%. O sinal positivo indica que a diferença é favorável ao modelo Kulandswamy. No caso da otimização dos dois anos, a discrepância foi de somente 0,15% favorável ao modelo referido. A diferença entre as vazões máximas calculadas e observadas para os dois modelos, nos hidrogramas isolados, também foram pequenas.

Do ponto de vista da otimização o modelo Kulandswamy utiliza em média 20% a mais de iterações em relação ao modelo Muskingum, devido ao acréscimo de um parâmetro. Esta porcentagem é variável, pois depende essencialmente do ponto de partida.

Recomendamos os seguintes trabalhos como futuras pesquisas neste sentido:

1. Testar os dois modelos referidos em outras bacias, com uma série maior de dados, para procurar determinar as funções parâmetros.
2. Estabelecer limites de variação para as variáveis dos métodos de otimização, o que evitará problemas sérios, como um valor absurdo de um parâmetro, após a otimização.
3. Aplicação desse métodos de otimização em modelos pluvio - hidrológicos, estabelecendo uma metodologia prática de análise.

4. Estudar as possibilidades práticas de avaliação da contri  
buição em percurso, e como uma possibilidade propomos o  
uso do hidrograma unitário (quando for possível usá-lo),  
para avaliar esta contribuição.

# RELAÇÃO : CONTRIBUIÇÃO EM PERCURSO - FUNÇÃO OBJETIVA

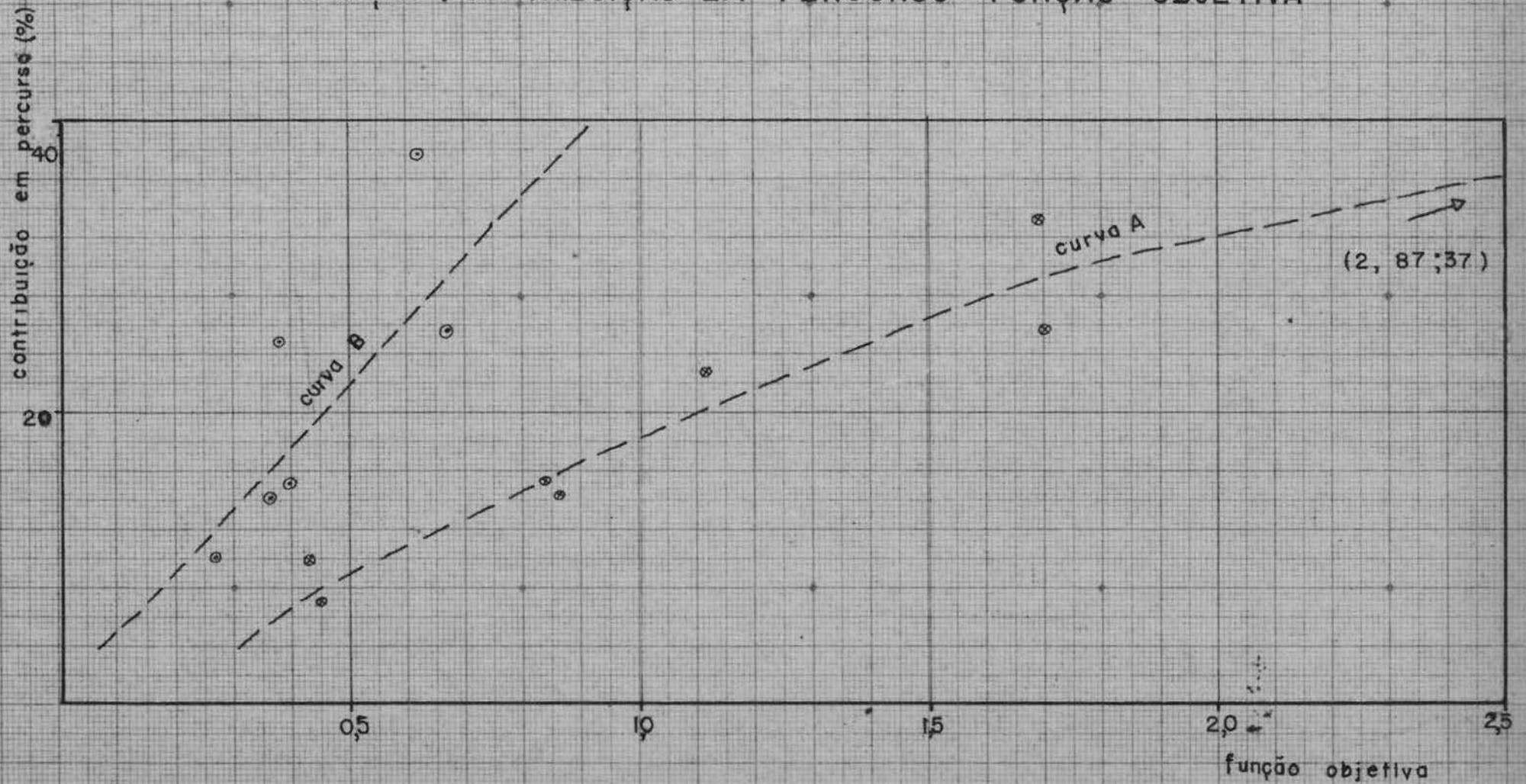
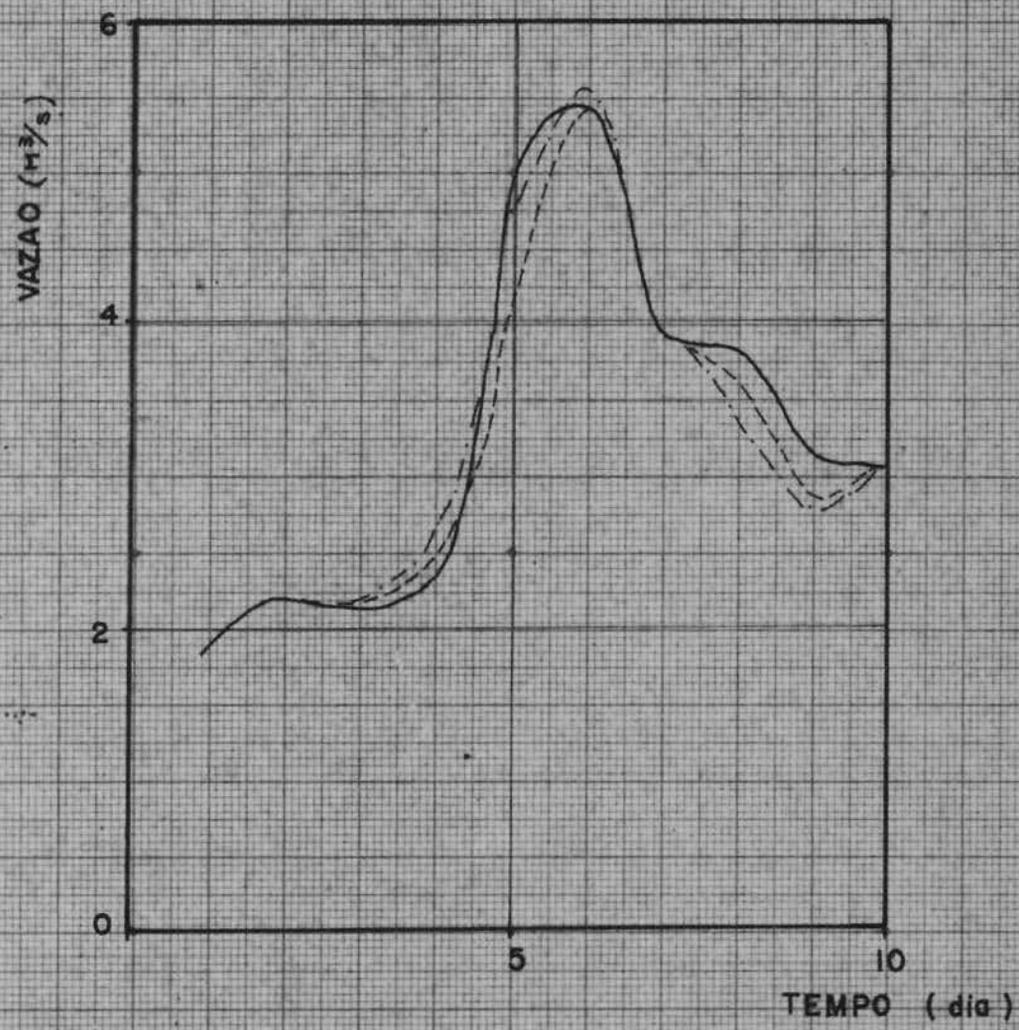


FIGURA 5. 1

# HIDROGRAMA I

PERIODO I A 10/1/1968



--- MUSKINGUM  
... KULANDSWAMY  
— OBSERVADO

FIGURA 5.2

# HIDROGRAMA 2

PERIODO 21 A 28 / 6 / 1968

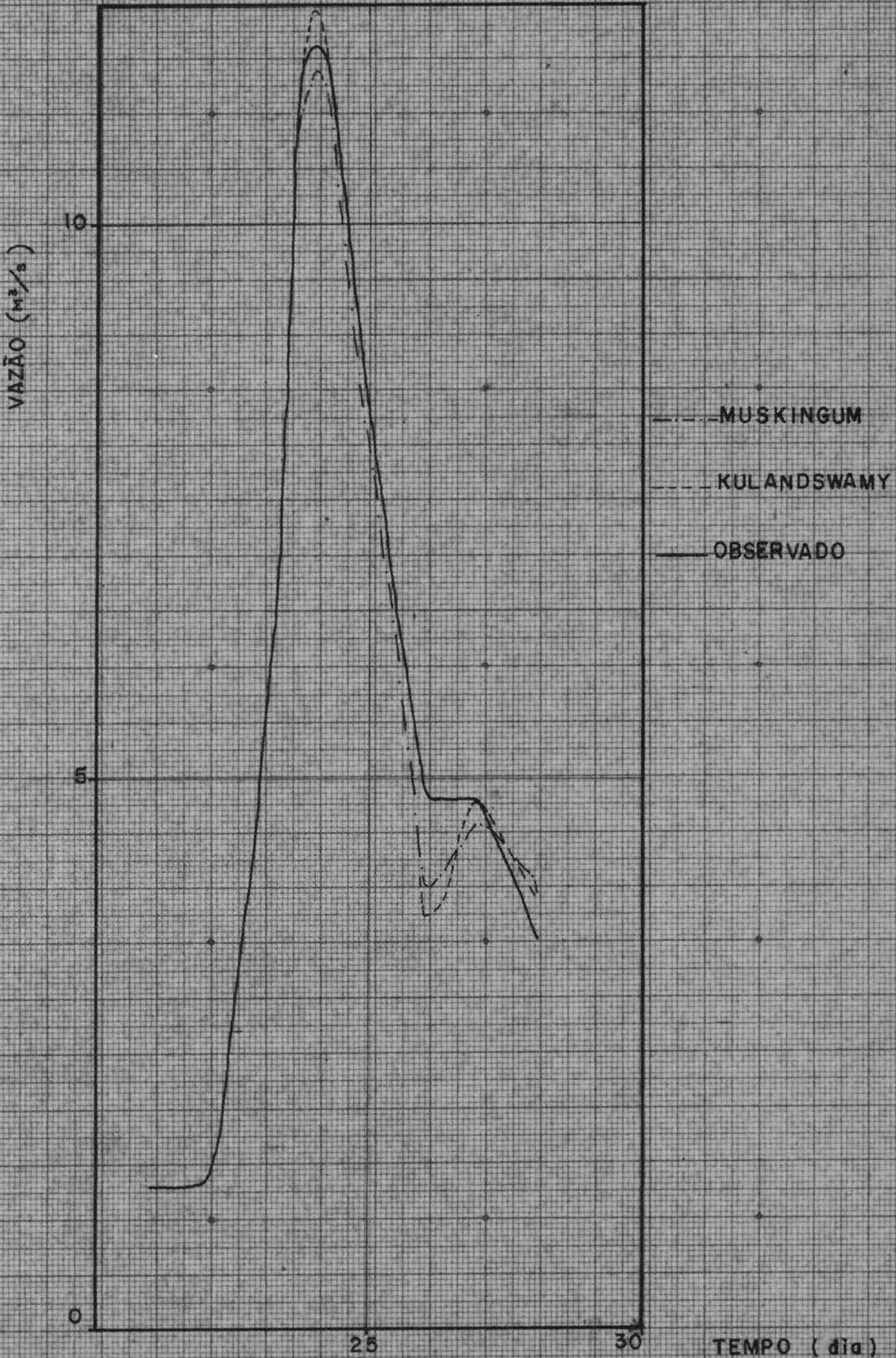


FIGURA 5.3

# HIDROGRAMA 3

PERIODO 16 A 28/1/1968

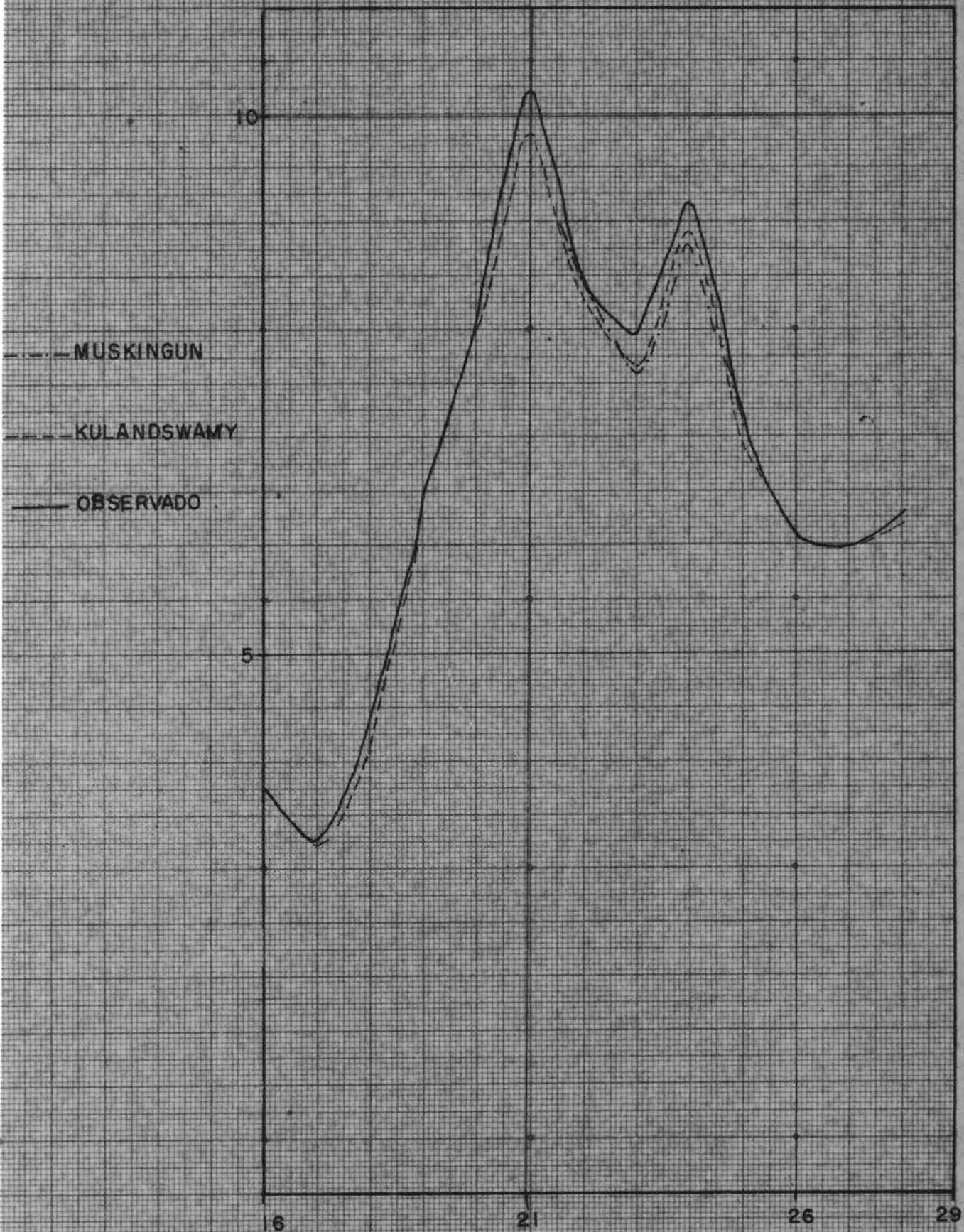


FIGURA 5.4

# HIDROGRAMA 5

PERIODO 23/5 A 1/6 /1969



FIGURA 5.5

# HIDROGRAMA 6

PERIODO 7 A 29/9/1969

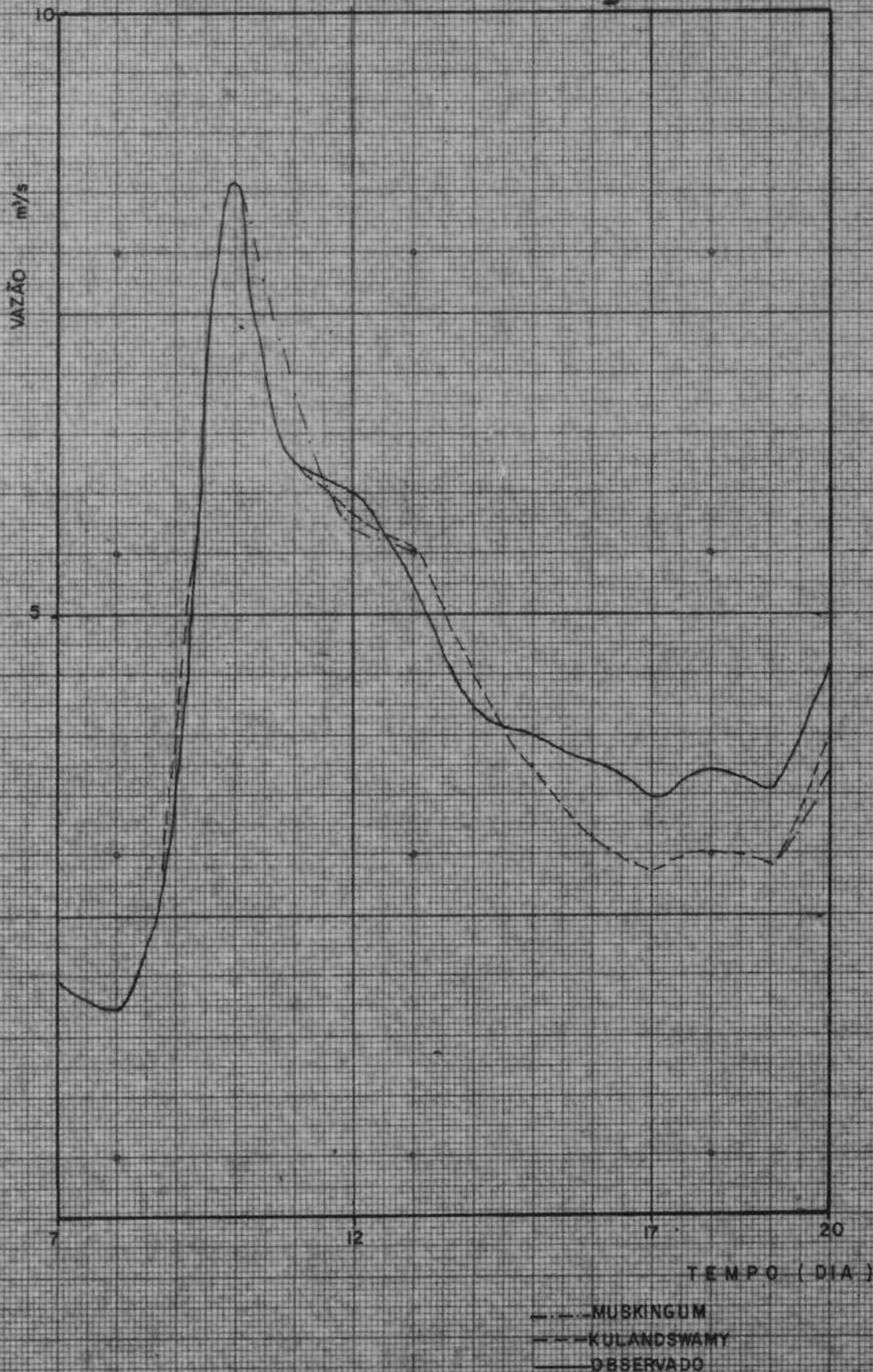


FIGURA 5.6

# HIDROGRAMA 9

PERIODO 19 A 31/7/69

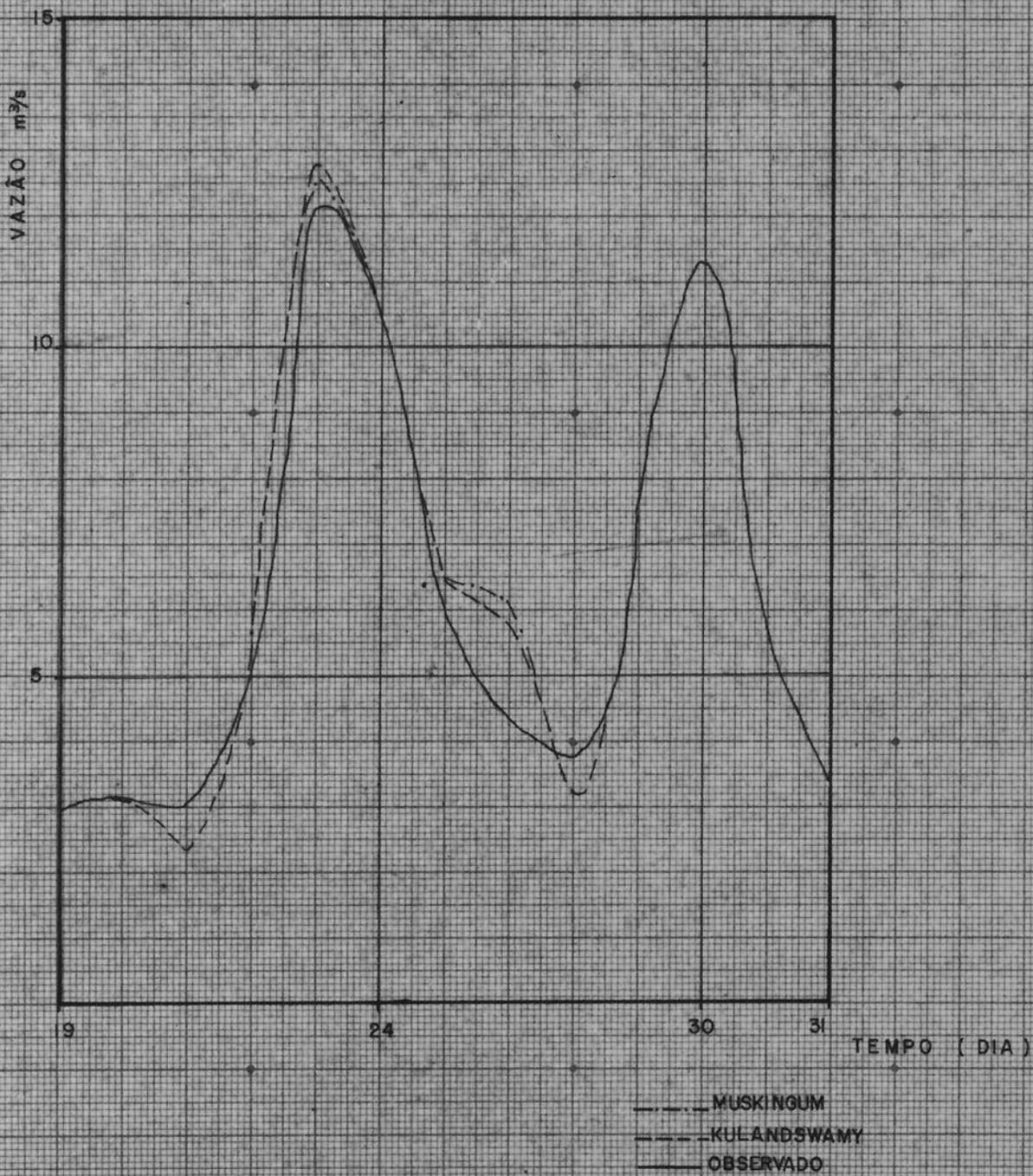


FIGURA — 5.7

200 L. 1110 - 219  
C. F. B. 1011 1324



RELAÇÃO : PARAMETROS — VAZÃO MÁXIMA DO HIDROGRAMA DE JUSANTE

$A_o = f(Q)$

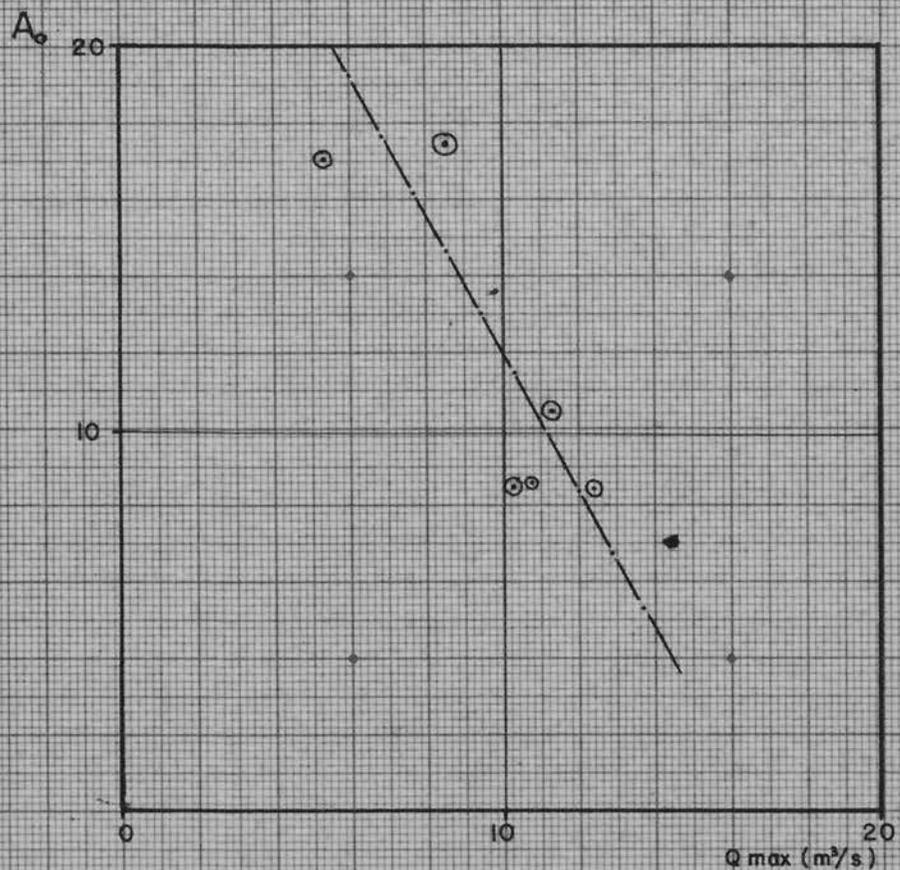


FIGURA — 5. 8

$B_o = f(Q)$

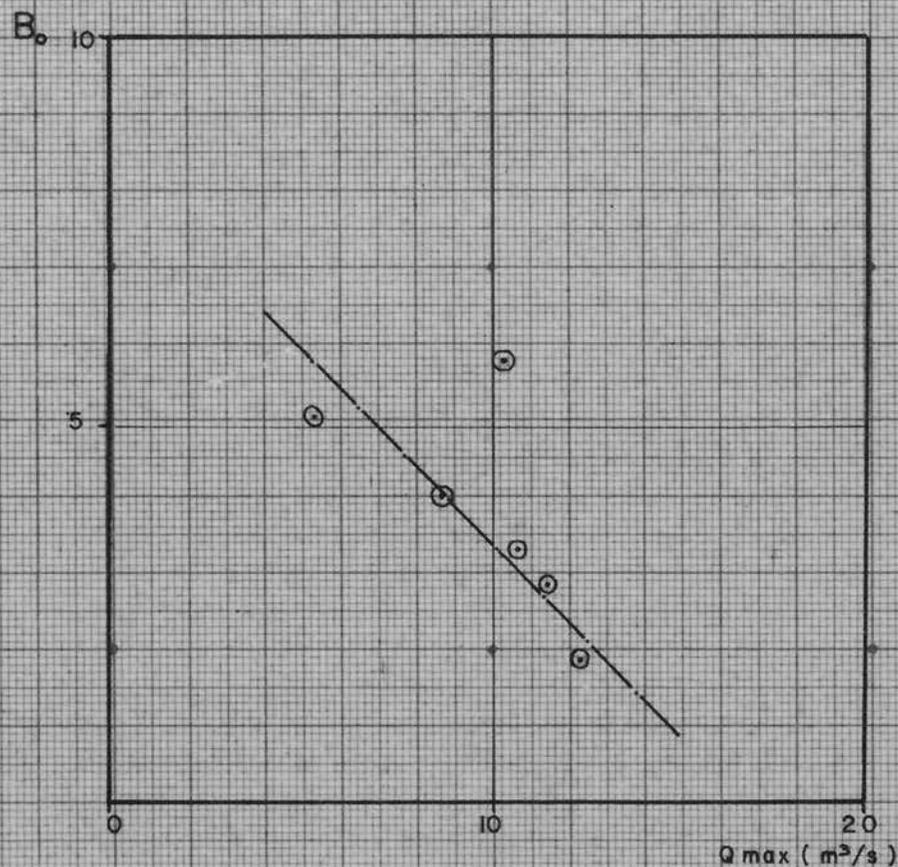
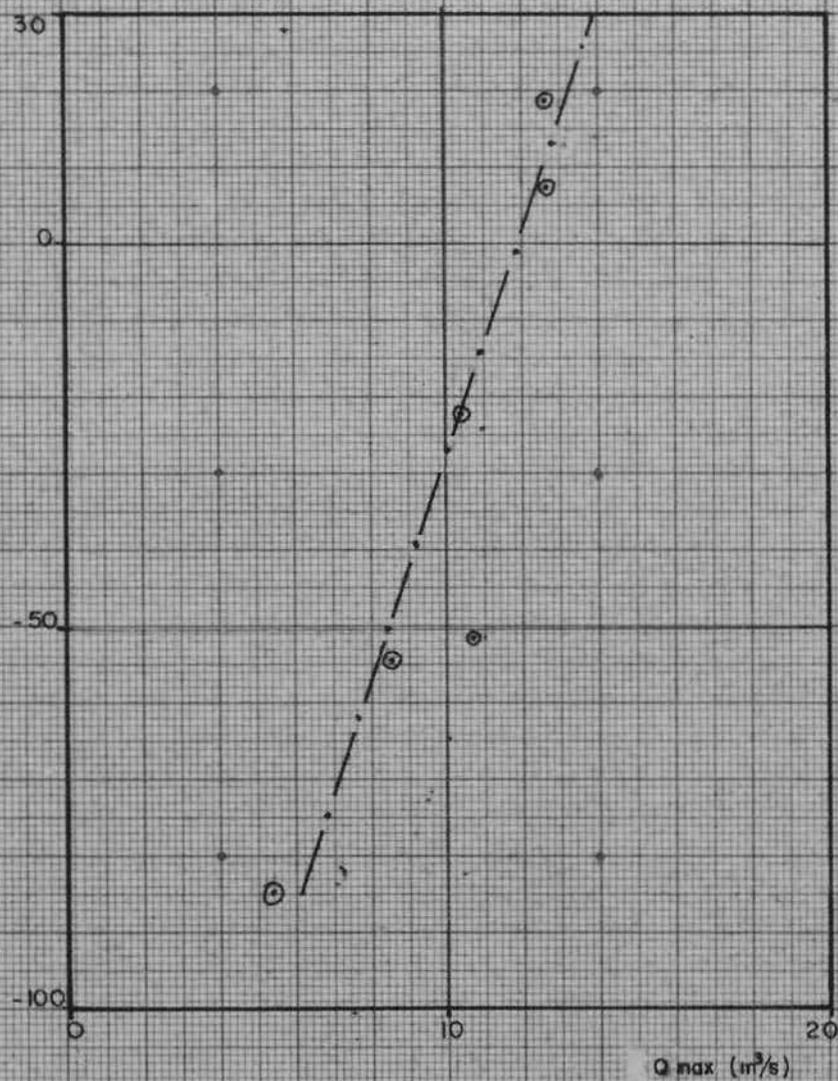


FIGURA — 5. 9



RELAÇÃO PARAMETROS VAZÃO  
MÁXIMA DO HIDROGRAMA DE  
JUSANTE

$$A_i = f(Q)$$

FIGURA 5.10

# VARIAÇÃO DO PARAMETRO

$A_0$

(HIDROGRAMA 21 A 28 / 6 / 1968)

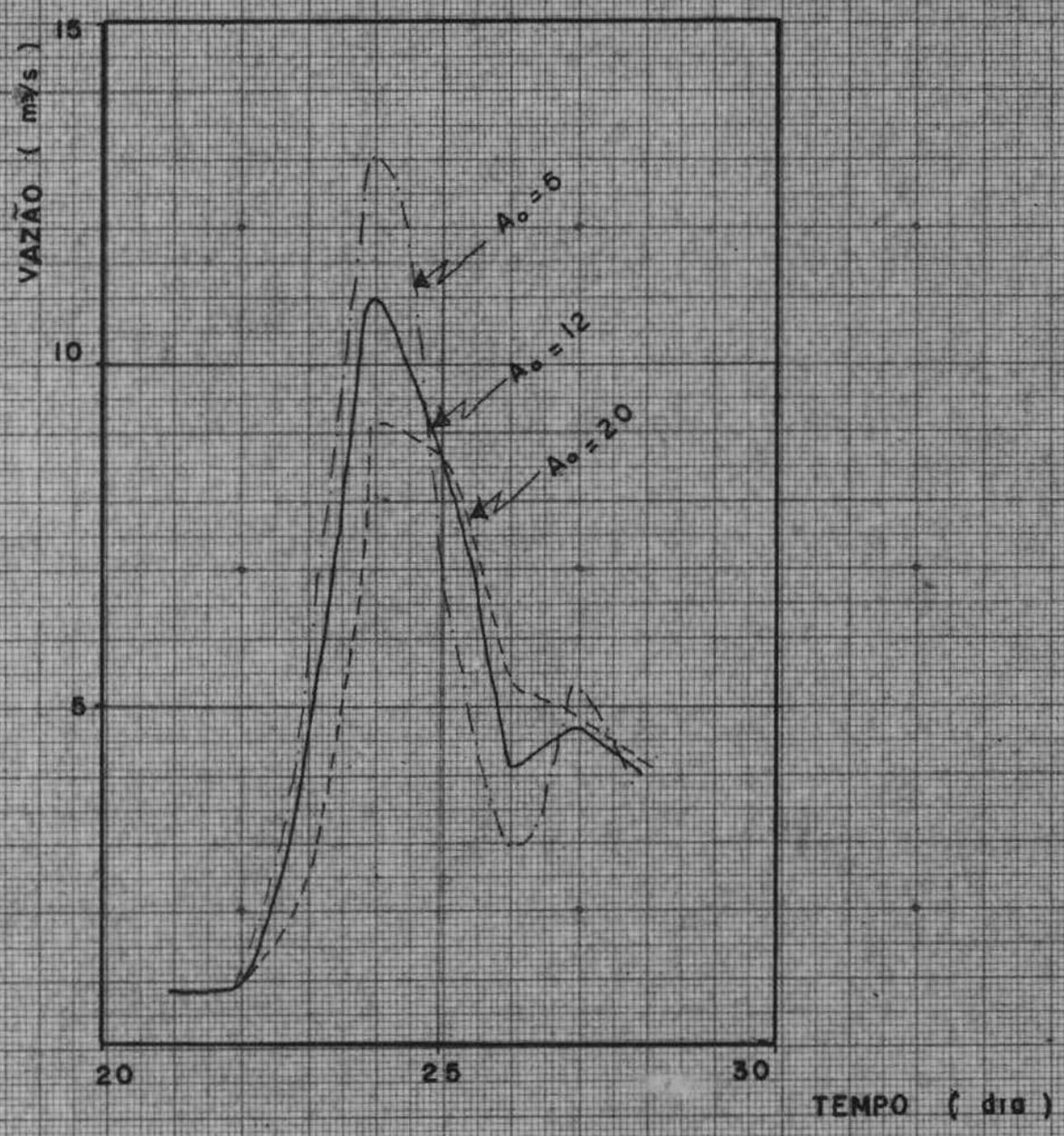


FIGURA 5.11

# VARIAÇÃO DO PARAMETRO

## $A_1$

( HIDROGRAMA 21 28 / 6 / 1968 )

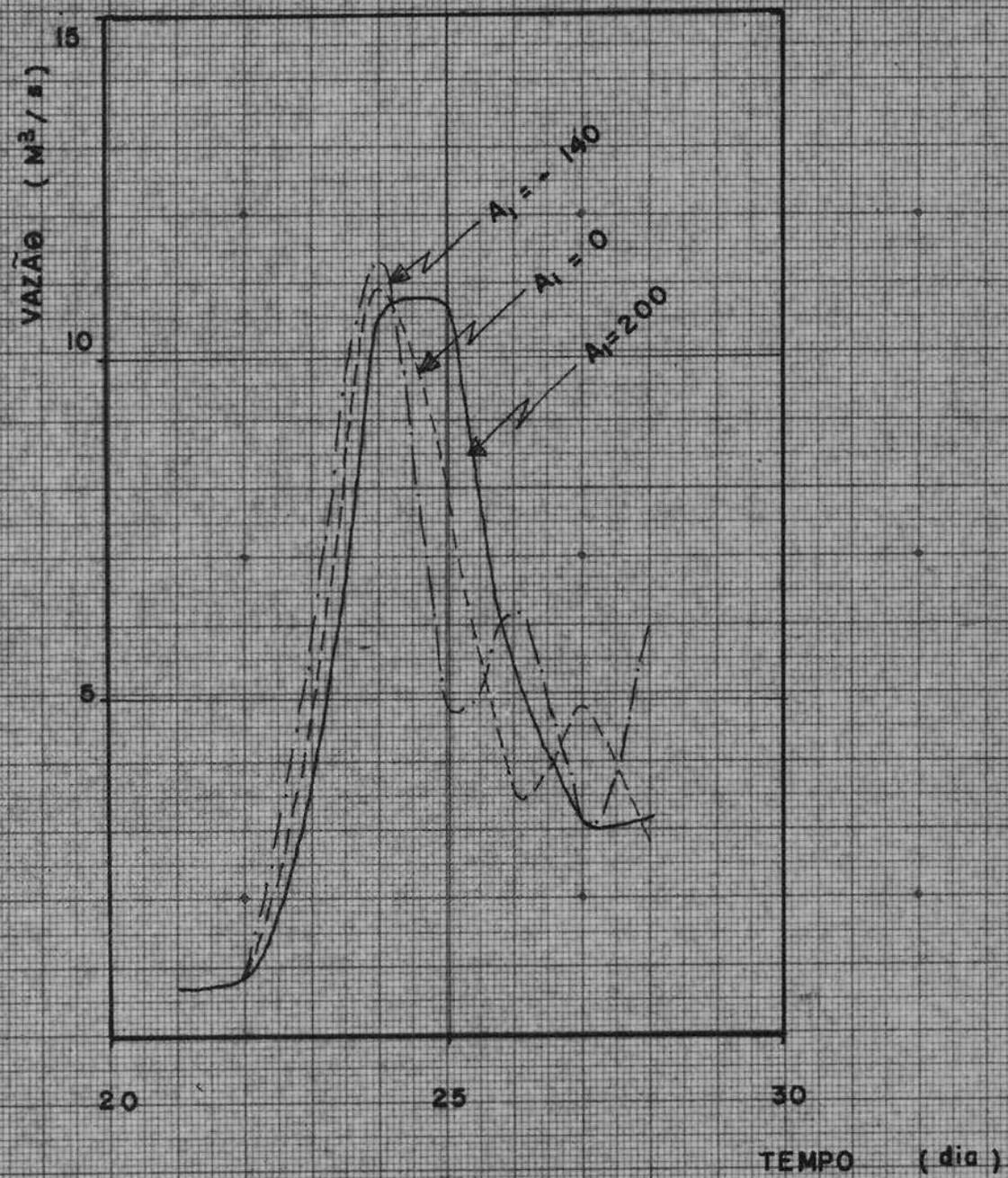


FIGURA 5.12

# VARIAÇÃO DO PARAMETRO

$B_0$

(HIDROGRAMA 21 A 28/6/1968)

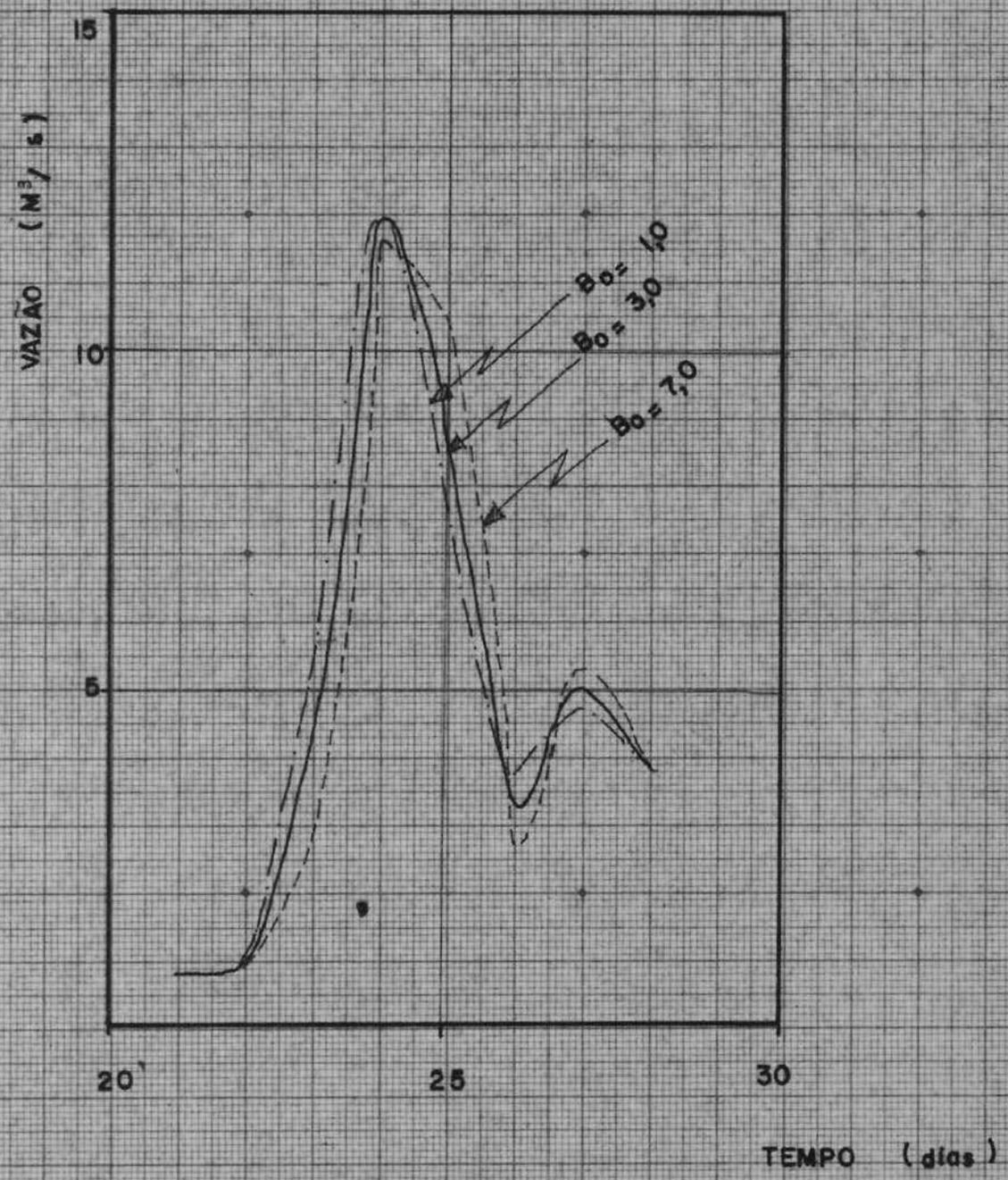
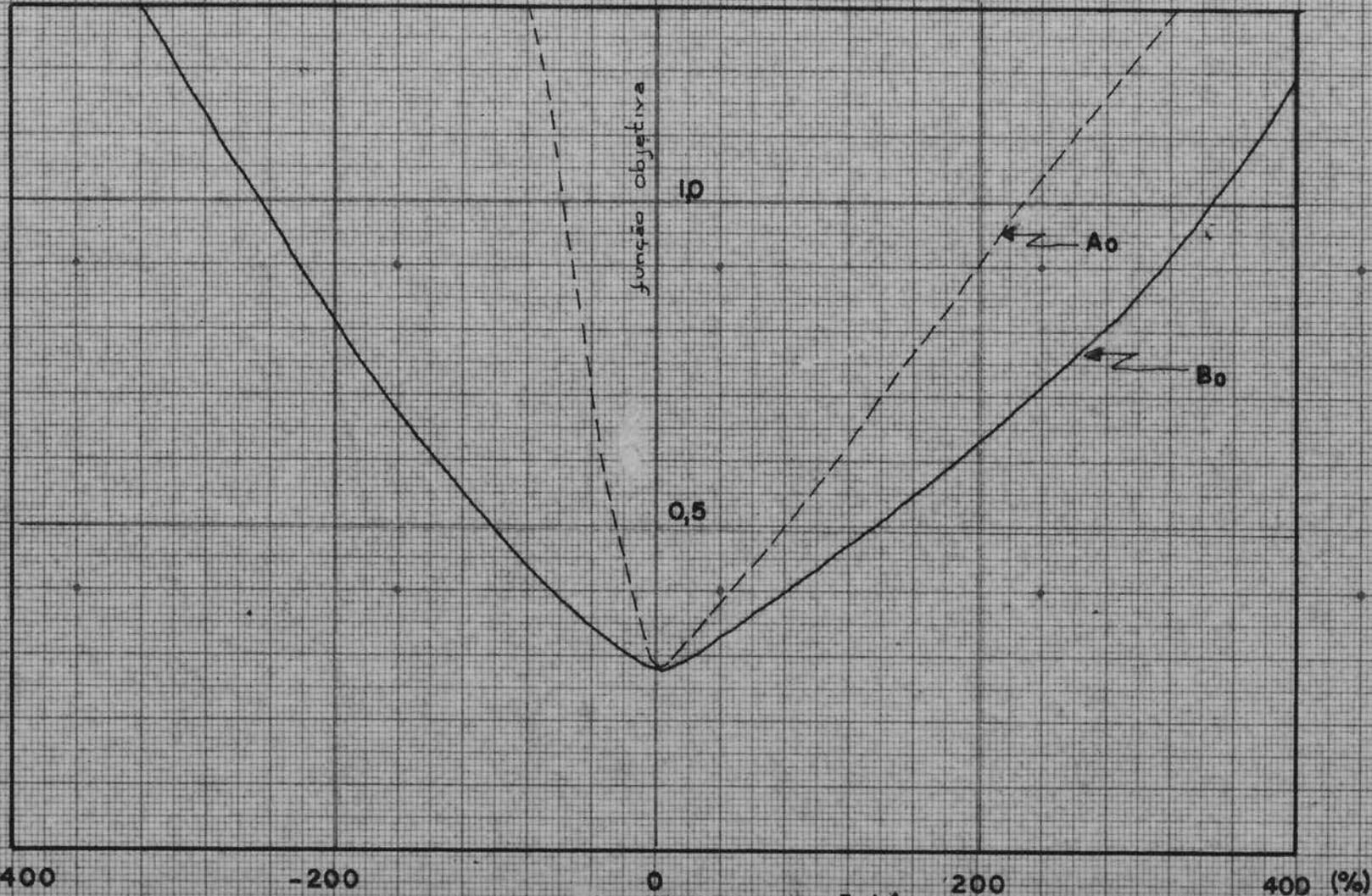


FIGURA 5 13

# SENSIBILIDADE DO MODELO

$A_0$  e  $B_0$



FIGURA

5.14

007

# SENSIBILIDADE DO MODELO

$A_i$

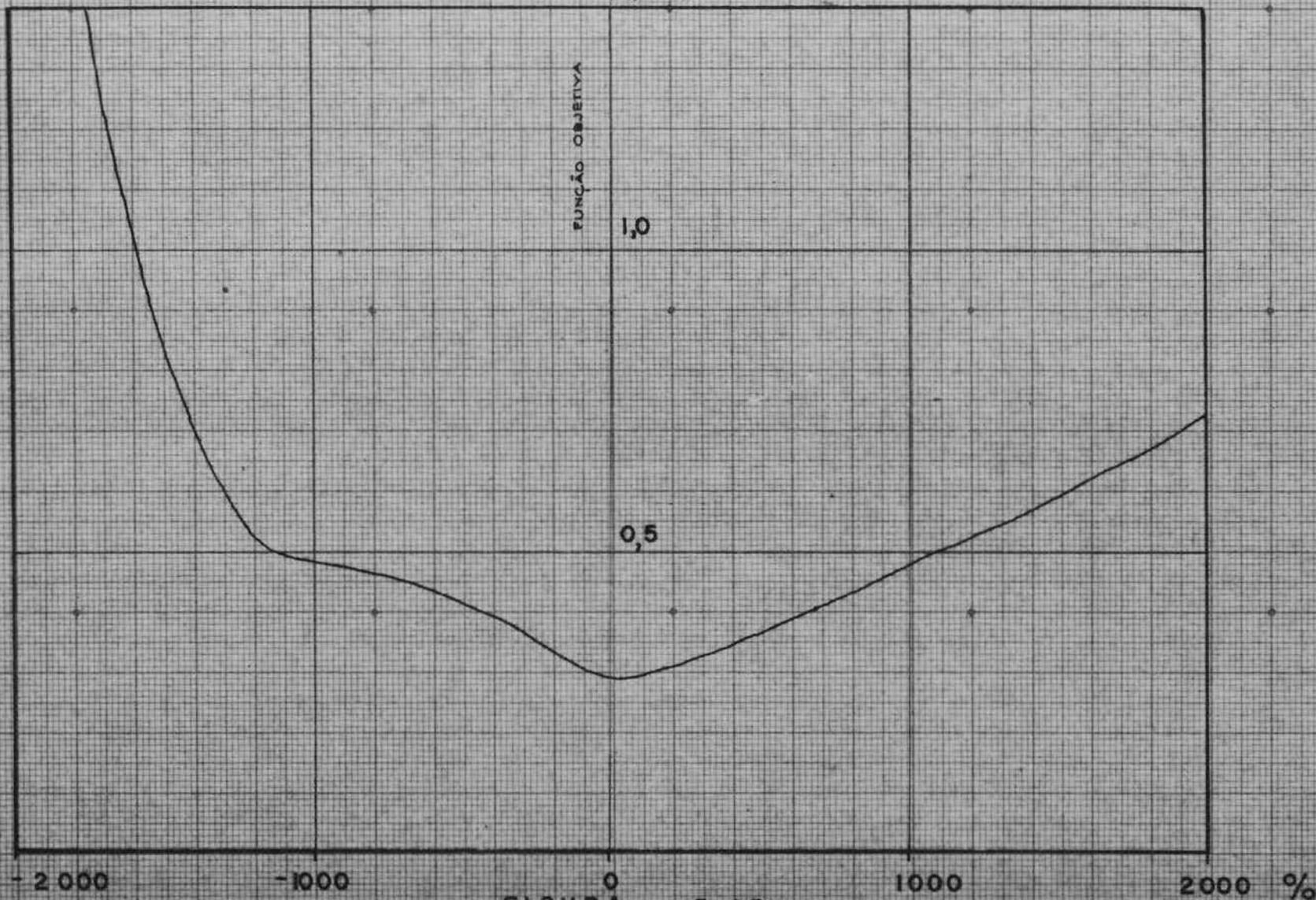


FIGURA 5.15

107

HIDROGRAMA CALCULADO E OBSERVADO  
ANO 1968

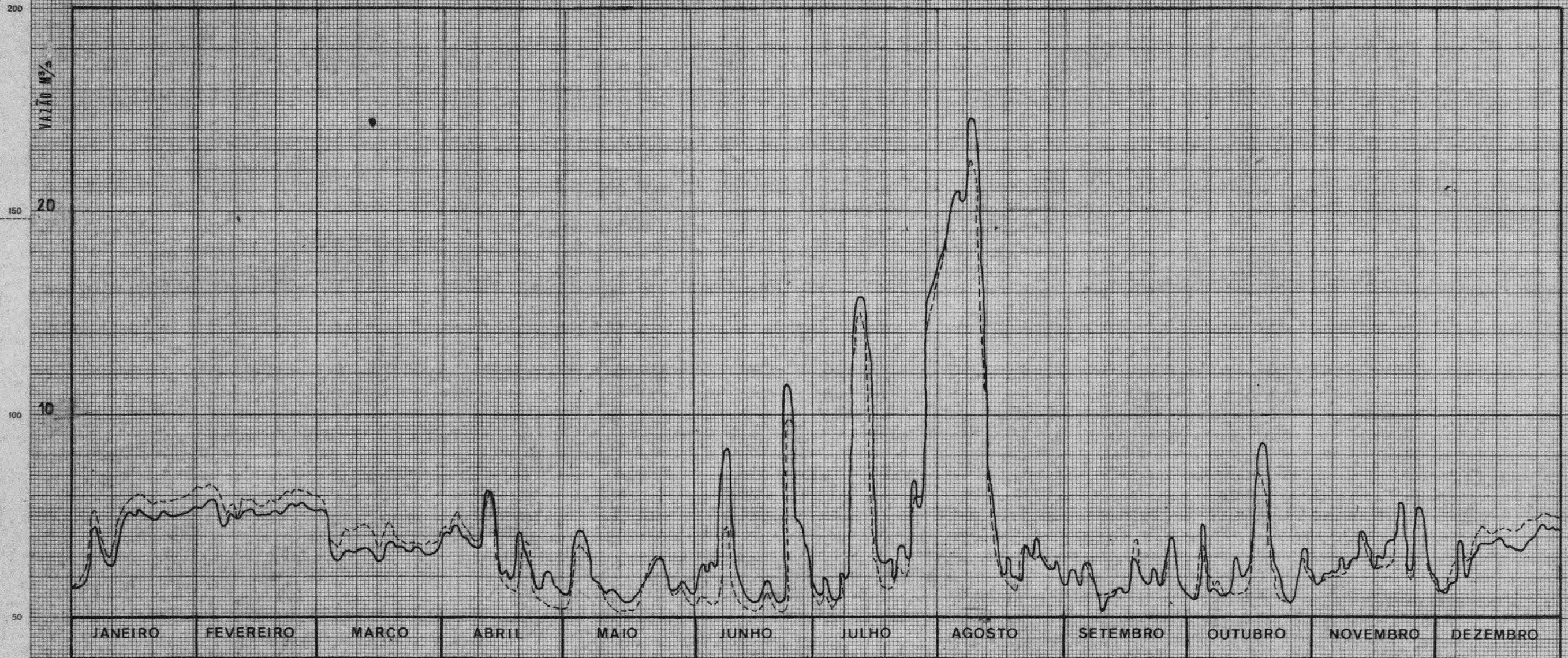


FIGURA 5.16

— VAZÕES OBSERVADAS  
- - - VAZÕES CALCULADAS

HIDROGRAMA CALCULADO E OBSERVADO  
ANO 1969

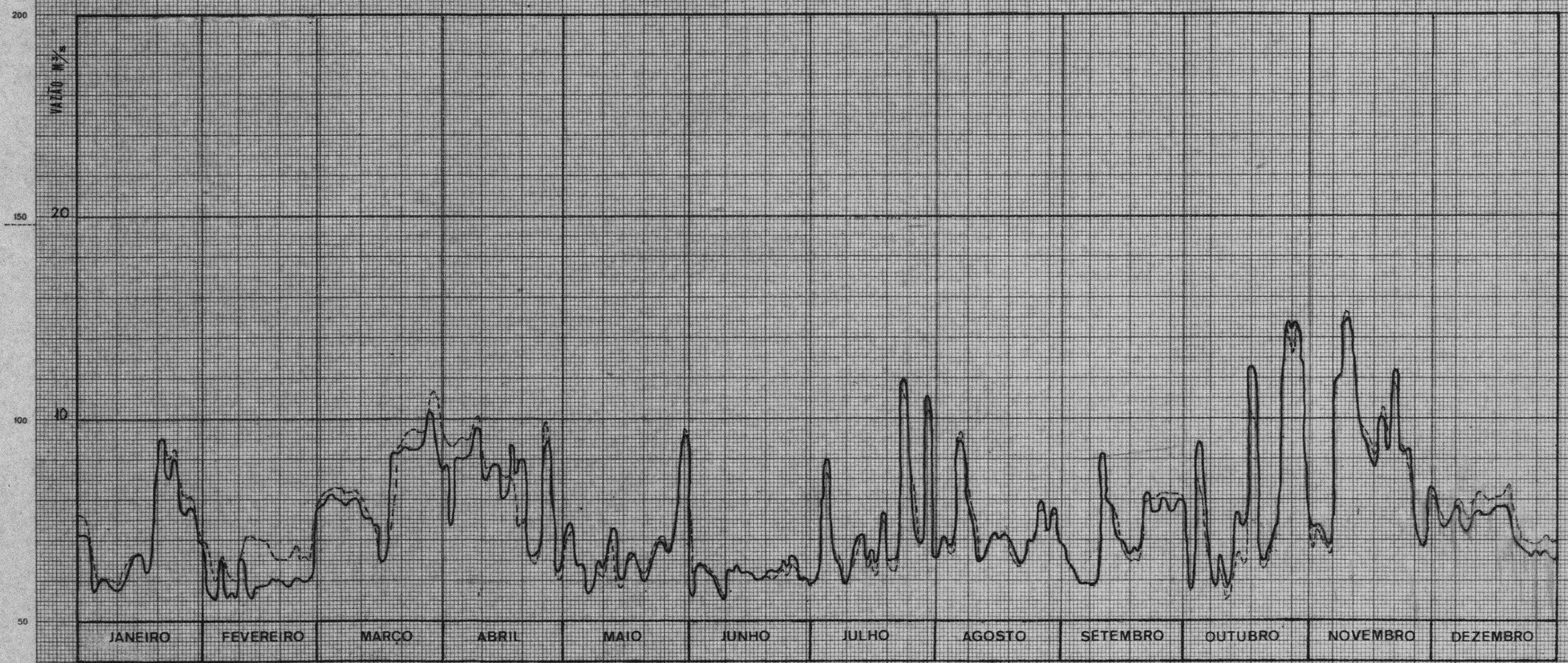


FIGURA 5.17

— VAZÕES OBSERVADAS  
- - - VAZÕES CALCULADAS

## 7 - Descrição das rotinas de otimização, de propagação e do programa principal

### 7.1 - Introdução

Este programa propaga vazões em um trecho de um rio e admite nos cálculos até dois afluentes. No caso do trecho possuir mais do que duas contribuições em percurso, deve-se modificar as dimensões das seguintes variáveis: QAFL, ITEA e IFC.

O programa é constituído de dez subprogramas e foi escrito em FORTRAN IV. Utiliza aproximadamente 6500 palavras e foi desenvolvido num computador B6700, sendo compatível para outras máquinas como IBM/360 e IBM/370.

O programa prevê até uma série de 732 valores de vazão. O intervalo de tempo mínimo é uma hora, ou seja, vinte e quatro valores por dia. Caso seja necessário para o usuário utilizar o programa para um período maior, devem ser alteradas as dimensões das seguintes variáveis: QENT, QCALC, QAFL.

### 7.2 - Subprogramas

São os seguintes sub-programas utilizados neste programa:

- MUSKI - utilizado para calcular as vazões pelo método de Muskingum.
- SSARR - utilizado para calcular as vazões pelo método SSARR.
- KULA - utilizado para calcular as vazões pelo método apresentado por Kulandswamy.
- AFLU - utilizado quando o trecho em estudo possui afluentes e este afluente contribui somente na seção de jusante.

- INVA - utilizado para otimizar os parâmetros dos modelos de propagação pelo método univariacional.
- FOBJ - utilizado para definir e calcular a função objetiva escolhida pelo usuário dentre as disponíveis.
- AUX - utilizado como subprograma auxiliar do subprograma ROSEM, modifica os parâmetros numa determinada direção.
- FUNC - utilizado para definir o modelo de propagação para os subprogramas de otimização.
- ROSEM - utilizado para otimizar os parâmetros dos modelos de propagação pelo método das rotações de coordenadas (Rosembrock).
- PLOTA - utilizado para plotar os hidrogramas
- DIA - utilizado para definir o número do primeiro e último dia de cada mes.

Os subprogramas utilizam do comando COMMON, para transferir os valores das variáveis, entre si e para o programa principal.

Na figura 7.1 apresentamos um fluxograma geral da estrutura do programa principal, nas figuras 7.2 a 7.6 apresentamos os fluxogramas dos subprogramas.

### 7.3 - Descrição dos cartões de dados

Quando nos cartões a seguir houver um asterisco, indica que os dados desse cartão devem ser perfurados em formato livre.

No formato livre as variáveis podem ser perfuradas em qualquer coluna do cartão, desde que após o número, seja perfurada uma vírgula. A posição da vírgula para valores reais (ponto flutuante), desde que estejam com o ponto

decimal, pode ser em qualquer posição, entre o número e o seguinte. No caso de inteiros, a vírgula deve estar perfurada logo após o último dígito do número.

Cartões

Descrição

A Trêz cartões onde o usuário poderá livremente perfurar o que deseja que saia impresso no início da impressão dos resultados.

B\* MODELO - (variável inteira). Indica qual o modelo de propagação que o usuário deseja.

- 1 - modelo Kulandswamy
- 2 - modelo Muskingum
- 3 - modelo SSARR

IOTIMI - (variável inteira). Indica qual o método de otimização a usar.

- 1 - Não otimiza, calcula com os parâmetros lidos
- 2 - Método de rotação das coordenadas
- 3 - Método univariacional

MESMO - (variável inteira). Quando na execução do programa em teste for utilizar dados lidos no teste anterior deve-se indicar um valor para a variável.

- 1 - usará dados já lidos em sequência anterior
- 0 - lerá dados.

IBLOTA - (variável inteira). Indica como deve ser a plotagem.

- 1 - não plota os hidrogramas
- 2 - plota os hidrogramas
- 3 - plota o hidrograma de entrada no lugar do hidrograma calculado.

IFO - (variável inteira). Indica qual a função objetiva a ser utilizada.

- 1 - função objetiva  $F_1$
- 2 - função objetiva  $F_2$
- 3 - função objetiva  $F_3$
- 4 - função objetiva  $F_4$

PRINC - (variável inteira). Indica se o usuário deseja imprimir os resultados de cada ciclo de iteração de otimização.

- 0 - não imprime
- 1 - imprime

C\* X - arranjo que contém em cada posição um parâmetro do modelo de propagação escolhido. A ordem está especificada na tabela. Esses valores são de partida no caso da otimização, e devem ser diferentes de zero.

X	K	M	S
1	$A_0$	X	MK
2	$A_1$	K	ALFA
3	$B_0$		PAPA

D\* Este cartão existe se MESMO = 0

IOS - (variável inteira). Indica se vão ser lidas vazões na saída (vazões observadas).

0 - não

>0 - sim

= 1 não pondera as diferenças de volumes entre a entrada e a saída do trecho.

= 2 acrescenta a diferença de volumes no hidrograma de entrada.

= 3 subtrai a diferença de volume do hidrograma de saída.

IAFL - número de afluentes, (variável inteira)

ITEA - (variável inteira), arranjo com o número de elementos igual a IAFL + 1 e na ordem de cada afluente indica se o afluente contribui à montante ou jusante, e na última posição indica se existe contribuição à jusante.

0 - contribuição à jusante

1 - contribuição à montante

No último elemento do arranjo

0 - não existe contribuição à jusante

1 - existe

E\* Este cartão existe se MESMO = 0

YMAX - valor máximo para a escala das vazões

YMIN - valor mínimo para a escala das vazões

AT - intervalo de tempo em horas

F\* Este cartão existe se MESMO = 0

IANO - o ano dos dados que serão lidos (variável inteira)

G\* Este cartão existe se MESMO = 0

As variáveis seguintes são inteiras

MESI. - o mes de início dos dados de vazão

que serão lidos

MES2 - o mes final dos dados de vazão serão lidos

ID1 - o dia do primeiro mes onde começam os dados de vazão

ID2 - o dia do último mes onde terminam os dados de vazão.

Quando todo o período se encontra dentro de um mes, MES1 = MES2

H\*

Estes cartões existem se MESMO = 0 e devem estar perfurados segundo o formato padrão para dados hidrológicos.

colunas	especificação
1 - 8	identificação do posto
9 - 10	ano
11 - 12	mes
13 - 14	último dia do cartão, 16 para o primeiro cartão do mes e 28, 29, 30 ou 31, para o segundo cartão do mes.
15 - 16	potência utilizada para converter a vazão decimal em inteira por exemplo $10,2 = 102 \cdot 10^{-1}$ , -1 é a potência
17 - 80	vazões perfuradas segundo formato I4.

No caso de AT = 1 dia, para cada mes são utilizados 2 cartões. Deve-se colocar na seguinte ordem:

- 1º cartão do mes: vazão de entrada  
vazão observada (se houver)  
vazão dos afluentes (se houver)

Repete-se para o 2º cartão do mes, e assim sucessivamente, até o último mes especificado.

No caso de existir outros anos, repete-se as sequências desde o cartão F até este. Quando encerrar deve-se colocar um cartão com uma vírgula perfurada em qualquer coluna.

É permitido no mínimo  $AT = 1$  hora, neste caso para o período deve-se perfurar todos os dias do mes, compondo os dois cartões referidos. A ordem dos cartões deve ser a estabelecida acima, mas deve-se colocar todo o mes de um período para vir o seguinte.

- I\* Este cartão existe se IOTIMI for diferente de 2 e 4.
- ALFA - coeficiente de aceleração dos métodos de otimização (aconselhamos 1,5)
- BETA - coeficiente que indica a modificação do parâmetro percentualmente para a primeira tentativa (aconselhamos 0,04 e 0,06)
- NITMAX - número máximo de ciclos de iteração
- PRECI - precisão após a qual deve ser encerrada a otimização, entre os valores de um ciclo e outro, dos parâmetros.

#### 7.4 - Variável do programa

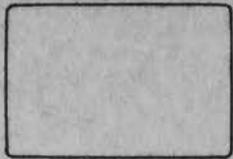
- $C_2$  - parâmetro  $C_0$  do modelo Muskingum
- $C_1$  - parâmetro  $C_1$  do modelo Muskingum
- $C_2$  - parâmetro  $C_2$  do modelo Muskingum
- CABECA - arranjo utilizado para ler e imprimir o cabeçalho do usuário.

- IENT - arranjo usado para ler em inteiro, de cartão, as vazões de entrada.
- ISAI - arranjo usado para ler em inteiro, de cartão, as vazões observadas na seção de jusante.
- ICA - arranjo usado para ler as vazões dos afluentes.
- IFC - arranjo usado para ler as potências das vazões dos afluentes.
- IFB - arranjo usado para ler as potências das vazões de entrada.
- IFA - arranjo usado para ler as potências das vazões de jusante.
- X - arranjo usado para armazenar os parâmetros do modelo usado.
- N - número de parâmetros
- ALFA - coeficiente acelerador dos métodos de otimização.
- BETA - coeficiente utilizado para a primeira modificação dos parâmetros.
- NITMAX - número máximo de ciclos a serem calculados.
- F - função objetiva
- NTI - número total de iterações.
- NIT - número de ciclos.
- NR - número de reservatórios do modelo SSARR.
- PRECI - precisão que deve ter os parâmetros entre um ciclo e outro para interromper a otimização.
- IFO - variável que assume um valor que define qual a função objetiva que deve ser utilizada.
- PRINC - define se imprime ou não os resultados de cada ciclo
- QENT - arranjo que armazena as vazões do posto de montante.
- QSAI - arranjo que armazena as vazões do posto de jusante.
- QCALC - arranjo que armazena as vazões calculadas.
- KONT - número total de vazões.
- SOB - somatório das vazões do posto de jusante para todo o período.

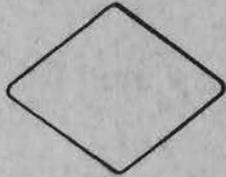
- AT - intervalo de tempo em horas
- SCAL - somatório das vazões calculadas.
- QAFL - arranjo das vazões dos afluentes.
- ITEA - arranjo que identifica se a contribuição do afluente é à montante ou à jusante.
- MODELO - define qual o modelo a ser usado.
- TANO - ano usado.
- MES1 - primeiro mes do período.
- MES2 - último mes do período.
- ID1 - primeiro dia do período.
- ID2 - último dia do período.
- I1 - primeiro dia do mes.
- I2 - último dia do mes.
- MES - mes.
- YMAX - valor máximo da escala de vazões.
- YMIN - valor mínimo da escala de vazões.
- NP - número de períodos.
- NANO - número de anos.
- SENT - somatório das vazões do posto de montante.
- IOTIMI - define o modelo de otimização que será usado.
- MESMO - identifica se o programa lerá dados de vazões.
- IPLOTA - identifica se o programa plota os resultados.
- IOS - identifica se o programa lerá as vazões observadas e se haverá retirada da contribuição em percurso.
- COEF - coeficiente que reduz ou aumenta as vazões.
- Z - arranjo que contém ALFA, BETA e os parâmetros usados na otimização.
- A - arranjo que armazena os coeficientes  $d_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  (avanço total em cada direção  $i$  de pesquisa dos  $N$  parâmetros).
- XK - arranjo auxiliar para armazenar os parâmetros entre um ciclo e outro.
- F1 - resultado da função objetiva antes do novo incremento

- F2 - resultado da função objetiva anterior a F1.
- AA - variável que calcula os deslocamentos numa dada direção.
- CHANGE - variação dos parâmetros, entre um ciclo e outro.
- D - posição ideal numa direção após as tentativas.
- CE - constante C da equação quadrática.
- BE - constante B da equação quadrática.
- XMAX - a maior diferença entre um ciclo e outro dos parâmetros.

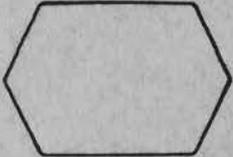
## SIMBOLOS USADOS NOS FLUXOGRAMAS



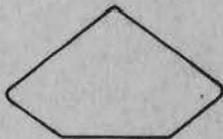
SIMBOLO DE PROCESSAMENTO, REPRESENTA CÁLCULOS, OU OUTRA FUNÇÃO NÃO ESPECIFICADA



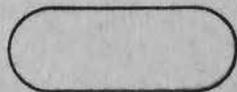
DECISÃO COM ATÉ TRES OPÇÕES



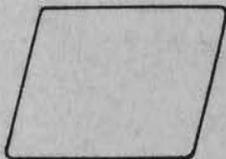
UTILIZADO PARA INDICAR O USO COMANDO "DO"



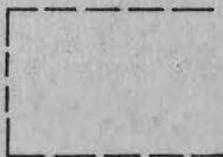
DECISÃO COM QUATRO OPÇÕES



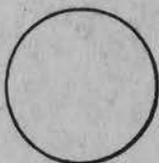
UTILIZADO PARA REPRESENTAR O COMEÇO OU FIM DE UM PROCESSAMENTO



REPRESENTA A ENTRADA E SAIDA DE DADOS



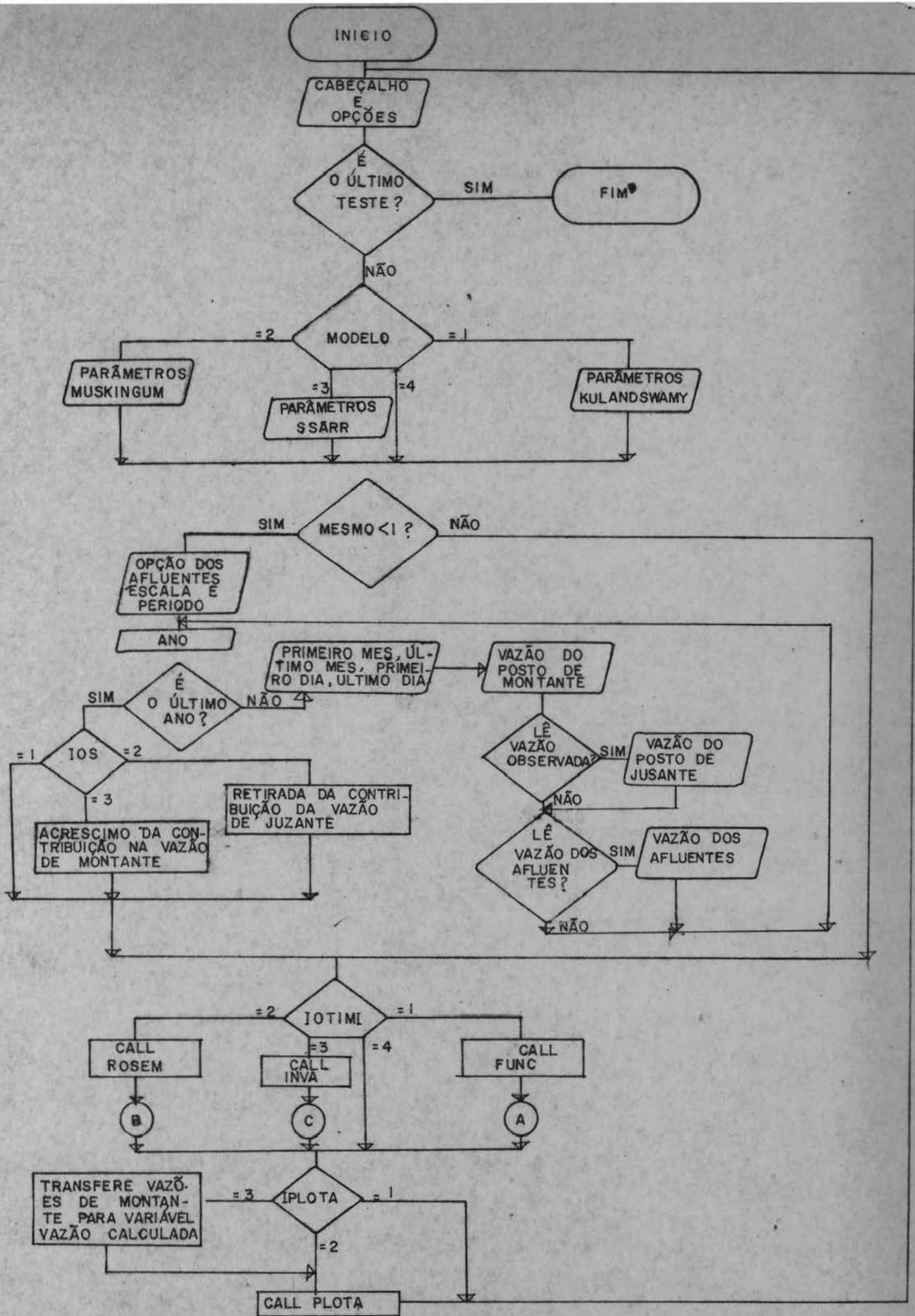
INDICAÇÃO DE UM LAÇO



UTILIZADO PARA LIGAR DIFERENTES PARTES DE UM FLUXOGRAMA

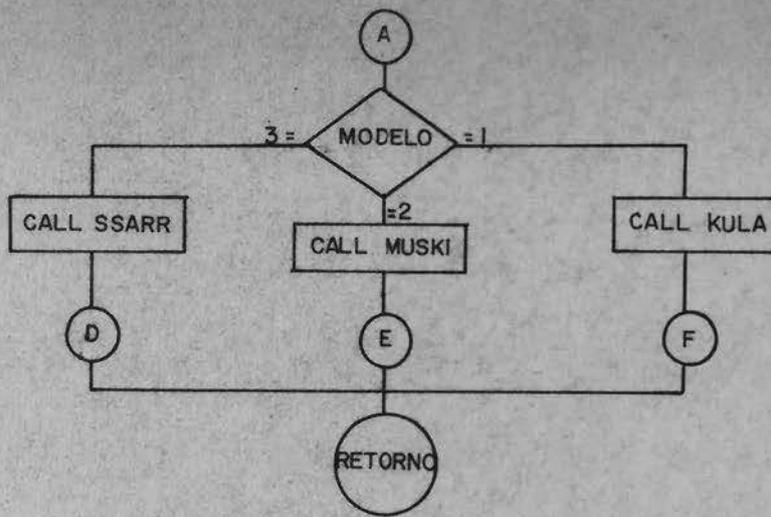


INDICATIVO DE SEQUÊNCIA

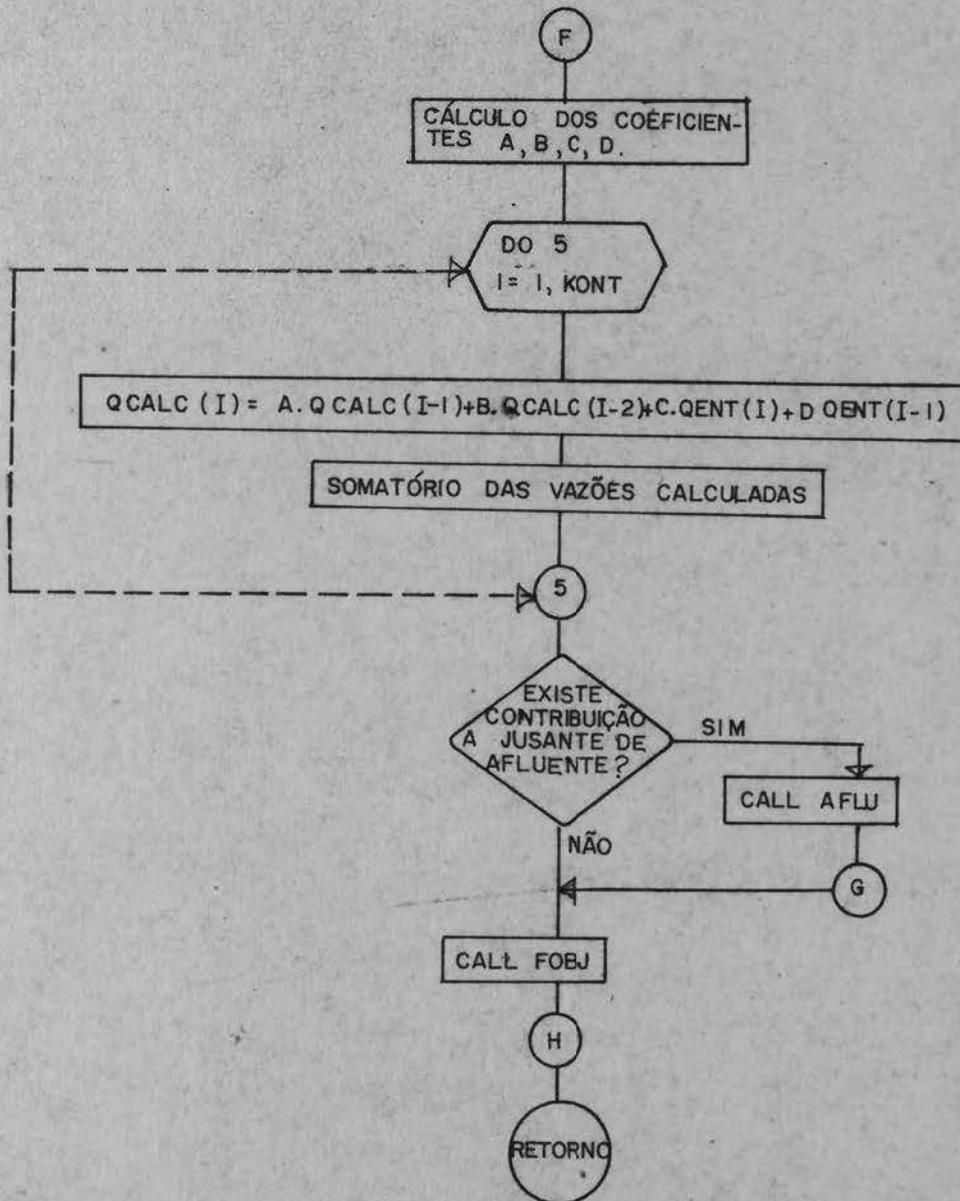


PROGRAMA PRINCIPAL

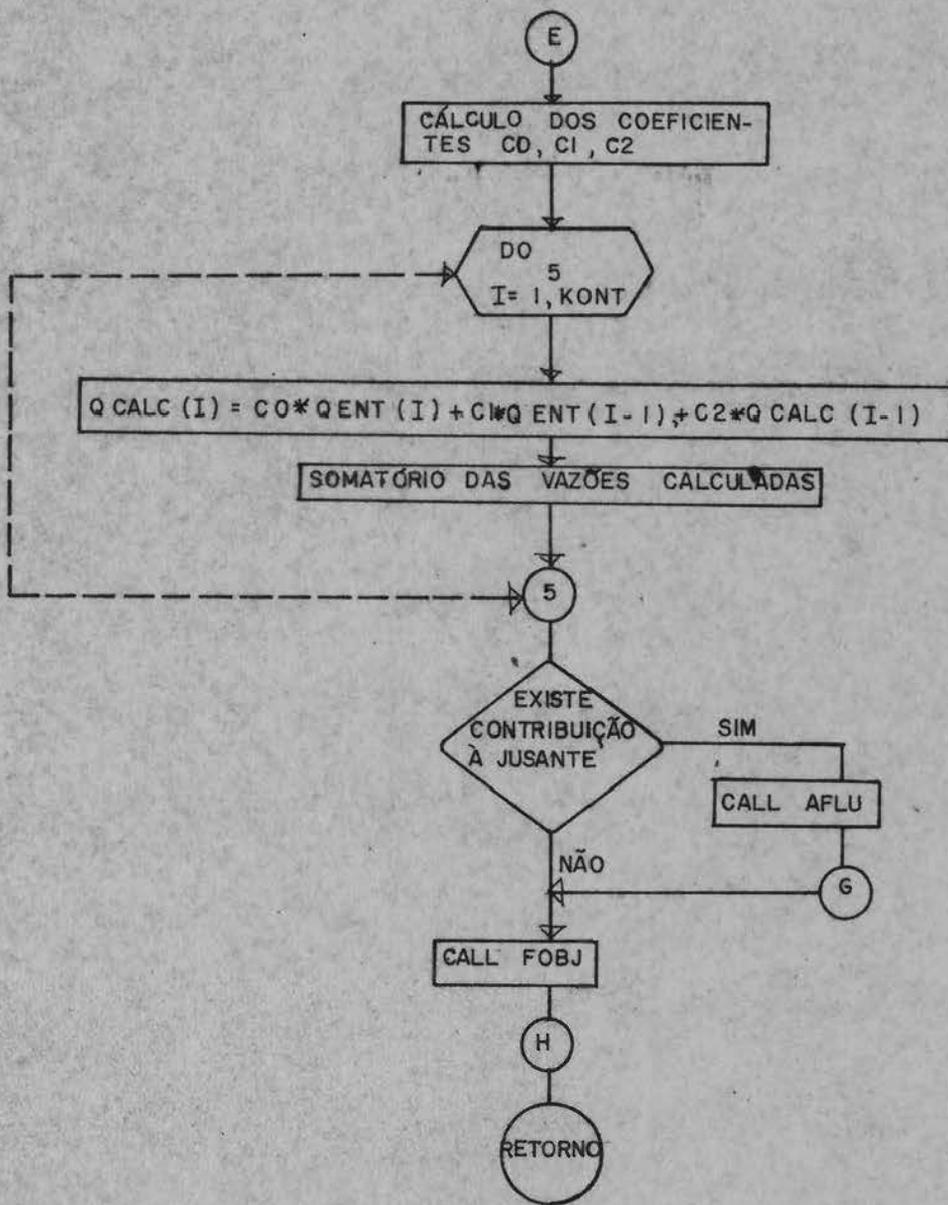
FIGURA 7.1



SUBPROGRAMA FUNC — FIGURA 7.2



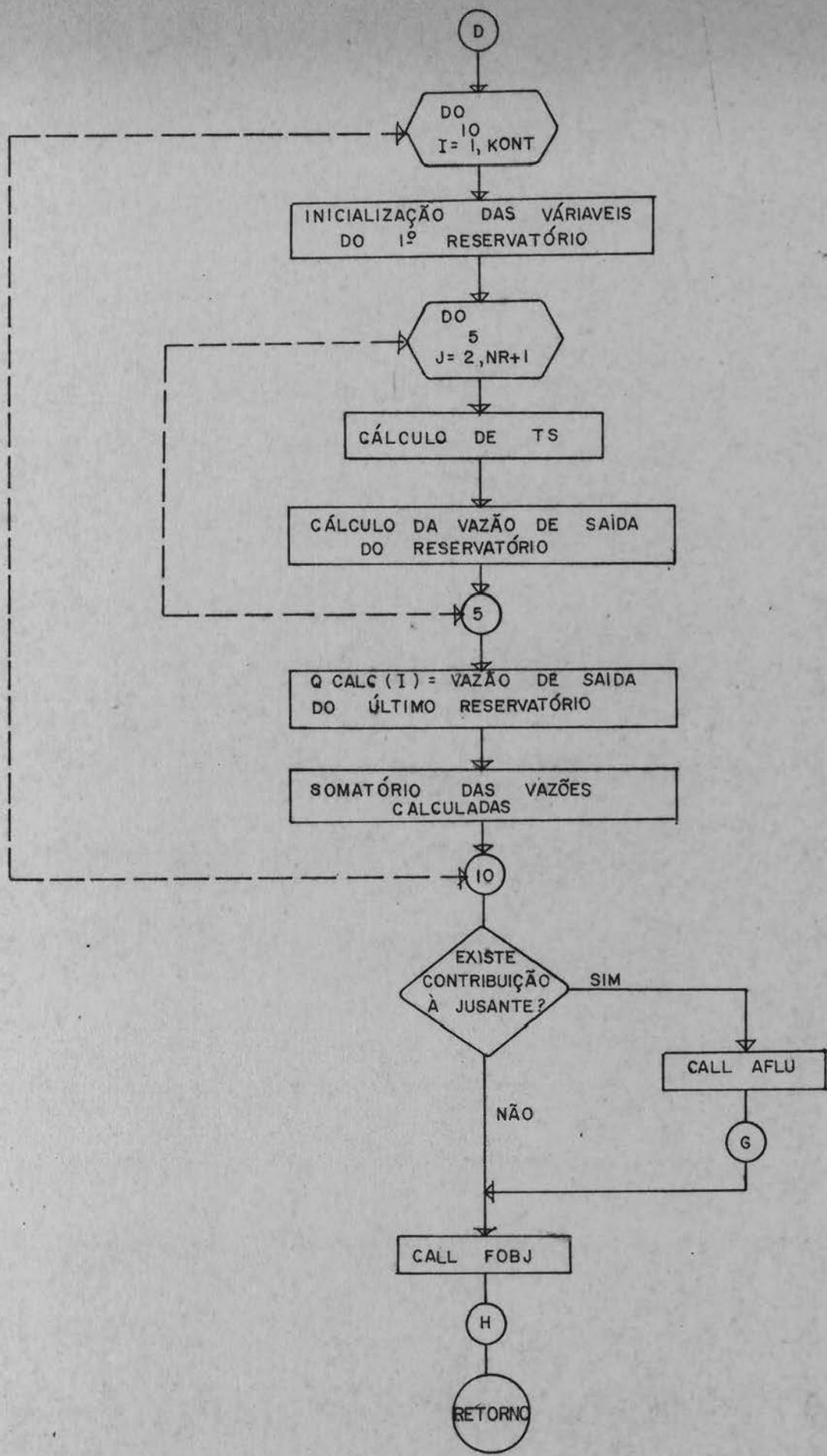
SUBPROGRAMA KULA — FIGURA 7.3



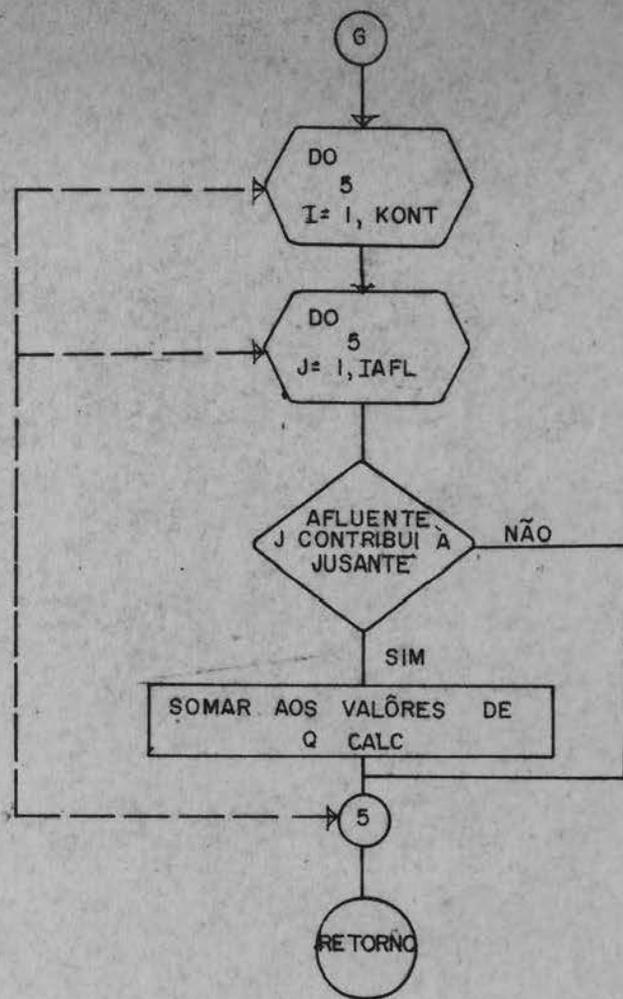
SUBPROGRAMA

MUSKI

FIGURA 7.4



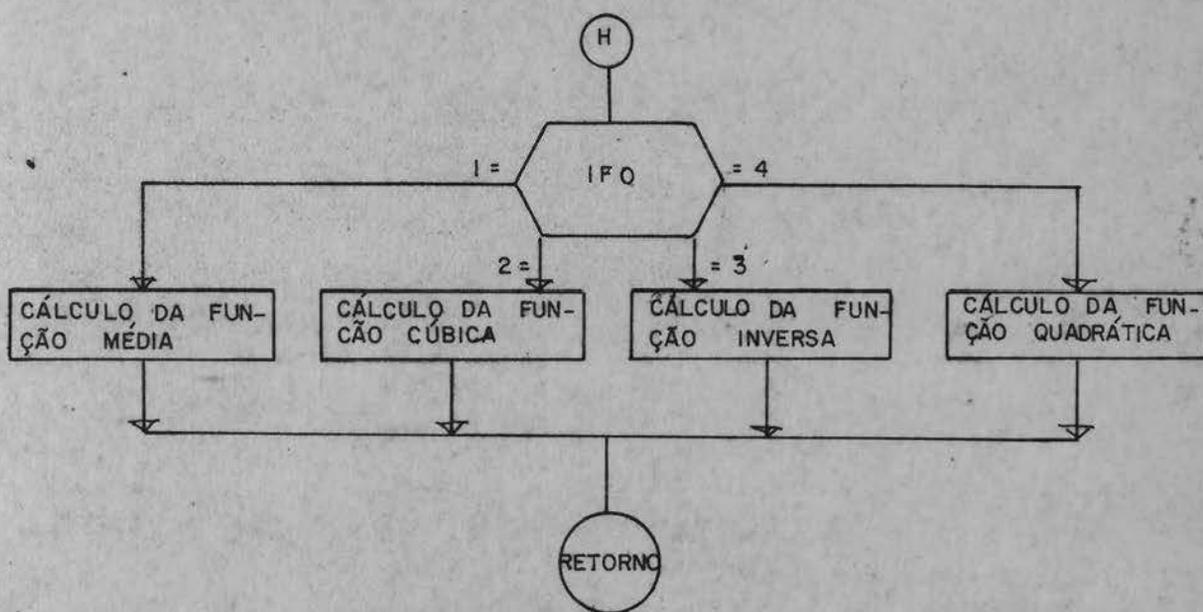
SUBPROGRAMA SSARR — FIGURA 7.5



SUBPROGRAMA

AFLU

FIGURA 7.6



SUBPROGRAMA

FOBJ

FIGURA 7.7

Bibliografia

- 1 - ARBHABHIRAMA, Anat; SAGAGUN, V.A. e TINGCHANSALI - Mathematical Modeling of a Flood Flow in a River and Floodplain, Regional Training course on the Use of Computer Tokyo, Japan.
- 2 - BEARD, Lee R. - Optimization techniques Hydrologic Engineering, Water Resources Research, vol. 3 n 3, 1967
- 3 - BURROUGHS - B6700/B7700 - Fortran reference Manual 1972
- 4 - CHOW, Ven Te - Open Channel Hydraulics, (1959), McGraw Hill Book Company, Inc., New York.
- 5 - CHOW, Ven Te - Systems approaches in Hydrology and Water Resources, Proceedings of the First International Seminar of Hydrology professors (1969)
- 6 - CLARK, R.T. - Mathematical Models in Hydrology, FAO, Roma, 1973.
- 7 - EMSHOFF, James R.; SISSON, Roger L. - Design and use of computer simulation models. The Macmillan Company (1970).
- 8 - FOX, Richard L. - Optimization Methods for Engineering Design, Addison Wesley Publishing Company, 1971.
- 9 - GORDON, Geoffrey - Systems Simulation, Prentice Hall, Inc. (1969).
- 10 - HAAL, Warren A.; DRACUP, John A. - Water Resources Systems Engineering (1970).

- 11 - HENDERSON, F.M.- Open Channel Flow, The Macmillan Company, New York (1966).
- 12 - IBBITT, Richard P. e O'DONNEL, Terence - Designing Conceptual Catchment Models for Automatic Fitting Methods. (1971).
- 13 - IBBITT, Richard P. e O'DONNEL, Terence - Fitting Methods for conceptual Catchment Models, Journal of Hydraulics Division, ASCE, vol.97, n° HY9, 1971.
- 14 - JACOBY, S.L.S.; KOWALIK, J.S. e PIZZO, J.T. - Iterative Methods for Nonlinear Optimization problems, Prentice Hall, USA (1972).
- 15 - KUESTER, James L. e MIZE, Joe H. - Optimization Techniques with FORTRAN, MacGraw Hill Book Company, USA, 1973.
- 16 - KULANDAISWAMY, V.C.; KRISHNASWAMI, M. e RAMALINGAM, T.N. Flood Routing through channels, Journal of Hydrology, vol. V, n°3, North-Holland Publishing Co., Holland, sept 1967.
- 17 - LINSLEY, Ray K.; KOHLER, Max A. e PAULHUS, Joseph L.H. Applied Hydrology, MacGraw - Hill Book Company, New York (1949).
- 18 - MARTIN, Francis F. - Computer Modeling and Simulation, John Wiley & Sons, Inc. New York (1968).
- 19 - NARANJO BUNSEN, Carlos - Modelo Matemático Semi-empírico para la regulación del Rio Bogotá, 1972.

- 20 - NELDER, J.A. e R. Mead - A Simplex Method for function Minimization Computer Journal, vol.7, 308, 1965.
- 21 - PINTO, Helson L. de Souza; HOLTZ, Antonio C.T. e MARTINS José Augusto - Hidrologia de Superfície, Editora Edgard Bucher Ltda, São Paulo (1973).
- 22 - ROSEMBROCK, H.H., - An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function, Computer Journal, vol.3, 175, 1960.
- 23 - SPIEGEL, Murray R. - Analise Vetorial, Ao Livro Técnico S/A, Rio de Janeiro, 1966.
- 24 - STARCK, Robert; NICHOLLS, Robert L. - Mathematical Foundations for Design, Civil Engineering Systems, MacGraw - Hill Book Company, 1972, USA.
- 25 - TUCCI, Carlos E.M. - FORTRAN IV, Curso de Pós-Graduação em Hidrologia, (1974).
- 26 - U.S. ARMY - Corps of Engineers - Routing of Floods Thourgh River Channels (1960).
- 27 - U.S. ARMY - Corps of Engineers - Computer Application to Systems Analysis (1967).
- 28 - YEVJEVICH, V.; BARNES, A.H. - Flood Routing through storms Drains Part I (1970).

NO ERRORS DETECTED. NUMBER OF CARDS = 479.  
COMPILATION TIME = 84 SECONDS ELAPSED. 5.64 SECONDS PROCESSING(5096  
D2 STACK SIZE = 39 WORDS. FILESIZE = 140 WORDS. ESTIMATED CORE STOR  
TOTAL PROGRAM CODE = 1669 WORDS. ARRAY STORAGE = 7542 WORDS.  
NUMBER OF PROGRAM SEGMENTS = 25. NUMBER OF DISK SEGMENTS = 117.  
PROGRAM CODE FILE = IPHCHA/DTIMIZA, COMPILER COMPILED ON 12/21/74

```
SUBROUTINE MUSKI
COMMON /CALC/QENT(732),QSAI(732),QCALC(732),K,SOB,AT,SCAL
1,QAFI(2,732),ITEA(3)
COMMON /VAR/X(7),N,ALFA,BETA,NITMAX,F,NTI,NR,PRECI,IFO,PRINC
QCALC(1)=QSAI(1)
  QCALC(2)=QSAI(2)
DEN=2.*X(2)*(1.-X(1))+AT
CZ=(AT-2.*X(2)*X(1))/DEN
C1=(AT+2.*X(2)*X(1))/DEN
C2=(2.*X(2)*(1.-X(1))-AT)/DEN
F=0.
SCAL= QCALC(1)+QCALC(2)
  DO 5 I=3,K
    QCALC(I)=CZ*QENT(I)+C1*QENT(I-1)+C2*QCALC(I-1)
    SCAL=SCAL+QCALC(I)
5 CONTINUE
NTI=NTI+1
IF(ITEA(IAFL+1).GT.0)CALL AFLU
  CALL FOBJ
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE AFLU  
COMMON /CALC/QENT(732),QSAI(732),QCALC(732),K,SOB,AT,SCAL  
1,QAFI(2,732),ITEA(3)  
DO 5 I=1,KONT  
DO 5 IAF=1,IAFL  
IF(ITEA(IAF).GT.0)GO TO 5  
QCALC(I)=QCALC(I)+QAFI(IAF,KONT)  
5 CONTINUE  
RETURN  
END
```

```

SUBROUTINE SSARR
COMMON /CALC/QENT(732),QSAI(732),QCALC(732),K,SOB,AT,SCAL
1,Q AFL(2,732),ITEA(3)
COMMON /VAR/X(7),N,ALFA,BETA,NITMAX,F,NTI,NR,PRECI,IFO,PRINC
DIMENSION QANT(50)
SCAL=0.
DO 10 I=1,K
E=QENT(I)
Q1=QANT(I)
QANT(I)=E
F=0.
DO 5 J=2,NR+1
IF(X(1).EQ.0.)GO TO 16
IF(X(1).LT.0) GO TO 15
TS=X(2)/(E**X(1))
GO TO 16
15 XX=-X(1)
TS=X(2)*E**XX
16 E=((Q1+E)/2.-QANT(J))/(TS+AT/2)*AT+QANT(J)
Q1=QANT(J)
5 QANT(J)=E
SCAL=E+SCAL
QCALC(I)=E
10 CONTINUE
NTI=NTI+1
IF(ITEA(IAFL+1).GT.0)CALL AFLU
CALL FOBJ
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE INVA
COMMON /VAR/X(7),N,ALFA,BETA,NITMAX,F,NTI,NR,PREC1,IFO,PRINC
DIMENSION RAUX(7),XAJX(7)
I=0
NIT=1
NTI=0
CALL FUNC
4 DO 50 I=1,N
  AL=1.
  RAUX(I)=X(I)
  AA=BETA/ALFA
5  F2=F1
  F1=F
  AA=AA*ALFA
  AL=AL+AA
  X(I)=RAUX(I)*AL
  CALL FUNC
  IF(F1.GT.F)GO TO 5
  IF(AA.NE.BETA)GO TO 10
  F2=F
  AL=AL-2*AA
  X(I)=RAUX(I)*AL
  CALL FUNC
  AA=-AA
  IF(F1.GT.F)GO TO 5
  AL=AL-AA
  B=F-F2
  C=2.*(F+F2-2.*F1)
  GO TO 15
10 AL=AL-AA
  AA=AA/ALFA
  C=2*(F+ALFA*F2-(1+ALFA)*F1)
  B=F2*ALFA*ALFA-F1*(ALFA*ALFA-1)-F
15 IF(C.LE.1.E-5)GO TO 20
  D=AA*B/C
  AL=AL+D
  X(I)=RAUX(I)*AL
  CALL FUNC
  IF(F1.GT.F)GO TO 50
  AL=AL-D
20 F=F1
  X(I)=RAUX(I)*AL
50 CONTINUE
  IF(PRINC.GT.0)PRINT 1,NTI,NIT,N+1,F,(X(I),I=1,N)

  NIT=NIT+1
  IF(NIT.EQ.1)GO TO 35
  XMAX=0.
  DO 40 I=1,N
  DIF=ABS(X(I)-XAJX(I))
  IF(XMAX.LT.DIF)XMAX=DIF
40 CONTINUE
  IF(DIF.LE.PREC1)RETURN
  IF(NIT.GT.NITMAX)RETURN
35 DO 45 I=1,N
45 XAJX(I)=X(I)
  GO TO 4
1 FORMAT(2I7,*F10.3)
END

```

```

SUBROUTINE KJLA
COMMON /CALC/QENT(732),QSAI(732),QCALC(732),K,SOB,AT,SCAL
1,QAFL(2,732),ITEA(3)
COMMON /VAR/X(7),N,ALFA,BETA,NITMAX,F,NTI,NR,PREC,IFO,PRINC
DEN=X(2)+X(1)*AT+.5*AT*AT
AA=(2.*X(2)+X(1)*AT-.5*AT*AT)/DEN
BB=-X(2)/DEN
CC=(-X(3)*AT+.5*AT*AT)/DEN
DD=(X(3)*AT+.5*AT*AT)/DEN
QCALC(1)=QSAI(1)
QCALC(2)=QSAI(2)
F=0.
SCAL=QCALC(1)+QCALC(2)
DO 1 J=3,K
QCALC(J)=AA*QCALC(J-1)+BB*QCALC(J-2)+CC*QENT(J)+DD*QENT(J-1)
SCAL=SCAL+QCALC(J)
1 CONTINUE
NTI=NTI+1
IF(ITEA(IAFL+1).GT.0)CALL AFLU
CALL FOBJ
RETURN
END

```

```
SUBROUTINE FOBJ
COMMON /CALC/QENT(732),QSAI(732),QCALC(732),K,S0B,AT,SCAL
1,QAFI(2,732),ITEA(3)
COMMON /VAR/X(7),N,ALFA,BETA,NITMAX,F,NTI,NR,PRECI,IF0,PRINC
F=0.
GO TO (1,3,5,7),IF0
1 DO 2 I=1,K
2 F=F+ABS(QCALC(I)-QSAI(I))/K
GO TO 9
3 DO 4 I=1,K
DIF=ABS(QCALC(I)-QSAI(I))
4 F=F+DIF/K*DIF*DIF
GO TO 9
5 DO 6 I=1,K
6 F=F+ABS(1./QCALC(I)-1./QSAI(I))**2/K
GO TO 9
7 DO 8 I=1,K
8 F=F+ABS(QCALC(I)-QSAI(I))**2/K
9 RETURN
END
```

```
SUBROUTINE AUX(G,N,X,Z,A,L)
DIMENSION X(1),A(7,7),Z(3,7)
DO 5 I=1,N
Z(2,I)=Z(2,I)+A(I,L)*G
5 X(I)=Z(2,I)*Z(3,I)
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE FUNC  
COMMON /TEST/MODELO  
GO TO (1,2,3),MODELO  
1 CALL KULA  
  RETURN  
2 CALL MUSKI  
  RETURN  
3 CALL SSARR  
  RETURN  
END
```

```

SUBROUTINE PLOTA
COMMON /CALC/QENT(732),QSAI(732),QCALC(732),KKK,SOB,AT,SCAL
1,QAFI(2,732),ITEA(3)
COMMON /MDIA/IANO,MES1,MES2,IDI,ID2,I1,I2,MES
COMMON /ESCALA/YMAX,YMIN,NP,NANO
COMMON /PENT/SENT
DIMENSION MS(101),IPL0T(101),IY(11)
DATA MAIS/'+'/,IPONT/'.'/,IAST/'*'/,IBRAN/' '/,IPRE/'I'/
DATA MS/101*'-'/,I1/'0'/
KONT=0
DO 100 I=1,11
100 IY(I)=YMIN+(YMAX-YMIN)*(I-1)*0.1+0.01
DO 105 I=1,101,10
105 MS(I)=MAIS
COEF=100./(YMAX-YMIN)
COR=0.5/COEF
IANO=IANO-NANO
DO 180 NI=1,NANO
IANO=IANO+1
PRINT 1,IANO,(IY(I),I=1,11),MS
DO 180 MES=MES1,MES2
CALL DIA
DO 180 IDIA=I1,I2
DO 180 MI=1,NP
KONT=KONT+1
IF(KONT/10*10.NE.KONT)GO TO 120
DO 110 M=1,101
110 IPL0T(M)=MS(M)
GO TO 150
120 DO 130 M=1,101
130 IPL0T(M)=IBRAN
DO 140 M=1,101,10
140 IPL0T(M)=IPONT
150 QPLOT=QSAI(KONT)
IALFA=I1
170 K=(QPLOT+COR-YMIN)*COEF+1.01
IF(K.LE.100.AND.K.GE.1)IPL0T(K)=IALFA
IF(QPLOT.EQ.QCALC(KONT))GO TO 180
IALFA=IAST
QPLOT=QCALC(KONT)
GO TO 170
180 PRINT 2,IDI,AMES,QPLOT,QSAI(KONT),(IPL0T(M),M=1,101)
PRINT 3,SOB,SENT,SCAL
3 FORMAT(/,2X,'VAZAO TOTAL DE SAIDA =',F10.2//2X,'VAZAO TOTAL DE EN
1TRANDA =',F10.2//2X,'VAZAO TOTAL CALCULADA =',F10.2)
1 FORMAT('1',20X,'ANO',18//1X,' DATA',7X,'QC',5X,'QO',12,10110/
123X,101A1)
2 FORMAT(I3,'/',1,12,'/',1,2(1X,F7.2),101A1)
RETURN
END

```

## SUBROUTINE ROSEM

COMMON /VAR/X(7),N,ALFA,BETA,NITMAX,F,NTI,NR,PREC1,IFO,PRINC

DIMENSION Z(3,7),A(7,7),XK(7)

NTI=0

NIT=0

DO 10 I=1,N

Z(1,I)=BETA

Z(2,I)=ALFA

Z(3,I)=X(I)

DO 5 J=1,N

5 A(J,1)=0.

10 A(I,I)=1.

CALL FUNC

F1=F

15 DO 50 L=1,N

AA=.5\*Z(1,L)

B=0.

CALL AUX(AA,N,X,Z,A,L)

CALL FUNC

IF(F1.GT.F)GO TO 25

BB=-2.\*AA

CALL AUX(BB,N,X,Z,A,L)

F2=F

CALL FUNC

IF(F1.GT.F)GO TO 20

CALL AUX(AA,N,X,Z,A,L)

BE=F-F2

CE=2.\*(F+F2-2.\*F1)

GO TO 30

20 AA=-AA

25 F2=F1

F1=F

B=B+AA

AA=ALFA\*AA

CALL AUX(AA,N,X,Z,A,L)

CALL FUNC

IF(F1.GT.F)GO TO 25

BB=-AA

CALL AUX(BB,N,X,Z,A,L)

AA=AA/ALFA

Z(1,L)=AA

CE=2\*(F+ALFA\*F2-(1+ALFA)\*F1)

BE=F2\*ALFA\*ALFA-F1\*(ALFA\*ALFA-1)-F

30 IF(CE.LE.1.E-B)GO TO 40

D=AA\*BE/CE

CALL AUX(D,N,X,Z,A,L)

CALL FUNC

IF(F.GT.F1)GO TO 35

Z(1,L)=AA+D

F=F1

B=B+D

GO TO 45

35 BB=-D

CALL AUX(BB,N,X,Z,A,L)

40 IF(B.EQ.0)B=AA\*0.1

45 DO 50 J=1,N

50 A(J,L)=B\*A(J,L)

NIT=NIT+1

IF(PRINC.GT.0)PRINT 1,NTI,NIT,N+1,F1,(X(I),I=1,N)

1 FORMAT(2I7,\*F10.3)

IF(NIT.EQ.1)GO TO 50

XMAX=0.

DO 55 I=1,N

```
IF (CHANGE.GE.XMAX) XMAX=CHANGE
55 CONTINUE
IF (NITMAX.LT.NIT) RETURN
IF (XMAX.LE.PRECI) RETURN
60 DO 65 I=1,N
65 XK(I)=X(I)
DO 70 J=2,N
L=N-J+1
DO 70 I=1,N
70 A(I,L)=A(I,L)+A(I,L+1)
DO 95 J=1,N
IF (J.EQ.1) GO TO 85
I=J-1
DO 80 L=1,I
AA=0.
DO 75 K=1,N
75 AA=A(K,L)*A(K,J)+AA
DO 80 K=1,N
80 A(K,J)=A(K,J)-A(K,J)*AA
85 AA=0.
DO 90 K=1,N
90 AA=A(K,J)*A(K,J)+AA
IF (AA.EQ.0) AA=1.
AA=1./SQRT(AA)
DO 95 K=1,N
95 A(K,J)=AA*A(K,J)
GO TO 15
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE DIA
COMMON /MDIA/ IANO, MES1, MES2, ID1, ID2, I1, I2, MES
DIMENSION NDIA(12)
DATA NDIA/31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31/
I1=1
I2=NDIA(MES)
IF (IANO/4*4.EQ. IANO.AND. MES.EQ.2) I2=29
IF (MES.EQ. MES1) I1=ID1
IF (MES.EQ. MES2) I2=ID2
RETURN
END
```

```

DIMENSION CABECA(20,3),IENT(31),ISAI(31),ICA(31,12),IFC(2,2),IFB(2
1),IFA(2)
DIMENSION QEA(31,24),QSA(31,24),QAA(2,31,24)
COMMON /VAR/X(7),N,ALFA,BETA,NITMAX,F,NT1,NR,PREC1,IF0,PR1
INC
COMMON /CALC/QENT(732),QSAI(732),QCALC(732),KONT,S0B,AT,SCAL
1,QAF1(2,732),ITEA(3)
COMMON /TEST/MODELO
COMMON /MDIA/TANO,MES1,MES2,ID1,ID2,I1,I2,MES
COMMON /ESCALA/YMAX,YMIN,NP,NANO
COMMON /PENT/SENT
45 READ 1,((CABECA(I,J),I=1,20),J=1,3)

READ /,MODELO,IOTIMI,MESMO,IPL0TA,IF0,PRINC
IF(MODELO.LE.0)GO TO 105
PRINT 2
PRINT 3,((CABECA(I,J),I=1,20),J=1,3)
GO TO(50,55,60,65),MODELO
50 READ /,(X(I),I=1,3)
N=3
PRINT 4,(X(I),I=1,3)
GO TO 65
55 READ /,(X(I),I=1,2)
N=2
PRINT 5,(X(I),I=1,2)
GO TO 65
60 READ /,NR,(X(I),I=1,2)
PRINT 6, NR,(X(I),I=1,2)
N=2
65 IF(MESMO.EQ.1)GO TO 86
READ /,IOS,IAFL,(ITEA(I),I=1,IAFL+1)
SENT=0.
S0B=0.
KONT=0
NANO=0
READ /,YMAX,YMIN,AT
NP=24/AT
65 READ /,IANO
IF(IANO.LE.0)GO TO 81
TANO=IANO
NANO=NANO+1
READ /,MES1,MES2,ID1,ID2
PRINT 7,ID1,MES1,ID2,MES2,IANO
SEAUx=0.
SOAUx=0.
DO 80 MES=MES1,MES2
DO 76 NPE=1,NP
IQ1=1
IQ2=2
I2=0
IF(MES.NE.MES1.OR.ID1.LE.16)GO TO 71
IQ1=2
I2=16
71 IF(MES.EQ.MES2.AND.ID2.LT.16)IQ2=1
DO 74 IQ=IQ1,IQ2
I1=I2+1
READ 8,I2,IFB(IQ),(IENT(I),I=I1,I2)
IF(IOS.LE.0)GO TO 72
READ 9,IFA(IQ),(ISAI(I),I=I1,I2)
72 IF(IAFL.LE.0)GO TO 74

```

```

DO 73 IAF=1,IAFL
73 READ 9,IFC(IAF,IQ),(ICA(I,IAF),I=11,I2)
74 CONTINUE
I1=1
IF(MES.EQ.MES1.OR.MES.EQ.MES2)CALL DIA
IQ=1
DO 75 IDIA=I1,I2
IF(IDIA.GT.17)IQ=2
QEA(IDIA,NPE)=IENT(IDIA)*10.**IFB(IQ)
QSA(IDIA,NPE)=ISAI(IDIA)*10.**IFA(IQ)
IF(IAFL.LE.0)GO TO 76
DO 76 IAF=1,IAFL
IF(ITEA(IAF).LE.0)GO TO 75
QAA(IAF,IDIA,NPE)=ICA(IDIA,IAF)*10.**IFC(IAF,IQ)
GO TO 76
75 QEA(IDIA,NPE)=QEA(IDIA,NPE)+ICA(IDIA,IAF)*10.**IFC(IAF,IQ)
76 CONTINUE
DO 80 IDIA=I1,I2
DO 80 NPE=1,NP
KONT=KONT+1
QENT(KONT)=QEA(IDIA,NPE)
QSAI(KONT)=QSA(IDIA,NPE)
SOAUX=SOAUX+QSAI(KONT)
SEAUX=SEAUX+QENT(KONT)
DO 80 IAF=1,IAFL
IF(ITEA(IAF).LE.0)GO TO 80
QAFL(IAF,KONT)=QAA(IAF,IDIA,NPE)
80 CONTINUE
PRINT 10,SEAUX,SOAUX
SENT=SENT+SEAUX
SOB=SOB+SOAUX
GO TO 66
81 SDIV=SOB
IF(SENT.GT.SOB)SDIV=SENT
GO TO (86,83,79),IOS
79 COEF=1.-(SOB-SENT)/SDIV
SOB=0.
SENT=0.
DO 82 I=1,KONT
QSAI(I)=QSAI(I)*COEF
SOB=SOB+QSAI(I)
82 SENT=SENT+QENT(I)
GO TO 86
83 COEF=1+(SOB-SENT)/SDIV
SOB=0.
SENT=0.
DO 84 I=1,KONT
QENT(I)=QENT(I)*COEF
SOB=SOB+QSAI(I)
84 SENT=SENT+QENT(I)
86 GO TO(85,90,95,100),IOTIMI
85 CALL FUNC
PRINT 12,F
PRINT /,F
GO TO 100
90 READ /,ALFA,BETA,NITMAX,PRECI
IF(PRINC.GT.0)PRINT 11,ALFA,BETA,NITMAX,PRECI
CALL ROSEM
GO TO 100
95 READ /,ALFA,BETA,NITMAX,PRECI
IF(PRINC.GT.0)PRINT 11,ALFA,BETA,NITMAX,PRECI
CALL INVA
100 GO TO (45,103,101),IPLUTA
101 DO 102 K=1,KONT

```

```

103 CALL PLOTA
    GO TO 45
105 CALL EXIT
    1 FORMAT(20A4)
    2 FORMAT('1',//,1X,100('*'),4(/),50X,'PROGRAMA OTIMIZA',/50X,
    116('-')//, 40X,'MODELOS DE PROPAGACAO DESCARGA-DESCARGA COM OTIMI
    1ZACAO',4(/),1X,100('*'))
    3 FORMAT(/30X,20A4)
    4 FORMAT(4(/),40X,'MODELO DE KULANDSWAMY',/30X,'A0',8X,'A1',8X,
    1'BO',/,22X,3F10.2)
    5 FORMAT(4(/),40X,'MODELO MUSKINGUM',/31X,'X',9X,'K',/22X,2F10.3)
    6 FORMAT(4(/),40X,'MODELO SSARR',/,28X,'NRES',6X,'ALFA',6X,'PARA',/
    122X,110,2F10.2)
    8 FORMAT(12X,2I2,16I4)
    9 FORMAT(14X,I2,16I4)
    10 FORMAT(20X,'VOLUME DE ENTRADA (M3/S)',15X,'VOLUME DE SAIDA (M3/S)'
    1/ ,20X,F18.2,21X,F16.2)
    7 FORMAT(4(/),30X,'PERIODO DOS DADOS',//,10X,15,' DE',I3,' A',I5,'
    1DE',I3,/,18X,'ANO',I5)
    11 FORMAT(/,15X,'ALFA',5X,'BETA',5X,'NUMERO MAXIMO DE CILOS',5X,'PRE
    1CISAO',/,10X,2F10.2,5X,118,10X,F8.3,/, '1',2X,'N.ITE',2X,'CICLOS',2
    2X,'F.OBJET.',10X,'PARAMETROS')
    12 FORMAT(/,5X,'FUNCAO OBJETIVA',/,F15.4)
    END

```

```

012:0238:3 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEME
012:0239:5 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEME
012:023B:1 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEME
012:023C:3 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEME
012:023D:5 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEME
012:023F:1 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEME
012:0240:3 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEME
012:0241:5 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEME
012:0243:1 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEME
012:0244:3 IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEME

```