

UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR
PARA A OPERAÇÃO SEMANAL DE UM
PARQUE HIDROELÉTRICO

MÁRIO ANDRADE CARDOSO

Orientador:

Prof. Dr. Hermano de Medeiros F. Tavares

Dissertação apresentada no Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Matemática Aplicada.

Junho/1981

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Aos meus pais

Manoel (em memória) e Catarina.

À minha esposa Vanda, pelo sacrifício
e apoio nas horas difíceis.

Ao meu filho Plínio, pelo silêncio da
ausência.

AGRADECIMENTOS

- Ao orientador e amigo Hermano, pelo problema proposto, pelas horas que dispôs em me acompanhar retirando os espinhos deste trabalho.
- Aos amigos da FEC, Christiano, Akebo, Anilton, Geromel, Raul, Evandro, Ana, Taka, Ariovaldo, Secundino, França, Pedro e Jurandir, pela amizade e apoio.
- Aos amigos do IMECC, Amélia, Belloni, Estela, Hermínio, Luis , Lourival, Renato, Alberto, Adilson.
- Ao Mário Martínez, pela orientação durante os cursos.
- Aos amigos Marisa, Stela e Adail, pela leitura e correção do original.
- Aos amigos João e Irlando, pelos desenhos.
- Ao amigo Manoel Leite, pelos incentivos.
- À U.F.Pa pela minha liberação e custeio da minha permanência durante o curso.
- À CAPES, pela bolsa concedida durante a realização total do trabalho aqui desenvolvido.
- Ao CESEP pela ajuda de custos na confecção deste trabalho.

ÍNDICE

SUMÁRIO.....	08
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	
I.1. Conceitos de Usinas e Função de Geração.....	10
I.1.1. Elementos de Sistemas Geradores de Energia Elétrica.....	11
I.1.2. Variáveis.....	12
I.1.3. Função de Geração e Equações Dinâmicas.....	12
I.2. Comentários.....	14
I.3. Sequência do Trabalho.....	15
CAPÍTULO II - OTIMIZAÇÃO DA ESCALA DE GERAÇÃO	
II.1. Introdução.....	16
II.2. Descrição do Sistema.....	18
II.3. Formulação e Solução do Problema.....	21
II.3.1. Fase I (Fase Térmica).....	22
II.3.2. Comentários.....	23
II.3.3. Inicialização.....	24
II.3.4. Comentários.....	25
II.4. Fase II (Fase Hidráulica).....	25
II.5. Procedimento Computacional.....	26
II.6. Comentários.....	26
CAPÍTULO III - MÉTODO SIMPLEX-CANALIZADO	
III.1. Introdução.....	28
III.2. Notação.....	28
III.3. Definições.....	29
III.3.1. Variável Básica.....	30
III.3.2. Variável Não-básica.....	30
III.3.3. Solução Básica Factível.....	30
III.4. Desenvolvimento de Uma Solução Básica Factível.....	30
III.4.1. Acréscimo em x_k a partir de seu Limite Inferior \underline{x}_k	32
III.4.2. Uma Variável Básica Alcança seu Limite Inferior.....	32
III.4.3. Uma Variável Básica Alcança seu Limite Supe-	

rior.....	33
III.4.4. x_k Alcança o seu Limite Superior por si mesmo	34
III.4.5. Atualização da Variável Não-Básica, da Variável Básica, da Função Objetivo.....	34
III.4.6. Decréscimo em x_k a partir do Limite Superior \bar{x}_k	35
III.4.7. Atualização da Variável Não-Básica, da Variável Básica e da Função Objetivo.....	36
III.5. Resumo dos Principais Passos do Método Simplex-Canalizado.....	37
III.5.1. Inicialização dos Passos.....	37
III.5.2. Principais Passos.....	38
III.6. Comentários.....	39
III.7. Formulação do Problema Proposto na Forma Matricial....	39
III.8. Procedimento Computacional.....	42
III.8.1. Comentários sobre as Principais Subrotinas...	44
 CAPÍTULO IV - EXPERIÊNCIAS COMPUTACIONAIS	
IV.1. Introdução.....	46
IV.2. Grupo 1.....	46
IV.2.1. Comentários.....	48
IV.3. Grupo 2.....	49
IV.3.1. Comentários.....	50
IV.4. Grupo 3.....	50
IV.4.1. Comentários.....	51
IV.5. Grupo 4.....	52
IV.5.1. Comentários.....	53
IV.6. Grupo 5.....	53
IV.6.1. Comentários.....	54
IV.7. Grupo 6.....	54
IV.7.1. Comentários.....	54
IV.8. Grupo 7.....	55
IV.8.1. Comentários.....	55
IV.9. Curvas dos Testes.....	56
IV.10. Listagens de Erro.....	83

CAPÍTULO V - CONCLUSÃO E IDÉIAS

V.1. Conclusão.....	86
V.2. Idéias e Sugestões.....	86
REFERÊNCIAS.....	92

SUMÁRIO

O presente trabalho aborda o problema de escala de geração das usinas hidroelétricas localizadas no médio São Francisco. Este sistema apresenta-se constituído por 4 usinas hidroelétricas, duas delas contendo reservatórios (Sobradinho e Moxotó), sendo que as outras duas, Paulo Afonso I-II-III (a fio d'água) e Paulo Afonso IV, que aproveita a água oriunda do reservatório de Moxotó, encontram-se localizadas em torno da cachoeira de Paulo Afonso.

Vários fatores surgem na abordagem deste problema:

- a) O atraso de água existente entre os reservatórios de Sobradinho para o de Moxotó, devido à distância entre eles de aproximadamente 470km, o que acarreta atrasos de 3 dias em média.
- b) A pequena variação que deve existir no volume do reservatório de Moxotó, devido a este ser um regulador horário de 3 usinas (Moxotó, P.A-I-II-III e P.A-IV) sendo que a usina de P.A-IV, por ser a de maior ganho energético do sistema, deverá estar sempre em funcionamento e portanto consumindo água do reservatório de Moxotó.
- c) O máximo volume que deve haver no reservatório de Sobradinho - no final do horizonte de discretização, devido a ser este o regulador plurianual do sistema.
- d) Minimizar, na medida do possível, a ocorrência de vertimentos nas usinas, pois vertimentos implica em perda de energia, o que não é desejável a não ser em casos especiais, como, por exem-

plo, excesso de água no reservatório.

O problema é desenvolvido como um problema de Programação Linear. Usa-se o método Simplex-Canalizado para um período de 2 semanas, com 3 discretizações diárias e iguais de 8 horas, não obstante estarmos interessados em períodos de uma semana. Foram estabelecidas duas semanas porque a quantidade de água já existente entre Sobradinho e Moxotó (retardo) nos 3 primeiros dias, foge do nosso controle; e porque a existência, nos 3 últimos dias, de um acúmulo de água no reservatório de Sobradinho, sacrificaria o reservatório de Moxotó. Tal período programado permite-nos escolher uma semana, dentro do horizonte, em que estas contingências não ocorram.

São feitas análises físicas do problema a fim de atendermos aos fatores acima e para que possamos obter o máximo proveito das peculiaridades do sistema.

CAPÍTULO I

I N T R O D U Ç Ã O

I.1) CONCEITOS DE USINAS E FUNÇÃO DE GERAÇÃO:

As usinas geradoras existentes no sistema da CHESF são de 2 tipos:

- | | | |
|--------------------|---|---|
| a) Hidroelétricas | { | sem reservatório (a fio d'água)
com reservatório |
| b) Termoelétricas* | | |

As usinas hidroelétricas quanto à sua localização em rios podem se apresentar em Cascata, localizadas em um mesmo rio, Paralelas localizadas em rios de bacias diferentes ou então em braços de um mesmo rio.

As funções de geração são não lineares. Devido às particularidades físicas do sistema, tais como: os limites desejáveis de operação do reservatório (limites capazes de atender o mercado consumidor sem afetar o sistema nas piores condições) e as capacidades instaladas das máquinas em turbinagem, fomos levados a suspeitar que seriam funções não-lineares, porém suaves (i.e., poderiam ser aproximadas por retas com erros pequenos) dentro das condições exigidas. Isto foi mais tarde comprovado através de ajustamento destas curvas, com erros médios nunca acima de 1%, o que nos levou a linearizar as mesmas.

(*) Consulte [1], para melhores estudos.

A função de geração é função da quantidade de água turbinada e da quantidade de água armazenada a cada intervalo de discretização. Ambas as variáveis são limitadas inferior e superiormente.

1.1.1) ELEMENTOS DE SISTEMAS GERADORES DE ENERGIA ELÉTRICA:

De um modo geral, um sistema gerador de energia elétrica apresenta como componentes usinas que transformam alguma forma de energia potencial em energia elétrica. No sistema considerado, estas usinas são do tipo hidroelétricas e termoelétricas.

As usinas hidroelétricas apresentam como principais elementos: os reservatórios, um grupo turbina-gerador e uma sub-estação elétrica, de onde partem as linhas de transmissão para os pontos de carga. A figura (1.1) abaixo ilustra os componentes de um sistema gerador.

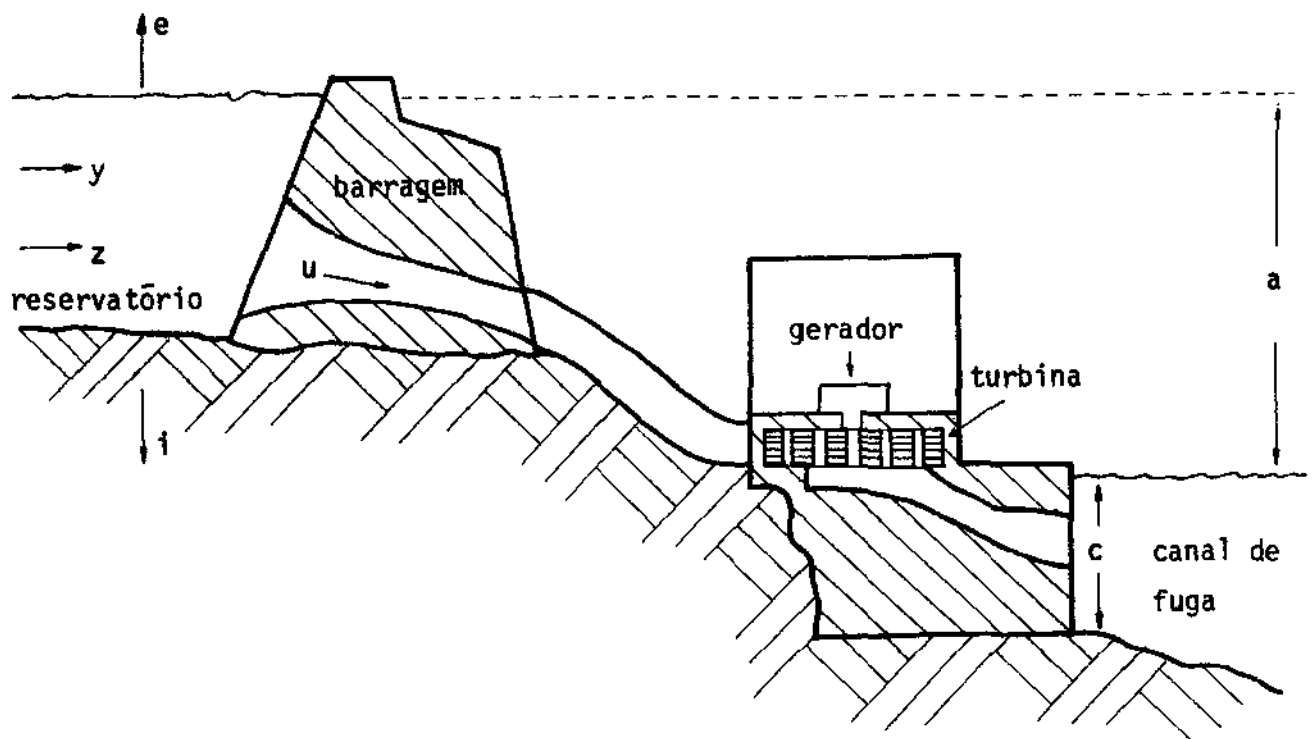


FIGURA 1.1

I.1.2) VARIÁVEIS:

As variáveis mais importantes no modelo matemático de uma usina hidroelétrica são:

$y(t)$ - Vazão independente afluente ao reservatório no instante t .

$z(t)$ - Vazão controlável afluente ao reservatório no instante t .

Esta vazão corresponde à água turbinada e/ou vertida na usina a montante no mesmo instante, ou em instantes anteriores.

$x(t)$ - Volume de água armazenada no reservatório no instante t .

$h(t)$ - Altura da queda entre o nível superior do reservatório e o canal de fuga. A altura depende do volume de água armazenada no instante t e do nível do canal de fuga.

$u(t)$ - Vazão de água turbinada para produzir energia no instante t . A vazão turbinada apresenta-se limitada superior e inferiormente devido às condições operacionais.

$v(t)$ - Vazão de água vertida no instante t . Como a água vertida não produz energia elétrica, tenta-se eliminar estes vertimentos.

$e(t)$ - Vazão de água evaporada (no reservatório) no instante t .

$i(t)$ - Vazão de água perdida por infiltração no instante t .

I.1.3) FUNÇÃO DE GERAÇÃO E EQUAÇÕES DINÂMICAS:

A função de geração é dada pela seguinte expressão:

$$\phi(x(t), u(t)) = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot u(t) \cdot [h_1(x(t)) - h_2(u(t))] \quad (1.1)$$

Portanto, é função da água turbinada e do volume de água no reservatório no instante t , sendo:

- η = coeficiente de rendimento da máquina
- ρ = densidade da água
- g = aceleração da gravidade
- $u(t)$ = quantidade de água turbinada no instante t
- $h_1(x(t))$ = polinômio VOLUME x COTA
- $h_2(u(t))$ = polinômio VAZÃO x NÍVEL JUSANTE

As equações dinâmicas que determinam a variação do volume de água armazenada no reservatório satisfazem o princípio de conservação da massa, que pode ser bem representado com a equação diferencial

$$\frac{dx(t)}{dt} = y(t) + z(t) - u(t) - v(t) - e(t) - i(t) \quad (1.ii)$$

Como o nosso problema é discretizado no tempo, toma-se a integral da equação (1.ii) entre dois instantes de tempo consecutivos, extremos de um intervalo de discretização e , de acordo com a referência [1], chegaremos à equação (1.iii) abaixo.

$$x^{m+1} = x^m + y^m + z^m - u^m - v^m - e^m - i^m \quad (1.iii)$$

Sendo:

$x^{m+1} = x(t^{m+1})$ = volume de água no reservatório no início do intervalo $m+1$.

$x^m = x(t^m)$ = volume de água no reservatório no início do intervalo m .

y^m = volume de água independente afluente ao reservatório durante o intervalo m .

z^m = volume de água dependente afluente ao reservatório durante o intervalo m .

u^m = volume de água turbinado no reservatório, durante o intervalo m .

v^m = volume de água vertido no reservatório, durante o intervalo m .

e^m = volume de água evaporado no reservatório, durante o intervalo m .

i^m = volume de água perdido por infiltração no reservatório, durante o intervalo m .

I.2) COMENTÁRIOS:

a) A equação (1.iii) descrita acima deverá estar na nossa formulação sem os termos e^m e i^m devido a estas perdas estarem incluídas no termo y^m , assumindo portanto a seguinte expressão:

$$x^{m+1} = x^m + y^m + z^m - u^m - v^m \quad (1.iv)$$

b) Embora o sistema CHESF no médio São Francisco seja, no momento, exclusivamente hidráulico, vale ressaltar que existem usinas térmicas instaladas para entrar em operação em qualquer emergência (por exemplo, um possível corte de carga). Por isso, a nossa formulação, que será exposta no capítulo 2, leva em conta também a utilização de usinas térmicas.

I.3) SEQUÊNCIA DO TRABALHO:

No capítulo II, fazemos a apresentação, descrição, formulação, solução do Problema, inicialização e um resumo dos passos do procedimento computacional da Resolução.

No capítulo III, fazemos uma breve apresentação do método do Simplex-Canalizado sem nos preocupar em demasia com o desenvolvimento teórico do método, visto ser um método bem conhecido em diversas bibliografias entre as quais a referência [2]. Procuramos também formular o nosso problema na forma matricial a fim de tornar do ponto de vista matemático mais compreensível e no final do capítulo colocamos um diagrama de bloco simplificado de todo o programa computacional desenvolvido por nós, assim como as principais subrotinas e seus comentários.

No capítulo IV, procuramos resumir todo o trabalho computacional desenvolvido, através dos gráficos indicativos das políticas a serem tomadas. Do mesmo modo, são feitas diversas observações físicas do comportamento do sistema.

No capítulo V, abordamos sugestões e idéias que foram surgindo durante o desenvolvimento deste trabalho, assim como outras dificuldades que o sistema apresenta no momento, dificuldades estas solucionáveis por meio de adaptações das soluções apresentadas para o problema que nos ocupou.

CAPÍTULO II

OTIMIZAÇÃO DA ESCALA DE GERAÇÃO

II.1) INTRODUÇÃO:

O sistema CHESF no Rio São Francisco é formado por 4 usinas hidráulicas como nos mostra a figura (2.1) abaixo, sendo que Sobradinho e Moxotó possuem reservatórios, enquanto que Paulo Afonso I-II-III (P.A-I-II-III) é a fio d'água e Paulo Afonso IV (P.A-IV) é alimentada através de um canal com 5.200 metros, ligado ao reservatório de Moxotó, sendo que estas duas usinas se localizam em torno da cachoeira de Paulo Afonso.

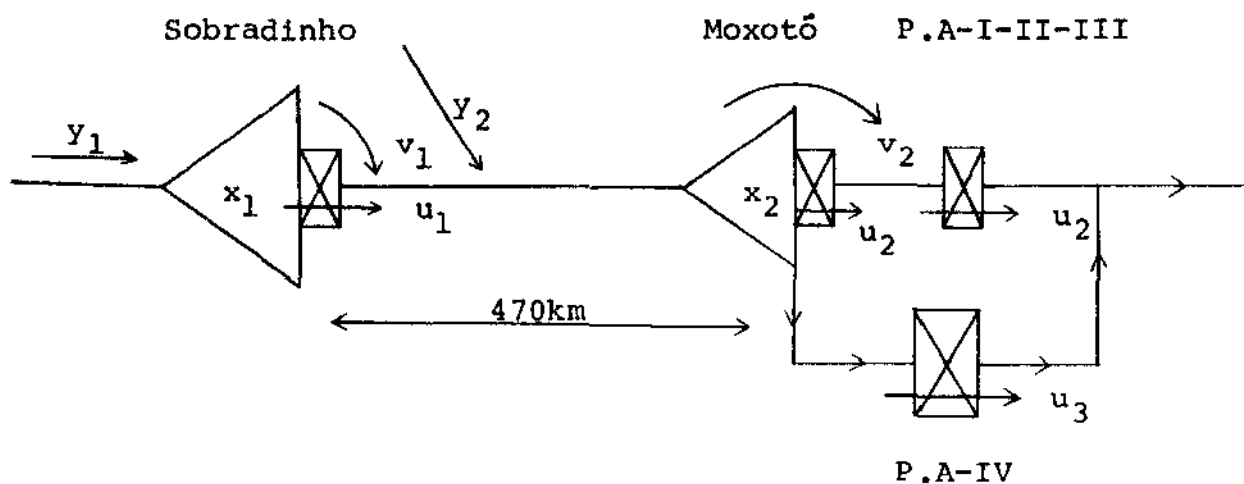


FIGURA 2.1

No reservatório de Sobradinho, situado a 470km a montante de Moxotó, ficam armazenadas as reservas de energia do sistema CHESF - pois, Sobradinho possui capacidade para regularização pluri-anual; Moxotó tem capacidade apenas para regularização horária. O tempo médio de percurso da água entre os dois reservatórios é

de três dias.

Como se observa na figura (2.1), Moxotô e P.A-I-II-III estão em cascata, e o conjunto em paralelo com P.A-IV, ou seja: a água armazenada no reservatório de Moxotô pode ser turbinada (e/ou vertida) na usina de Moxotô, passando em seguida por P.A-I-II-III, ou pode ser desviada para P.A-IV.

O ganho energético da água turbinada em P.A-IV é maior do que o obtido no conjunto Moxotô e P.A-I-II-III, devido ao aproveitamento global da soma das duas alturas da queda d'água (112,5m). Na verdade, a usina de P.A-IV é a de maior ganho energético do sistema CHESF, além de possuir quase 50% da capacidade instalada; daí a conveniência de manter a cota de Moxotô alta e estável.

Uma das dificuldades para a programação semanal da operação é encontrar a política de geração que proporcione o máximo ganho energético no complexo de Paulo Afonso, satisfazendo as restrições operativas do sistema. Outra dificuldade é coordenar a operação do complexo de Paulo Afonso, cujo reservatório (Moxotô) é capaz apenas de compensações horárias, com o grande reservatório de Sobradinho a 3 dias (470 km) de distância. Nesta coordenação deseja-se minimizar as flutuações de cota em Moxotô e maximizar a energia potencial que permanece no sistema (i.e., maximizar a água armazenada em Sobradinho).

As dificuldades descritas são formuladas em um problema de controle ótimo discreto, do qual se obtém a programação semanal da operação.

O problema foi discretizado em períodos de oito horas. Na escolha do período de discretização levou-se em conta que na

operação em tempo real aparecem imprevistos, como saída forçada de máquinas, manutenção de emergência e variações de carga, que impossibilitariam a execução de planejamento com discretização excessivamente fina. Por outro lado, foi necessário escolher discretização que representasse as variações diárias de demanda - ponta, madrugada e dia.

II.2) DESCRIÇÃO DO SISTEMA:

O sistema em estudo está representado na figura (2.1).

Para o reservatório de Sobradinho, tem-se a seguinte equação de conservação da água:

$$x_1^{m+1} = x_1^m + y_1^m - u_1^m - v_1^m, \quad m = 0, 1, 2, \dots, T-1 \quad (2.1)$$

onde,

x_1^m = volume d'água armazenada no intervalo m .

y_1^m = volume d'água correspondente a vazão não controlável afluente ao reservatório. É formado pela água liberada por Três Marias e pela incremental do trecho Três Marias - Sobradinho, durante o período m . Este volume d'água inclui as perdas por evaporação e infiltração e é perfeitamente conhecido para o horizonte de duas semanas.

u_1^m = volume d'água turbinado nas máquinas de Sobradinho no intervalo m .

v_1^m = volume d'água vertido no intervalo m .

T = instante final do horizonte de estudo.

A outra equação de conservação da água refere-se ao complexo de Paulo Afonso:

$$x_2^{m+1} = x_2^m + y_2^m + u_1^{m-\tau} + v_1^{m-\tau} - u_2^m - u_3^m - v_2^m \quad (2.ii)$$

$$m = 0, 1, \dots, T-1$$

onde:

x_2^m = volume d'água armazenada em Moxotó

y_2^m = volume d'água incremental do trecho Sobradinho-Moxotó, também perfeitamente conhecido (incluindo as perdas) durante o período de duas semanas.

u_2^m = volume d'água turbinada em Moxotó e P.A-I-II-III

v_2^m = volume vertido no complexo de Paulo Afonso durante o intervalo m .

u_3^m = volume d'água turbinada em P.A-IV

τ = tempo de viagem da água entre os reservatórios de Sobradinho e Moxotó.

Na equação (2.ii) levou-se em conta que a água do reservatório de Moxotó pode ser usada em Moxotó, passando em seguida pelas máquinas de P.A-I-II-III, ou pode ser desviada para P.A-IV. Como as capacidades de engulimento das turbinas de Moxotó e P.A-I-II-III são praticamente idênticas, considerou-se estas usinas de forma agregadas, i.e., os volumes d'água turbinados e vertidos são os mesmos em ambas as usinas.

Os volumes, turbinagens e vertimentos estão sujeitos aos limites:

$$\underline{x}_1 \leq x_1^m \leq \bar{x}_1 \quad (2.iii)$$

$$\underline{x}_2 \leq x_2^m \leq \bar{x}_2 \quad (2.iv)$$

$$\underline{u}_1 \leq u_1^m \leq \bar{u}_1 \quad (2.v)$$

$$\underline{u}_2 \leq u_2^m \leq \bar{u}_2 \quad (2.vi)$$

$$\underline{u}_3 \leq u_3^m \leq \bar{u}_3 \quad (2.vii)$$

$$v_1^m \geq 0 \quad (2.viii)$$

$$v_2^m \geq 0 \quad (2.ix)$$

No planejamento da operação semanal, as restrições de volume (2.iii) e (2.iv) não correspondem necessariamente aos limites de armazenagem dos reservatórios. Em Sobradinho, onde estão as reservas de energia do sistema, o limite inferior é determinado pelo planejamento da operação a longo prazo. Reflete a quantidade máxima de energia que pode ser usada sem comprometer a operação para períodos maiores. O limite superior em geral é determinado pela capacidade do reservatório.

A cota em Moxotó deve ser alta e aproximadamente constante, devido às características de projeto das turbinas de P.A-IV e à necessidade de manter potencial para produção de energia - em emergências.

As solicitações de energia devem ser sempre atendidas .

Tem-se:

$$h_1^m + h_2^m + \Delta^m = d^m ; \quad m = 0, 1, 2, \dots, T-1 \quad (2.x)$$

$$h_1^m = \phi_1(x_1^m; u_1^m; v_1^m) \quad (2.xi)$$

$$h_2^m = \phi_2(x_2^m; u_2^m) + \phi_3(u_2^m; v_2^m) + \phi_4(x_2^m; u_3^m) \quad (2.xii)$$

d^m - demanda de energia no intervalo m .

Δ^m - corte de carga ou geração térmica.

ϕ_1 - função de geração em Sobradinho.

ϕ_2 - função de geração em Moxotó.

ϕ_3 - função de geração em P.A - I-II-III.

ϕ_4 - função de geração em P.A-IV.

II.3) FORMULAÇÃO E SOLUÇÃO DO PROBLEMA:

Deseja-se coordenar a operação semanal do sistema hidroelétrico situado no médio São Francisco, de modo que as necessidades de energia, na área sob responsabilidade da CHESF, sejam atendidas apenas com geração hidráulica. Todas as restrições de operação devem ser atendidas e a reserva de energia, i.e., a água armazenada no reservatório de Sobradinho, deve ser poupada ao máximo.

A única equação não linear que aparece na descrição matemática do sistema é a restrição de balanço de energia (eq. 2.x). A formulação de um problema capaz de ser resolvido pelos métodos de programação linear requer, evidentemente, sua linearização. Para a programação da operação semanal no sistema em estudo o erro introduzido é pequeno.

O problema foi resolvido para um período de duas semanas, divididas em 42 intervalos de oito horas. Usou-se o algoritmo simplex, em duas fases, com a seguinte formulação:

II.3.1) FASE I (Fase Térmica):

$$\text{Min } J = \sum_{m=0}^{41} \Delta^m ; \quad (m = 0, 1, 2, \dots, 41)$$

$$\text{s.a } x_1^{m+1} = x_1^m + y_1^m - u_1^m - v_1^m \quad (2.xiii)$$

$$x_2^{m+1} = x_2^m + y_2^m + u_1^{m-\tau} + v_1^{m-\tau} - u_2^m - u_3^m - v_2^m \quad (2.xiv)$$

$$d^m = h_1^m + h_2^m + \Delta^m \quad (2.xv)$$

$$h_1^m = A1 \cdot u_1^m + E1 \cdot x_1^m + C1 \quad (2.xvi)$$

$$h_2^m = A2 \cdot u_2^m + A3 \cdot u_3^m + E2 \cdot x_2^m + C2 \quad (2.xvii)$$

$$\Delta^m \geq 0 \quad (2.xviii)$$

$$\underline{x}_1 \leq x_1^m \leq \bar{x}_1 \quad (2.xix)$$

$$\underline{x}_2 \leq x_2^m \leq \bar{x}_2 \quad (2.xx)$$

$$\underline{u}_1 \leq u_1^m \leq \bar{u}_1 \quad (2.xxii)$$

$$\underline{u}_2 \leq u_2^m \leq \bar{u}_2 \quad (2.xxiii)$$

$$\underline{u}_3 \leq u_3^m \leq \bar{u}_3 \quad (2.xxiiii)$$

$$v_1^m \geq 0 \quad (2.xxiv)$$

$$v_2^m \geq 0 \quad (2.xxv)$$

dados: x_1^0 ; x_2^0 ; y_1^m ; y_2^m ($m = 0, 1, 2, \dots, 41$)

$$u_1^{m-\tau} + v_1^{m-\tau} \quad (m = 0, 1, \dots, 8)$$

$$d^m \quad (m = 0, 1, 2, \dots, 41)$$

II.3.2) COMENTÁRIOS:

As equações (2.xvi) e (2.xvii) foram obtidas por linearizações das equações (2.xi) e (2.xii), onde foram feitas algumas simplificações: independência do vertimento; agregação das usinas de Moxotô e P.A - I-II-III; etc.

Os coeficientes A1, A2, A3, E1, E2, C1, C2 foram calculados através de linearizações e serão dados previamente a cada teste proposto, como veremos no capítulo IV.

Os dados processados foram (volumes 10^6 m^3 , afluências m^3/s)

$$x_1^0 = 19484 \quad ; \quad x_2^0 = 1150.$$

y_1^m ($m = 0, 1, 2, \dots, 41$) = (1528., 1528., 1528., 1493., 1493., 1493., 1493., 1493., 1493., 1493., 1458., 1458., 1458., 1528., 1528., 1528., 1424., 1424., 1424., 1424., 1424., 1424., 1424., 1424., 1424., 1424., 1493., 1493., 1493., 1319., 1319., 1319., 1319., 1319., 1319., 1285., 1285., 1285., 1319., 1319., 1319., 1319., 1319., 1319.)

$$y_2^m \quad (m = 0, 1, \dots, 41) = (0; 0; \dots; 0)$$

É indispensável considerar a água liberada por Sobradinho antes do período em estudo, mas que, devido ao atraso de transporte, chega em Moxotó no início deste período.

τ : 9 intervalos (de oito horas)

$$u_1^{m-\tau} + v_1^{m-\tau} \quad (m = 0, 1, \dots, 8) = (1528., 1806., 2083., 1597., 1875., 1979., 1701., 1736., 1944.)$$

Para demanda de energia, medida em Mw-médios, considerou-se:

$$d^m \quad (m = 0, 1, 2, \dots, 41) = (1808., 2190., 2463., 1879., 2276., 2559., 1816., 2200., 2474., 1844., 2234., 2512., 1911., 2315., 2604., 1835., 1956., 2413., 1738., 1571., 2176., 1859., 2253., 2533., 1906., 2309., 2596., 1864., 2258., 2539., 1833., 2220., 2497., 1833., 2220., 2497., 1894., 2019., 2491., 1698., 1535., 2126.)$$

II.3.3) INICIALIZAÇÃO:

$$a) \quad x_1^m = x_1^0 \quad ; \quad m = 1, 2, \dots, 42$$

$$x_2^m = x_2^0 \quad ; \quad m = 1, 2, \dots, 42$$

b) Variáveis básicas:

$$\begin{bmatrix} v_1^m \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} y_1^m \end{bmatrix} \quad ; \quad (m = 0, 1, \dots, 41)$$

$$\begin{bmatrix} v_2^m \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} y_2^m \end{bmatrix} \quad ; \quad (m = 0, 1, \dots, 41)$$

$$\left[\Delta^m \right]^T = \left[d^m + (C1 + C2) - (E1 \cdot x_1^0 + E2 \cdot x_2^0) \right]^T ; (m = 0, 1, \dots, 41)$$

c) Variáveis não-básicas:

$$\left[x_1^m \right]^T = \left[\bar{x}_1 \right]^T = [19484.]^T ; (m = 1, 2, \dots, 42)$$

$$\left[x_2^m \right]^T = \left[\bar{x}_2 \right]^T = [1150.] \quad (m = 1, 2, \dots, 42)$$

$$\left[u_1^m \right]^T = \left[\bar{u}_1 \right]^T = [0.] \quad (m = 0, 1, \dots, 41)$$

$$\left[u_2^m \right]^T = \left[\bar{u}_2 \right]^T = [0.] \quad (m = 0, 1, \dots, 41)$$

$$\left[u_3^m \right]^T = \left[\bar{u}_3 \right]^T = [0.] \quad (m = 0, 1, \dots, 41)$$

II.3.4) COMENTÁRIOS:

Quando for possível obter valor nulo para o funcional J, passa-se para a fase II (fase hidráulica); isto significa que é possível operar o sistema sem lançar mão de geração térmica ou corte de carga. A solução ótima da fase I fornece uma base inicial para a fase II (fase hidráulica).

II.4) FASE II (Fase Hidráulica):

Inicialmente foi adotado como objetivo da fase II a maximização do volume d'água que permanece em Sobradinho no final do horizonte de estudo.

Em relação à fase I, as únicas modificações são:

II.4.1) MAXIMIZAÇÃO DA FUNÇÃO-OBJETIVO:

$$J = x_1^{42} \quad (2.xxvi)$$

II.4.2) SUBSTITUIÇÃO DA RESTRIÇÃO (2.xv) por:

$$d^m = h_1^m + h_2^m \quad (2.xxvii)$$

II.5) PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL:

PASSO 1: Escolhe-se uma base Inicial I (ver II.3.2), e função ob-
jetivo sendo a soma dos deficit de energia.

PASSO 2: Chama-se o algoritmo Simplex-Canalizado.

PASSO 3: O valor da função objetivo é nulo? Se sim, vá para o -
passo 4. Caso contrário, pare e imprima solução infacti-
vel (deficit de energia) e termine a FASE I (têrmica).

PASSO 4: Inicie a FASE II (Fase hidráulica) com uma base inicial
determinada pela FASE I (Fase têrmica).

PASSO 5: Terminado o passo 4, chama-se a subrotina IMPRES.F10 a
fim de rearrumar as variáveis e os seus respectivos va-
lores. Vá para o passo 6.

PASSO 6: Terminado o passo 5, chama-se a subrotina XEQUE.F4 a fim
de verificar o fechamento das equações (2.i), (2.ii) e
(2.xv) ou (2.xvii) e calcula-se o erro cometido pela -
função linear e não linear, assim como erro acumulado
no final do horizonte.

II.6) COMENTÁRIOS:

Várias experiências foram desenvolvidas para as várias
dificuldades anteriormente citadas, assim como outras que foram

surgindo através das observações físicas feitas a partir das primeiras, levando-se em conta que o procedimento computacional realizado é sempre o mesmo, só mudando às vezes alguns parâmetros - das linearizações, e/ou os limites de turbinagem, o que ocorreria devido às peculiaridades do sistema.

CAPÍTULO III

MÉTODO SIMPLEX CANALIZADO [2]

III.1) INTRODUÇÃO:

Nos problemas práticos que ocorrem constantemente e que são tratados através da Programação linear, a maioria das variáveis são limitadas inferiormente e/ou superiormente. Em nosso problema, por exemplo, aparecem limitadas inferior e superiormente as variáveis turbinagem e volume nos reservatórios, enquanto que as variáveis vertimento e déficit de energia são limitadas inferiormente.

Uma variável x_i é limitada inferiormente por \underline{x}_i e superiormente por \bar{x}_i . Ao denotarmos os vetores limites inferiores e superiores respectivamente por \underline{X} e \bar{X} , nós podemos escrever um problema de programação linear Canalizado como sendo

$$(P) \begin{cases} \text{Min} : z = C \cdot X & (3.i) \\ \text{s.a} \quad A \cdot X = b & (3.ii) \\ \underline{X} \leq X_i \leq \bar{X} & (3.iii) \end{cases}$$

Como $A = (a_{ij})_{m \times n}$ com posto m , $b = (b_i)$, $C = (c_j)$
com $1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$.

O algoritmo se processa, partindo de uma solução básica factível e passando por soluções básicas factíveis intermediárias do sistema $AX = b$, $\underline{X} \leq X \leq \bar{X}$, até que a solução ótima seja alcançada, ou a solução ilimitada seja verificada.

III.2) NOTAÇÃO:

- $A(m;n)$: matriz de m linhas e n colunas
- $b(m,1)$: vetor coluna de m elementos; $b_1; b_2; \dots; b_m$
- $C(1,n)$: vetor coluna de n elementos; $c_1; c_2; \dots; c_n$
- A_i^k : indica o elemento da matriz A situado na k-ésima coluna e na i-ésima linha
- A^k : indica a k-ésima coluna da matriz A, ou seja, um vetor coluna de componentes $A_1^k; A_2^k; \dots; A_m^k$
- z : função-objetivo
- A_i : denota a i-ésima linha da matriz A
- $R1$: conjunto dos índices das variáveis não-básicas em seus limites inferiores.
- $R2$: conjunto dos índices das variáveis não-básicas em seus limites superiores.
- B : sub-matriz básica
- $N1$: sub-matriz não-básica cujas colunas correspondem às variáveis não-básicas em seus limites inferiores
- $N2$: sub-matriz não-básica cujas colunas correspondem às variáveis não-básicas em seus limites superiores
- \underline{X} : vetor dos limites inferiores
- \bar{X} : vetor dos limites superiores
- X^* : vetor constituído de variáveis básicas factíveis .

III.3) DEFINIÇÕES:

III.3.1) VARIÁVEL BÁSICA:

Diz-se que uma variável x_i é básica, se x_i estiver entre seus limites inferior e superior ($\underline{x} \leq x_i \leq \bar{x}$). Se x_i coincidir com algum de seus limites e continuar na base, então é dita degenerada.

III.3.2) VARIÁVEL NÃO-BÁSICA:

Diz-se que uma variável x_i é não-básica, se x_i coincide com um de seus limites.

III.3.3) SOLUÇÃO BÁSICA FACTÍVEL:

Uma solução básica X^* do problema (P) é dita factível, se satisfaz a $AX^* = b$ e $\underline{X} \leq X^* \leq \bar{X}$.

III.4) DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO BÁSICA FACTÍVEL:

Suponhamos que temos uma base B , e suponhamos que a matriz não-básica é decomposta em duas sub-rotinas $N1$ e $N2$; ou seja, $A = [B \mid N1 \mid N2]$, $X = [X_B \mid X_{N1} \mid X_{N2}]$, $C = [C_B \mid C_{N1} \mid C_{N2}]$.

De (3.iii) podemos tirar que

$$X_B = B^{-1} \cdot b - B^{-1} \cdot N1 \cdot X_{N1} - B^{-1} \cdot N2 \cdot X_{N2} \quad (3.iv)$$

Através de (3.i), temos:

$$z = C_B \cdot X_B + C_{N1} \cdot X_{N1} + C_{N2} \cdot X_{N2}$$

Substituindo-se (3.iv) nesta última expressão obtemos:

$$z = C_B \cdot B^{-1} \cdot b + (C_{N1} - C_B \cdot B^{-1} \cdot N1) \cdot X_{N1} + (C_{N2} - C_B \cdot B^{-1} \cdot N2) \cdot X_{N2} \quad (3.v)$$

onde $(C_{N1} - C_B \cdot B^{-1} \cdot N1)$ e $(C_{N2} - C_B \cdot B^{-1} \cdot N2)$ são vetores com os coeficientes da função-objetivo das variáveis não-básicas em seus limites inferiores e superiores respectivamente.

Seja k o índice de uma variável não-básica qualquer, e seja $c_k - z_k$ o seu coeficiente. Logo

$$c_k - z_k \in (C_{N1} - C_B \cdot B^{-1} \cdot N1) \quad \text{ou} \quad c_k - z_k \in (C_{N2} - C_B \cdot B^{-1} \cdot N2) .$$

Então podemos reescrever (3.v) da seguinte forma:

$$z = C_B \cdot B^{-1} \cdot b - \sum_{k \in R1} (z_k - c_k) \cdot x_k - \sum_{k \in R2} (z_k - c_k) \cdot x_k \quad (3.vi)$$

Suponhamos agora a variável não-básica de índice $k \in R1$. Para que a função-objetivo z possa decrescer é necessário que $z_k - c_k > 0$, para que possamos acrescentar x_k de seu limite inferior de um valor corrente Δ_k . Analogamente $k \in R2$ e $z_k - c_k < 0$ indicamos que a variável x_k deve decrescer de seu limite superior de um valor corrente Δ_k , tal que o valor Δ_k seja sempre menor ou igual a diferença entre o limite superior e inferior.

Iremos modificar uma única variável não-básica permanecendo as demais fixadas em seus respectivos limites. Feitas estas observações, podemos agora eleger o índice k da variável não-básica candidata a entrar na base como segue:

$$k = \text{Máx} \left[\begin{array}{l} \text{Máx}_{k \in R1} (z_k - c_k) ; \\ \text{Máx}_{k \in R2} (c_k - z_k) \end{array} \right] \quad (3.vii)$$

Se este máximo é positivo, então k é o índice onde o máximo é obtido. Se $k \in R1$, então x_k sofrerá um acréscimo Δ_k ; se

$k \in R2$, então x_k sofrerá um decréscimo de Δ_k . Se, porém, este máximo é ≤ 0 , então $z_k - c_k \leq 0, \forall k \in R1$ e $z_k - c_k \geq 0, \forall k \in R2$. Portanto, examinando a expressão (3.vi), concluímos que a solução corrente é ótima.

III.4.1) ACRÉSCIMO EM x_k A PARTIR DE SEU LIMITE INFERIOR \underline{x}_k :

Seja $x_k = \underline{x}_k + \Delta_k$. Substituindo-se em (3.iv) e (3.vi)

temos:

$$x_B = \hat{x}_B - A^k \cdot \Delta_k \quad (3.viii)$$

e

$$z = \hat{z} - (z_k - c_k) \cdot \Delta_k \quad (3.ix)$$

Desde que $(z_k - c_k) > 0$, pela equação (3.ix) vemos que Δ_k poderá crescer tanto quanto possível. Entretanto a equação (3.viii) nos diz que o acréscimo de Δ_k vai acarretar que uma das variáveis básicas atinja o seu limite inferior ou superior, tornando-se uma variável não-básica e por conseguinte bloqueando o crescimento de Δ_k .

III.4.2) UMA VARIÁVEL BÁSICA ALCANÇA SEU LIMITE INFERIOR:

Vamos denotar o valor de Δ_k no qual uma variável básica alcança seu limite inferior por γ_1 . Da equação (3.viii) temos

$$\underline{x}_B \leq x_B = \hat{x}_B - A^k \cdot \Delta_k, \quad A^k \cdot \Delta_k \leq \hat{x}_B - \underline{x}_B$$

Se $A^k \leq 0$, então Δ_k pode assumir um valor muito grande sem violar a desigualdade, e então $\gamma_1 \rightarrow \infty$ (i.e., nenhuma variável básica atinge o seu limite inferior). Caso contrário, γ_1 é

dado por:

$$\gamma_1 = \begin{cases} \min_{\ell \leq i \leq m} \left\{ \frac{\hat{X}_{B_i} - \bar{X}_{B_i}}{A_i^k} ; A_i^k > 0 \right\} & \text{se } A^k \geq 0 \\ \infty & \text{se } A^k < 0 \end{cases} = \frac{\hat{X}_{B_r} - \bar{X}_{B_r}}{A_r^k} \quad (3.x)$$

e portanto a variável básica que alcança o seu limite inferior localizada na linha r-ésima é a candidata a sair da base.

III.4.3) UMA VARIÁVEL BÁSICA ALCANÇA SEU LIMITE SUPERIOR:

Vamos denotar o valor de Δ_k no qual uma variável básica alcança seu limite superior por γ_2 . Da equação (3.viii) temos

$$\hat{X}_B - A^k \cdot \Delta_k = X_B \leq \bar{X}_B$$

e então,

$$\hat{X}_B - A^k \cdot \Delta_k \leq \bar{X}_B$$

e ainda podemos escrever que

$$-A^k \cdot \Delta_k \leq \bar{X}_B - \hat{X}_B$$

Se $A^k \geq 0$, então Δ_k pode assumir um valor muito grande sem que essa desigualdade seja violada, e então $\gamma_2 + \infty$ (i.e., nenhuma variável básica atinge o seu limite superior). Caso contrário, γ_2 é dado por:

$$\gamma_2 = \begin{cases} \min_{\ell \leq i \leq m} \left\{ \frac{\bar{X}_{B_i} - \hat{X}_{B_i}}{-A_i^k} ; A_i^k < 0 \right\} & \text{se } A^k \neq 0 \\ \infty & \text{se } A^k \geq 0 \end{cases} = \frac{\bar{X}_{B_r} - \hat{X}_{B_r}}{-A_r^k} \quad (3.xi)$$

e portanto a variável básica que atinge o seu limite superior é - uma candidata a sair da base.

III.4.4) x_k ALCANÇA O SEU LIMITE SUPERIOR POR SI MESMO:

O valor de Δ_k no qual x_k atinge o seu limite superior - \bar{x}_k é logicamente $\bar{x}_k - \underline{x}_k$. Dessa forma, vemos que Δ_k pode ser - bloqueado de 3 maneiras distintas e por conseguinte Δ_k é dado por

$$\Delta_k = \text{Min} \{ \gamma_1 ; \gamma_2 ; \bar{x}_k - \underline{x}_k \} \quad (3.xii)$$

Se $\Delta_k = \infty$, então o acréscimo em x_k é não bloqueada e pela equação (3.ix) a solução ótima é ilimitada. De outra forma, $\Delta_k < \infty$, e então uma nova solução factível básica é obtida onde $x_k = \underline{x}_k + \Delta_k$ e as variáveis básicas são modificadas de acordo com a equação (3.viii).

III.4.5) ATUALIZAÇÃO DA VARIÁVEL NÃO-BÁSICA, DA VARIÁVEL BÁSICA E DA FUNÇÃO OBJETIVO:

A nova solução básica factível reflete então as seguintes mudanças:

III.4.5.1) Se $\Delta_k = \bar{x}_k - \underline{x}_k$, então a troca da variável básica não é feita e x_k continua não-básica, só que agora encontra-se no limite superior. Sendo assim, somente é modificado o valor da função objetivo e da variável básica sem haver pivoteamento, e de acordo com as equações (3.ix) e (3.viii), \hat{z} é substituído por $\hat{z} - (z_k - c_k) \cdot \Delta_k$ e \hat{X}_B por $\hat{X}_B - A^k \cdot \Delta_k$.

III.4.5.2) Se Δ_k é dado por γ_1 ou γ_2 , então x_k entra na base e X_{B_r} sai da base, onde r é o índice determinado pela equação (3.x) se $\Delta_k = \gamma_1$, ou de acordo com a equação (3.xi) se $\Delta_k = \gamma_2$. E aí se processa o pivoteamento em A_r^k . Vale ressaltar aqui que este elemento pode ser positivo ou negativo, e os valores da função objetivo e da variável básica são atualizados de acordo com as equações (3.ix) e (3.viii), chamando-se só a atenção para o fato de que o elemento r -ésimo do vetor \hat{X}_B é substituído por $\underline{x}_k + \Delta_k$ para refletir o valor de x_k o qual justamente entrou na base.

De maneira análoga, podemos sintetizar o caso em que a variável caminha do limite superior em direção ao limite inferior.

III.4.6) DECRÉSCIMO EM x_k A PARTIR DO LIMITE SUPERIOR \bar{x}_k :

Neste caso $z_k - c_k < 0$ e $x_k = \bar{x}_k - \Delta_k$, onde $\Delta_k \geq 0$. Usando as equações (3.iv) e (3.iv) chegaremos às seguintes equações

$$X_B = \hat{X}_B + A^k \cdot \Delta_k \quad (3.xiii)$$

e

$$z = \hat{z} + (z_k - c_k) \cdot \Delta_k \quad (3.xiv)$$

O máximo decréscimo em Δ_k é dado pela equação (3.xii) onde γ_1 e γ_2 são dados a seguir:

$$\gamma_1 = \begin{cases} \min_{\ell \leq i \leq m} \left\{ \frac{\bar{X}_{B_i} - \hat{X}_{B_i}}{-A_i^k} : A_i^k < 0 \right\} = \frac{\bar{X}_{B_r} - \hat{X}_{B_r}}{-A_r^k} & \text{se } A^k \not\leq 0 \\ \infty & \text{se } A^k \geq 0 \end{cases} \quad (3.xv)$$

$$\gamma_2 = \begin{cases} \min_{\ell \leq i \leq m} \left\{ \frac{\bar{X}_{B_i} - \hat{X}_{B_i}}{A_i^k} ; A_i^k > 0 \right\} = \frac{\bar{X}_{B_r} - \hat{X}_{B_r}}{A_r^k} & \text{se } A^k \not\leq 0 \\ \infty & \text{se } A^k \leq 0 \end{cases} \quad (3.xvi)$$

Se $\Delta_k = \infty$, então o decréscimo de x_k é não bloqueado e pela equação (3.xiv) a solução ótima é ilimitada. Se $\Delta_k < \infty$, então a nova solução básica factível é obtida, onde $x_k = \bar{x}_k - \Delta_k$ e as variáveis básicas são modificadas de acordo com a equação (3.xiii).

III.4.7) ATUALIZAÇÃO DA VARIÁVEL NÃO-BÁSICA, DA VARIÁVEL BÁSICA E DA FUNÇÃO OBJETIVO:

III.4.7.1) Se $\Delta_k = \bar{x}_k - x_k$, então x_k é ainda não básica, mas no seu limite inferior, e a variável básica e a função objetivo são atualizadas de acordo com as equações (3.xiii) e (3.xiv). Por conseguinte não há pivoteamento.

III.4.7.2) Se Δ_k é dado por γ_1 ou γ_2 , então x_k entra na base e X_{B_r} sai da base, onde r é determinado por (3.xv) se

$\Delta_k = \gamma_1$ e pela equação (3.xvi) se $\Delta_k = \gamma_2$; novamente se processa o pivoteamento em A_r^k . A observação feita em (III.4.5.2) é válida aqui também; os valores da função objetivo e da variável básica são atualizados de acordo com as equações (3.xiv) e (3.xiii), enquanto que o r-ésimo elemento do vetor X_B é substituído por $\bar{x}_k - \Delta_k$ para refletir o valor de x_k o qual justamente entrou na base.

III.5) RESUMO DOS PRINCIPAIS PASSOS DO MÉTODO SIMPLEX-CANALIZADO:

III.5.1) INICIALIZAÇÃO DOS PASSOS:

Escolha as variáveis básicas e não-básicas em seus limites inferiores e superiores. Verifique se é possível obter uma solução básica factível sem o uso de variáveis artificiais *. Em caso afirmativo, inicialize o método; em caso negativo, adicione tantas variáveis quanto possível nas restrições que necessitarem, e inicie o método cuja função-objetivo é minimizar o somatório destas variáveis, até zerar o valor da função-objetivo. Com isto, está terminada a Fase I, e então obtemos uma solução básica factível para iniciar a Fase II, cuja função objetivo é a função original.

(*) Variável Artificial - É a variável que devemos acrescentar a uma determinada restrição a fim de obtermos uma forma canônica para inicializar o método, quando isto não é possível somente com as variáveis de folga.

III.5.2) PRINCIPAIS PASSOS:

PASSO 1: Se $z_k - c_k \leq 0$ para a variável não-básica em seu limite inferior e $z_k - c_k \geq 0$ para a variável não-básica em seu limite superior, então a solução é ótima. Caso contrário se uma das condições é violada para um índice k , então vá para o Passo 2 se x_k está no seu limite inferior, e para o Passo 5 se x_k está no seu limite superior.

PASSO 2: Use a equação (3.vii) para determinar o índice k da variável x_k , esta é acrescida de seu valor atual x_k para $x_k + \Delta_k$. O valor de Δ_k é dado pela equação (3.xiii) onde γ_1 e γ_2 são dados pelas equações (3.x) e (3.xi). Se $\Delta_k = \infty$, vá para o Passo 3, caso contrário vá para o Passo 4.

PASSO 3: A solução ótima é ilimitada, atualize e imprima os resultados e pare.

PASSO 4: Se $\Delta_k = \bar{x}_k - x_k$, então faça (III.4.5.1) e repita o Passo 1. Se Δ_k é dado por γ_1 ou γ_2 faça (III.4.5.2) e repita o Passo 1.

PASSO 5: Use a equação (3.viii) para determinar o índice k da variável x_k , esta é decrescida de seu valor atual \bar{x}_k para $\bar{x}_k - \Delta_k$. O valor de Δ_k é dado pela equação (3.xii) onde γ_1 e γ_2 são dados pelas equações (3.xv) e (3.xvi). Se $\Delta_k = \infty$, vá para o Passo 3, caso contrário vá para o Passo 6.

PASSO 6: Se $\Delta_k = \bar{x}_k - x_k$, então faça (III.4.7.1) e repita o Passo 1. Se Δ_k é dado por γ_1 ou γ_2 faça (III.4.7.2) e repita o Passo 1.

III.6) COMENTÁRIOS:

Na exposição deste capítulo, nada de novo quisemos acrescentar. O nosso intuito foi preparar elementos de que pudéssemos lançar mão para as explicações dos próximos itens, ou seja, procuramos mostrar de uma forma matricial a resolução do nosso problema e os procedimentos computacionais feitos para a solução do mesmo, juntamente com os diagramas de bloco sintetizados. Reconhecemos que fomos bastante sintéticos na exposição dos itens anteriores, ora deixando de definir algum elemento, ora deixando subentendida alguma passagem matemática. Isto se deve ao método ser bastante conhecido.

Para maiores esclarecimentos, consulte [2].

III.7) FORMULAÇÃO DO PROBLEMA PROPOSTO NA FORMA MATRICIAL:

$$(P) \begin{cases} \text{Máx } J = x_1^{42} \\ \text{s.a } AX = b \\ \underline{X} \leq X \leq \bar{X} \end{cases}$$

Onde A é uma matriz $m \times n$, b um vetor $m \times 1$ e X um vetor $n \times 1$, onde $m = 126$ e $n = 294$, adicionam-se mais 42 variáveis artificiais correspondentes aos déficits de energia no 39 bloco da matriz \bar{A} abaixo, $(\Delta^m, m = 0, 1, \dots, 41)$ a fim de incluirmos a possibilidade do nosso programa também atestar a necessidade de possi

veis gerações térmicas ou de carga no sistema. Com isso a matriz ficou aumentada e $\bar{A}_{126 \times 336}$ e o vetor $X'_{336 \times 1}$. Assim podemos formular uma Fase I que passaremos a chamar Fase Térmica, pois a nossa função-objetivo passa a ser minimizar a soma dos déficits de energia. Terminada a fase Térmica (desde que o valor da função artificial seja nula), passamos para a Fase II que passaremos a chamar de Fase Hidráulica, isto quer dizer que o sistema pode atender o mercado consumidor só com gerações hidráulicas. Podemos então enunciar o problema (P) como segue:

$$(P') \left\{ \begin{array}{l} \text{Min } J = \sum_{i=295}^{336} x_i \\ \text{s.a } \bar{A} X' = \underline{b} \\ \underline{X} \leq X' \leq \bar{X} \end{array} \right.$$

onde a matriz \bar{A} tem o seguinte formato:

$$\begin{array}{cccccccc}
 \left[\begin{array}{c} 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c} 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \\ -1 \ 1 \end{array} \right] \\
 \left. \begin{array}{l} E1 \\ E1 \\ E1 \\ E1 \end{array} \right\} & \left. \begin{array}{l} E2 \\ E2 \\ E2 \\ E2 \end{array} \right\} & \left. \begin{array}{l} A1 \\ A1 \\ A1 \\ A1 \end{array} \right\} & \left. \begin{array}{l} A2 \\ A2 \\ A2 \\ A2 \end{array} \right\} & \left. \begin{array}{l} A3 \\ A3 \\ A3 \\ A3 \end{array} \right\} & & & & \left. \begin{array}{l} 19b \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 29b \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 39b \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\}
 \end{array}$$

O vetor X' tem o seguinte formato:

$$X' = \left[x_1^i \mid x_2^j \mid x_3^k \mid x_4^\ell \mid x_5^m \mid x_6^n \mid x_7^0 \mid x_8^p \right]^T$$

onde

$$x_1^i = \left[x_1^1; \dots; x_1^{42} \right]^T \quad (\text{volume de Sobradinho}); i=1,2,\dots,42$$

$$x_2^j = \left[x_2^1; \dots; x_2^{42} \right]^T \quad (\text{volume de Moxotó}); j=1,2,\dots,42$$

$$x_3^k = u_1^k = \left[u_1^0; \dots; u_1^{41} \right]^T \quad (\text{turbinagem de Sobradinho}); k=0,1,\dots,41$$

$$x_4^\ell = u_2^\ell = \left[u_2^0; \dots; u_2^{41} \right]^T \quad (\text{turbinagem de Moxoto}); \ell=0,1,\dots,41$$

$$x_5^m = u_3^m = \left[u_3^0; \dots; u_3^{41} \right]^T \quad (\text{turbinagem de P.Afonso IV}); m=0,1,\dots,41$$

$$x_6^n = v_1^n = \left[v_1^0; \dots; v_1^{41} \right]^T \quad (\text{vertimento de Sobradinho}); m=0,1,\dots,41$$

$$x_7^0 = v_2^0 = \left[v_2^0; \dots; v_2^{41} \right]^T \quad (\text{vertimento no Complexo P.Afonso}); \\ m=0;1;\dots;41$$

$$x_8^p = \Delta^p = \left[\Delta^0; \dots; \Delta^{41} \right]^T \quad (\text{déficits de energia}); m=0;1;\dots;41$$

O vetor b tem o seguinte formato:

$$b = \left[b^1; b^2; \dots; b^{125}; b^{126} \right]^T$$

onde:

$$b^1 = x_1^0 + y_1^0; \quad b^i = y^i; \quad i = 2, \dots, 42$$

$$b^{43} = x_2^0 + y_2^0 + (u_1^{-9} + v_1^{-9}); \quad b^j = y_2^j + (u_1^{-1} + v_1^{-1}); \quad i=8,7,\dots,1 \\ j=44;\dots;52$$

$$b^i = y_2^i ; \quad i = 53; 54; \dots; 84$$

$$b^{85} = d^0 - (E1 \cdot X_1^0 + E2 \cdot X_2^0) + (C1 + C2)$$

$$b^i = d^i + (C1 + C2); \quad i = 86; \dots; 126.$$

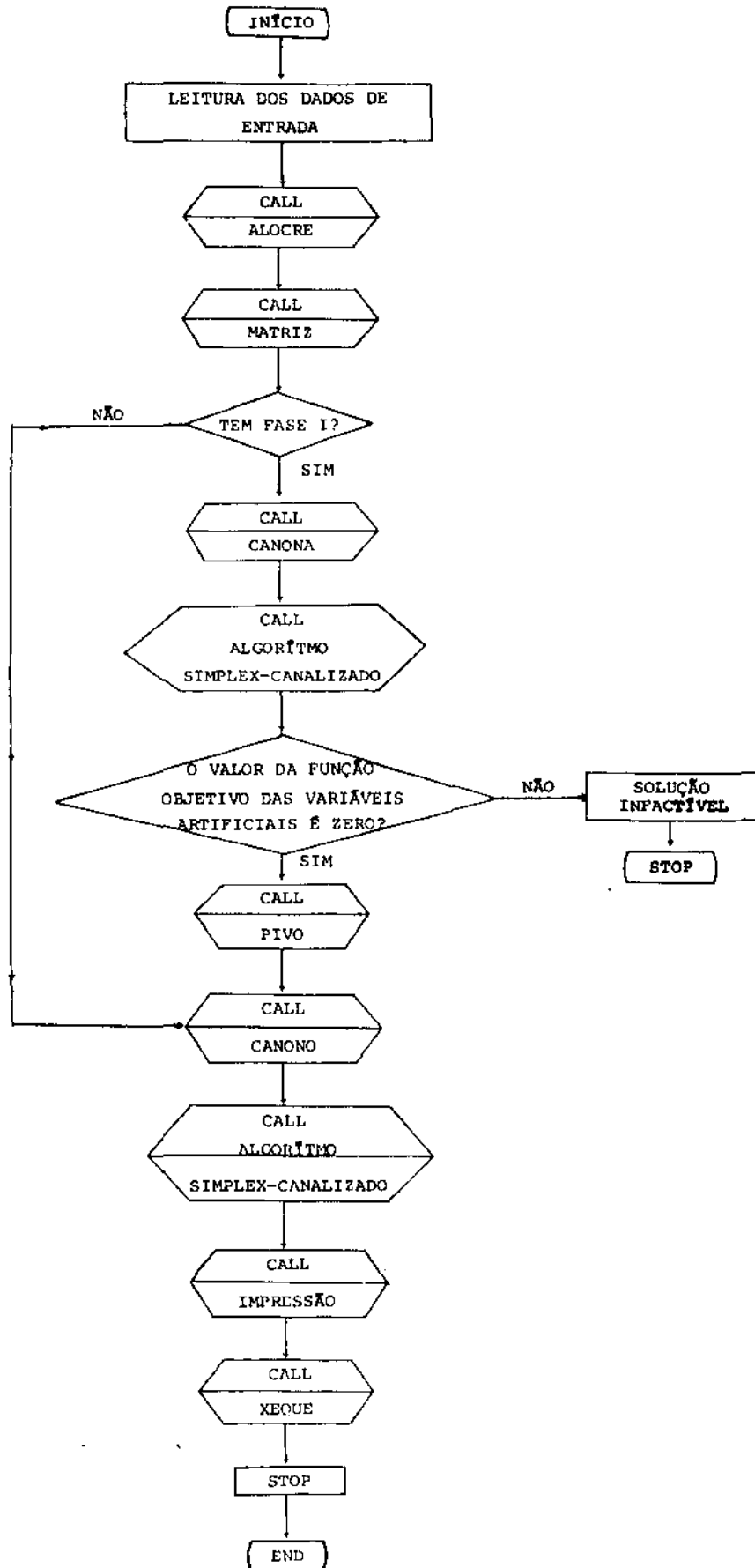
Terminada a Fase Térmica com a eliminação dos déficits de energia passaríamos para a Fase Hidráulica resolvendo o problema (P).

Feita essa apresentação matricial, passaremos a descrever o processo computacional realizado com o seu respectivo diagrama de blocos simplificados.

III.8) PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL:

Neste item, iremos expor todo o procedimento computacional desenvolvido para a resolução do problema proposto.

O programa computacional abrange o programa principal que compreende a Fase I e II e no seu interior possui 13 subrotinas. De modo geral podemos traduzir o programa Principal no seguinte diagrama de bloco:



III.8.1) COMENTÁRIOS SOBRE AS PRINCIPAIS SUBROTINAS:

a) SUBROTINA ALOCRE:

É a subrotina que recebe os dados fornecidos pelos técnicos da CHESF, tal como: afluência de Sobradinho, de Moxotô, os retardos de água, demanda, volumes iniciais, etc., e que faz as discretizações e transformações de unidades bem como cria o vetor B e XB.

b) SUBROTINA MATRIZ:

É aquela que gera a matriz das restrições.

c) SUBROTINA CANONA:

É aquela que torna nulos os custos básicos da função artificial.

d) SUBROTINA CANAL (ALGORITMO SIMPLEX-CANALIZADO):

É a subrotina que desenvolve o algoritmo simplex-canalizado tanto para a Fase I, como para a Fase II.

Possui 3 subrotinas acopladas que são PIVOT, ERO1, ERO2.

e) SUBROTINA PIVO:

É a subrotina que elimina as linhas redundantes, e atualiza o vetor das variáveis básicas.

f) SUBROTINA CANONO:

É a subrotina que torna nulos os custos básicos da função objetivo original e atualiza o vetor das variáveis não-básicas.

g) SUBROTINA IMPRESSÃO:

É a subrotina que imprime todos os elementos necessários do programa, como turbinagem, volume, etc.

h) SUBROTINA XEQUE:

É a subrotina que com os resultados da subrotina impressão checa a factibilidade das equações hidráulicas e energéticas; verifica também o erro por intervalo de tempo e o erro acumulado pelas duas funções de geração linearizada e não-linearizada.

CAPÍTULO IV

EXPERIÊNCIAS COMPUTACIONAIS

IV.1) INTRODUÇÃO:

O presente capítulo tem como objetivo investigar diversas contingências, expostas pelos técnicos da CHESF, quanto ao sistema hidroelétrico do Médio São Francisco. A investigação tratará não só do que foi apresentado em capítulos anteriores, como outras experiências que foram surgindo a partir da realização das primeiras. É importante ter em conta que a análise do sistema foi feita por meio de 43 testes computacionais, subdivididos em 11 grupos. Foram selecionados 13 testes que apresentavam informações mais relevantes sobre o sistema, visando não só a dar uma visão geral do funcionamento deste, como evitar o acúmulo de dados no capítulo.

Queremos frisar aqui que, de cada grupo de experiências, apresentaremos nas tabelas apenas valores que não foram citados no capítulo II, referentes aos coeficientes lineares e limites inferiores e superiores de turbinagem. Do mesmo modo, trataremos dos dados que sofreram modificações no curso das experiências; em alguns testes, colocaremos a listagem dos erros cometidos pela linearização em relação à função não-linear, assim como o erro acumulado no final do horizonte.

O tempo computacional para os diversos testes variou entre 2,5 a 4,5 minutos de C.P.U.

IV.2) GRUPO 1:

FINALIDADE: Observar a influência da variação do volume mínimo do reservatório de Moxotó, no funcionamento do sistema hidroelétrico da CHESF.

TESTE 1:

$A_1 \left(\frac{MW}{m^3/s} \right)$	$A_2 \left(\frac{MW}{m^3/s} \right)$	$A_3 \left(\frac{MW}{m^3/s} \right)$	$E_1 \left(\frac{MW}{10^6 m^3} \right)$	$E_2 \left(\frac{MW}{10^6 m^3} \right)$	C1 (MW)	C2 (MW)	Função Objetivo
0.22464	0.98784	1.0656	0.0073	0.1871	-140.7	-214.0	x_1^{42}

TABELA 4.1

	TURBINAGEM (m^3/s)				VOLUME ($10^6 m^3$)	
	SOBRADINHO	MOXOTÓ	P.A-I-II-III	P.A-IV	SOBRADINHO	MOXOTÓ
Máximo	$\bar{u}_1 = 4565.$	$\bar{u}_2 = 2270.$	$\bar{u}_2 = 2270.$	$\bar{u}_3 = 2450.$	19484.	1150.
Mínimo	$\underline{u}_1 = 0.$	$\underline{u}_2 = 0.$	$\underline{u}_2 = 0.$	$\underline{u}_3 = 0.$	19054.	1138.

TABELA 4.2

VOLUME MÍNIMO DE MOXOTÓ = 1138.

TESTE 2:

VOLUME MÍNIMO DE MOXOTÓ = 1144.

TESTE 3:

VOLUME MÍNIMO DE MOXOTÓ = 1148.

IV.2.1) COMENTÁRIOS:

Analisados os três testes anteriores, podemos tirar a conclusão de que a variação do volume inferior de Moxotó não altera em nada o funcionamento do sistema, o que é de fácil observação, visto que, comparadas as curvas, correspondentes às mesmas variáveis, a política é quase a mesma, com pequenas oscilações. Uma variação de 12 unidades de volume no reservatório de Moxotó acarreta uma variação de apenas 10cm de cota neste reservatório; devido a estes fatos, o reservatório de Moxotó pode ser considerado a fio d'água.

A partir destes testes básicos podemos tirar outras conclusões que serviram como elementos para testes posteriores:

- a) Sendo a função-objetivo $J = x_1^{42}$, é fácil verificar que a otimização do sistema nos mostra que a água que percorreria o espaço entre o intervalo de discretização 33 a 42 não seria usada. Ela é retida pelo sistema, o que leva o reservatório de Sobradinho a acumular água até o final do horizonte de discretização;
- b) De acordo com a observação feita no item (a), verifica-se também que, a partir do instante 33, as turbinagens e vertimentos de Sobradinho tornam-se nulos, o que explica a permanência do acúmulo de água em Sobradinho no final do horizonte;
- c) Verifica-se também que as usinas de Moxotó e P.A-I-II-III foram inoperantes para a demanda atual, ou seja, as usinas de Sobradinho e P.A-IV são suficientes para atender o mercado;

d) Como se vê neste grupo de teste, existem vertimentos em Sobradinho, seja no início do horizonte, seja em outros intervalos, o que nos levou a supor a existência de água em demasia no sistema.

Os vertimentos iniciais em Sobradinho são compreensíveis, devido a iniciarmos com o volume de Sobradinho no valor máximo, e a água afluente a este reservatório ser maior do que a necessária para ser turbinada, o que acarretaria uma sobra de água que, somada à água já existente no reservatório, não poderá ser maior do que o máximo permitido, daí a necessidade do vertimento inicial. A ocorrência de vertimentos subsequentes nos leva a duas suposições: 1a.) A quantidade de água no sistema é demasiada; 2a.) Se ocorrerem vertimentos em períodos em que a turbinagem de Sobradinho é praticamente zero, é devido a necessidade de se abastecer o reservatório de Moxotô. Por causa destes fatos, foi realizado o Grupo 2 de experiências, que consiste na retirada de uma quantidade de água igual a $139 \text{ m}^3/\text{s}$ em todos os intervalos de tempo nas afluições de Sobradinho, de modo a diminuir água no sistema.

IV.3) GRUPO 2:

FINALIDADE: Verificar a existência de vertimentos em Sobradinho em intervalos de tempo posteriores aos iniciais, visando atestar a existência de água a mais no sistema.

TESTE 4:

$$A1 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right) = 0.22176 ; \text{ VOLUME MÍNIMO DE MOXOTÔ} = 1138.$$

IV.3.1) COMENTÁRIOS:

Observa-se que a retirada de água do sistema implica no término dos vertimentos em Sobradinho nos instantes superiores ao nono intervalo de tempo, acarretando, logicamente, em turbinagens maiores, o que nos leva a corrigir o parâmetro A1 da linearização, procurando com isso uma diminuição dos erros por ela provocados. Observa-se também que o fato de Sobradinho turbinar mais faz com que P.A-IV diminua um pouco a sua geração, o que provoca uma maior estabilidade do nível superior de Moxotó na maioria dos intervalos. Entretanto, as usinas de Moxotó e P.A-I-II-III continuam inoperantes, fatos estes que nos faz supor possíveis contingências na usina de P.A-IV, como, por exemplo: quebra de máquinas, trabalhos de manutenção, corte de carga, etc. Procuramos prever isto de forma gradativa, já que sendo P.A-IV a usina de maior rendimento energético, precisaríamos ter um maior conhecimento sobre a mesma.

IV.4) GRUPO 3:

FINALIDADE: Verificar possíveis contingências na usina de P.A-IV, como parada de máquinas para manutenção ou por quebra, e, por conseguinte, a possível entrada da usina de Moxotó, que se encontrava inoperante, em funcionamento.

TESTE 9:

$$A1 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right) = 0.22176 ; A2 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right) = 0.98784 ; A3 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right) = 1.07136$$

$$\bar{u}_3 = 2040 \text{ m}^3/\text{s} \quad (- 1 \text{ máquina parada em P.A-IV})$$

TESTE 13:

$$A1 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right) = 0.22176 ; A2 \frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} = 0.99648 ; A3 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right) = 1.0761$$

$$\bar{u}_3 = 1624 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (- 2 máquinas paradas em P.A-IV).}$$

IV.4.3) TESTE 15:

$$A1 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right) = 0.22176 ; A2 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right) = 0.964224 ; A3 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right) = 1.0761$$

$$\bar{u}_3 = 0. \text{ (Todas as máquinas paradas em P.A-IV).}$$

 1665/08
 180/3991
IV.4.1) COMENTÁRIOS:

Analisando o teste 9, é fácil observar a pequena participação da usina de Moxotó, reduzida a alguns intervalos de tempo, que aumenta apenas a partir do trigésimo terceiro intervalo, devido ao fato da usina de Sobradinho parar de turbinar e verter por causa da função-objetivo que exige o máximo de volume no final do horizonte. Assim, P.A-IV não é suficiente para gerar a demanda, já que o seu limite superior de turbinagem é menor, pois estamos partindo do pressuposto que esteja sem uma máquina em funcionamento.

Já no teste 13, é visível a participação maior da usina de Moxotó na maioria dos intervalos, devido à paralização de mais uma máquina em P.A-IV.

No teste 15, as nossas suspeitas ficam totalmente confirmadas, pois, examinando-se as curvas, verificam-se fatos importantes como:

- a) Estando P.A-IV sem funcionar, é possível atender ainda à demanda existente;
- b) O vertimento de Sobradinho só existe no primeiro intervalo e mesmo assim relativamente pequeno, o que é explicado pelo fato de toda a água vinda de Sobradinho ter sido turbinada a fim de suprir a falta de P.A-IV;
- c) O nível do reservatório de Sobradinho no final do horizonte é bem inferior se comparado com os de outros testes anteriores. Isto é justificável, pois, se observamos a curva da turbinagem de Sobradinho em alguns dos nove últimos intervalos de tempo, veremos que houve turbinagens maiores, o que não ocorreu nos testes anteriores devido a P.A-IV estar funcionando;
- d) A curva de turbinagem de Moxotó nos mostra, de fato, que neste último teste os valores nunca são inferiores a $1200 \text{m}^3/\text{s}$. Esta cifra equivale em parte aos $1624 \text{m}^3/\text{s}$ de P.A-IV no teste 13. Daí concluímos que é possível atender à demanda com a água existente no sistema, sem recorrer ao funcionamento de P.A-IV.

IV.5) GRUPO 4:

FINALIDADE: Verificar possíveis contingências simultâneas em Sobradinho e P.A-IV, supondo saídas de máquinas de operação.

$A1 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right)$	$A2 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right)$	$A3 \left(\frac{\text{MW}}{\text{m}^3/\text{s}} \right)$	$E1 \left(\frac{\text{MW}}{10^6 \text{m}^3} \right)$	$E2 \left(\frac{\text{MW}}{10^6 \text{m}^3} \right)$	C1 (MW)	C2 (MW)	Função Objetivo
0.22176	0.99648	1.0761	0.0073	0.1871	-140.7	-214.0	x_1^{42}

TABELA 4.3

TESTE 21:

$$\bar{u}_1 = 3804 \text{ m}^3/\text{s} \quad (- 1 \text{ máquina parada em Sobradinho})$$

$$\bar{u}_3 = 1624 \text{ m}^3/\text{s} \quad (- 2 \text{ máquinas paradas em P.A-IV})$$

TESTE 25:

$$\bar{u}_1 = 3043 \text{ m}^3/\text{s} \quad (- 2 \text{ máquinas paradas em Sobradinho})$$

$$\bar{u}_3 = 1624 \text{ m}^3/\text{s} \quad (-2 \text{ máquinas paradas em P.A-IV})$$

IV.5.1) COMENTÁRIOS:

Este grupo nos mostra o seguinte resultado:

Se compararmos as curvas uma a uma, veremos que são iguais. Isto nos leva a concluir que o sistema funcionaria para atender à demanda com uma única máquina em funcionamento em Sobradinho, uma em P.A-IV e com Moxotô gerando uma certa quantidade de energia a fim de contrabalançar a parada de máquinas em Sobradinho e P.A-IV.

IV.6) GRUPO 5:

FINALIDADE: Verificar a influência da água existente entre Sobradinho e Moxotô nos nove primeiros intervalos de tempo (retardo) no funcionamento do sistema. Para isso foi retirada a metade do volume de água de cada um dos 9 intervalos iniciais e o montante foi acrescido ao volume inicial de Sobradinho.

TESTE 27:

A1 $\left(\frac{MW}{m^3/s}\right)$	A2 $\left(\frac{MW}{m^3/s}\right)$	A3 $\left(\frac{MW}{m^3/s}\right)$	E1 $\left(\frac{MW}{10^6 m}\right)$	E2 $\left(\frac{MW}{10^6 m}\right)$	C1 (MW)	C2 (MW)	Função Objetivo
0.22464	0.98784	1.0656	0.0073	0.1871	-140.7	-214.0	x_1^{42}

TABELA 4.4

IV.6.1) COMENTÁRIOS:

Observando-se as curvas e comparando-as com as do primeiro grupo, verificamos que as mudanças são poucas, o que nos leva a concluir que ao retirarmos uma parcela bem acentuada da água entre Sobradinho e Moxotó a política é quase a mesma que a do grupo 1, devido ao sistema permanecer com a mesma quantidade de água.

IV.7) GRUPO 6:

FINALIDADE: Pesquisar novas funções-objetivos, a fim de obter, no final do horizonte, melhores condições para um novo período.

TESTE 33:

$$\text{Função-Objetivo: } J = x_1^{42} + 1 \cdot \sum_{m=33}^{41} u_1^m$$

TESTE 37:

$$\text{Função-Objetivo: } J = x_1^{42} + 5 \cdot \sum_{m=33}^{41} u_1^m$$

IV.7.1) COMENTÁRIOS:

Comparando-se as curvas dos testes 33 e 37, observamos poucas variações nas curvas. Há diferenças nas curvas de volume e

turbinagem de Sobradinho, porque no teste 37 premiamos a turbinagem com um maior valor nos nove últimos períodos de tempo, o que acarretou uma turbinagem um pouco superior à do teste 33 e a redução do volume em Sobradinho. Mesmo tais diferenças, entretanto, não são significativas, o que nos leva a concluir que a premiação maior (5 vezes mais) da turbinagem nos últimos intervalos de tempo não acarreta grandes mudanças na política a ser tomada.

IV.8) GRUPO 7:

FINALIDADE: Verificar o atendimento de um aumento na demanda da ordem de 80%, supondo-se um aumento de afluência em Sobradinho de $1320 \text{ m}^3/\text{s}$ a cada intervalo de tempo.

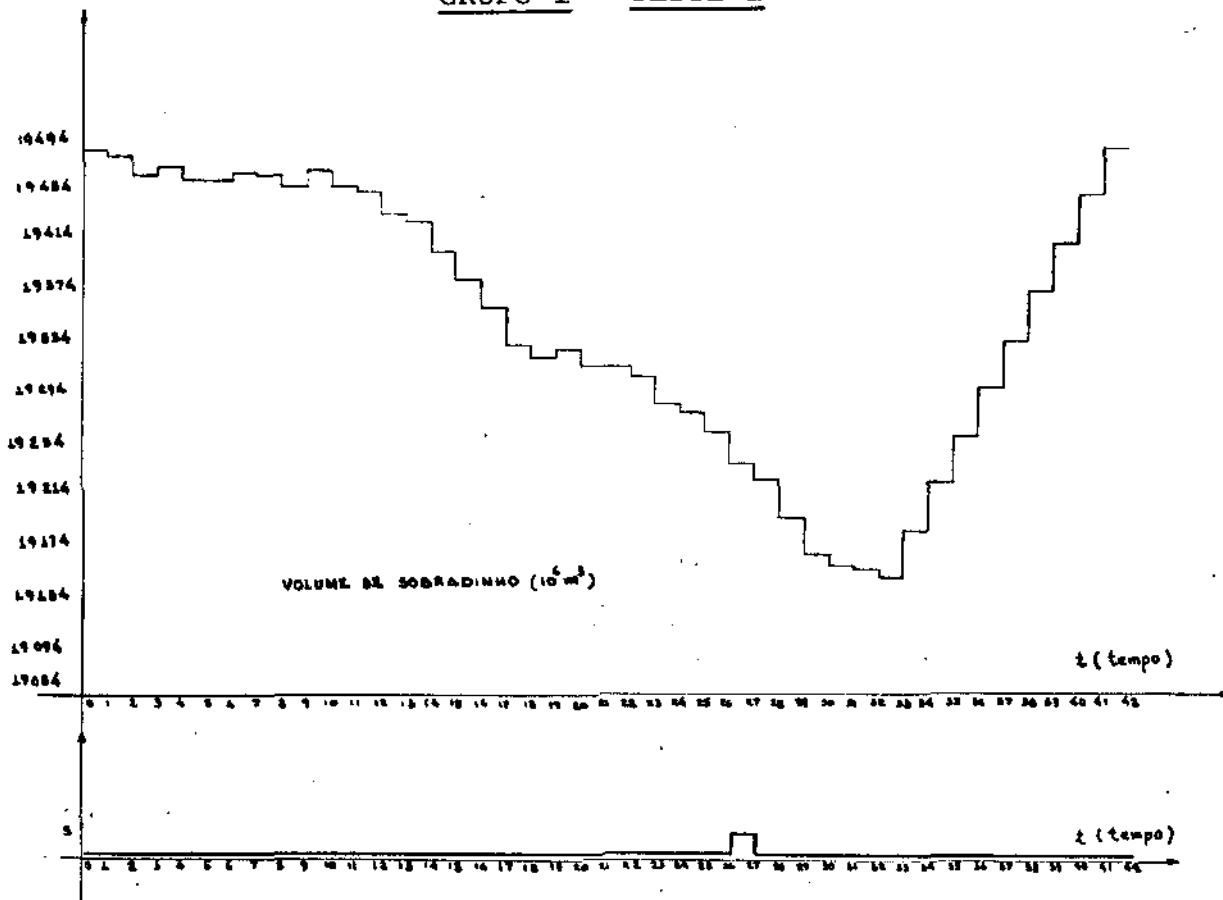
TESTE 43:

IV.8.1) COMENTÁRIOS:

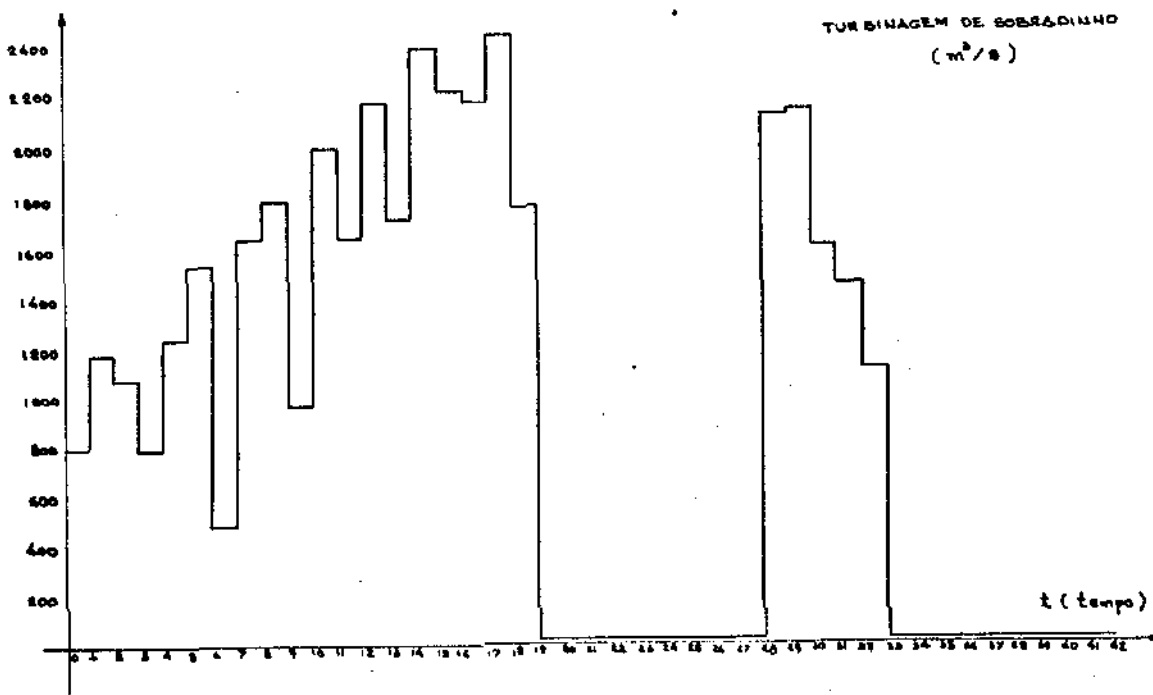
Observando-se as curvas, conclui-se que é possível atender a este tipo de acréscimo da demanda, desde que admitamos maior quantidade de água no sistema.

IV.9) CURVAS DOS TESTES:

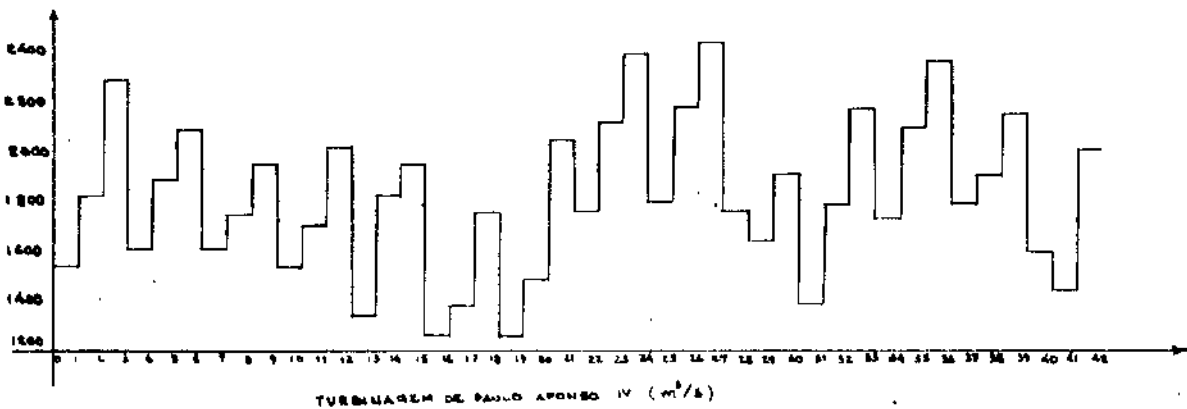
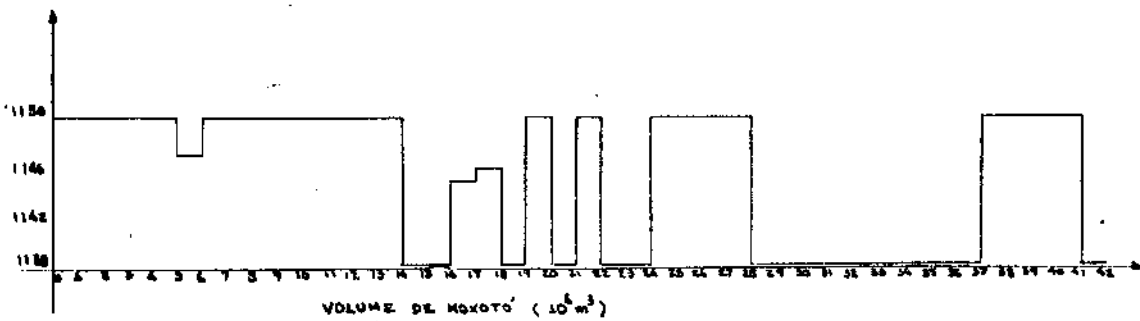
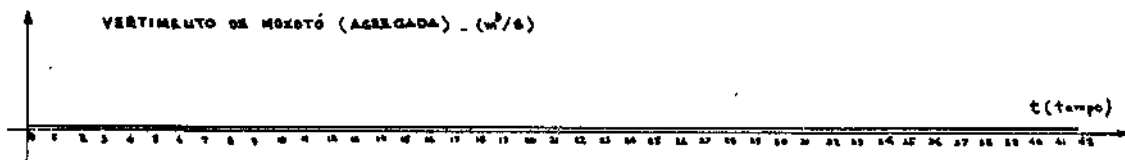
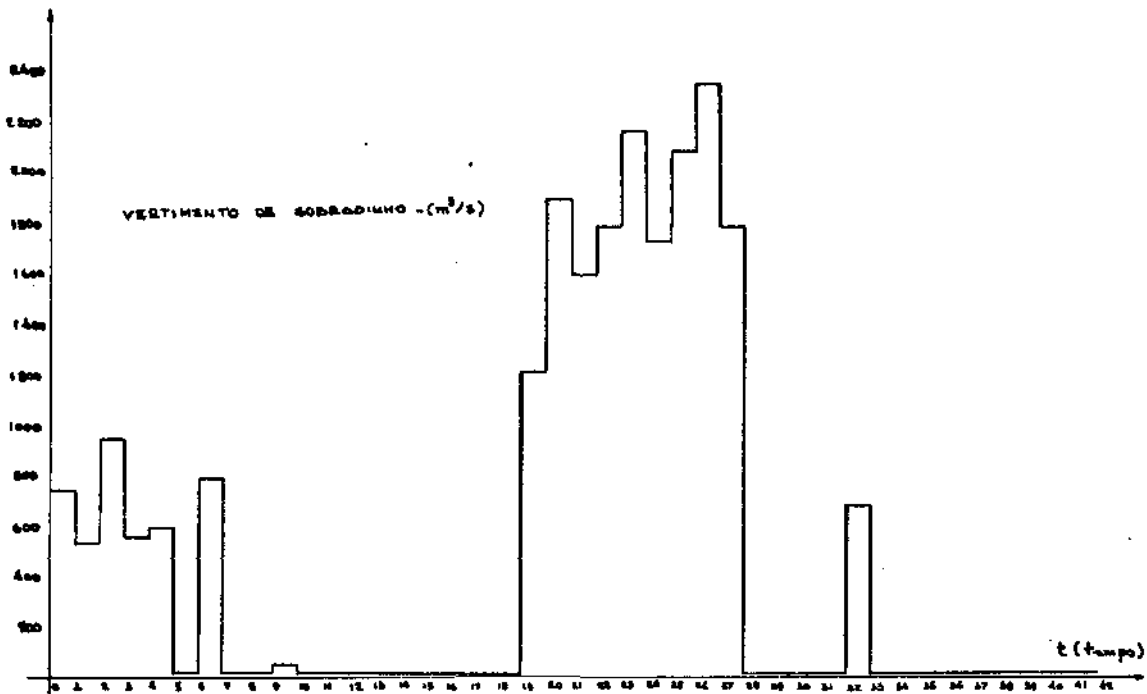
GRUPO 1 - TESTE 1

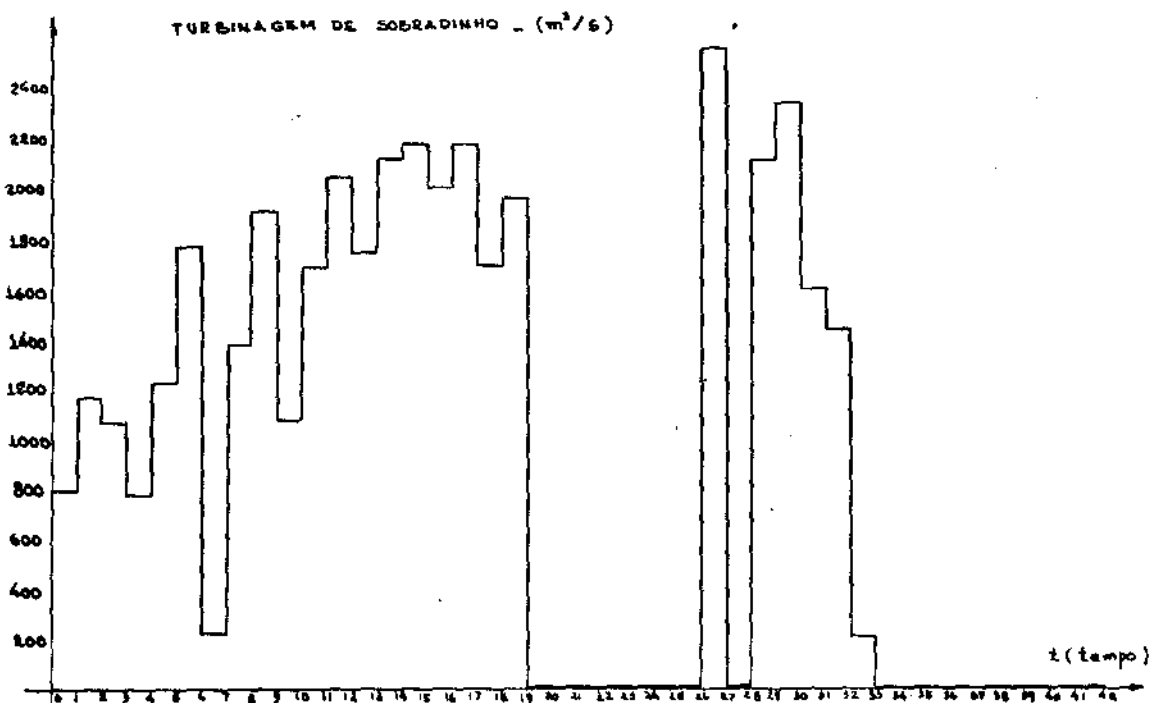
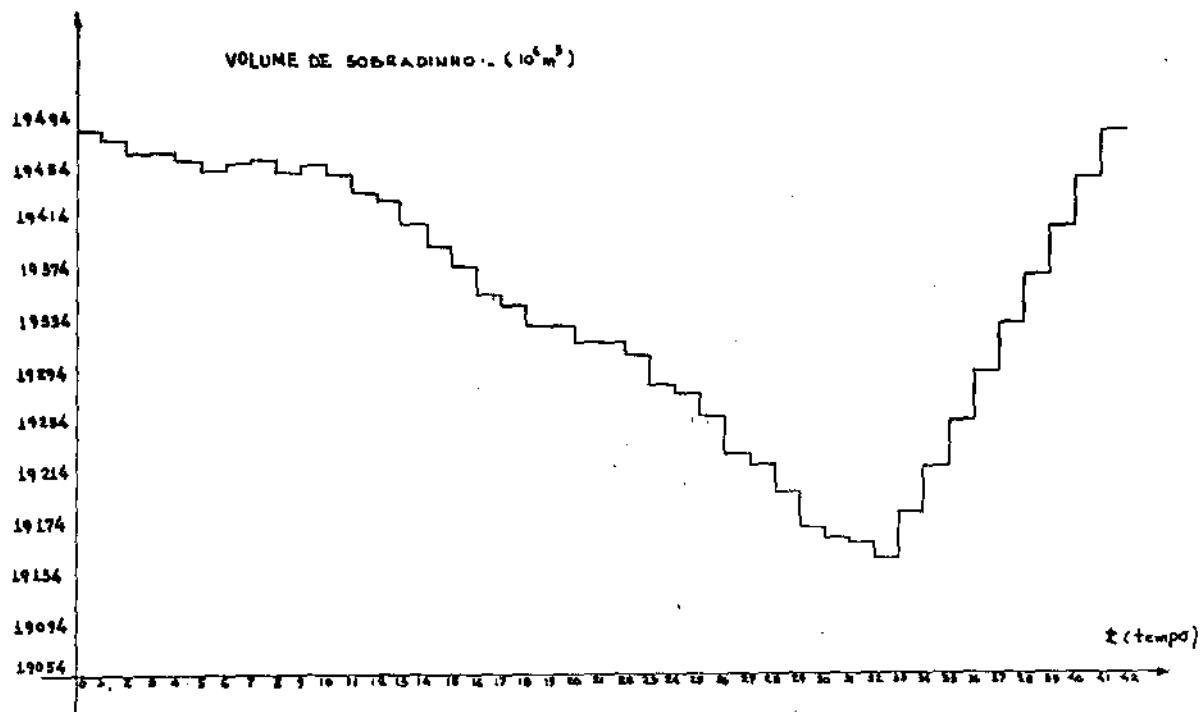


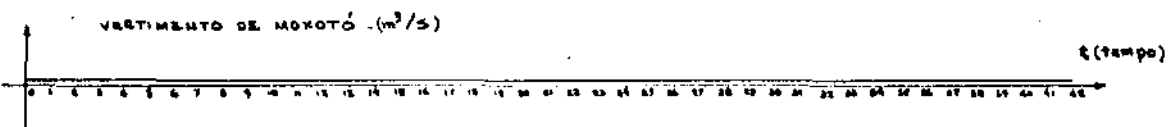
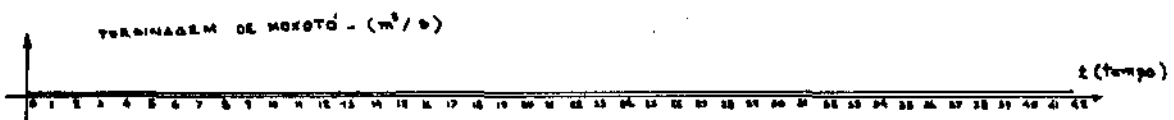
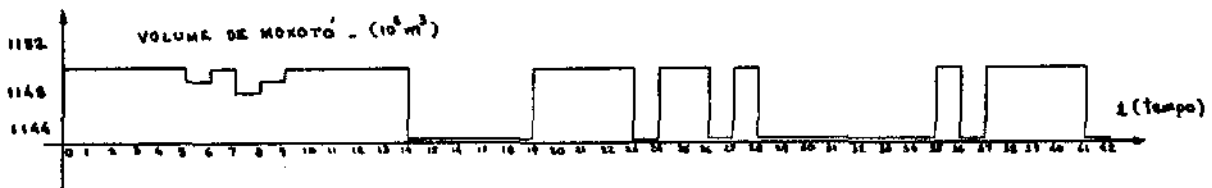
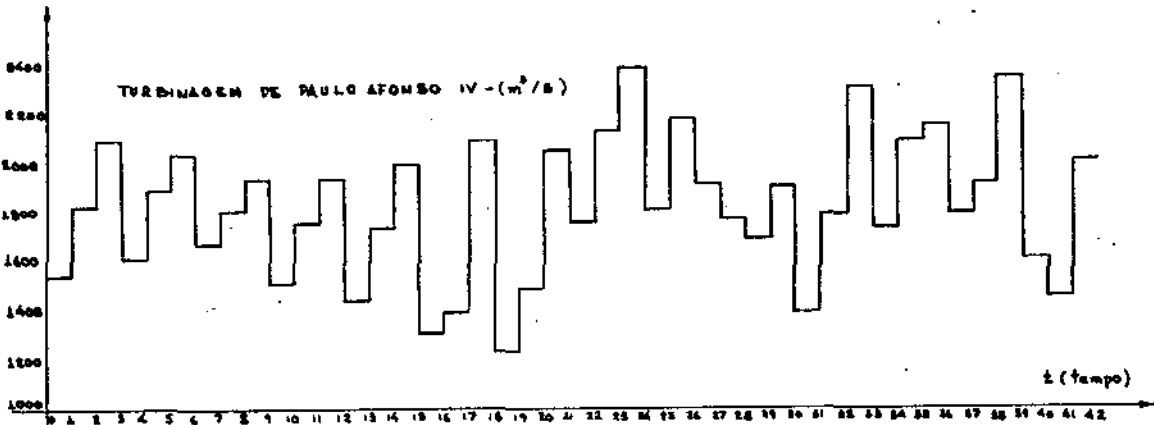
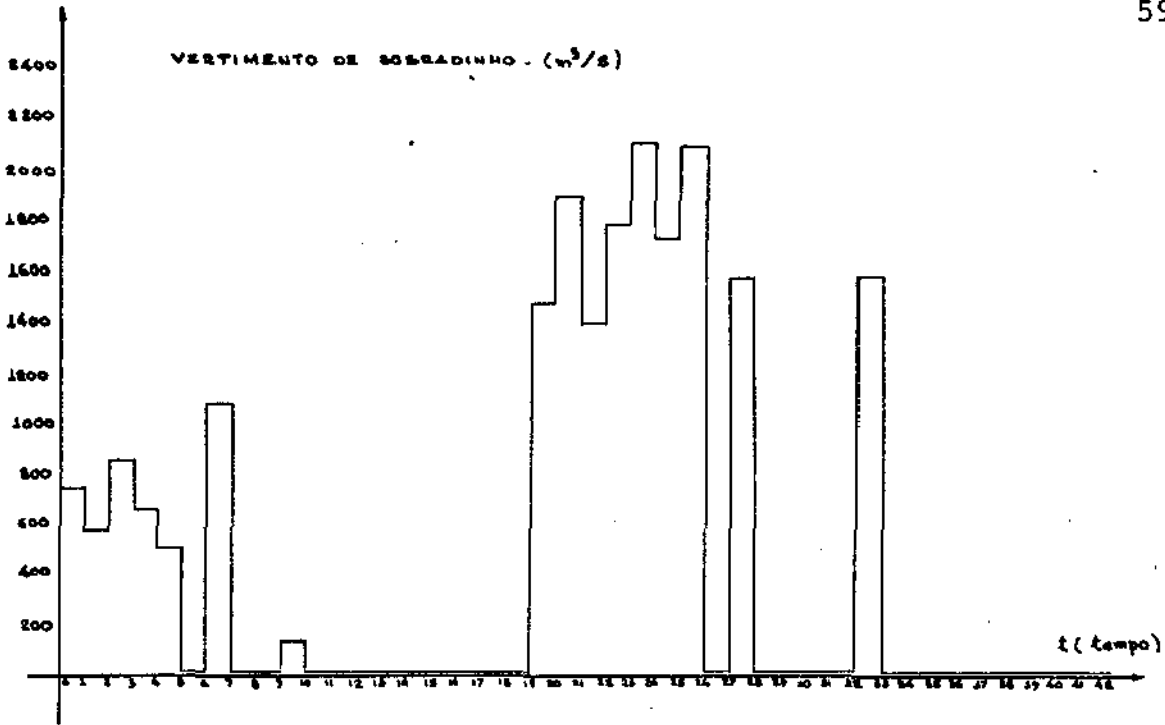
TURBINAGEM DE AXOTÓ (ARRIÇADAS) - (m³/s)



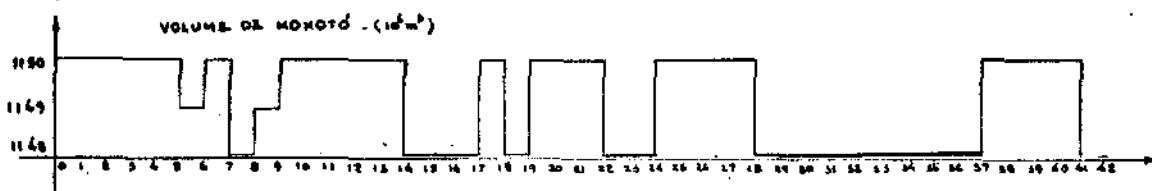
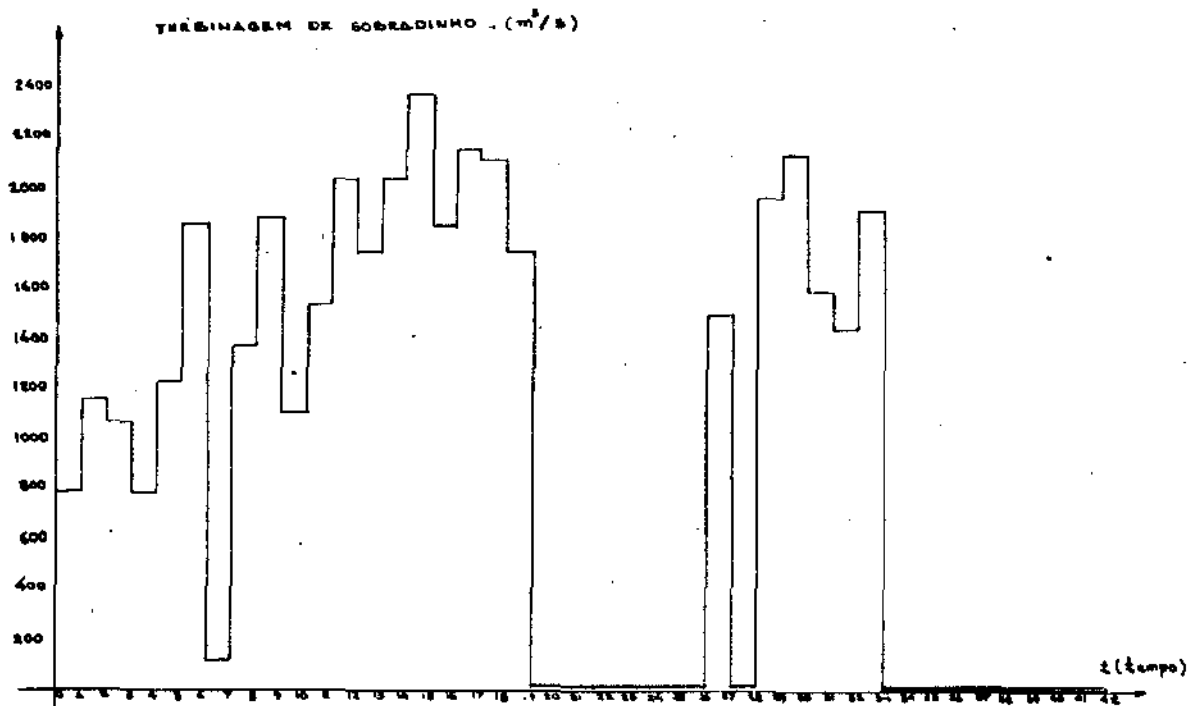
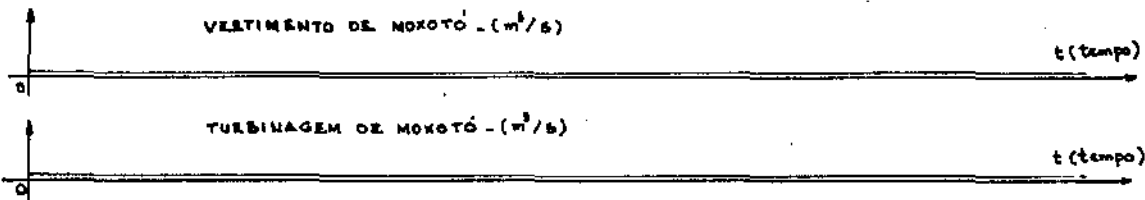
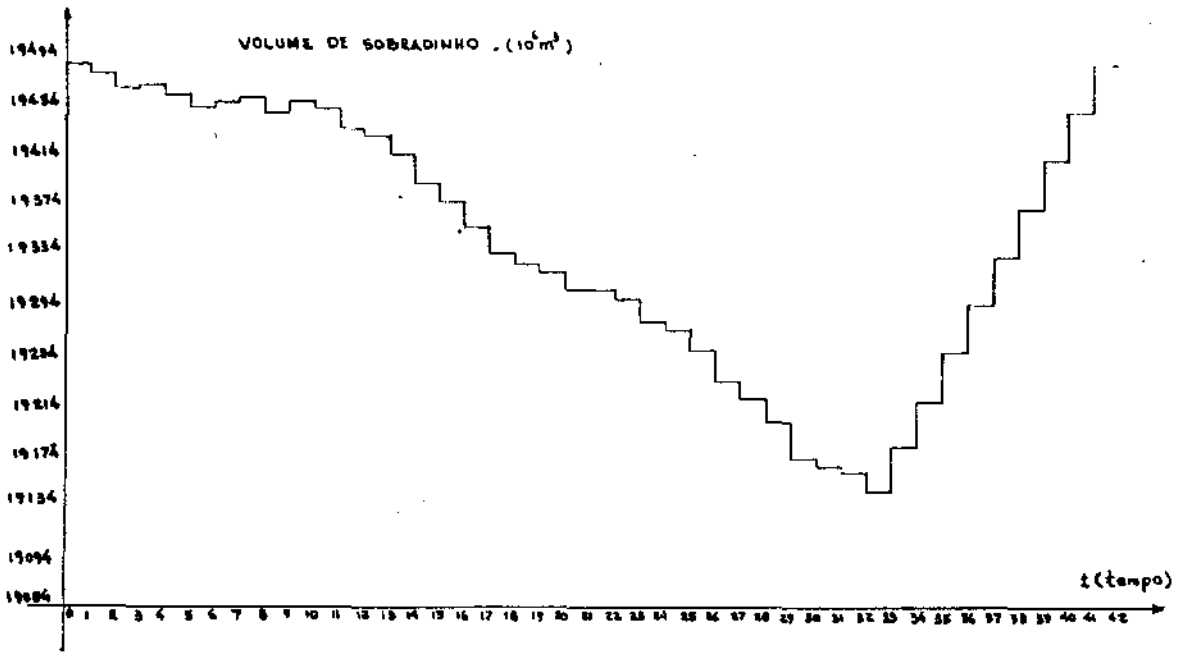
TURBINAGEM DE SOBRADINHO (m³/s)

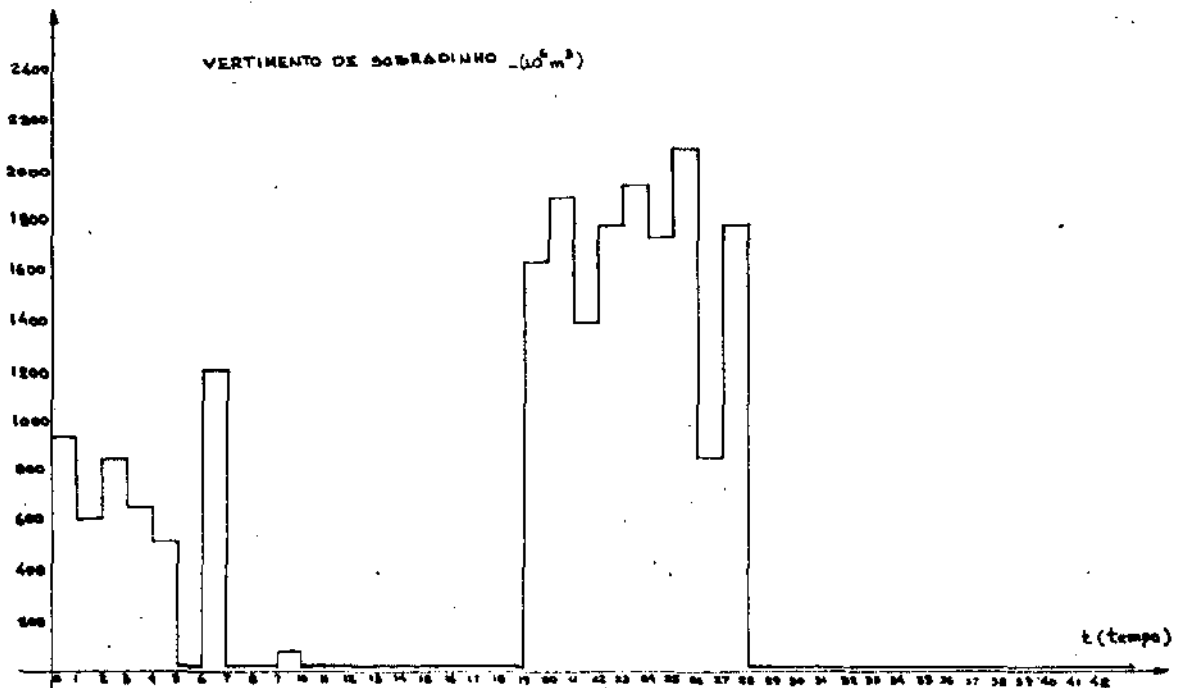
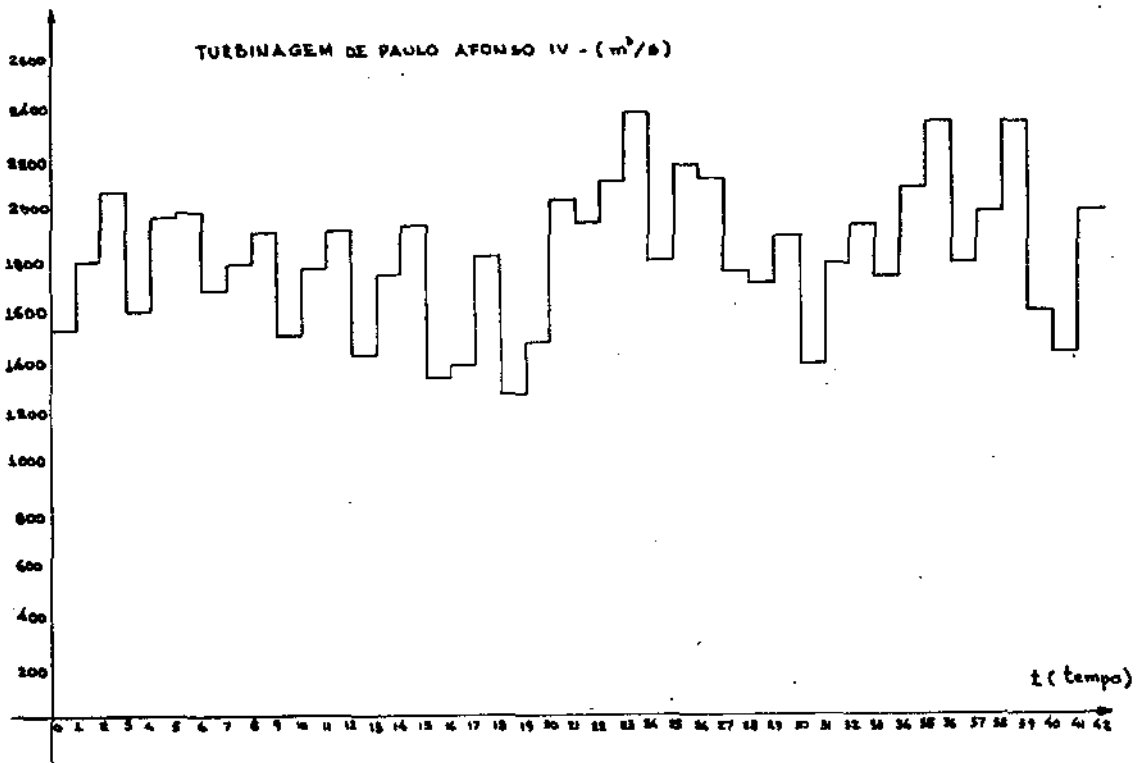


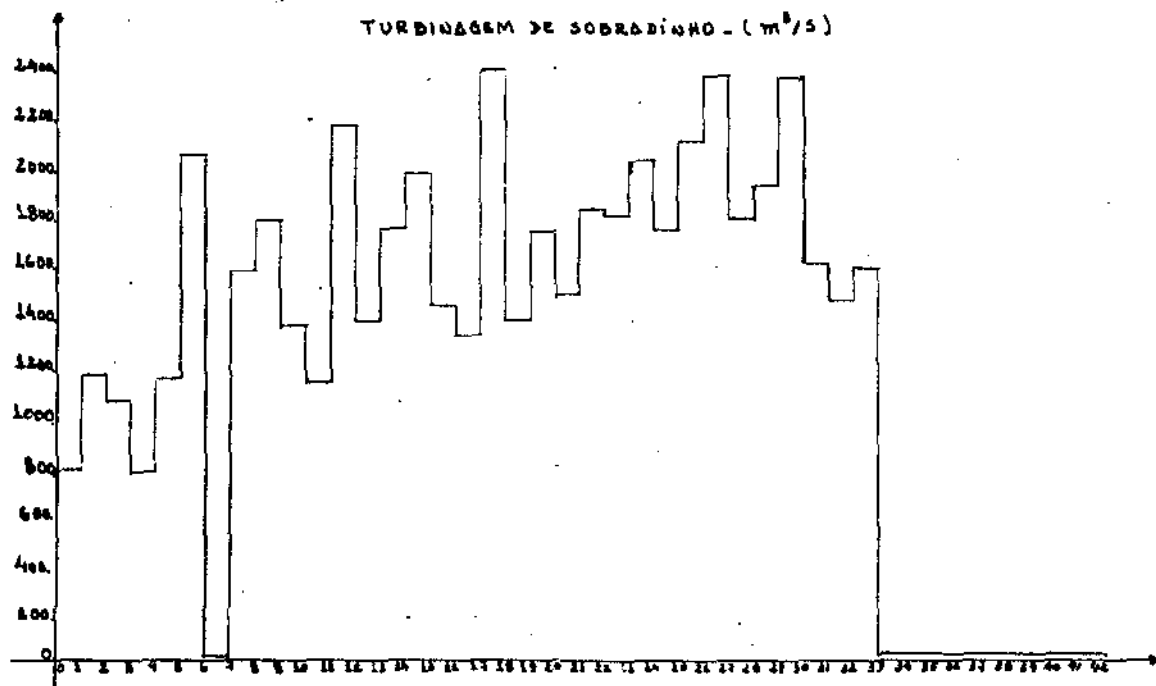
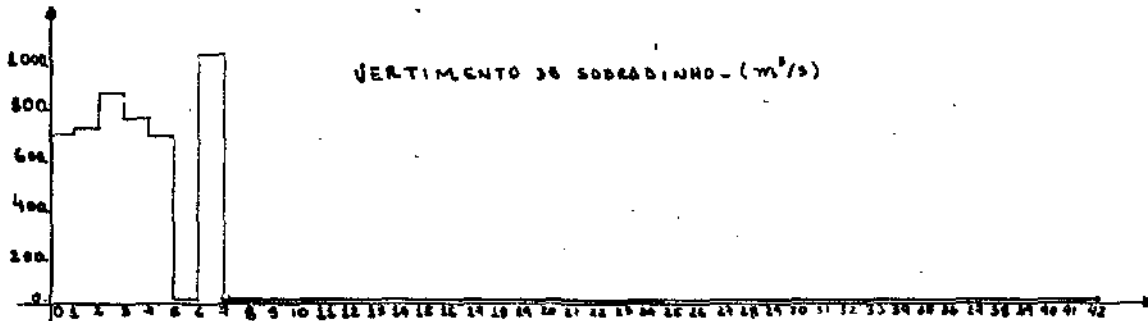
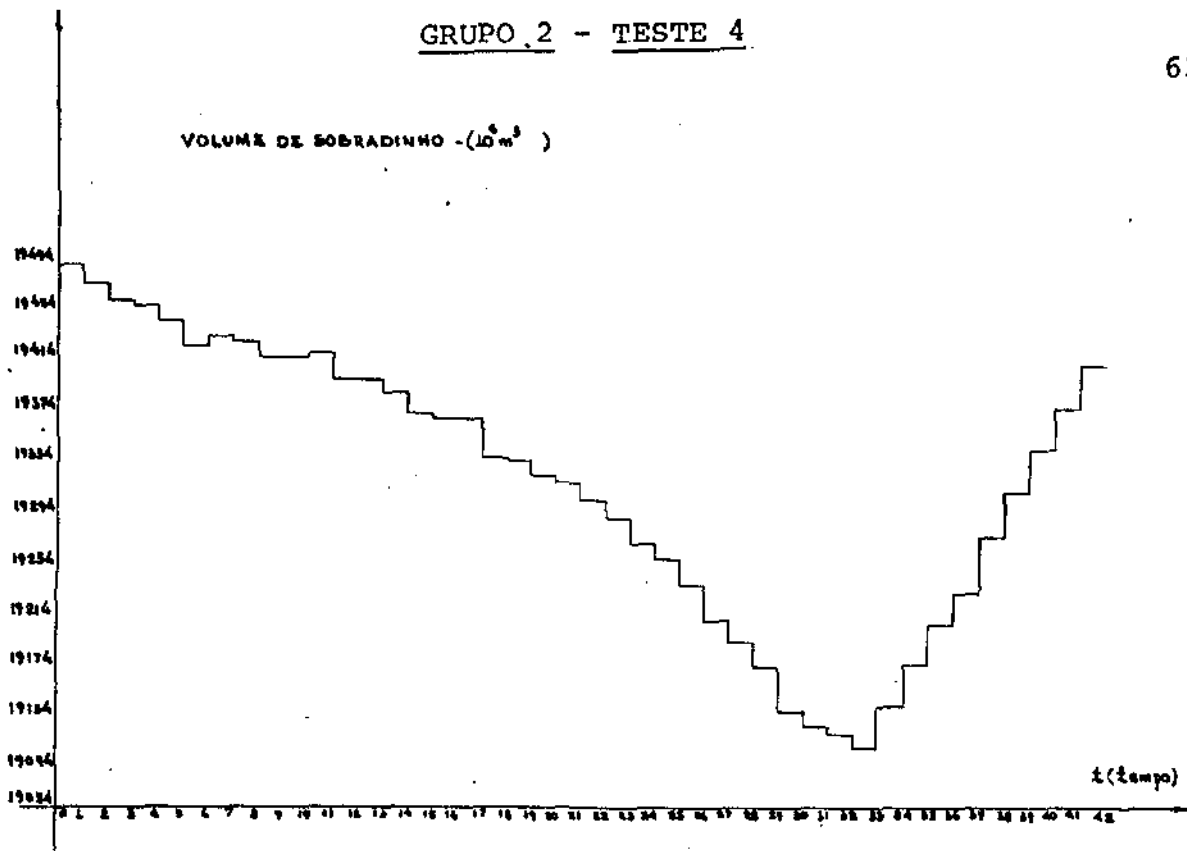


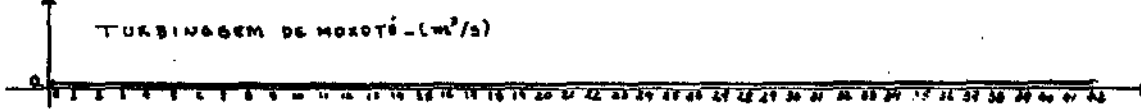
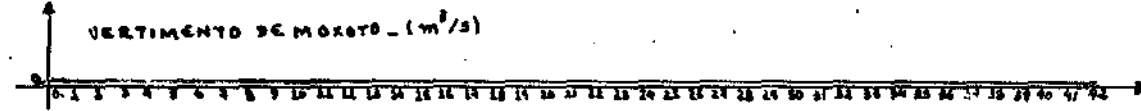
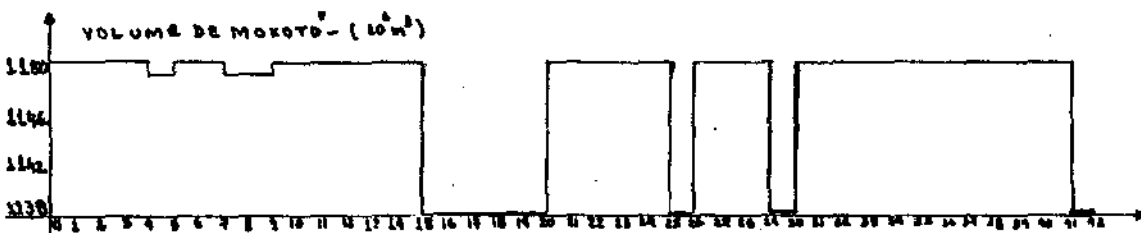
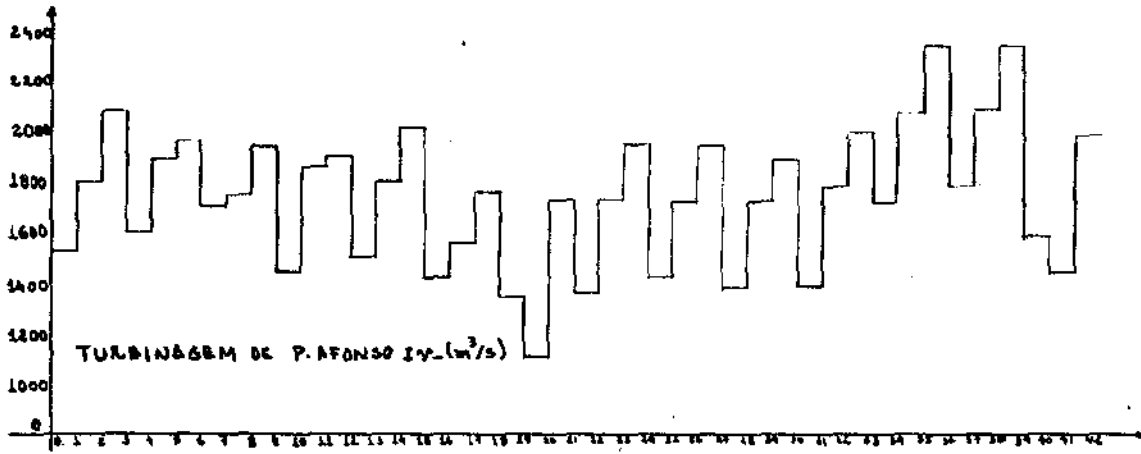


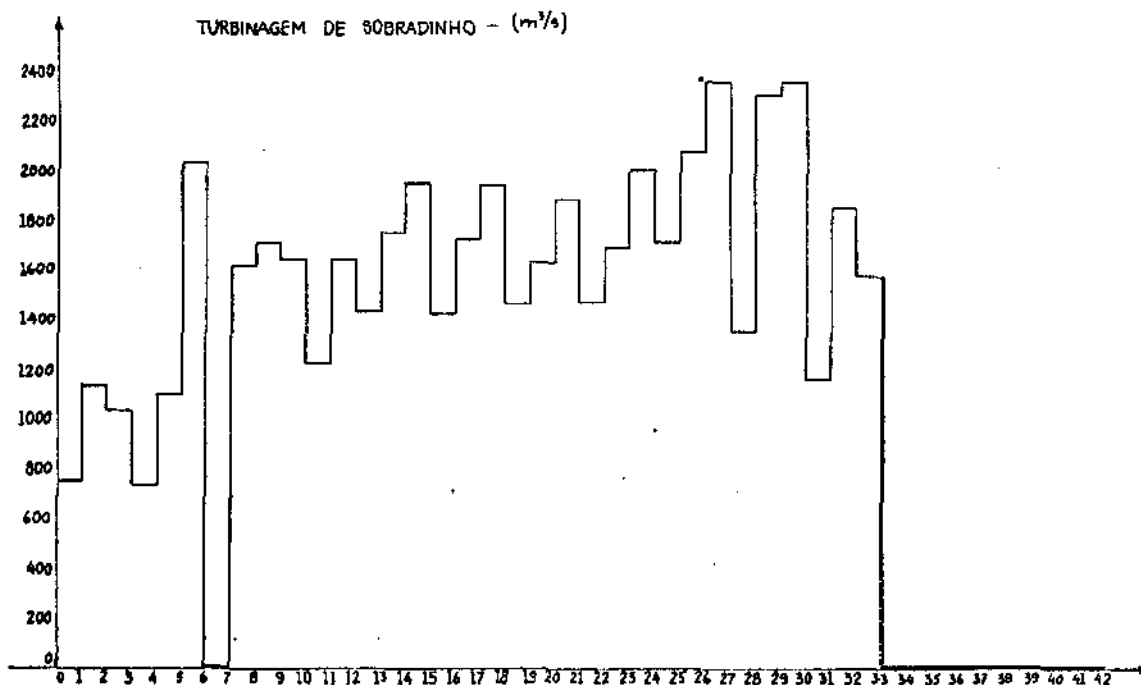
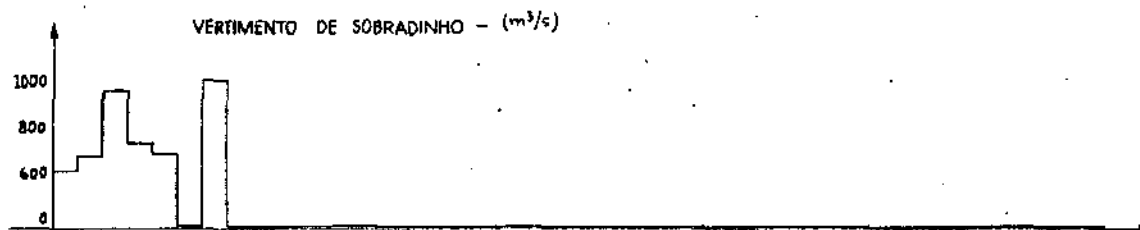
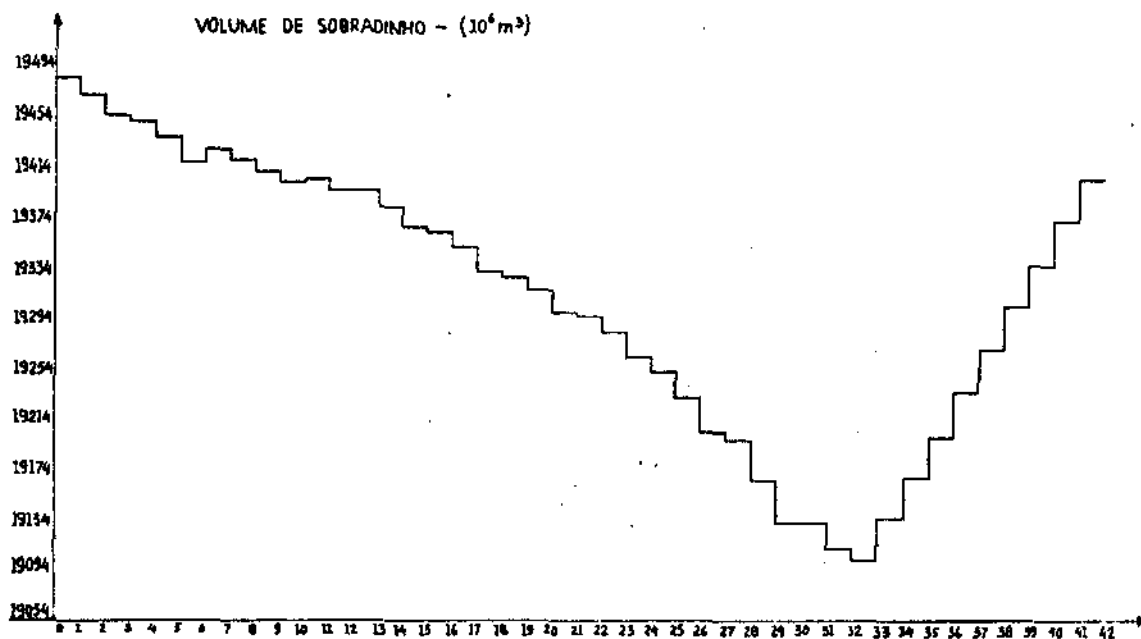
GRUPO 1 - TESTE 3

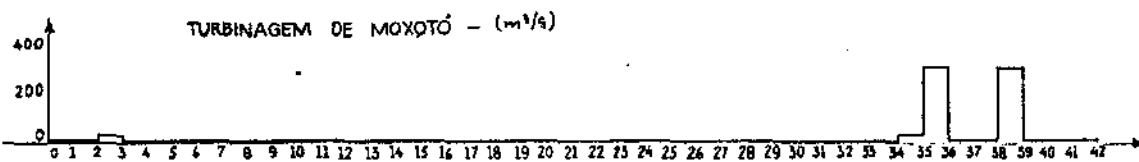
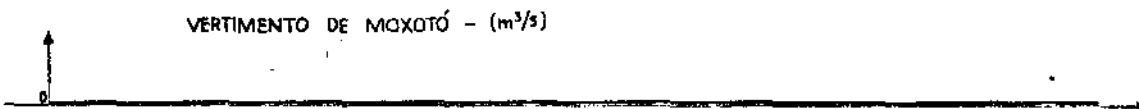
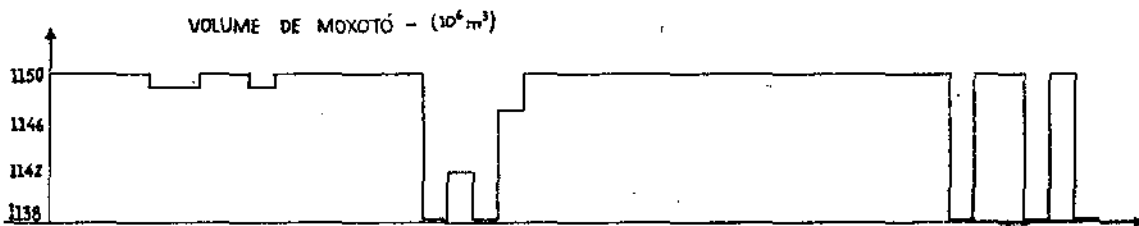
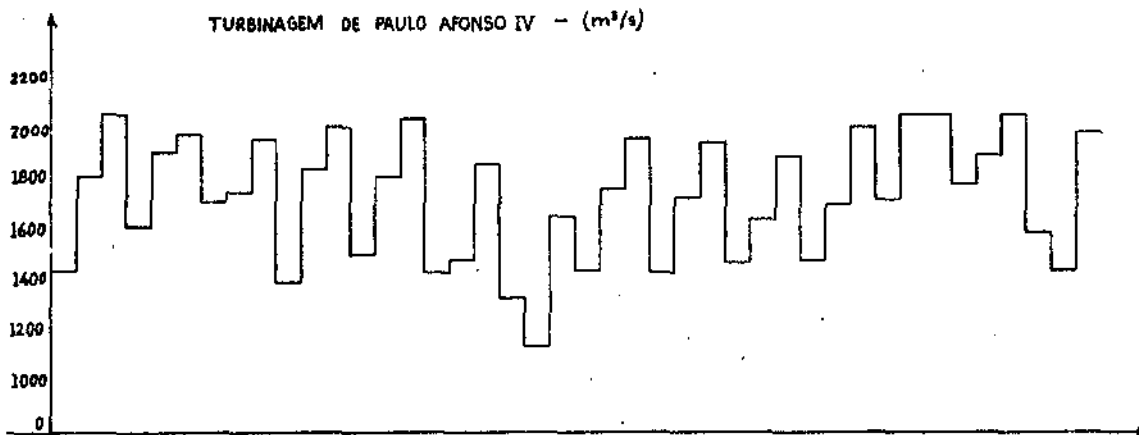


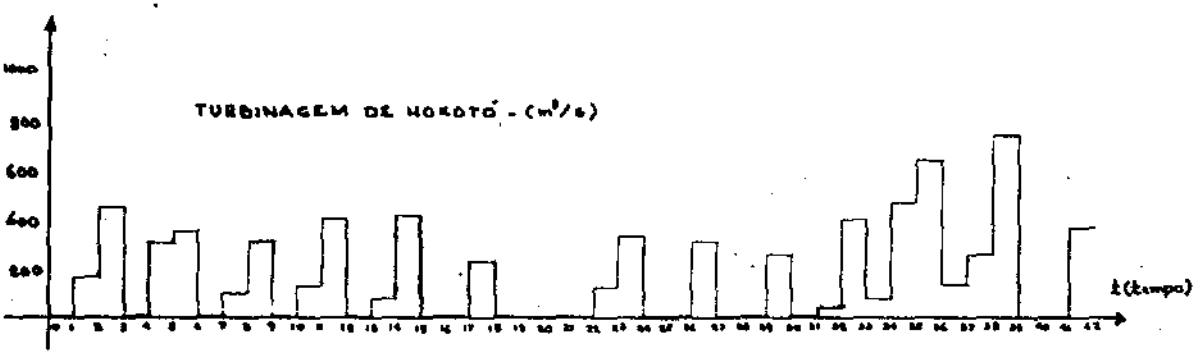
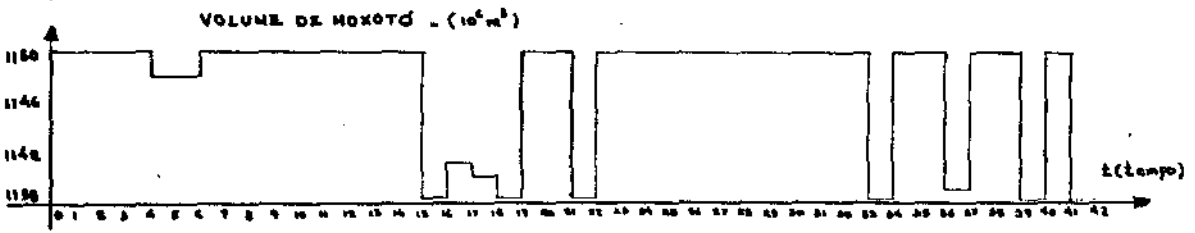
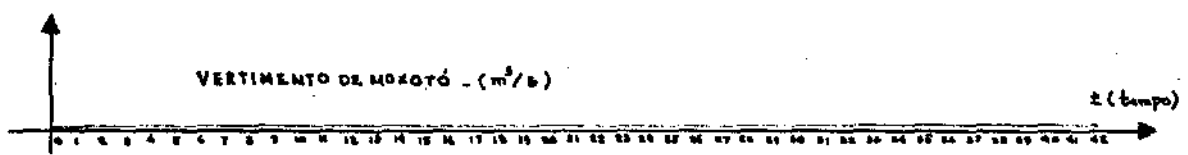
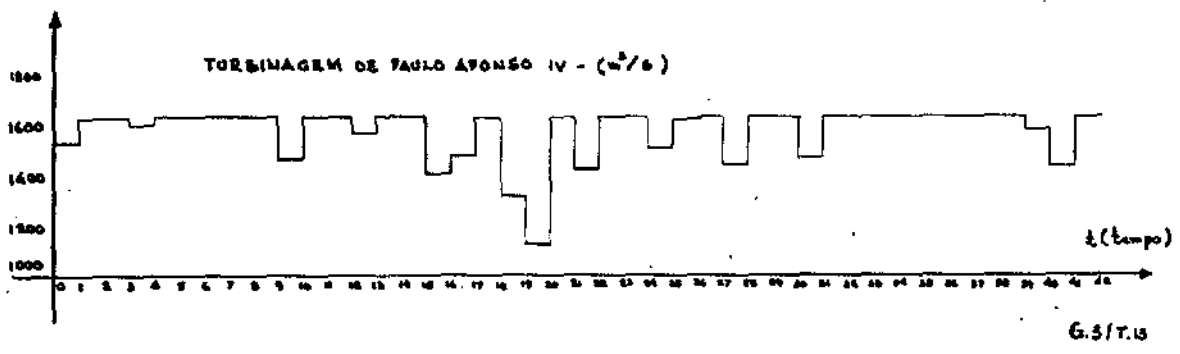
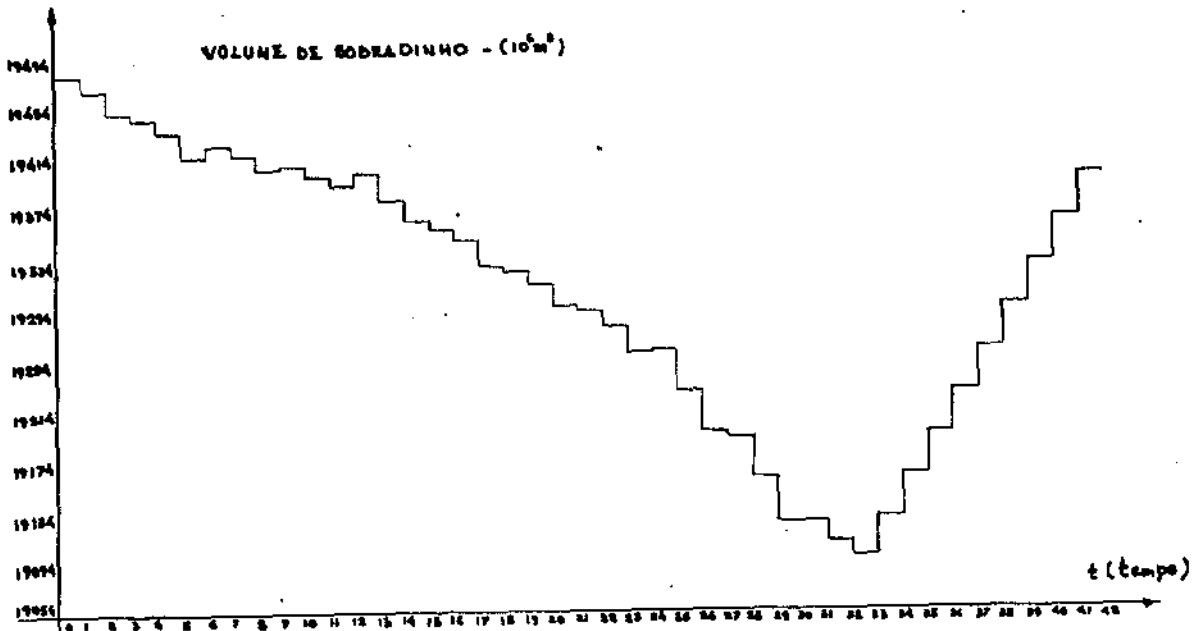


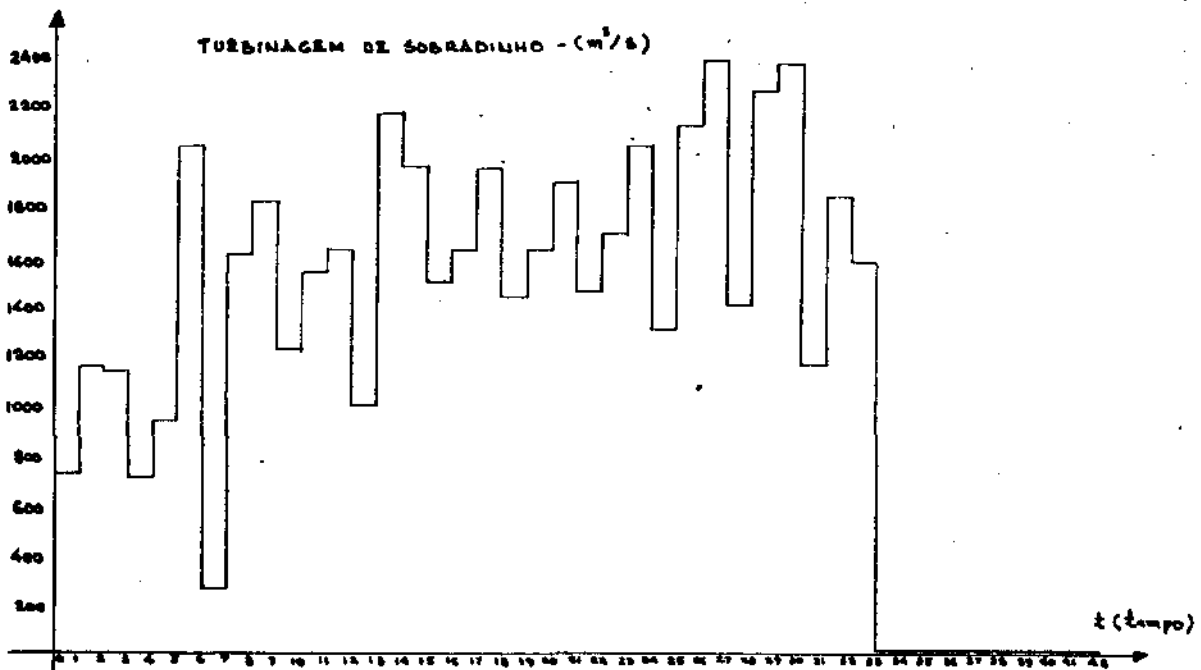
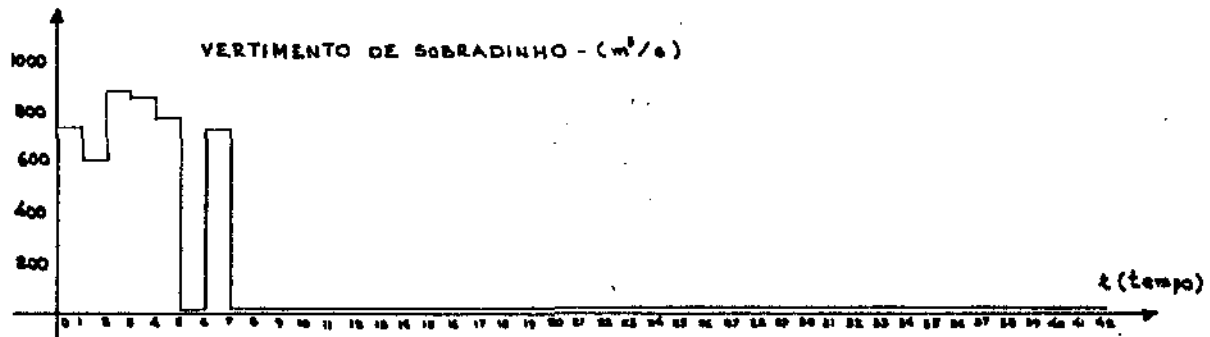


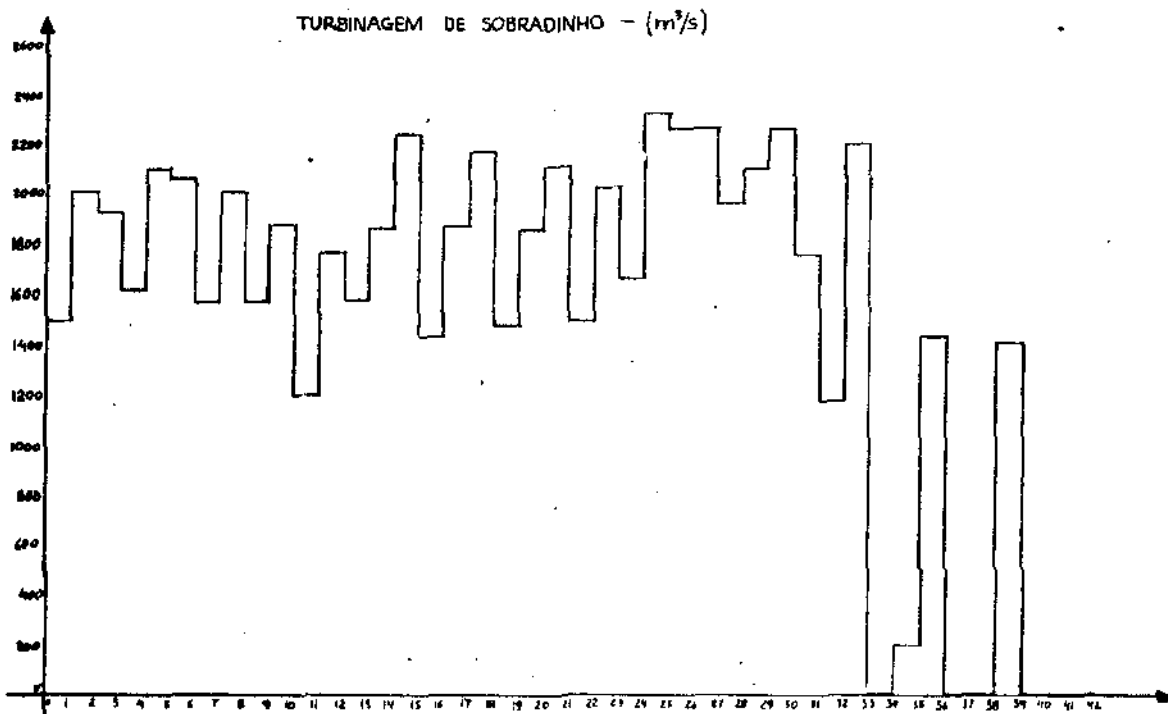
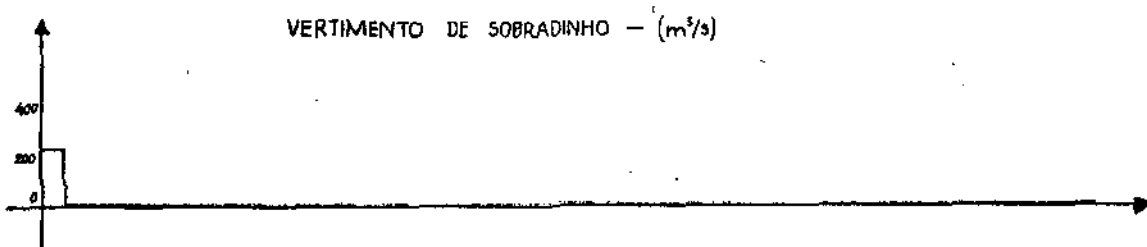
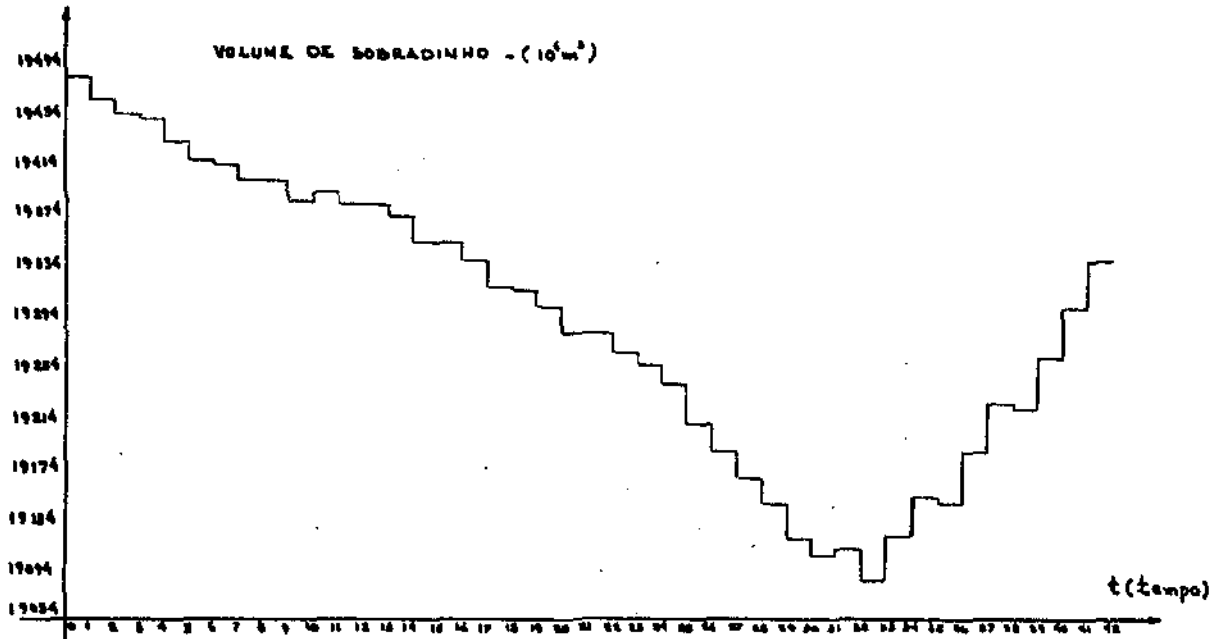
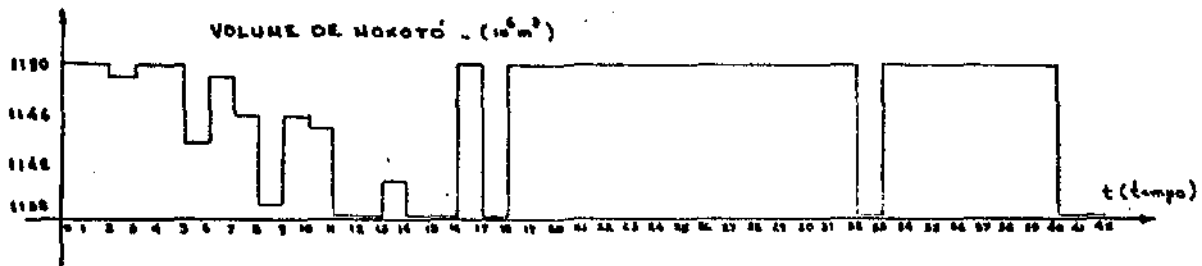


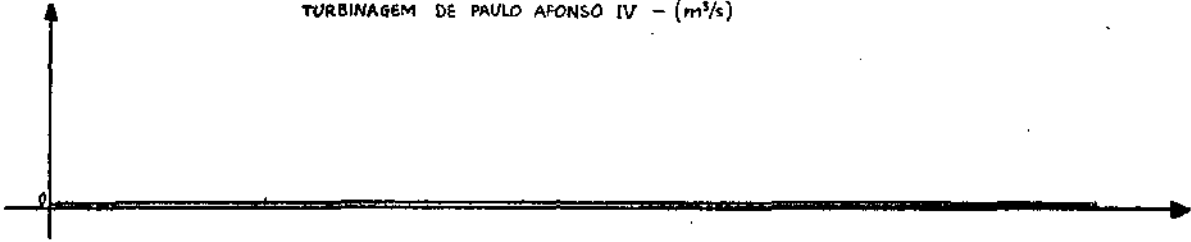
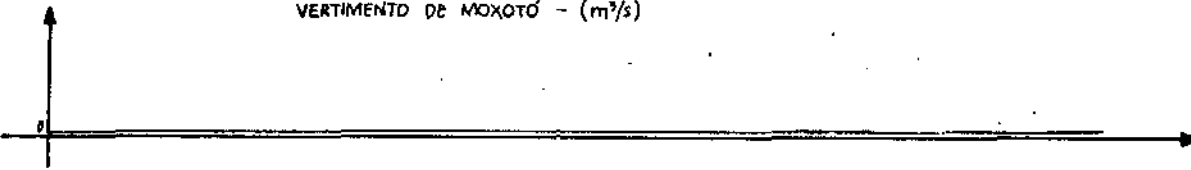
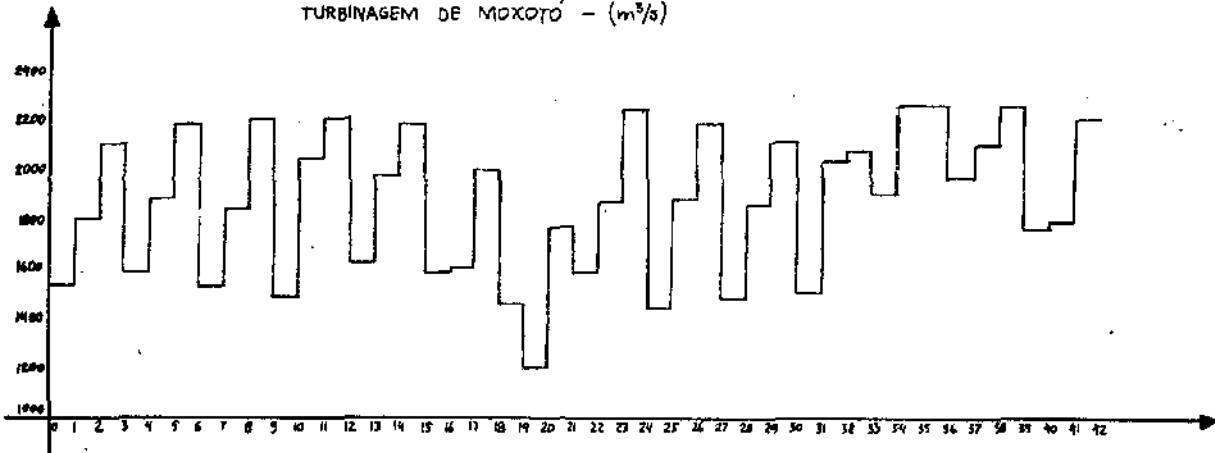


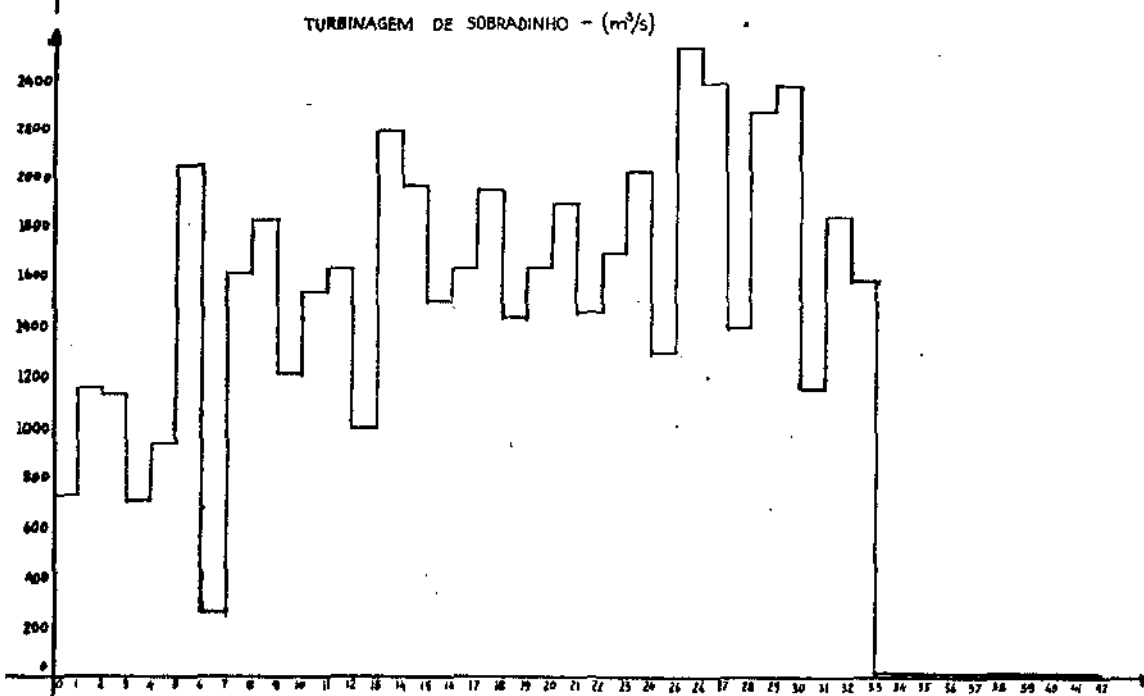
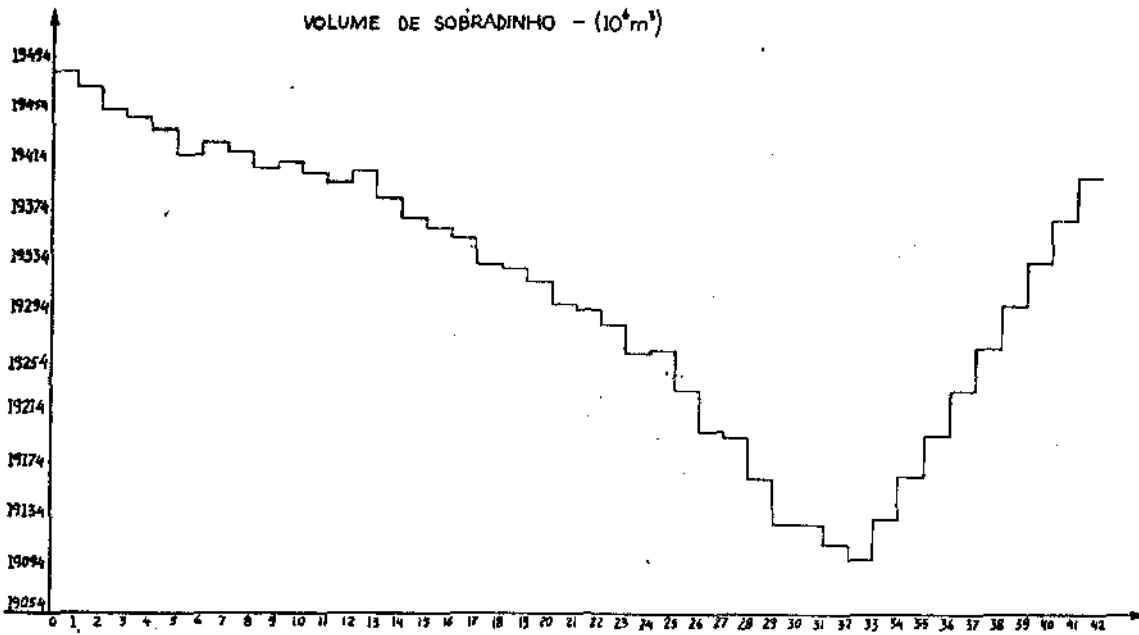


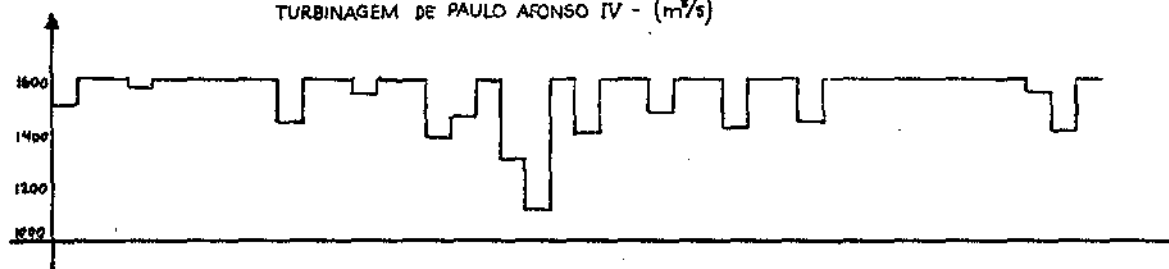
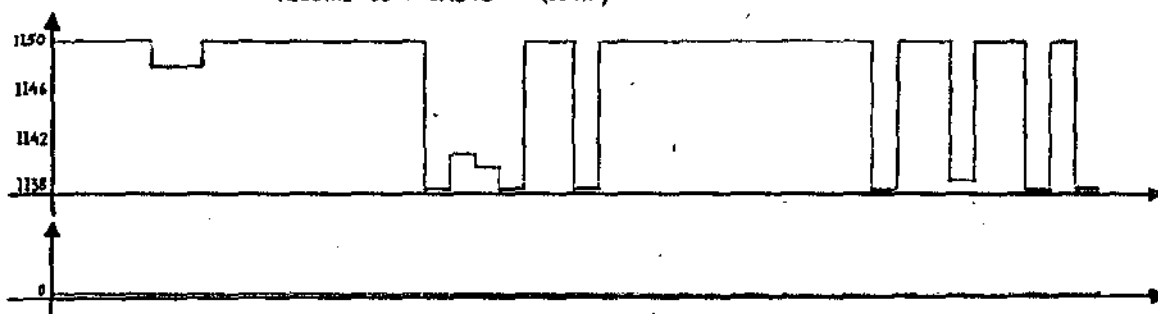
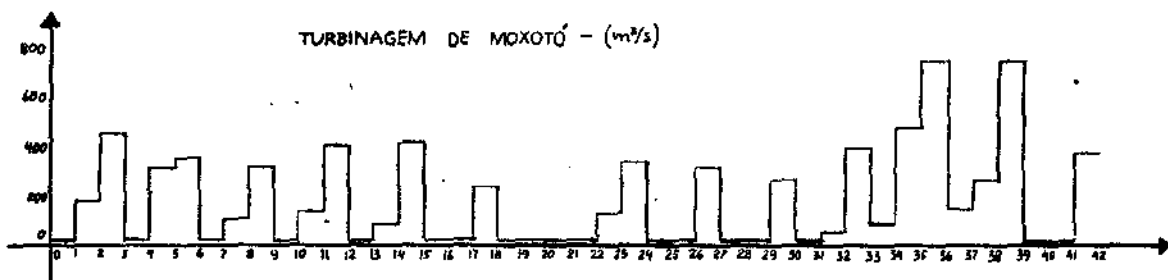




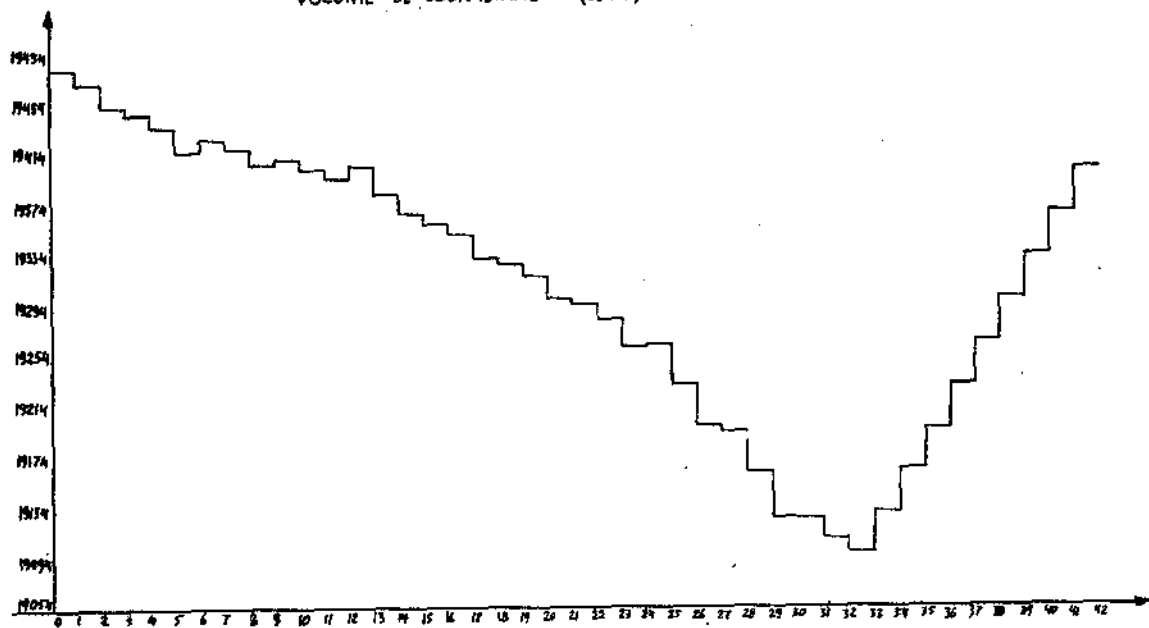
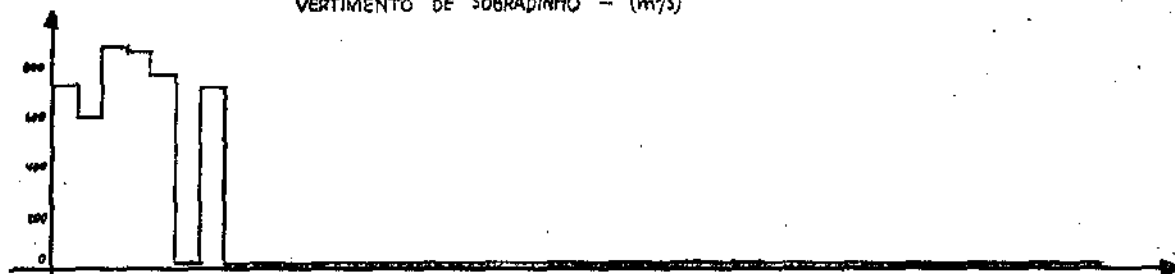
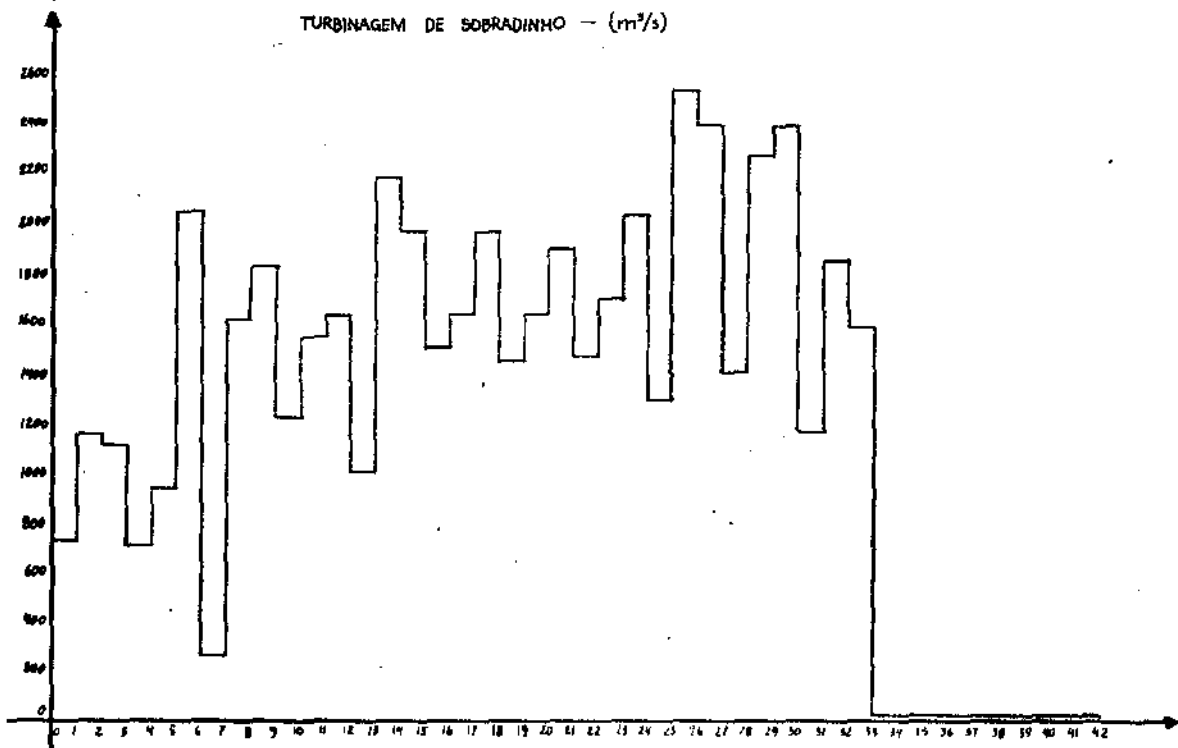


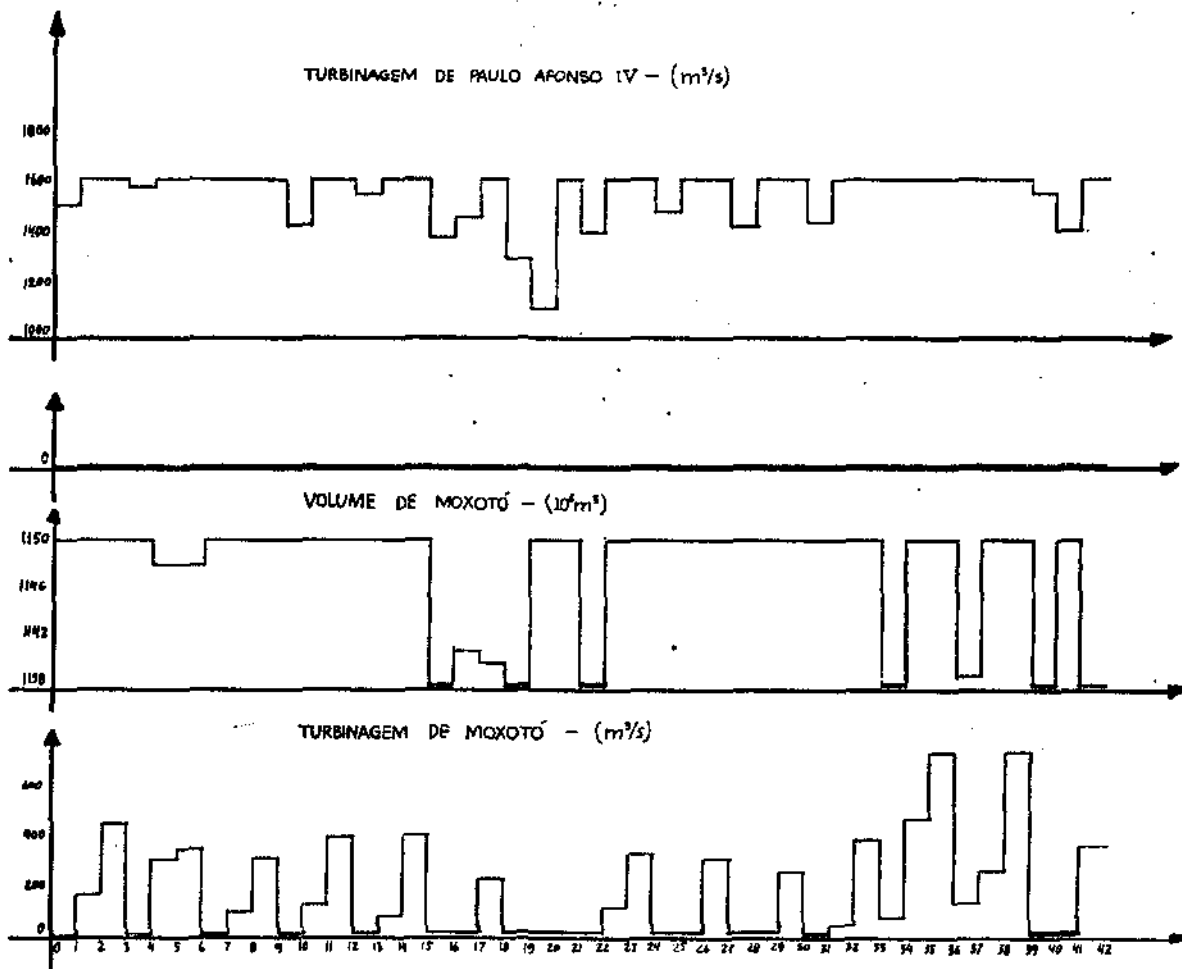
TURBINAGEM DE PAULO AFONSO IV - (m³/s)VERTIMENTO DE MOXOTÓ - (m³/s)TURBINAGEM DE MOXOTÓ - (m³/s)

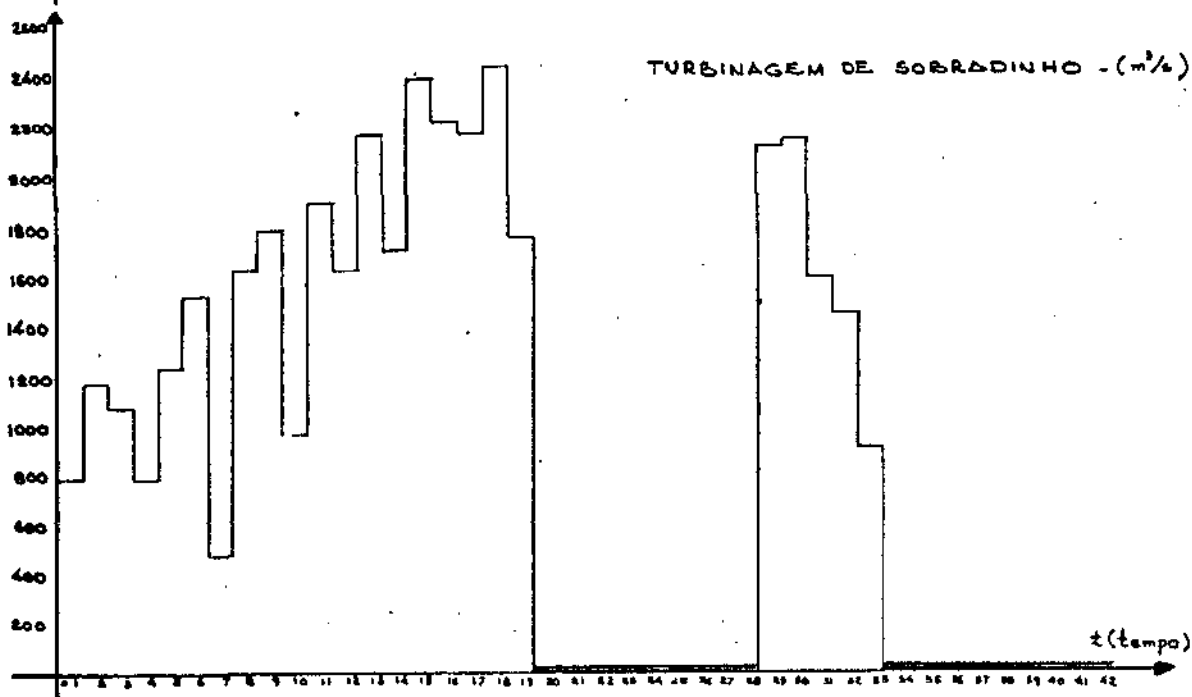
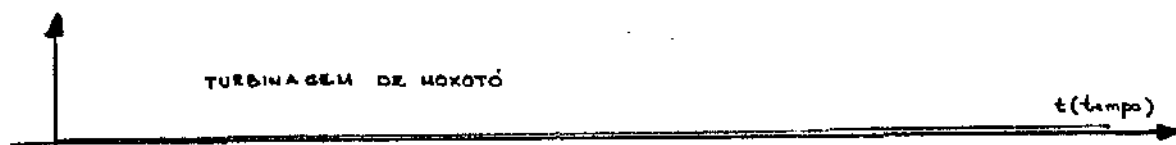
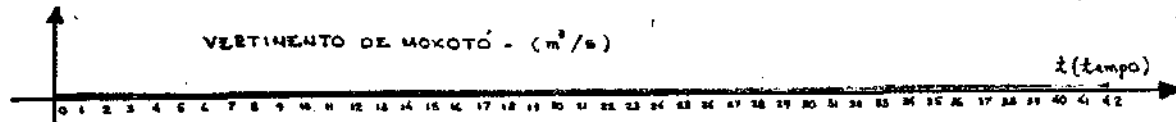
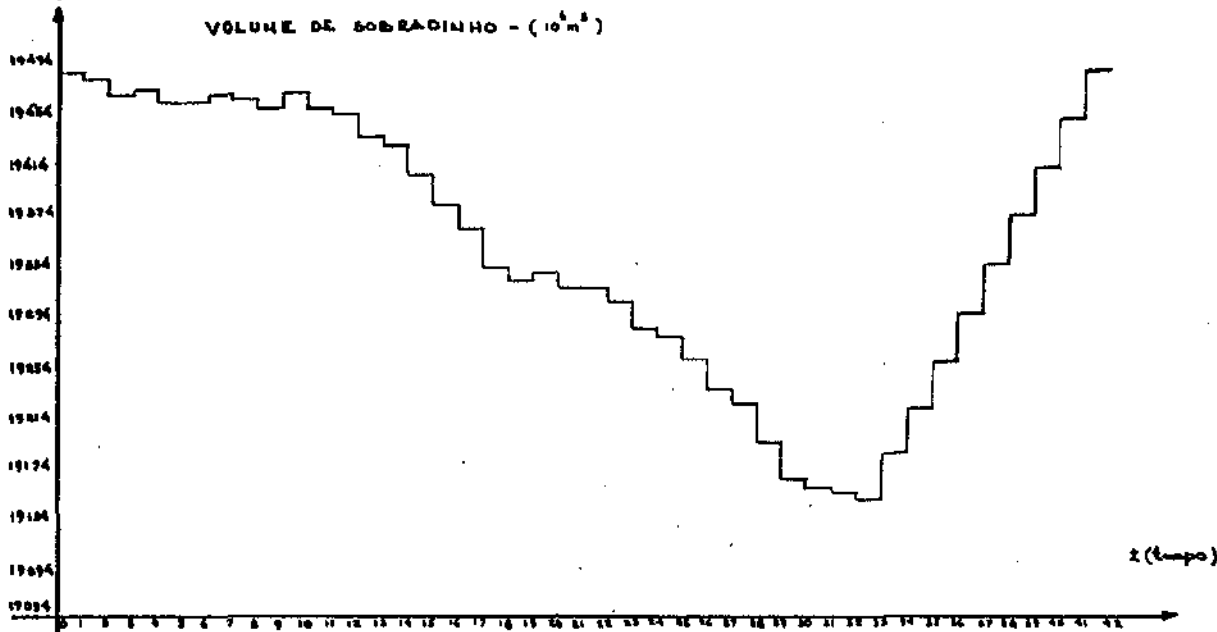
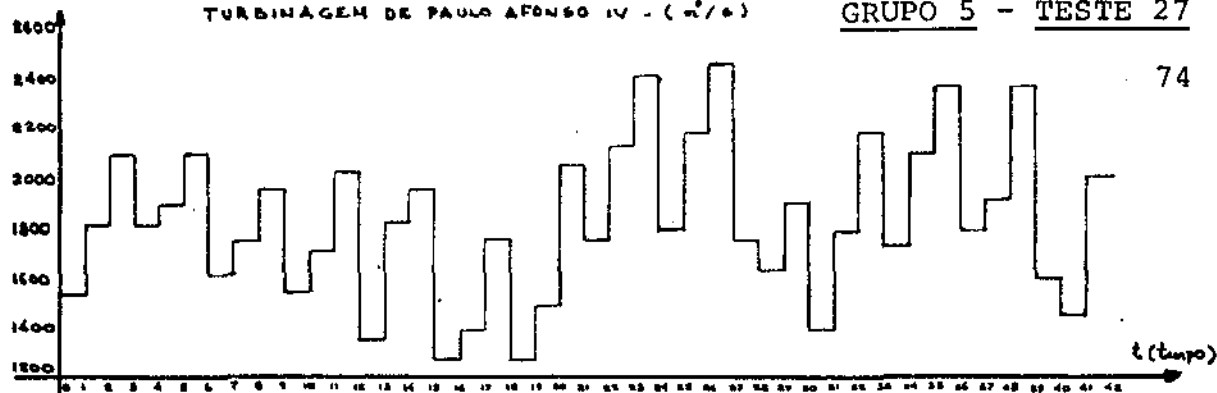


TURBINAGEM DE PAUL AFONSO IV - (m³/s)VOLUME DE MOXOTÓ - (10⁶m³)TURBINAGEM DE MOXOTÓ - (m³/s)

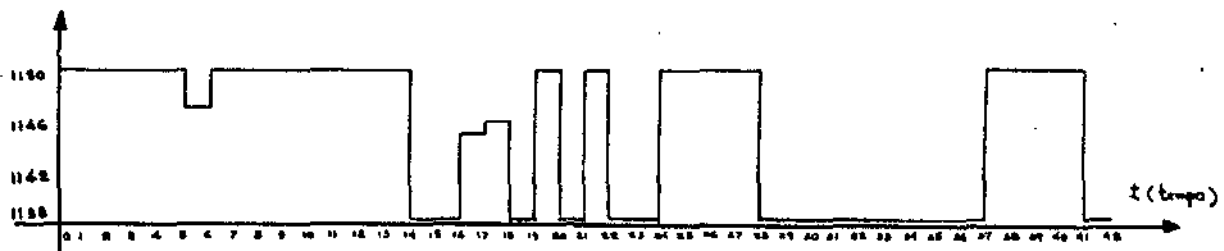
GRUPO 4 - TESTE 25

VOLUME DE SOBRADINHO - ($10^6 m^3$)VERTIMENTO DE SOBRADINHO - (m^3/s)TURBINAGEM DE SOBRADINHO - (m^3/s)

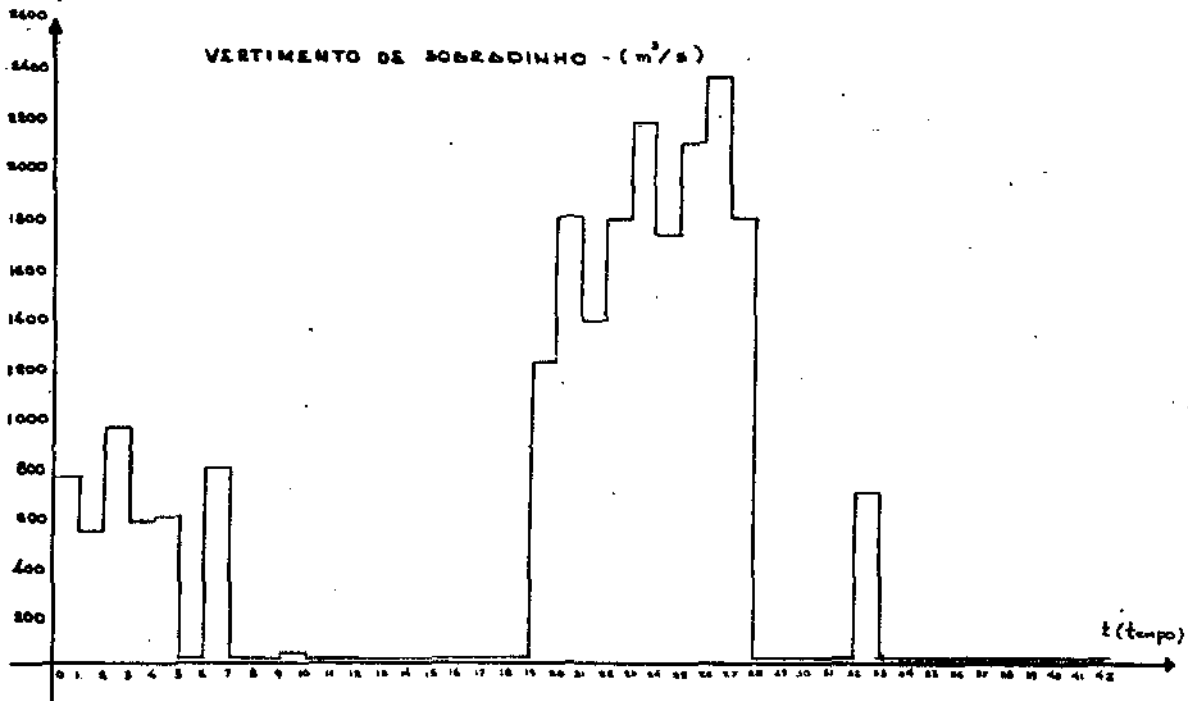




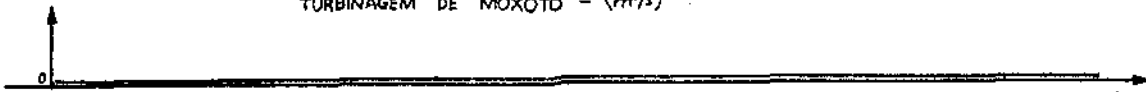
VOLUME DE MOXOTO - ($10^6 m^3$)



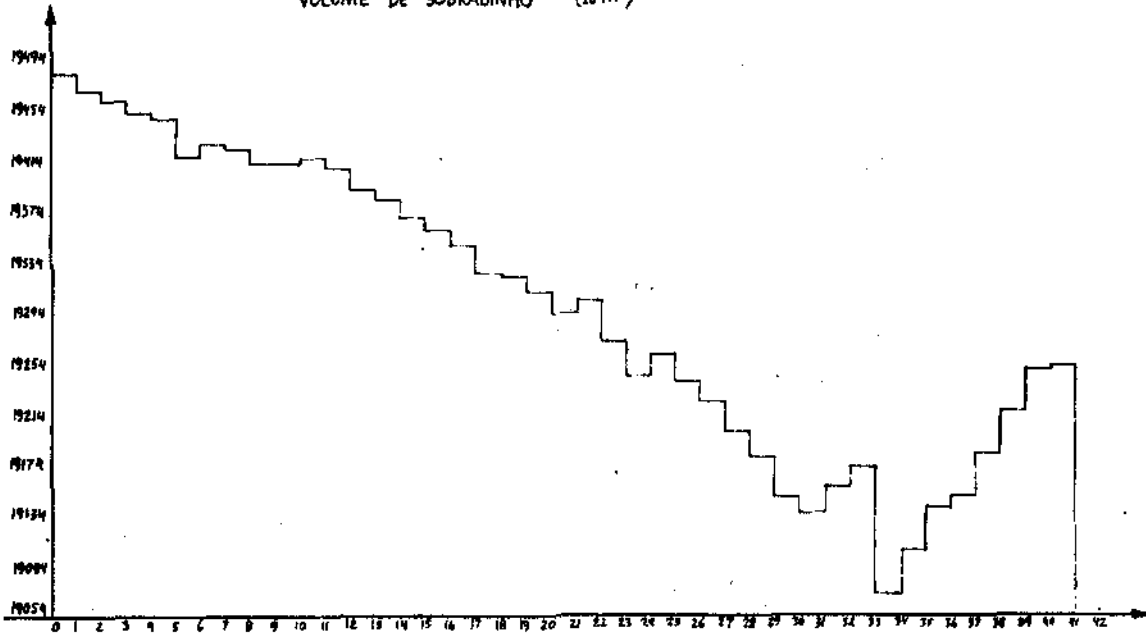
VERTIMENTO DE SOBREADINHO - (m^3/s)



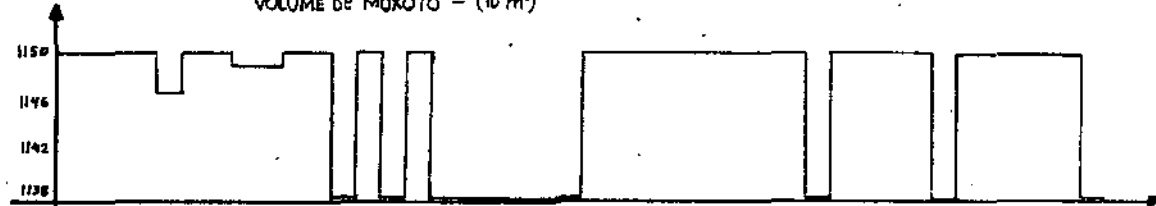
TURBINAGEM DE MOXOTÓ - (m³/s)



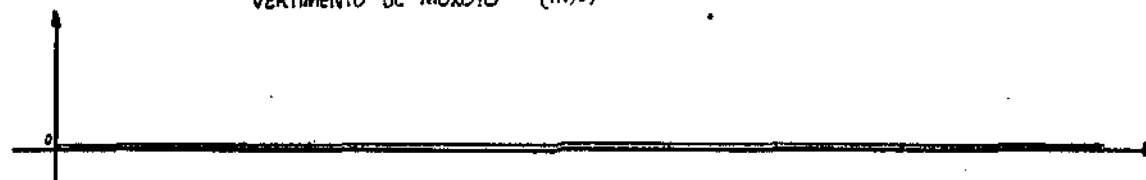
VOLUME DE SOBRADINHO - (10⁶m³)



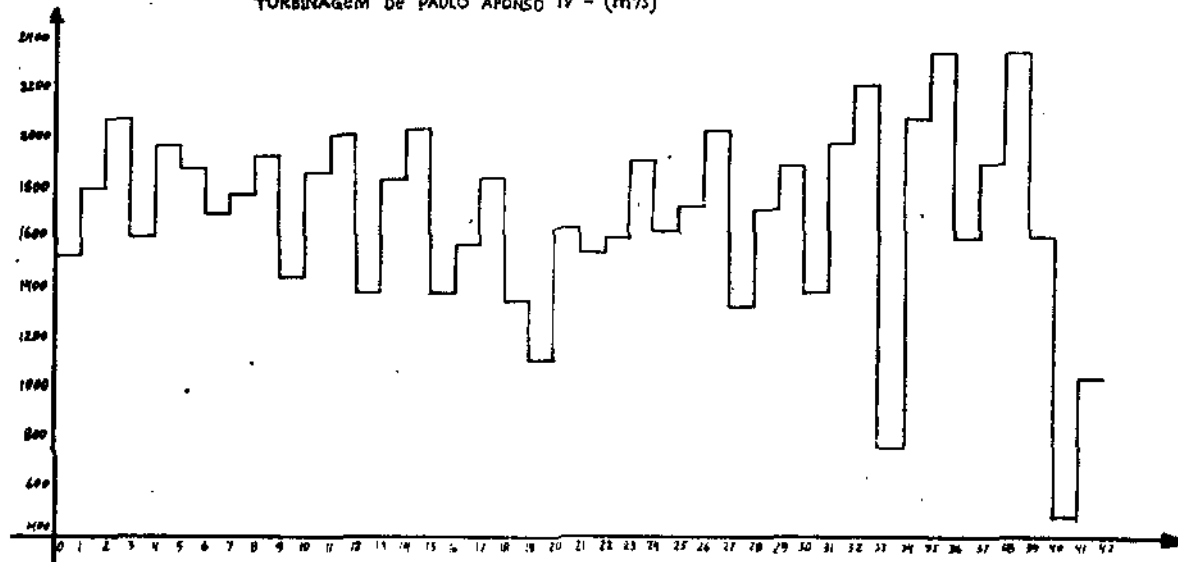
VOLUME DE MOXOTÓ - (10⁶m³)

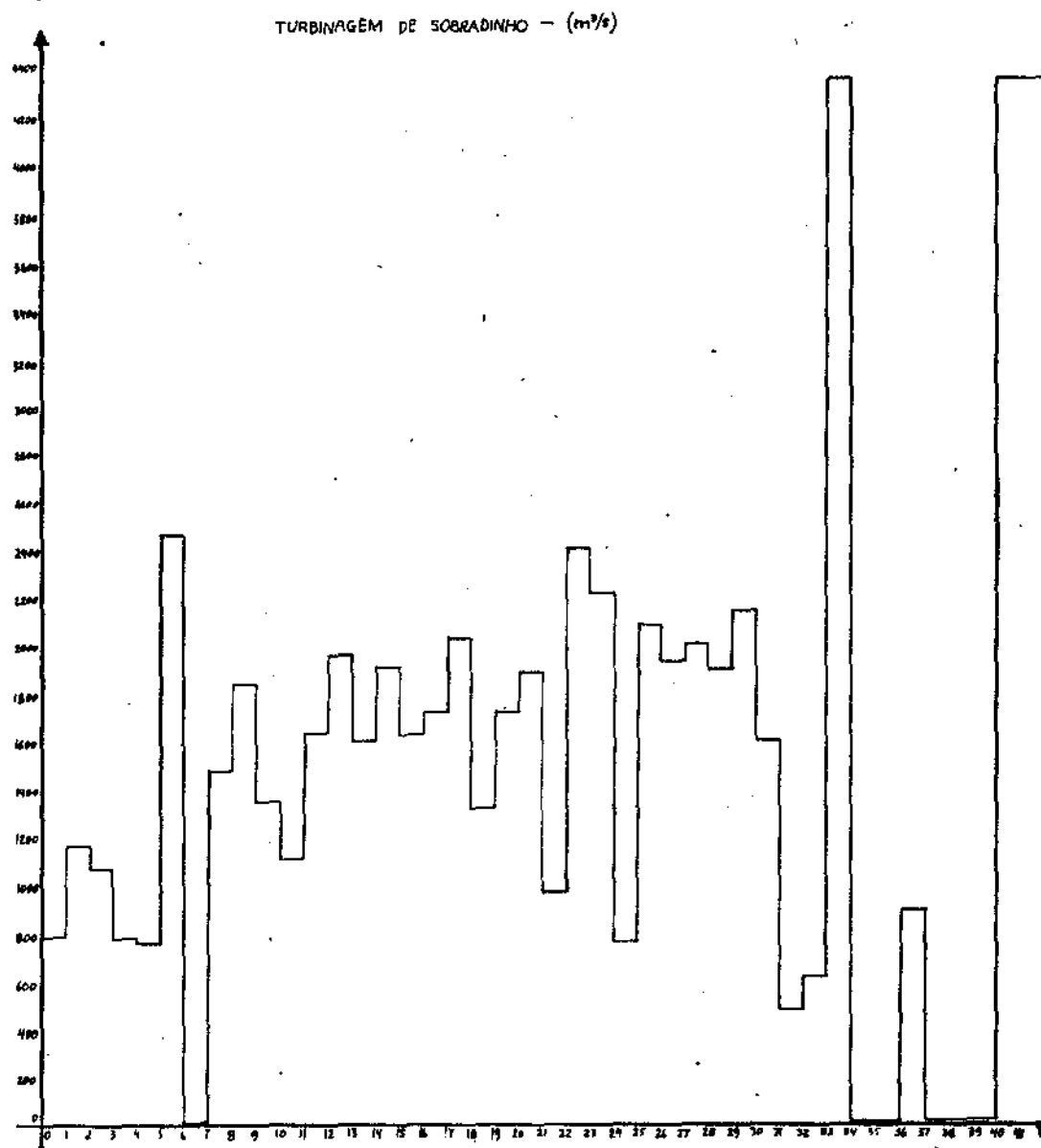
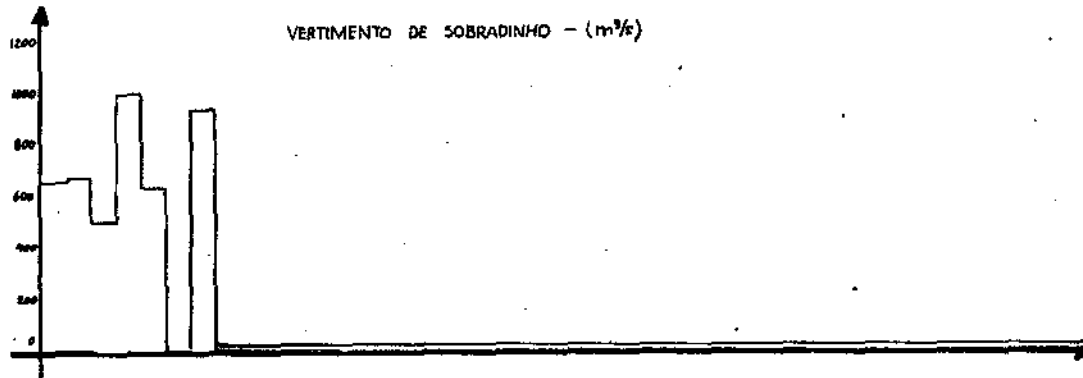


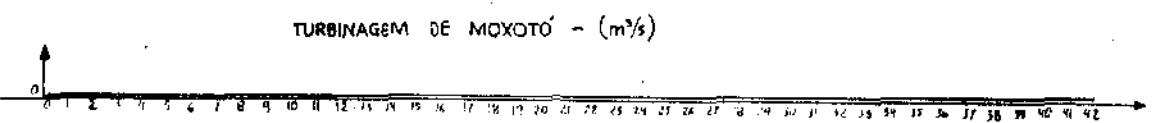
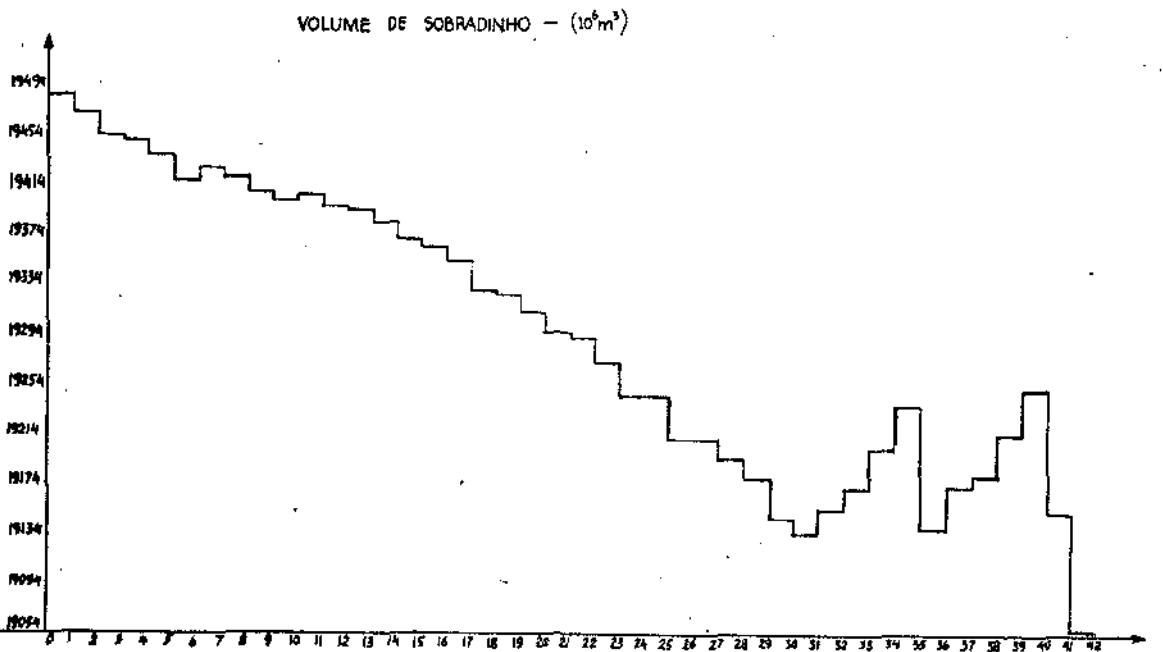
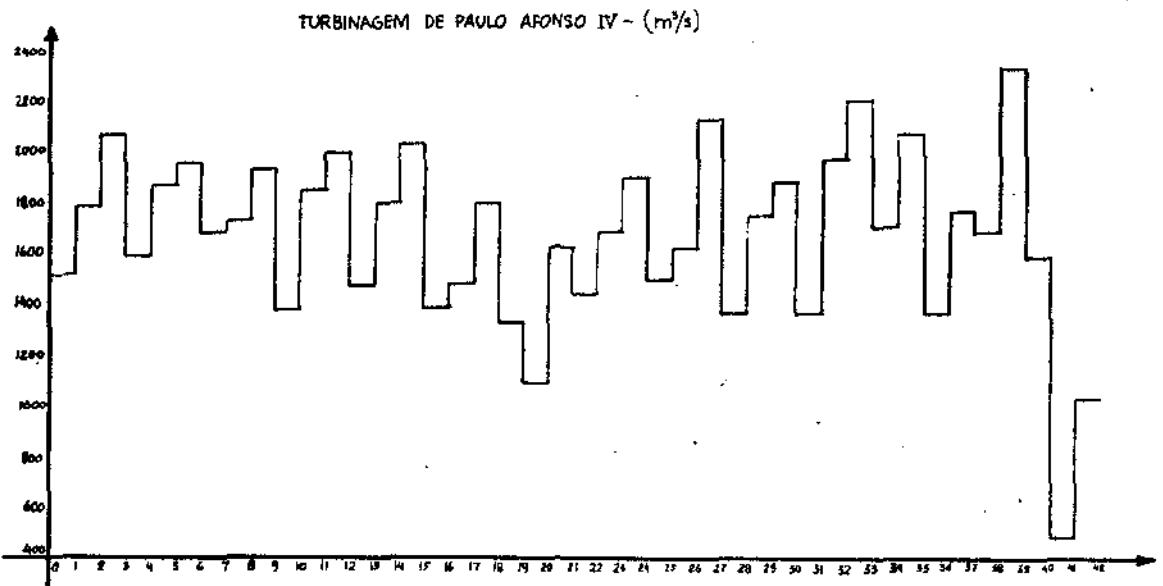
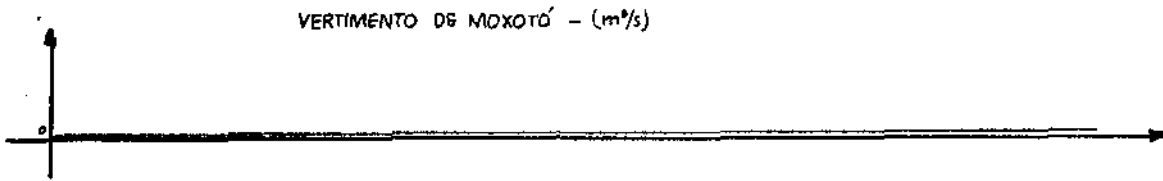
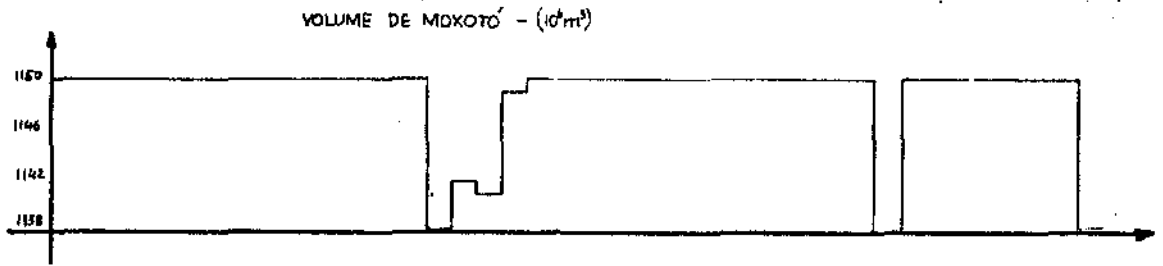
VERTIMENTO DE MOXOTÓ - (m³/s)



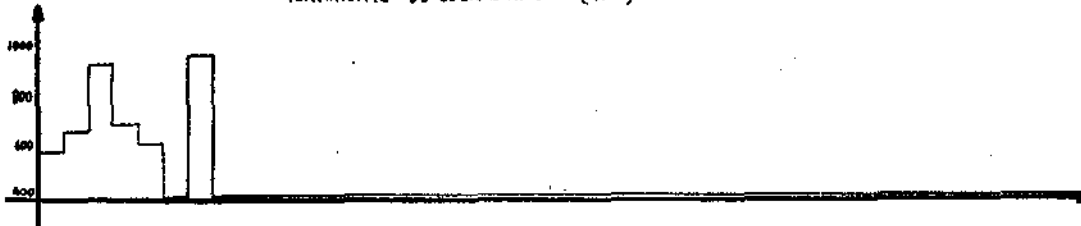
TURBINAGEM DE PAULO AFONSO IV - (m³/s)



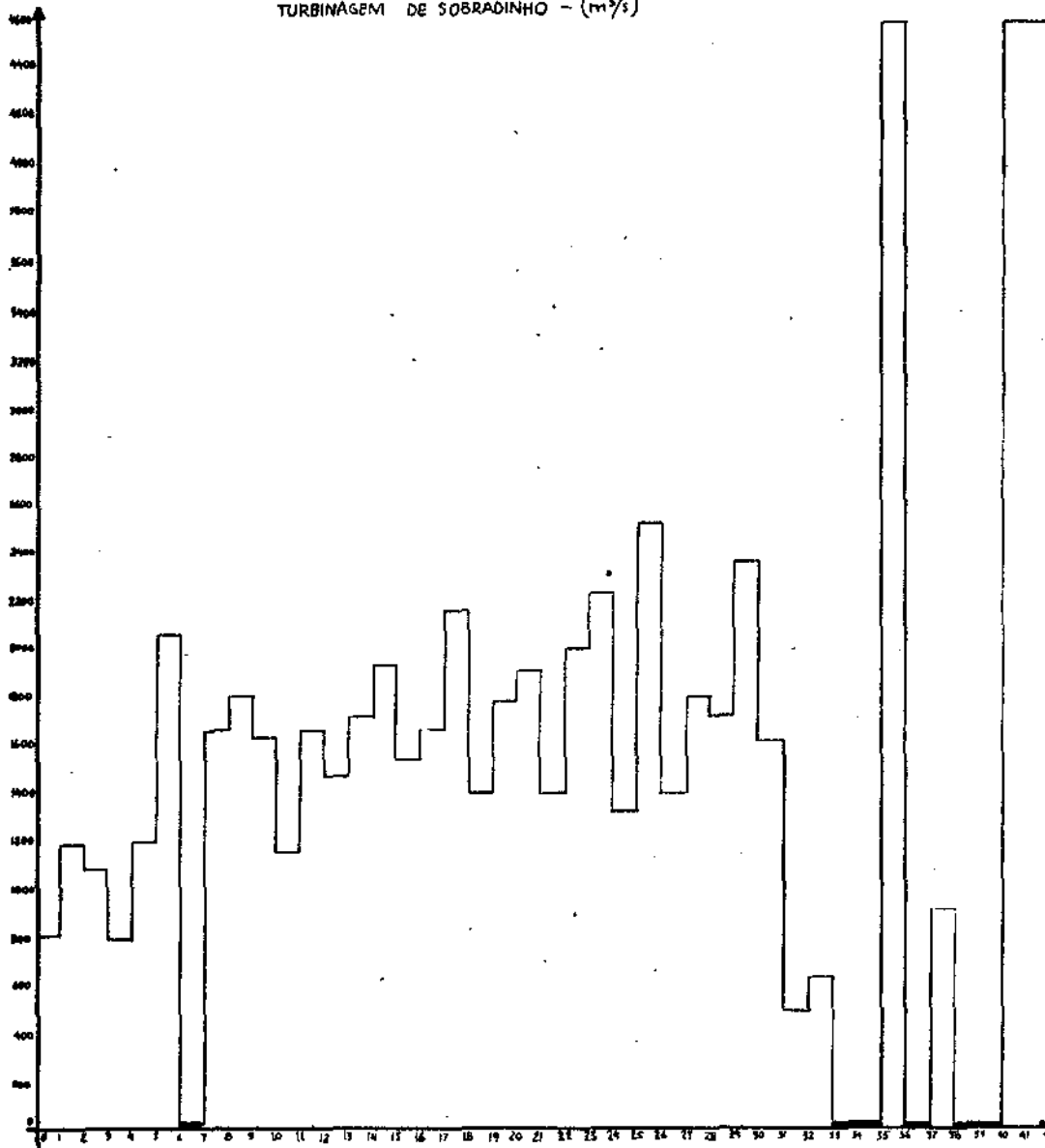




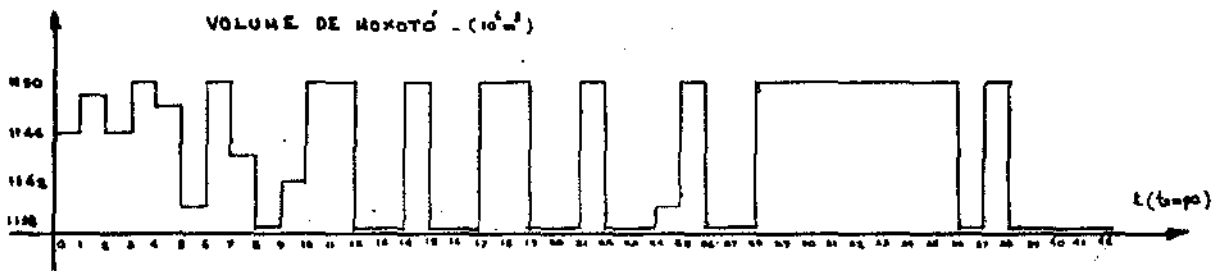
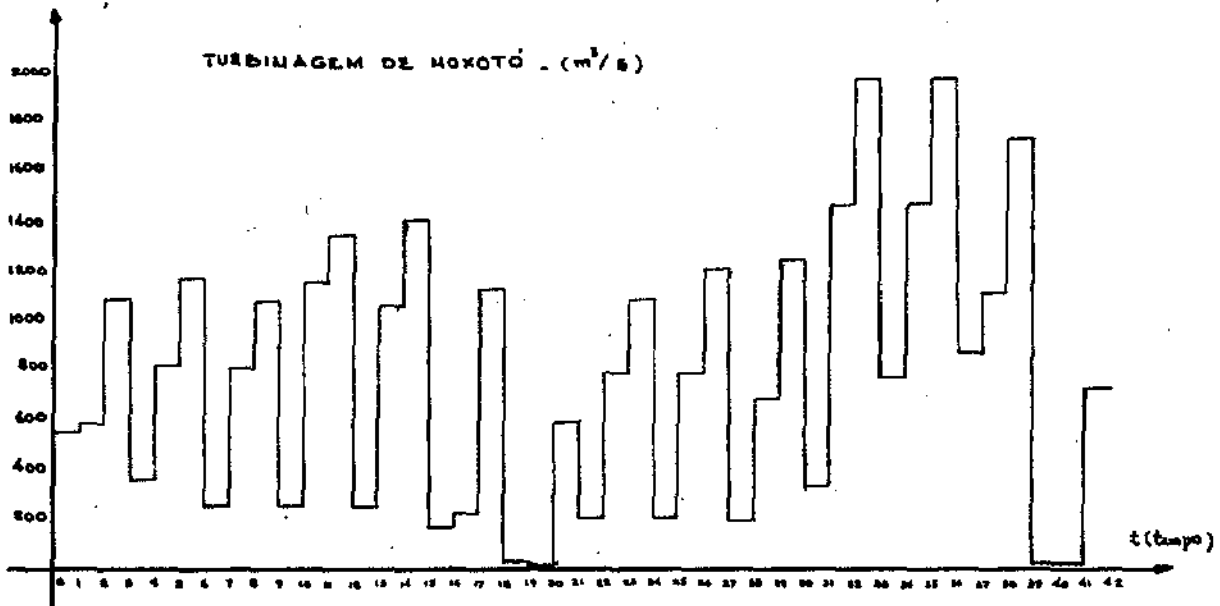
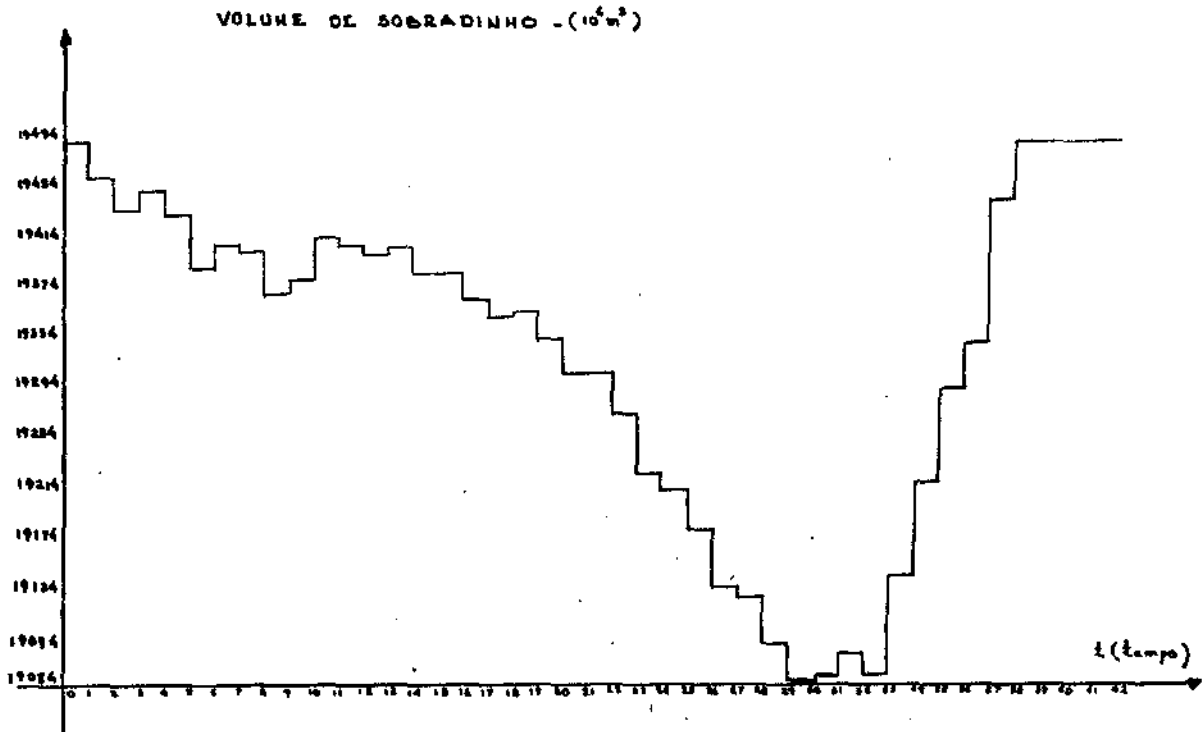
VERTIMENTO DE SOBRADINHO - (m³/s)

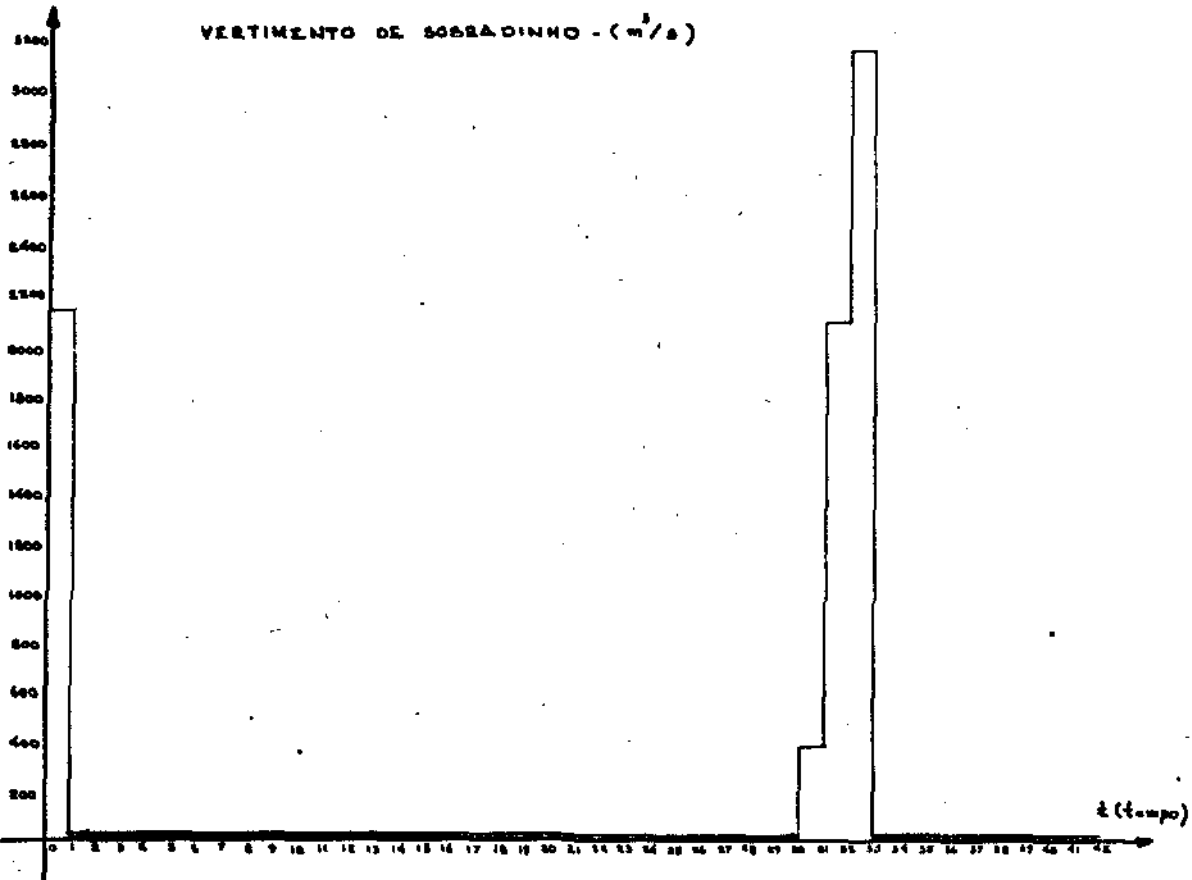
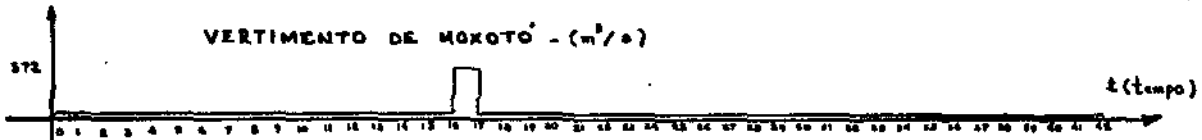


TURBINAGEM DE SOBRADINHO - (m³/s)

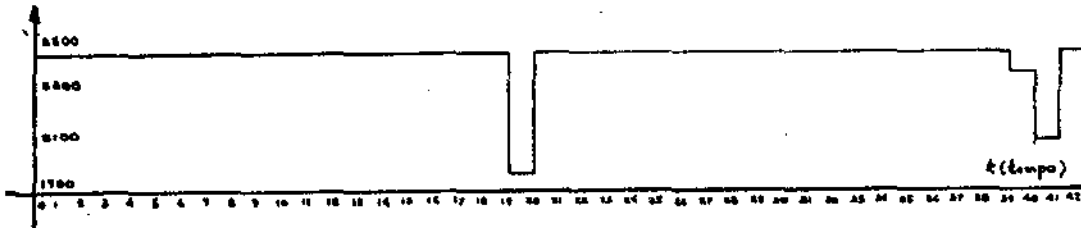


GRUPO 7 - TESTE 43

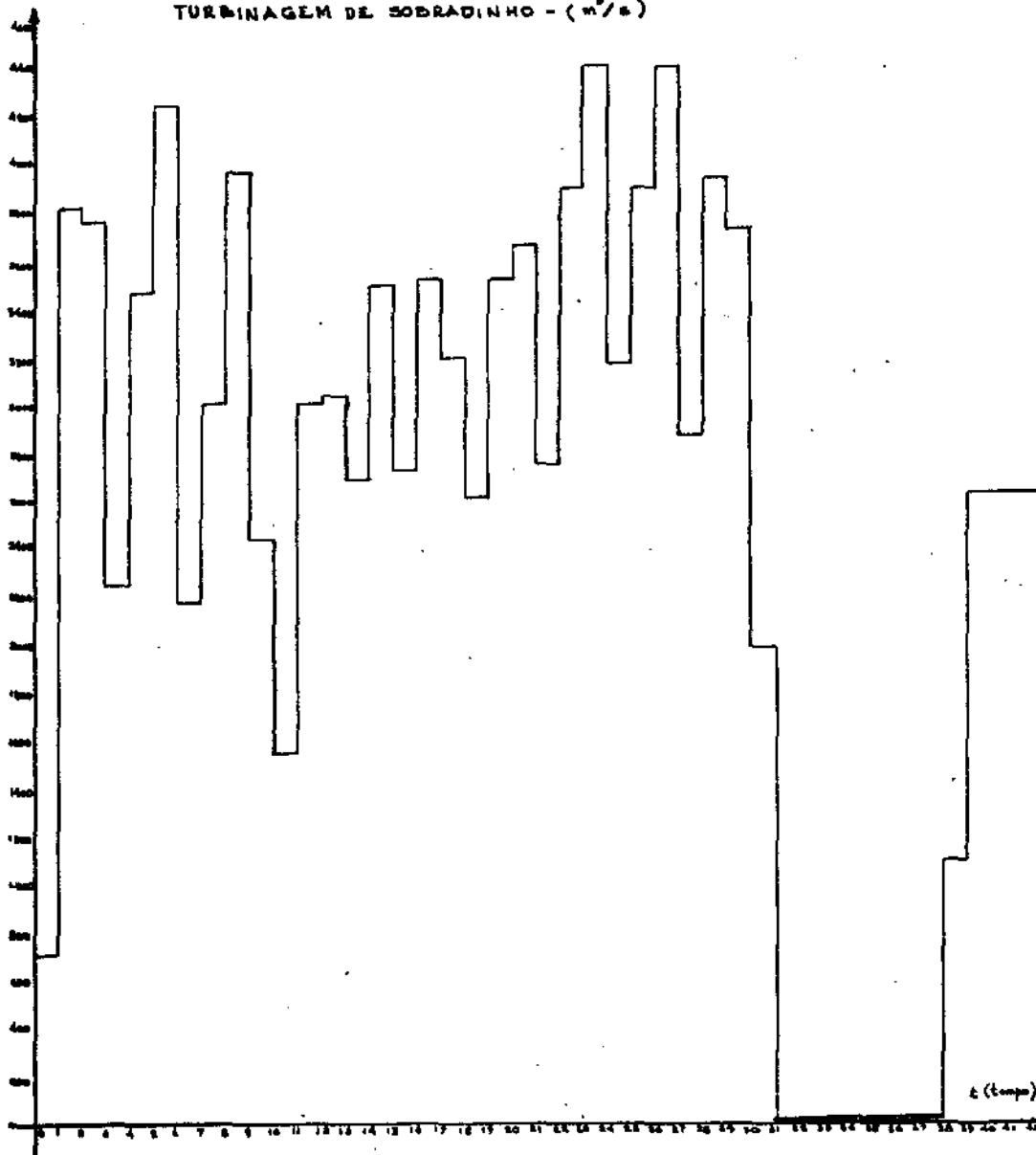




TURBINAGEM DE PAULO AFONSO IV - (m³/s)



TURBINAGEM DE SOBRADINHO - (m³/s)



LISTAGEM DE ERRO: GRUPO 3 - TESTE 9

I= 1	FLIN=	1807.990	GHT=	1814.556	DIF =	11.57
I= 1	FLIN=	2187.990	GHT=	2181.043	DIF =	1.05
I= 2	FLIN=	2462.990	GHT=	2451.796	DIF =	-11.20
I= 3	FLIN=	1878.990	GHT=	1888.120	DIF =	9.13
I= 4	FLIN=	2275.990	GHT=	2272.680	DIF =	-3.31
I= 5	FLIN=	2558.990	GHT=	2541.984	DIF =	-14.01
I= 6	FLIN=	1815.990	GHT=	1812.296	DIF =	-3.69
I= 7	FLIN=	2219.990	GHT=	2222.284	DIF =	2.29
I= 8	FLIN=	2473.990	GHT=	2464.578	DIF =	-9.41
I= 9	FLIN=	1843.990	GHT=	1858.890	DIF =	14.90
I=10	FLIN=	2233.990	GHT=	2234.041	DIF =	0.05
I=11	FLIN=	2511.990	GHT=	2500.436	DIF =	-11.55
I=12	FLIN=	1919.990	GHT=	1924.266	DIF =	13.28
I=13	FLIN=	2314.990	GHT=	2313.277	DIF =	-1.71
I=14	FLIN=	2603.990	GHT=	2587.752	DIF =	-16.24
I=15	FLIN=	1834.990	GHT=	1850.506	DIF =	15.52
I=16	FLIN=	1955.990	GHT=	1968.412	DIF =	12.42
I=17	FLIN=	2412.990	GHT=	2406.799	DIF =	-6.19
I=18	FLIN=	1737.990	GHT=	1756.937	DIF =	18.95
I=19	FLIN=	1570.990	GHT=	1591.693	DIF =	20.69
I=20	FLIN=	2175.990	GHT=	2179.716	DIF =	3.73
I=21	FLIN=	1858.990	GHT=	1874.026	DIF =	15.04
I=22	FLIN=	2252.990	GHT=	2254.161	DIF =	1.17
I=23	FLIN=	2532.990	GHT=	2520.467	DIF =	-12.52
I=24	FLIN=	1905.990	GHT=	1919.256	DIF =	13.27
I=25	FLIN=	2308.990	GHT=	2306.515	DIF =	-2.48
I=26	FLIN=	2595.990	GHT=	2578.237	DIF =	-17.75
I=27	FLIN=	1863.990	GHT=	1879.079	DIF =	15.09
I=28	FLIN=	2257.990	GHT=	2255.520	DIF =	-2.47
I=29	FLIN=	2538.990	GHT=	2524.092	DIF =	-14.90
I=30	FLIN=	1832.990	GHT=	1848.676	DIF =	15.69
I=31	FLIN=	2219.990	GHT=	2222.383	DIF =	2.39
I=32	FLIN=	2496.990	GHT=	2486.549	DIF =	-10.44
I=33	FLIN=	1832.990	GHT=	1830.824	DIF =	-2.17
I=34	FLIN=	2219.990	GHT=	2200.747	DIF =	-19.24
I=35	FLIN=	2496.990	GHT=	2482.017	DIF =	-14.97
I=36	FLIN=	1893.990	GHT=	1888.583	DIF =	-5.41
I=37	FLIN=	2018.990	GHT=	2007.995	DIF =	-11.00
I=38	FLIN=	2490.990	GHT=	2475.218	DIF =	-15.77
I=39	FLIN=	1697.990	GHT=	1697.483	DIF =	1.49
I=40	FLIN=	1534.990	GHT=	1542.157	DIF =	7.17
I=41	FLIN=	2125.990	GHT=	2108.253	DIF =	-17.73

LISTAGEM DE ERRO: GRUPO 4 - TESTE 21

I= 0	FLIN=	1807.990	GHT=	1812.143	DIF =	4.15
I= 1	FLIN=	2189.990	GHT=	2192.915	DIF =	2.92
I= 2	FLIN=	2462.990	GHT=	2465.928	DIF =	2.94
I= 3	FLIN=	1878.990	GHT=	1880.368	DIF =	1.38
I= 4	FLIN=	2275.990	GHT=	2279.371	DIF =	3.38
I= 5	FLIN=	2558.990	GHT=	2555.480	DIF =	-3.51
I= 6	FLIN=	1815.990	GHT=	1811.574	DIF =	-4.42
I= 7	FLIN=	2219.990	GHT=	2220.337	DIF =	0.35
I= 8	FLIN=	2473.990	GHT=	2473.371	DIF =	-0.62
I= 9	FLIN=	1843.990	GHT=	1851.973	DIF =	7.98
I=10	FLIN=	2233.990	GHT=	2235.243	DIF =	1.25
I=11	FLIN=	2511.990	GHT=	2513.151	DIF =	1.16
I=12	FLIN=	1910.990	GHT=	1915.048	DIF =	4.06
I=13	FLIN=	2314.990	GHT=	2308.056	DIF =	-6.93
I=14	FLIN=	2603.990	GHT=	2601.428	DIF =	-2.56
I=15	FLIN=	1834.990	GHT=	1844.069	DIF =	9.08
I=16	FLIN=	1955.990	GHT=	1961.887	DIF =	5.90
I=17	FLIN=	2412.990	GHT=	2411.108	DIF =	-1.88
I=18	FLIN=	1737.990	GHT=	1750.656	DIF =	12.67
I=19	FLIN=	1570.990	GHT=	1587.320	DIF =	16.33
I=20	FLIN=	2175.990	GHT=	2172.262	DIF =	-3.73
I=21	FLIN=	1858.990	GHT=	1867.481	DIF =	8.49
I=22	FLIN=	2252.990	GHT=	2253.750	DIF =	0.76
I=23	FLIN=	2532.990	GHT=	2529.912	DIF =	-3.08
I=24	FLIN=	1905.990	GHT=	1912.622	DIF =	6.63
I=25	FLIN=	2308.990	GHT=	2294.659	DIF =	-14.33
I=26	FLIN=	2595.990	GHT=	2586.815	DIF =	-9.18
I=27	FLIN=	1863.990	GHT=	1872.517	DIF =	8.53
I=28	FLIN=	2257.990	GHT=	2248.533	DIF =	-9.46
I=29	FLIN=	2538.990	GHT=	2529.871	DIF =	-9.12
I=30	FLIN=	1832.990	GHT=	1841.939	DIF =	8.95
I=31	FLIN=	2219.990	GHT=	2217.995	DIF =	-2.09
I=32	FLIN=	2196.990	GHT=	2499.231	DIF =	2.24
I=33	FLIN=	1832.990	GHT=	1927.493	DIF =	-5.50
I=34	FLIN=	2219.990	GHT=	2215.256	DIF =	-4.73
I=35	FLIN=	2496.990	GHT=	2487.539	DIF =	-9.45
I=36	FLIN=	1893.990	GHT=	1888.403	DIF =	-5.59
I=37	FLIN=	2018.990	GHT=	2014.267	DIF =	-4.72
I=38	FLIN=	2180.990	GHT=	2480.951	DIF =	-10.04
I=39	FLIN=	1697.990	GHT=	1692.310	DIF =	-5.68
I=40	FLIN=	1534.990	GHT=	1535.627	DIF =	0.64
I=41	FLIN=	2125.990	GHT=	2119.813	DIF =	-6.18

ADIF= -12.99106

LISTAGEM DE ERRO: GRUPO 7 - TESTE 43

85

I= 0	FLIN=	3254.390	GHT=	3277.063	DIF =	22.67
I= 1	FLIN=	3941.990	GHT=	3930.535	DIF =	-3.46
I= 2	FLIN=	4431.590	GHT=	4421.872	DIF =	-9.72
I= 3	FLIN=	3782.190	GHT=	3488.194	DIF =	26.00
I= 4	FLIN=	4696.790	GHT=	4100.676	DIF =	3.89
I= 5	FLIN=	4606.190	GHT=	4579.119	DIF =	-27.07
I= 6	FLIN=	3260.790	GHT=	3294.111	DIF =	29.32
I= 7	FLIN=	3995.990	GHT=	4010.046	DIF =	14.06
I= 8	FLIN=	4453.190	GHT=	4437.538	DIF =	-15.65
I= 9	FLIN=	3319.190	GHT=	3341.754	DIF =	22.56
I=10	FLIN=	4021.190	GHT=	4040.481	DIF =	19.21
I=11	FLIN=	4921.590	GHT=	4926.662	DIF =	-0.92
I=12	FLIN=	3439.790	GHT=	3452.834	DIF =	13.04
I=13	FLIN=	4166.990	GHT=	4180.467	DIF =	13.48
I=14	FLIN=	4687.190	GHT=	4671.019	DIF =	-16.17
I=15	FLIN=	3302.990	GHT=	3320.521	DIF =	17.53
I=16	FLIN=	3520.790	GHT=	3522.434	DIF =	1.64
I=17	FLIN=	4343.390	GHT=	4349.226	DIF =	1.84
I=18	FLIN=	3120.390	GHT=	3144.019	DIF =	15.63
I=19	FLIN=	2827.790	GHT=	2846.526	DIF =	18.74
I=20	FLIN=	3916.790	GHT=	3916.674	DIF =	-0.12
I=21	FLIN=	3346.190	GHT=	3367.723	DIF =	17.53
I=22	FLIN=	4055.190	GHT=	4048.828	DIF =	-6.56
I=23	FLIN=	4959.390	GHT=	4927.515	DIF =	-31.88
I=24	FLIN=	3430.790	GHT=	3439.049	DIF =	9.06
I=25	FLIN=	4156.190	GHT=	4147.508	DIF =	-8.68
I=26	FLIN=	4672.790	GHT=	4637.878	DIF =	-34.91
I=27	FLIN=	3355.190	GHT=	3370.020	DIF =	14.88
I=28	FLIN=	4064.390	GHT=	4054.711	DIF =	-9.68
I=29	FLIN=	4970.190	GHT=	4959.037	DIF =	-15.15
I=30	FLIN=	3299.390	GHT=	3327.497	DIF =	28.11
I=31	FLIN=	3995.990	GHT=	3984.037	DIF =	-11.95
I=32	FLIN=	4494.590	GHT=	4491.478	DIF =	-43.11
I=33	FLIN=	3299.390	GHT=	3308.593	DIF =	9.20
I=34	FLIN=	3995.990	GHT=	3983.510	DIF =	-12.48
I=35	FLIN=	4494.590	GHT=	4450.569	DIF =	-44.03
I=36	FLIN=	3409.190	GHT=	3419.164	DIF =	9.97
I=37	FLIN=	3634.190	GHT=	3633.145	DIF =	-1.05
I=38	FLIN=	4483.790	GHT=	4474.831	DIF =	-8.96
I=39	FLIN=	3056.390	GHT=	3074.908	DIF =	18.52
I=40	FLIN=	2762.990	GHT=	2799.404	DIF =	32.41
I=41	FLIN=	3020.790	GHT=	2847.621	DIF =	20.83

RDIF= 76.97239

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO E IDÉIAS

V.1) CONCLUSÃO:

Acreditamos que os objetivos iniciais, que motivaram nosso trabalho, foram alcançados:

- a) Obtenção de uma escala de geração para curto prazo com ou sem contingências.
- b) Armazenamento da maior quantidade possível de água existente no reservatório de Sobradinho no final do horizonte.
- c) Evitar a existência de vertimentos em períodos sobre o nosso controle.
- d) Permitir um mínimo de variação no volume do reservatório de Moxotó a fim de garantir uma maior rentabilidade na produção de energia no sistema, tendo em vista que este reservatório alimenta a usina de maior rendimento energético.

V.2) IDÉIAS E SUGESTÕES:

Durante o desenrolar do trabalho surgiram diversas idéias que deixamos de desenvolver e incorporar a este tese, sobretudo por questões de tempo. Gostaríamos de comentar, a seguir, aquelas que nos pareceram mais importantes, bem como sugerir alguns desdobramentos para nosso modelo.

- 19) Como vimos no capítulo IV, a matriz das restrições é composta de três equações:

a) Equação de balanceamento hidráulico de Sobradinho

$$x_1^{m+1} = x_1^m + y_1^m - u_1^m - v_1^m \quad (2.i)$$

b) Equação de balanceamento hidráulico do Complexo de Paulo Afonso.

$$x_2^{m+1} = x_2^m + y_2^m + u_1^{m-\tau} + v_1^{m-\tau} - u_2^m - v_2^m - u_3^m \quad (2.ii)$$

c) Equação de balanceamento energético do sistema.

$$E1.x_1^m + E2.x_2^m + A1.u_1^m + A2.u_2^m + A3.u_3^m + (C1+C2) + \Delta = d \quad (2.xv)$$

As equações (2.i) e (2.ii) são mais simples que a (2.xv) apresentando coeficientes 1, -1 e 0. Além disso se tivermos necessidade de refinar o modelo para evitar erros de linearização, pensamos em lançar mão de uma linearização por partes para substituir a equação (2.xv). Nestas circunstâncias, pensamos por um tratamento adequado que seria dualizar a equação (2.xv), ou sua substituta, dando em seguida ao problema um tratamento do tipo linear por parte [4], [5].

Este recurso pode ser útil, por exemplo, para um problema com intervalo de discretização para 1 hora.

29) Seria desejável fazer uma adaptação do nosso programa, que usa simplex Clássico, para utilizar o simplex revizado; com isto conseguiríamos melhoria de alguns fatores, entre os quais: tempo de computação, economia de memória, etc.

39) As empresas CHESF e ELETRONORTE, a partir de julho/81, deve-

rão estar interligadas, sendo que a primeira deverá fornecer uma parcela fixa de energia para a segunda a fim de atender ao mercado consumidor que ora se instala no Norte, devendo este fornecimento ser feito em horário sem grandes demandas (fora de pico).

Esta cota fixa de energia a ser gerada é de fácil adaptação ao nosso modelo, pois, acarreta o aumento de um certo número de variáveis na equação de balanceamento energético, bem como em mais uma restrição, a saber:

$$- h_1^m + h_2^m = d^m + ELN^m ; m = 0,1,2,3,\dots,41 \text{ e } ELN^m = 0 , \\ m = 3i+2.$$

$$- \sum_{m=0}^{41} ELN^m = k \text{ (quantidade total de energia contratada pela Eletronorte.)}$$

Onde ELN (quantidade de energia gerada em intervalos de tempo fora de pico.)

49) No trecho Sobradinho/Moxotó está localizada a cidade de Juazeiro, que representa o porto mais importante da área. É desejável a regularização do rio São Francisco, a fim de evitar perturbações no funcionamento do porto de Juazeiro. A sugestão seria acrescentar ao nosso modelo restrições do tipo $a \leq u_1^m + v_1^m \leq b$; $m = 0,1,2,\dots,41$, onde a e b seriam os níveis mínimos e máximos da vazão defluente de Sobradinho.

59) Vale ressaltar que a solução básica factível inicial no nosso trabalho é de obtenção óbvia, como mostramos nos capítulos anteriores.

De acordo com as observações realizadas durante os testes, é possível supor inicializações mais ricas, cujas variáveis básicas sejam turbinagens de Sobradinho, P.A-IV e volume de Sobradinho. A razão pela qual fomos levados a esta afirmativa é que estas variáveis se encontram quase sempre entre - seus limites inferiores e superiores na maioria dos intervalos de tempo, o que é de fácil compreensão:

- a) A forma pela qual supomos a turbinagem de Sobradinho como variável básica decorre do fato de ser Sobradinho o regulador plurianual e alimentador do sistema. Logo, a água que sai deste reservatório deverá passar por turbinagens, uma vez que, de acordo com os dados iniciais, estamos em períodos secos, o que implica na inconveniência de vertimentos, a não ser em casos especiais.
- b) O que nos leva a supor a turbinagem de P.A-IV como variável básica, deve-se ao fato de ser ela a usina de maior rendimento energético, estando, portanto, em funcionamento contínuo. Além disso, se atingir o seu limite máximo, é bem provável que se torne uma variável degenerada.
- c) Quanto ao volume de Sobradinho a razão é a mesma do item a, pois dada a capacidade do reservatório de Sobradinho não só de liberar água mas também de receber água vinda de Três-Marias, é fácil perceber que existe um equilíbrio neste reservatório ao ponto do seu volume estar quase sempre entre seus limites inferiores e superiores. Portanto, ele deve ser um possível candidato a variável básica.

Como se vê, resta-nos um estudo mais detalhado sobre a fixação dos limites nas variáveis não básicas a fim de garantirmos a factibilidade do sistema.

69) Outra sugestão para futuro teste, diz respeito a "difusão da água", o que pode ser compreendido através das figuras abaixo:

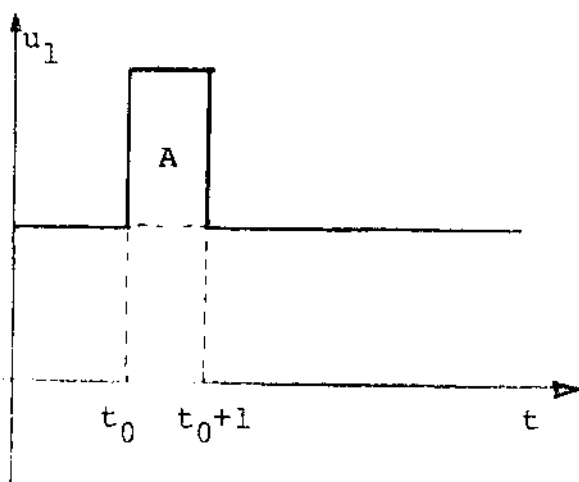


GRÁFICO A

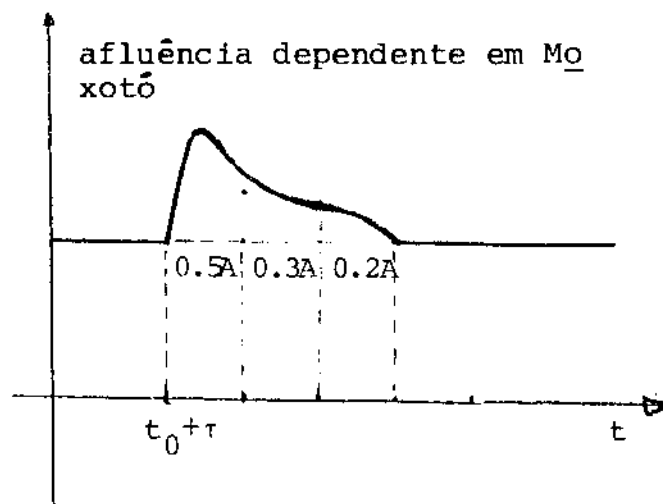


GRÁFICO B

Os gráficos (a) e (b) nos mostram que uma onda d'água liberada em Sobradinho num instante t_0 chegará em Moxotô três dias após, depois de haver percorrido 470km, submetida a uma difusão ao longo do percurso.

Nosso modelo poderia se aproximar da descrição deste fenômeno, formulando-se a seguinte equação para o balanceamento de água em Moxotô:

$$x_2^{m+1} = x_2^m + y_2^m + 0.5 (u_1^{m-\tau} + v_1^{m-\tau}) + 0.3 (u_1^{m-\tau-1} + v_1^{m-\tau-1}) + 0.2 (u_1^{m-\tau-2} + v_1^{m-\tau-2}) - u_2^m - u_3^m - v_2^m .$$

79) Um outro teste que deixamos de realizar, seria referente à ocorrência do desacoplamento das usinas de Moxotó e P.A-I-II-III. Não o fizemos por causa de vários fatores, a saber:

- a) O aumento das variáveis na nossa formulação.
- b) As usinas de Moxotó e P.A-I-II-III estão em cascata, próximas, com uma diferença de cota de apenas 21 metros e com igual engulimento.

Isto nos leva a crer que quase nenhuma diferença haveria nos resultados até agora obtidos a respeito do funcionamento do sistema, mas apenas teríamos um aumento de trabalho computacional.

89) Analisando a equação (2.xv) observamos que a mesma não apresenta, na sua constituição, a variável vertimento, cujo coeficiente deveria ser negativo. A razão pela qual deixamos de introduzir vertimento na equação de geração é que os dados iniciais a nós fornecido são de períodos secos, onde é pouco provável a ocorrência de vertimentos importantes.

O aparecimento de vertimento acarreta um aumento no nível do canal de fuga, prejudicando a geração do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] CHRISTIANO LYRA FILHO: "Otimização da Escala de Geração em Sistemas de Potência Hidrotérmicos". Tese de Mestrado, FEC, UNICAMP, 1979.

- [2] MOKHTAR S. BAZARAA and JOHN J. JARVIS: "Linear Programming and Network Flows". John Wiley & Sons, 1979.

- [3] M. SAKAROVITCH: "Notes on Linear Programming". Van Nostrand Reinhold, (1971).

- [4] GARCIA, A.S.: "Método Dual Simplex Linear por Partes". Tese de Mestrado, UNICAMP, IMECC, 1978.

- [5] FERREIRA, E.P.: "Método Linear por Partes, Método Primal Dual". Tese de Mestrado, UNICAMP, FEC, 1979.