

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM REDES HIDRAULICAS

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA
ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

1990

AUTOR: HANS GUNTHER POLL
ORIENTADOR...: PROF. DR. EDMUNDO KOELLE

Sys. 1840724

MULACAO COMPUTACIONAL EM REDES HIDRAULICAS



**TRABALHO DE GRADUACAO EM ENGENHARIA MECANICA
ESCOLA POLITECNICA DA UNIVERSIDADE DE SAO PAULO**

1990

AUTOR.....: HANS GUNTHER POLL

ORIENTADOR.: PROF. DR. EDMUNDO KOELLE

APRESENTACAO

Neste trabalho desenvolvido a partir do inicio de 1990, é apresentado o modelo computacional designado por Simulador em Redes de Água, ou simplesmente SRA, baseado no Método das Características (MOC) , para simular a operação de uma rede hidráulica de condutos forçados em regime permanente , transitório e oscilatório.

O modelo desenvolvido permite analisar a operação de instalações hidrelétricas , e redes de distribuição de água, em função do tempo (t), nas várias seções (x) da rede . Numa versão inicial utilizamos uma discretização no plano (x,t) através de malha regular, e numa versão final utilizamos a malha escalonada cruzada , cujas vantagens são evidenciadas ao longo do texto.

No desenvolvimento do trabalho são apresentados os fundamentos que permitem evoluções futuras , conforme sugerido no capítulo 2. A necessidade de se dispor de modelos matemáticos multivalentes , que permitam simular as operações nas instalações hidráulicas, na fase de projeto, é atualmente crescente. Tais modelos deverão permitir , a operação em tempo real nas instalações.A análise de simulações dinâmicas de manobras deverá ser previamente efetuada visando a especificação dos equipamentos.

Demonstra-se a versatilidade do modelo matemático como auxílio concreto na solução de vários problemas das instalações. Apresentaremos vários exemplos , inclusive um caso real envolvendo o projeto básico de uma válvula de bloqueio de uma usina hidrelétrica, elucidando a aplicação do programa desenvolvido.

A associação dos conhecimentos teóricos aprendidos no curso de engenharia , com o projeto mecânico demonstra o processo de otimização e ressalta o objetivo central , a ser perseguido pelo engenheiro, que é , a compatibilização de modelos matemáticos à situações físicas reais.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Edmundo Koelle, nosso orientador na Escola Politécnica da U.S.P., agradecemos pela valiosa orientação geral no desenvolvimento do trabalho e pelo tempo dedicado no encaminhamento profissional. Em especial salientamos a dedicação no permanente entusiasmo , o encorajamento constante; fundamentais condições para a realização deste trabalho.

Ao Eng. Ernani Felipe Beppler da Voith S/A agradecemos a sua colaboração prestada com informações sobre usinas hidrelétricas e a operação das válvulas de bloqueio. Agradecemos também o estímulo manifestado para a realização deste trabalho.

Ao Eng. Marcelo Bergweiler da Voith S/A agradecemos a sua colaboração no desenvolvimento do sistema, com o fornecimento de informações valiosas sobre a linguagem computacional utilizada.

À Voith S/A Máquinas e Equipamentos que proporcionou nos dois últimos anos de nossa graduação em engenharia mecânica o estágio supervisionado , através do qual consolidamos os conhecimentos adquiridos na Escola Politécnica e iniciamos nossa atuação profissional.

AOS MEUS PAIS

CAPITULO - 4

4-PROJETO DO SISTEMA DE SIMUL. EM REDES DE ÁGUA.....	54
4.1-Projeto Lógico.....	54
4.2-Projeto Físico.....	59

CAPITULO - 5

5-ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE.....	61
5.1-Instalações Testadas.....	61
5.1.1-Dados dos enos.....	61
5.1.2-Resultados das instalações testadas.....	71
5.2-Controle em Redes Hidráulicas.....	93
5.2.1-Dados dos enos.....	93
5.2.2-Objetivos do controle.....	97
5.2.3-Telas orientativas (Alarme).....	98
5.2.4-Resultados do controle.....	100
5.2.5-Dados complementares do controle.....	109

CAPITULO - 6

6-ANÁLISE EM REGIME TRANSITÓRIO.....	111
6.1-Instalações Testadas.....	111
6.1.1-Dados iniciais.....	111
6.1.2-Resultados do exemplo 1.....	113
6.1.3-Dados complementares.....	114
6.1.4-Resultados do exemplo 2.....	115
6.1.5-Dados complementares.....	116
6.2-Projeto Básico de Válvula de Bloqueio.....	117
6.2.1-Condições simuladas.....	117
6.2.2-Dados iniciais.....	120
6.2.3-Resuldados da 1. condição de operação	123
6.2.4-Gráficos característicos das válvulas.....	127
6.2.5-Resultados da 2. condição de operação.....	129
6.2.6-Dados complementares da 2. condição de op..	147
6.2.7-Resultados da 3. condição de operação.....	151
6.2.8-Dados complementares da 3. condição de op..	160

INDICE DE SIMBOLOS

A	- área do tubo.
A	- ponto no plano (x,t)
a	- celeridade
B	- ponto no plano (x,t)
B	- constante do conduto elástico
C	- ponto no plano (x,t)
C _E ,C _D	- constantes no método das características
C _d	- coeficiente de descarga de válvula
D	- diâmetro do conduto
D	- ponto no plano (x,t)
E	- ponto no plano (x,t)
F	- ponto no plano (x,t)
f	- coeficiente de atrito Darcy & Weisbach
f	- frequência (Hz)
g	- aceleração da gravidade
H,H ₀	- carga
H _{Pi}	- carga no ponto P da abscissa i no instante t
H _i	- idem ao anterior no tempo t-Δt
i	- variável de indexação da secção de um conduto.
K _v	- coeficiente de perda de carga singular na válvula manobrável
K _s	- coeficiente de perda de carga singular nos dispositivos não manobráveis
L,L ₀	- comprimento do conduto

INDICE DE TERMOS

Eno ou elemento: Componente qualquer de uma Rede hidráulica . Ex: válvula, bomba, turbina, tubo, reservatório, chaminé de equilíbrio.

Rede: Conjunto de Enos associados de modo lógico através de Nós.

Nós: Extremos de um eno.

Nod: Nô com demanda. É o Nô ao qual é imposta uma vazão representando uma demanda instantânea.

Regime Permanente: É o estado de equilíbrio hidráulico de uma rede. As variáveis de estado (carga e vazão) não variam com o tempo em qualquer posição da rede.

Regime Transitório: É o conjunto de estados entre dois intervalos (inicial e final) de regime permanente, que resulta de uma ação (manobra) em algum eno da rede
Ex: válvula , bomba.

Regime Oscilatório: Corresponde ao estado não permanente provocado por manobra oscilante.

Manobra: Ação sobre enos da rede, que provocam alteração do regime permanente.

Período extensivo : Conjunto de estados de regime permanente que representam o comportamento de uma rede durante período pré-estabelecido.

C.I.M. : Processo de manufatura integrada por computador.

P.L.C. : Controlador lógico programável.

1.1 APRESENTACAO DO TRABALHO

Projetos de sistemas hidráulicos requerem sempre um estudo pormenorizado, que visa proporcionar a sua estabilidade operacional e a garantia na obtenção dos objetivos propostos.

A importância do uso de um método computacional eficaz, relaciona-se com a necessidade de garantir-se total confiança na concepção física do sistema. A análise de escoamento em redes hidráulicas pode ser feita por uma série de metodologias, desde as tradicionais até as mais recentes que se baseiam no "método elástico".

A abordagem clássica utiliza um sistema de equações algébricas não lineares, que correspondem à caracterização do escoamento de fluido incompressível. A condição de equilíbrio hidráulico, que é uma situação onde a carga e a vazão permanecem invariantes no tempo, é determinada com a aplicação de duas leis fundamentais em mecânica dos fluidos, a da continuidade e a da quantidade de movimento em regime permanente, não sendo, portanto, considerados os efeitos de inércia e elasticidade. Tal abordagem, clássica, pode ser considerada como um "método estático" de análise.

O método elástico baseia-se na integração numérica das equações diferenciais parciais básicas que caracterizam o escoamento do líquido, em regime variado, considerando que o regime permanente resulta como um caso particular desse regime, quando não se realizam manobras nos componentes da rede. A aplicação deste método é efetuada transformando as equações diferenciais parciais em equações ordinárias (MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS - MOC) através das quais se analisa o escoamento transitório. Como o regime transitório ocorre entre dois regimes permanentes (inicial, e final), uma análise possibilita também o cálculo do equilíbrio hidráulico.

No capítulo 7 focalizamos o escoamento oscilatório, pesquisando possíveis condições de ressonância de uma instalação simples.

No capítulo 8 apresentamos conclusões obtidas com as simulações e no desenvolvimento desse trabalho. Fazemos uma consideração especial ao método adotado, abordando sua confiabilidade e importância.

Finalmente no capítulo 9 são efetuadas recomendações para o desenvolvimento de análises de instalações hidráulicas com o auxílio de simuladores matemáticos.

1.3 OBJETIVOS

Visando orientar a solução de problemas operacionais e de projeto em redes hidráulicas o trabalho é desenvolvido com ênfase nos seguintes itens:

- a.) Apresentação da teoria utilizada, desenvolvendo-a a partir das equações fundamentais que regem o comportamento dinâmico da rede.
- b.) Apresentação do modelo computacional, que associado à teoria permite automatizar os cálculos.
- c.) Destaque ao desenvolvimento do modelo computacional, em linguagem estruturada, para se obter:
 - c.1) Os valores do equilíbrio hidráulico de uma rede, isto é o regime permanente.
 - c.2) Obtenção dos valores das variáveis de estado, resultantes de uma manobra na rede.
 - c.3) Estudo de efeitos provocados por (excitações harmônicas) manobras periódicas na rede.

2.1 BASE TECNOLOGICA

O modelo computacional desenvolvido serve como base tecnológica para quatro campos de aplicação:

- a.) Projeto de Redes e Instalações Hidráulicas.
- b.) Projeto de Elementos Associados a Rede.
- c.) Controle de Operações em Redes Hidráulicas.
- d.) Simulação de Manobras em Redes

2.1.1 Projeto de Redes e Instalações Hidráulicas:

Existem grandes vantagens na utilização do modelo computacional no projeto de qualquer rede hidráulica, seja ela de distribuição de água ou geração de energia.

Possibilitamos durante o projeto de uma rede hidráulica, a verificação imediata de possíveis problemas e alternativas operacionais, e, analisamos a posição em que se deve colocar um dado Enó para o controle da vazão e (ou) pressão nos Nós da rede. Exemplificamos as ações de válvulas e de chaminés de equilíbrio, muito embora, vários outros Enos possam ser inseridos no programa. Com os resultados das simulações, obtemos valores das variáveis de estado e determinamos dados de projeto básico, tais como: espessura de parede de tubos, e valores das classes de pressão de válvulas e acessórios.

Essas possibilidades associadas a outras tecnologias, integram o projeto hidráulico de redes com o projeto mecânico de seus componentes.

A figura 2.1 nos mostra, mediante o uso de um microcomputador, representando o sistema S.R.A., a operação conjunta com um sistema C.A.D. (desenho assistido por computador) e um sistema C.I.M. (manufatura integrada por computador).

CONJUNTO DE INTERACAO PARA A MELHOR SOLUCAO

Regime Permanente - Dados Dimensionais	arquivos I.A.
Simulações de Transitorio - Dados Dimensionais	
Regime Oscilatorio - Dados Estruturais	
Verificacao Estrutural M.E.P.	

Pig. 2.2 - Diagrama para Obtencao da Melhor Solucao

2.1.2 Projeto de Elementos Associados a Rede (ENOS):

Nesse campo de aplicação o simulador é a base para especificação de cargas extremas e da manobra em Enos. No projeto de válvulas de bloqueio para usinas hidrelétricas, por exemplo, os dados para o projeto básico são determinados através dos resultados da simulação para as condições operacionais, emergenciais e anormais extremas. Ou seja, dados dimensionais para se determinar espessuras necessárias para suportar cargas específicas, momentos e forças atuantes no obturador, e tempos de manobra.

O projeto semi-integrado possibilita a utilização de um modelo de cálculo dinâmico em substituição ao estático. Abre-se a oportunidade para a simulação em operações diversas, aberturas ou fechamentos com diferentes tempos de manobra, para quaisquer características de válvulas (obturadores), pesquisando-se assim, a melhor solução. Conjuntamente verifica-se a variação de esforços, como momentos e forças no obturador durante a manobra. O índice de cavitação (σ) disponível tem sua variação calculada e, assim, estabelece-se os limites operacionais, com base nos dados experimentais da válvula (índice requerido).

Uma maior integração desse tipo de projeto será possível mediante a utilização de simuladores que determinem as disposições de elementos mecânicos associados a esses Enos. Por exemplo, para uma válvula de bloqueio, que é acionada por servomotor hidráulico, poder-se-ia determinar a posição em que o servomotor é colocado, com o auxílio de rotinas que simulem mecanismos de 4 ou mais barras para se prever existência de pontos mortos, e posição de menor esforço. Um simulador assim completado, é a meta a ser obtida a partir do trabalho aqui desenvolvido.

O detalhe do ramo principal na figura 2.4 nos mostra quais os elementos necessários ao controle de um desses ramos ligados à rede. São previstos dois dispositivos de controle. Um P.L.C. (controlador lógico programável), que atua os componentes mecânicos, tais como válvulas e bombas, ou, simplesmente válvulas automáticas pilotadas pela própria pressão da rede. Os outros dispositivos de controle são os centros regionais de controle e de aquisição de dados. Esses centros são responsáveis por um dos ramos principais da rede, comunicando-se diretamente ao C.C.. A ligação entre o C.C. e os dispositivos de controle é a do tipo estrela.

DETALHE DO RAMO PRINCIPAL DA REDE

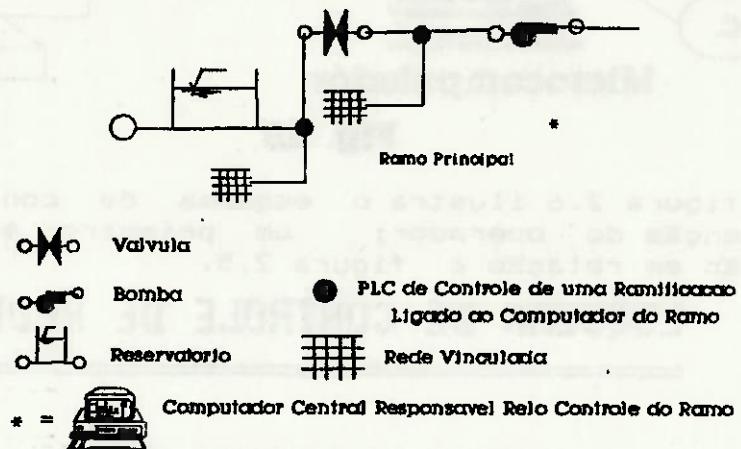


Fig. 2.4 - Ramo Principal da Rede

A figura 2.5 ilustra o tipo de ligação entre os dispositivos de controle. Note que o centro regional é responsável por vários centros locais (P.L.C.s) e é ele que faz a ponte com o C.C. (computador central).

Esse conjunto de controle operará com os dados adquiridos por sensores colocados na rede (telemetria), configurando-se assim uma rede de controle de malha fechada. O objetivo de tal controle é a correção dos dados inicialmente assumidos e permitir, em sequência, o controle em tempo real ou, no mínimo estabelecer, uma previsão de operação para os próximos períodos.

O computador central pode ser equipado com arquivos que forneçam uma base inteligente de comparação. A função é a de proporcionar ao sistema, uma base para decisão sobre a manobra a executar. Essa decisão, se adotada, dever ser armazenada, para servir como dado comparativo para análises futuras.

A figura 2.7 mostra uma variação das ligações entre os dispositivos de controle. Trata-se da união do esquema de controle de primeiro estágio com os arquivos de inteligência artificial, com o objetivo de promover o controle automático da rede. É o segundo estágio de evolução do esquema de controle originalmente proposto.

CONTROLE COMPUTACIONAL DE UMA REDE

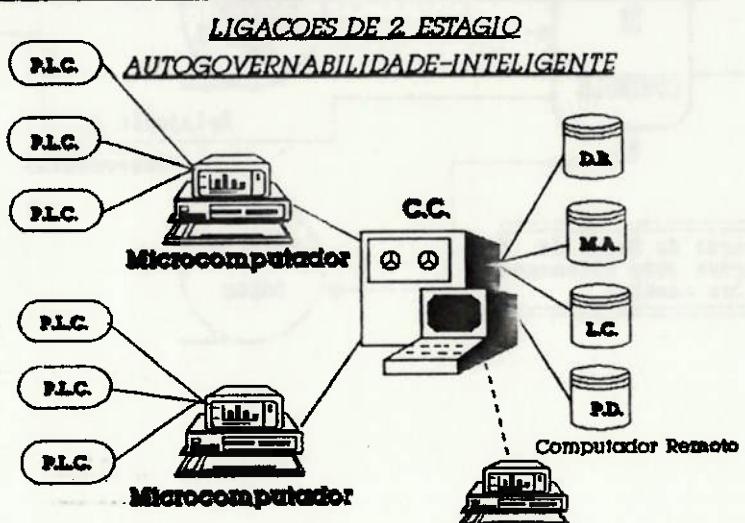


Fig. 2.7 - Esquema de Controle em 2 Estágio

O esquema de controle automático proposto para a rede, efetuado sem a intervenção direta do operador, está esquematizado na figura 2.8. Verifica-se que as diferenças fundamentais no fluxo de dados com relação ao esquema anterior, de primeiro estágio, referem-se ao fato, do próprio sistema simular as funções de um operador 'artificial'. O computador central (C.C.) , nesse segundo estágio, tomará a decisão mediante consulta à base de dados. O operador apenas receberá relatórios sobre as decisões tomadas. O banco de dados será continuamente atualizado.

MA = MEMORIA ARTIFICIAL (LEMBRANÇAS)

LC = ARQUIVO LOGICO-COMPARATIVO

DB = BANCO DE DADOS

PD = DADOS SOBRE PREVISÕES

Com tais procedimentos, minimizam-se as possibilidades de erros operacionais e garante-se previamente o sucesso no controle da rede.

A alocação de recursos para a configuração desses sistemas de controle pode parecer onerosa a primeira vista, contudo, há a possibilidade de implantação progressiva a partir de um simulador simples governado por microcomputador. Isso pode ser assegurado pelo fato de dispormos de microcomputadores capazes de executar, com o auxílio de interfaces de controle de motores, toda a programação de manobras necessárias para atender as demandas estabelecidas.

A figura 2.9 ilustra as facilidades topológicas para implantação de um sistema simples de controle em uma rede industrial.

REDE DE PEQUENO PORTE
INDUSTRIAS, PEQUENAS CIDADES

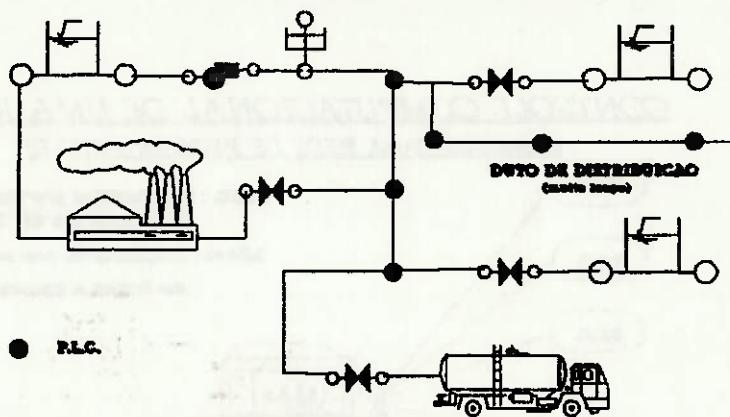


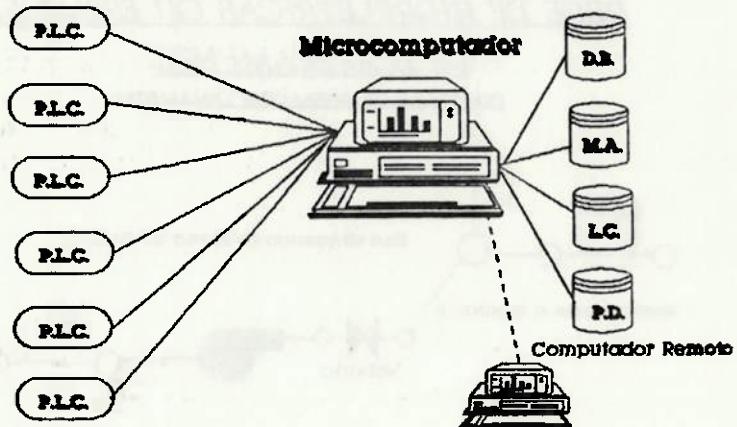
Fig. 2.9 - Rede em Industrial

Na figura 2.10, apresentamos um segundo exemplo, uma refinaria de petróleo na qual pode-se aplicar, também, a base desenvolvida, para se controlar o despacho e a "tancagem" de derivados.

O sistema de segundo estágio, em complementação ao anterior, ajustado para redes menores, está representado na figura 2.12.

Com relação às redes de grande porte, percebe-se a inexistência de centros regionais, e toda a tarefa de controle é exercida pelo microcomputador, agora central.

CONTROLE COMPUTACIONAL DE UMA REDE
LIGACOES DE 2. ESTAGIO PARA REDES DE PEQUENO PORTE
AUTOGOVERNABILIDADE-INTELIGENTE



M.A. = MEMORIA ARTIFICIAL (LEMBRANÇAS)

L.C. = ARQUIVO LOGICO-COMPARATIVO

D.B. = BANCO DE DADOS

P.D. = DADOS SOBRE PREVISÕES

Fig. 2.12 - Esquema de Controle p/ Redes Pequenas

ESQUEMA DE CONTROLE DINAMICO

DE MANOBRAS EM REDES

1. ESTAGIO : SIMULACAO MATEMATICA PREVIA COM MONITORACAO POSTERIOR

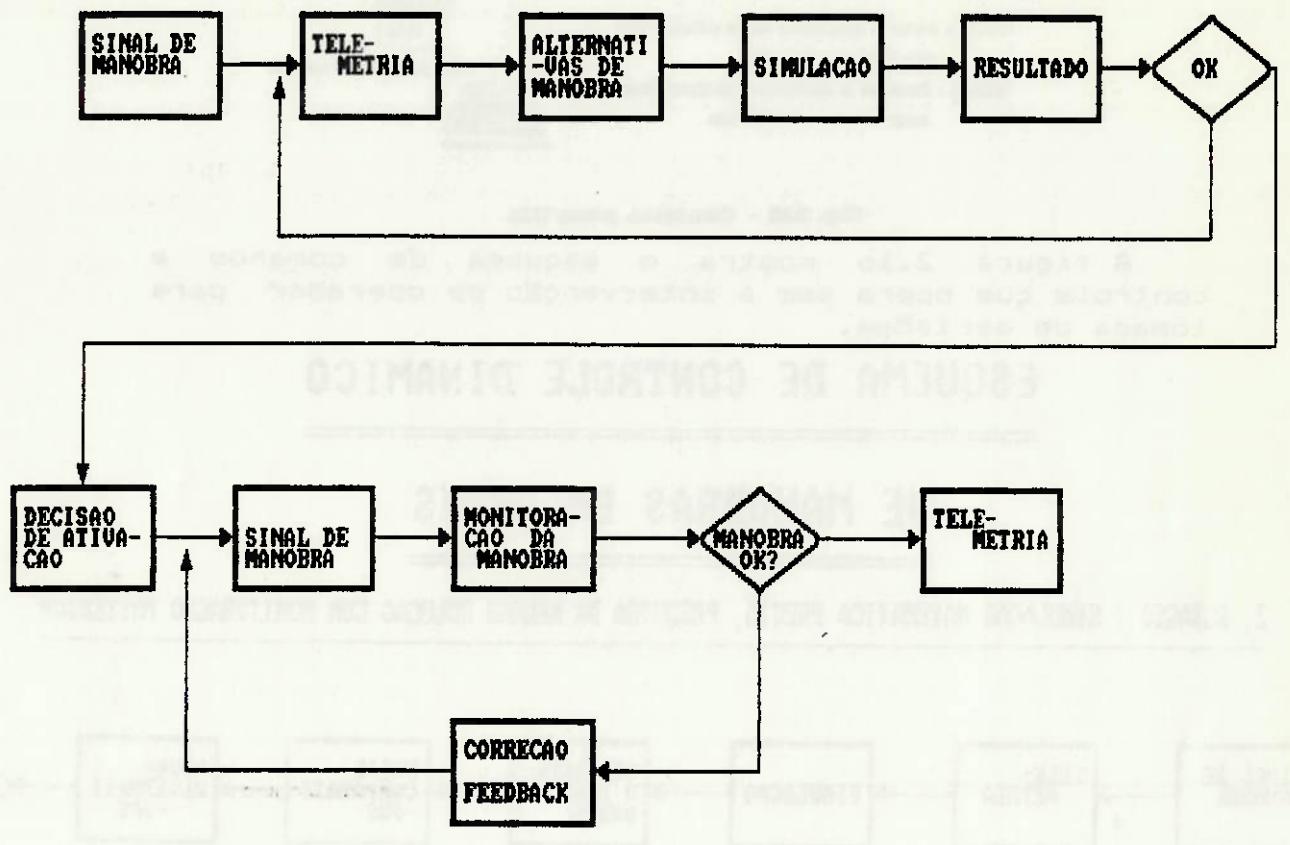


Fig. 2.14

Em um segundo estágio esquematizado na figura 2.15. usamos, também , do mesmo modo que nas apresentações anteriores , elementos de inteligência artificial com a função de garantir a otimização operacional do equipamento em compatibilidade com a capacidade de acumulação de água dos reservatórios.O computador buscará a melhor solução, através das simulações. A execução da manobra é concomitante com a monitoração da operação.

3.1 CONCEITOS BASICOS

O escoamento em um conduto forçado é dito *permanente* no caso em que os valores médios das grandezas associadas a um ponto (EULER) são invariáveis no tempo, quando a escala de tempo é bem superior à das flutuações turbulentas da grandeza, isto é:

$$G = \bar{G} + \Delta G \cong G_0 \quad (\text{no ponto})$$

\bar{G} = valor médio da grandeza G no ponto

ΔG = flutuações turbulentas

Em caso contrário, isto é, $G=G(t)$ a grandeza G associada ao ponto varia com o tempo e o escoamento passa a ser chamado de *variável*.

O escoamento é unidimensional quando as grandezas são definidas através de uma coordenada espacial x , geralmente tomada ao longo do conduto forçado no qual se processa o escoamento e do tempo t .

Escoamento Unidimensional

$G(x,t)$ $G(x)$ permanente

$G(x,t)$ variável

O escoamento variável é gerado por uma manobra - ato que modifica um regime permanente inicial. Se existir um regime permanente final, então o escoamento variável será dito *transitório*. O caso é ilustrado na figura 3.1:

A evolução do escoamento variável está diretamente relacionada às características da manobra. O equacionamento apresentado mostrará o fato, distinguindo-se aquelas, nas quais, as características elásticas do conduto e a compressibilidade do fluido não são mobilizadas. Nesse caso o fenômeno físico resultante não mostra efeitos de propagação, e tudo ocorre como se a massa de fluido no interior do conduto fosse um bloco sólido, que se movimenta de um lado a outro, em um vai-e-vem, caracterizando a chamada *oscilação em massa ou transitório rígido*.

Esse movimento é amortecido para o regime permanente final sob o efeito de atrito.

Contudo, se a manobra é de tal intensidade, e ou duração, que provoca a deformação do conduto, e a compressão ou expansão do fluido, temos a existência de um fenômeno de propagação dos efeitos da manobra para o escoamento. Isso caracteriza o *Golpe de Ariete ou Transitório Elástico*.

Ao engenheiro interessa o estudo amplo do escoamento variável, pois instalações hidráulicas são manobradas para atenderem os seus objetivos. Assim, no sentido de atender objetivos, essas manobras provocam variações nas grandezas G enfocadas. Logo é conveniente que determinamos os valores extremos dessa grandeza ($G_{\max}(t)$, $G_{\min}(t)$), para o correto dimensionamento dos componentes da instalação e otimização de custos.

Essas grandezas dispostas de uma forma genérica como G, são grandezas de interesse, pressão (P) e velocidade (V) ou carga (H) e vazão (Q). A variação da massa específica (ρ) e temperatura (T) são de segunda ordem e de pouco interesse prático.

Assim, o problema de determinação do escoamento variável (*transitorio ou oscilatorio*) está em se obter os valores das variáveis dependentes $P(x,t)$ e $V(x,t)$ ou $H(x,t)$ e $Q(x,t)$ em função das variáveis independentes: (x) - que indica a posição de seção do conduto para o escoamento unidimensional. (t) - tempo de manobra.

3.2 HIPÓTESES DE EQUACIONAMENTO

Supondo a ocorrência de uma manobra em uma instalação os ENOS do tipo Tubo irão sofrer efeitos representados pelas alterações das propriedades físicas associadas ao conduto, ao fluido e ao escoamento. Fixada a atenção a um dado volume de controle (porção do tubo), devemos verificar as equações básicas da Continuidade e Quantidade de Movimento para determinação das funções $H(x,t)$ e $Q(x,t)$ ou $P(x,t)$ e $V(x,t)$.

Assumimos as seguintes hipóteses:

3.2.1 Relativas ao Escoamento:

- H1 - Escoamento 1D e tubos com simetria axial.
- H2 - Distribuição uniforme de ρ , V e p na seção transversal.
- H3 - Perda de Carga 'quasi-estática'.

3.2.2 Relativas ao Líquido:

- H4 - Líquido monofásico (não há vaporização).
- H5 - Líquido homogêneo.
- H6 - Comportamento Reológico Linear, isto é
 - $K = -dp/(dV/V)$
 - = módulo de elasticidade volumétrica constante.
- H7 - Líquido é um fluido pouco compressível, isto é, se comprime, mas as variações de p são pequenas se comparadas com as variações de p ou V .

3.2.3 Relativas ao Conduto:

- H8 - Conduto uniforme, isto é, espessura constante e material homogêneo e isoentrópico ao longo da abscissa x .
- H9 - Eixo do conduto é imóvel.
- H10 - Comportamento Reológico Linear não há plastificação ou seja fica válida a lei de Hooke $\sigma = \epsilon \cdot E$.

Com essas hipóteses vamos analisar o volume de controle e estabelecer as condições de conservação de massa (E.C.) e da quantidade de movimento (E.Q.M.).

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} [\rho_2 V_2 A_2 - \rho_1 V_1 A_1] + \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\partial (\bar{\rho} \cdot \bar{A})}{\partial t} = 0$$

Δx

$$\frac{\partial (\rho \cdot V \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \cdot A)}{\partial t} = 0$$

Efetuada assim a derivada parcial $\frac{\partial}{\partial x}$ obtemos a derivada total:

$$\frac{D}{Dt} (\rho \cdot A) + \rho \cdot A \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

No caso particular no qual assumimos modelo rígido , isto é :

Tubo indeformável $A = \text{cte.}$
Líquido incompressível $\rho = \text{cte.}$

Resulta de (4)

$$\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{então} \quad V = V(t), \text{ ou seja } V \text{ independe de } x.$$

Isto significa que o transitório é uma *Oscilação de Massa*, pois todo o líquido no interior do tubo possui em cada instante , o mesma velocidade como se fosse uma massa sólida que oscila.

Se assumirmos a deformabilidade do tubo e a compressibilidade do líquido necessitamos determinar $\frac{D}{Dt} (\rho \cdot A)$ ou seja, a variação da ρ e A ao acompanharmos

$\frac{D}{Dt}$ o líquido (Lagrange). As variações da área e da massa específica com o tempo (efeitos) são devidas à variação de pressão imposta pela manobra. Considerando esta expressão $\frac{D}{Dt} (\rho \cdot A) = \frac{\rho \cdot DA}{Dt} + A \cdot \frac{D\rho}{Dt}$ e a (4)

dividindo por $\rho \cdot A$ resulta,

$$\frac{1}{A} \frac{DA}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

E daí , para uma dada condição inicial do líquido, massa H e volume V , obtemos a curva registrada no na figura 3.5 , na qual, $Dp/Dv = \operatorname{tg} \alpha$ indica a tendência a compressão (causa/efeito) e , esta pode ser definida como uma propriedade física através da quantidade positiva $K = -Dp/DV/V$, demasiadamente homogênea a pressão. Como a massa $M=\rho.V$ é mantida, temos:

$$\frac{DV}{D\rho} = - \frac{M}{\rho^2} = \frac{V}{\rho}$$

e portanto $K = \frac{Dp}{\frac{D\rho}{\rho}}$ onde p/ água $K= 2.2 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ (6)

A expressão (5) resulta em :

$$\frac{DA/A}{Dt} + \frac{Dp}{KDt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

ou

$$\frac{Dp}{Dt} \left[\frac{1}{K} \left[\frac{K \frac{DA/A+1}{Dp}}{Dp} \right] \right] + \sum \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

O coeficiente de Dp/Dt em (8) depende das características do conjunto tubo-líquido e é determinável, conhecendo-se a concepção estrutural de cada tubo , com o que, determina-se $\frac{DA/A}{Dp}$.

Consideramos por exemplo um tubo de parede fina de espessura e e raio R com $R \gg e$, (usualmente parede é fina se $R > 80e$).

Se tomamos uma fatia do comprimento Δx do tubo e o submetemos ao incremento Dp de pressão temos um aumento da área transversal e um aumento das tensões circunferenciais. Existe também variação de espessura que é considerada de segunda ordem , quando comparada com outras variações. Assim obtemos a expressão (9) que relaciona o incremento da tensão circumferencial resultante do incremento Dp , da pressão provocado pela manobra.

$$\frac{Dp}{Dt} \left[\frac{1}{K} \left[\frac{K \cdot 2 \cdot R}{E \cdot e} + 1 \right] \right] + \sum \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

Mostrando de modo explícito que o coeficiente Dp/Dt é função das características do Tubo (R, e, E) e do líquido (K). Se o tubo é rígido temos que $E \rightarrow \infty$ e portanto:

$$\frac{Dp}{Dt} + K \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

que é a equação da continuidade para a chamada "TEORIA DA COLUNA ELASTICA SIMPLIFICADA" na qual considera-se, somente, as deformações do líquido medida através de K . Se o líquido também é rígido, isto é, totalmente incompressível: $K \rightarrow \infty$ e em (12) $\partial V/\partial x = 0$ que é a equação já comentada para a TEORIA DA COLUNA RIGIDA $V=V(t)$.

Nas expressões (8) e (12), não aparecem explicitamente, a massa específica ρ que qualifica a inércia do líquido em escoamento e as quantidades $Dp/D\rho$ e Dp/DA foram avaliadas em processos quasi-estáticos acompanhando as deformações (efeitos) produzidos pelas manobras - causa. Dp - utilizamos o processo de LAGRANGE (seguimos o sistema).

Vamos rearranjar a expressão (8) para a expressão de Consenvacao da Massa (Eq da Continuidade) em variáveis Eureelianas, isto é, associadas às posições e ao instante. Para isto multiplicamos e dividimos o primeiro membro de (8) por ρ e transformamos a derivada total

$$Dp/Dt = \partial p/\partial t + V \cdot \partial p/\partial x$$

e definindo a grandeza, dimensionalmente homogênea a uma velocidade chamando-a de CELERIDADE representando por 'a'.

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{K \cdot DA/A}{Dp}}} \quad (14)$$

e ainda considerando a hipótese H7 - líquido pouco compressível ($\rho_x \approx 0$, $\rho_t \approx 0$) e a hipótese H9 (conduto imóvel $Zt = 0$), obteremos com a adoção do índices para representar a derivada parcial ($G_t = \partial G / \partial t$ e $G_x = \partial G / \partial x$) a expressão válida para os líquidos:

$$H_t + V \cdot H_x - V \cdot \operatorname{sen}\alpha + \frac{a^2}{g \cdot A} \cdot \left[Q_x - \frac{Q}{A} \cdot A_x \right] = 0 \quad (17)$$

3.3.1 Regime Permanente:

Para o caso do regime permanente temos ($H_t = 0$). Obtemos de (17) a expressão p/ $\partial Q / \partial x = dq / dx = Q_x$:

$$Q_x = \frac{g \cdot A}{a} \cdot \left[\frac{V}{a} \right] \cdot \left[\operatorname{sen}\alpha - H_x \right] + \frac{Q}{A} \cdot A_x \quad (18)$$

Se o tubo é horizontal ($\alpha=0$) e está submetido a uma carga constante ($H_x=0$) então, como a área também é constante, resulta velocidade constante, $V=Q/A$ para uma dada vazão. (caso ideal sem atrito para se ter $H_x=0$).

Por outro lado se há variação de carga e ou de inclinações que acarretam a variação de pressão ao longo do tubo, é necessário assumirmos uma variação na área para que tenhamos a mesma vazão em todas as seções, e, concomitantemente satisfazer a equação da continuidade (18). No entanto como $V \ll a$ o primeiro termo da equação do segundo membro é desprezível, resultando que, para dada vazão a hipótese da área constante é compatível com a condição de continuidade e podemos assim assumir que $A_x \approx 0$, com o que simplificamos (17) para $V \ll a$, obtendo:

$$H_t + \frac{a^2}{g \cdot A} Q_x = 0 \quad (19)$$

Nota: A equação (19) é válida para análise de transitórios em líquidos e satisfazendo, na condição de regime permanente ($H_t = 0$), a condição $Q_x = 0$ que é incompatível com tubo de seção constante.

3.4 EQUAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO (EQM)

No caso da EQM, se considerarmos a escolha do volume de controle, igual a utilizada para a dedução da EC, evidenciaremos os cortes no tubo, com o que será necessário representar as tensões que se manifestam nas paredes do tubo na seção de corte (figura 3.7). Tais tensões não são de interesse em uma primeira fase e para determiná-las deveríamos usar outro VC somente envolvendo o tubo. Essas circunstâncias mostram que o volume de controle não é adequado e portanto usamos agora um volume de controle que coincide com o tubo deformado no instante t (figura 3.8).

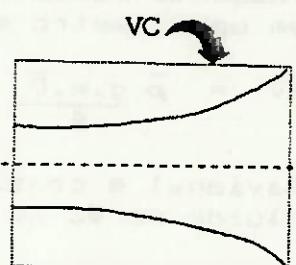


Fig. 3.7 - VC I

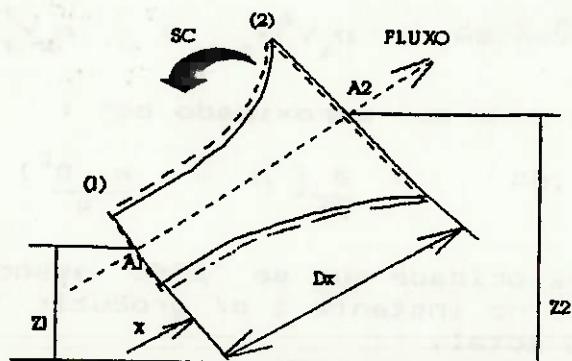


Fig. 3.8 - VC para Equação da Quant. de Movimento

Se considerarmos que Δx é arbitrário e independe de t , podemos dividir cada um dos termo de (20) e passamos ao limite para Δx tendendo a zero e obtemos após simplificações e expansões a expressão:

$$-A \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - \tau \cdot \pi \cdot D - \rho \cdot g \cdot A \cdot \text{sen}\alpha = \rho \cdot A \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (25)$$

que é a equação completa da EQM.

Se assumirmos a hipótese H3, perda de carga quasi-estática, e a fórmula de Darcy e Weisbach então:

$$\tau = \frac{\rho \cdot f \cdot V^2}{8} \quad (26)$$

f é o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach.

Considerando (26) e (27), dividindo por $\rho \cdot A$ obtemos, com a notação usada para as derivadas parciais, e colocando $V^2 = V|V|$ prevendo o sinal associado ao sentido do escoamento:

$$Vt + V \cdot Vx + \frac{px}{\rho} + \frac{f \cdot V|V|}{2 \cdot D} + g \cdot \text{sen}\alpha = 0 \quad (27)$$

Tal equação, usada em conjunto com a equação da continuidade na forma indicada da equação (15), se aplica a qualquer fluido escoando num conduto forçado elástico.

Em termos de $H = p/\rho g + z$, considerando as hipóteses, adicionalmente, H7, e H9 resulta:

$$Vt + V \cdot Vx + g \cdot Hx + \frac{f \cdot V|V|}{2 \cdot D} = 0 \quad (28)$$

que é válida para os líquidos (pouco compressíveis) e é usada em conjunto com a equação (17).

3.5 TEORIA DA COLUNA RIGIDA (CASO PARTICULAR)

Se durante o transitório, as condições de fronteira forem tais que resulte $H_t \approx 0$ isto é, manobras lentas, resultará da (EC) - (19) que $Q_x = 0$ ou seja, $Q = Q(t)$ e o transitório se aproxima do fenômeno físico regido pela TEORIA DA COLUNA RIGIDA (TCR). Com isso da (EQM) - (31) verificamos que :

$$H_x = \frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{f \cdot Q |Q|_2}{2 \cdot g \cdot D \cdot A^2} - \frac{1}{g \cdot A} \cdot Q_t = f(t)$$

isto significa que a linha piezométrica instantânea é uma reta, cuja inclinação é definida pela vazão e pela sua taxa de variação com o tempo e a EQM p/ o modelo rígido resulta de (31) com $Q_t = \frac{dQ}{dt}$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{f \cdot Q |Q|_2}{2 \cdot g \cdot D \cdot A^2} = 0 \quad (32)$$

Que é a equação fundamental para o modelo rígido. Tal equação, integrada num dado instante t entre os extremos (1) e (2) do conduto resulta na equação base do TCR:

$$(H_2 - H_1) + \frac{L}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{f \cdot L \cdot Q |Q|_2}{2 \cdot g \cdot D \cdot A^2} = 0 \quad (33)$$

Ou seja, a diferença entre a carga ($H_1 - H_2$) nos extremos do conduto é utilizada para acelerar o líquido no seu interior e vencer o atrito. Trata-se de uma equação diferencial ordinária na incógnitas H_1, H_2, Q e, para sua determinação necessitamos de duas equações adicionais que caracterizam as fronteiras (1) e (2) do conduto. Figura 3.9 (a).

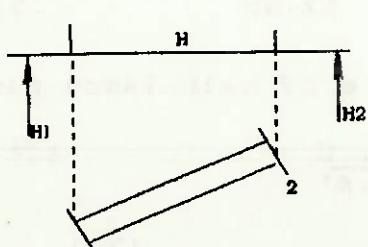


Fig. 3.9 (a)

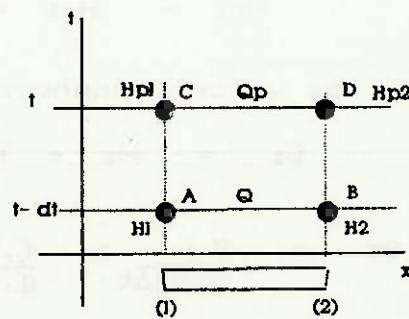


Fig. 3.9 (b)

A equação (35) é resolvida em cada caso, conjuntamente com as equações de fronteira p/ determinação de H_{p1} , H_{p2} e Q_p .

Tais valores determinados permitem o cálculo das duas constantes C_1 , e C_2 para o processamento numérico no instante seguinte defindo-se o cálculo progressivo no tempo.

3.6 RETAS CARACTERISTICAS

Considere um transitório hidráulico que mobilize a elasticidade de um conduto e a compressibilidade de um líquido. Será regido pelas equações de derivadas parciais (EDDP):

$$L_1 = H_t + \frac{a^2}{g \cdot A} \cdot Q_x = 0 \quad (19) \quad (\text{EC})$$

$$L_2 = Q_t + g \cdot A \cdot H_x + \frac{f \cdot Q |Q|}{2 \cdot D \cdot A} = 0 \quad (31) \quad (\text{EQM})$$

Tais equações do tipo hiperbólico não são integráveis analiticamente. Se olharmos para o conceito de derivada total $DG = G_t + V \cdot G_x$ vemos que ao somá-las poderíamos produzir uma derivada total transformando o sistema EDDP em uma equação diferencial ordinária (EDO).

Para produzir isto vamos considerar um coeficiente λ , a ser determinado, e considerar a soma $L = \lambda L_1 + L_2$ que deverá ser obviamente nula. Temos:

$$\lambda(H_t + \frac{a^2}{g \cdot A} Q_x) + (Q_t + g \cdot A \cdot H_x + \frac{f \cdot Q |Q|}{2 \cdot D \cdot A}) = 0$$

que com os termos agrupados em Q e H fornece:

$$\lambda[H_t + \frac{g \cdot A \cdot H_x}{\lambda}] + [Q_t + \frac{\lambda \cdot a^2 \cdot Q_x}{g \cdot A}] + \frac{f \cdot Q |Q|}{2 \cdot D \cdot A} = 0$$

que resulta em

$$\frac{\lambda DH}{Dt} + \frac{DQ}{Dt} + \frac{f \cdot Q |Q|}{2 \cdot D \cdot A} = 0 \quad (37)$$

3.7 MALHA ESCALONADA (MOC)

As equações diferenciais de derivadas parciais que descrevem o escoamento transitório do líquido num conduto são transformadas pelo método das características nos pares de equações diferenciais ordinárias:

$$\pm \frac{dH}{g \cdot A} + \frac{a \cdot dQ}{g \cdot A} + \frac{f |Q| Q}{2g \cdot D \cdot A^2} dx = 0 \quad (41)$$

$$dx = \pm a \cdot dt \quad (42)$$

As primeiras equações são válidas ao longo das retas características (42).

Assumindo a aproximação abaixo para o termo de atrito da equação (41) na integração temos:

$$\int_{x_a}^{x_p} \frac{f |Q| Q}{2g \cdot D \cdot A^2} dx \cong R |QA| \cdot Q_p \quad (43)$$

$$\text{com } R = \frac{f \Delta x}{2g \cdot D \cdot A^2} \quad \text{e} \quad B = \frac{a}{g \cdot A} \quad (44)$$

Sendo A e P pertencentes à reta $dx = +a \cdot dt$.

Procedendo analogamente, entre os pontos B e P pertencentes à reta $dx = -a \cdot dt$, obtemos as duas equações:

$$H_p = (H_A + B \cdot Q_A) - (B + R |QA|) \cdot Q_p \text{ para a reta AP} \quad (45)$$

$$H_p = (H_B - B \cdot Q_B) + (B + R |QB|) \cdot Q_p \text{ para a reta AB} \quad (46)$$

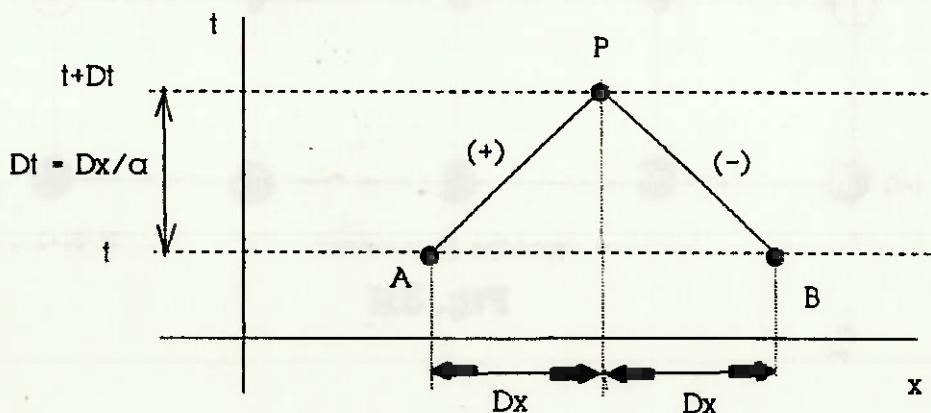


Fig. 3.10 - Retas Características

No processo usual de cálculo , admitem-se conhecidos as condições hidráulicas num dado instante ($t=0$), que são assim chamadas de condições iniciais nas posições relacionadas . A partir destas determina-se as condições hidráulicas nas mesmas posições mas instantes seguintes. Contudo é necessário que tenhamos nos extremos 1 e U as equações adicionais que representam as condições de contorno. Estas condições são caracterizadas pelas fronteiras do tubo , que pode ser um outro tubo ou enos que possuem equacionamento específico.

As seções de 1 a U são numeradas , sendo a última seção da tubulação de comprimento L ,a de número U+1.

Nos pontos interiores (2 a N), as cargas e vazões são determinadas a partir de (45) e (46) de forma explícita pois , obtemos:

$$Q_p = \frac{H_A - H_B + B.(Q_A + Q_B)}{2.B + R.(|Q_A| + |Q_B|)} \quad (47)$$

E o valor de Q_p , determinado através de (47) , permite o cálculo de H_p através de (45) ou (46) para todos os pontos interiores da malha de cálculo. O processo de cálculo somente poderá ser continuado se forem conhecidos as características dos extremos 1 e U condições de contorno - , pois em cada um destes extremos somente se dispõe de uma equação (47) para o extremo (U) e (48) para o extremo (1).

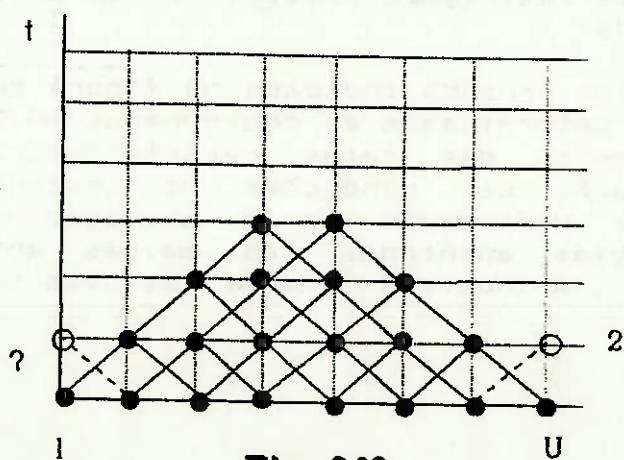


Fig. 3.12

Dois Transientes Independentes

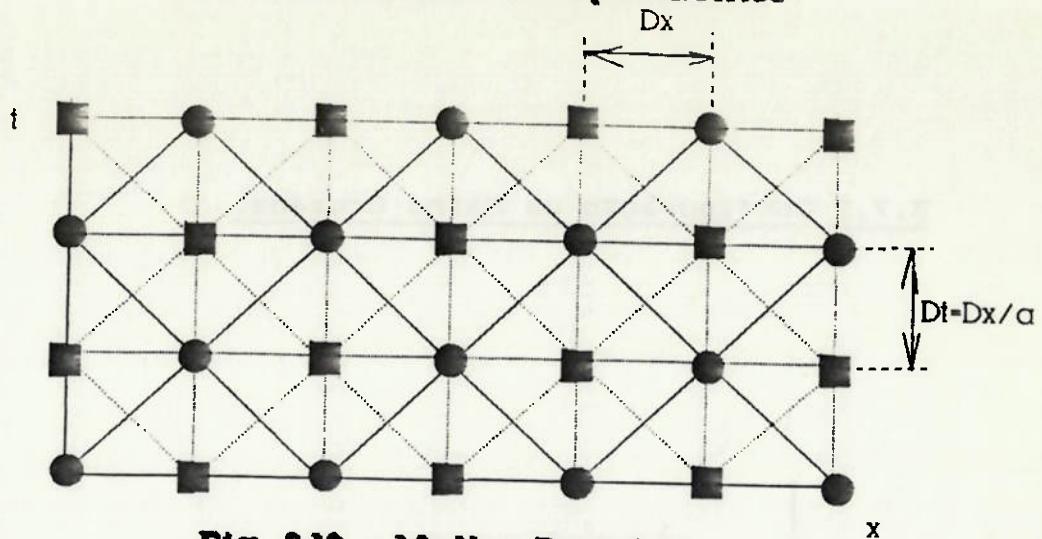


Fig. 3.13 - Malha Regular

N para Cond. de Contorno a cada $2.Dt$

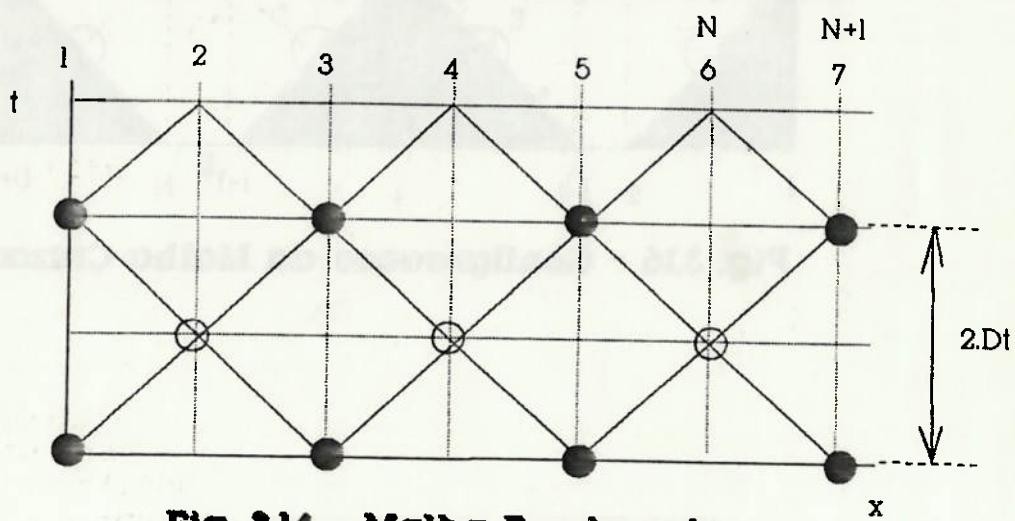


Fig. 3.14 - Malha Escalonada

N qualquer Cond. de contorno a cada Dt

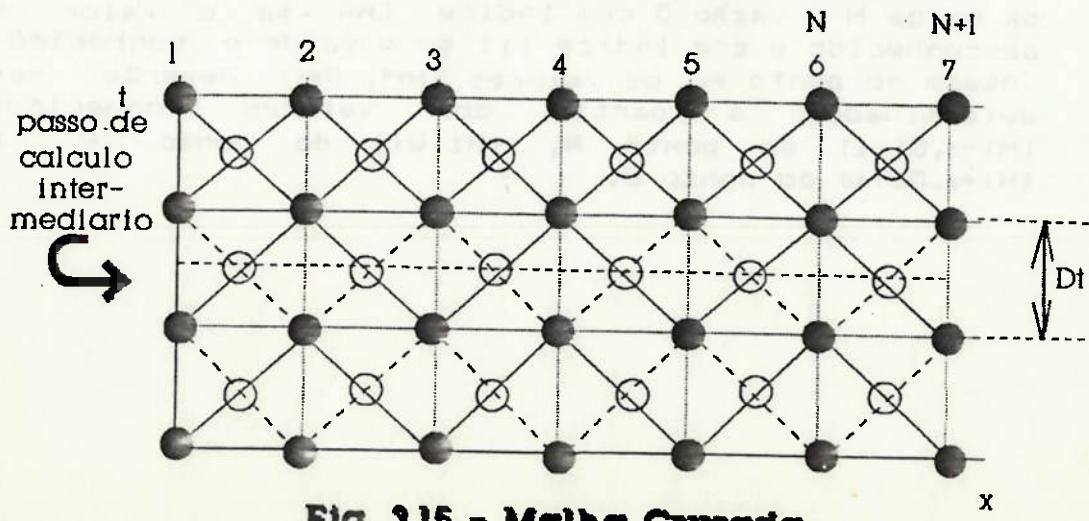


Fig. 3.15 - Malha Cruzada

3.7.3 Equacionamento à Esquerda do Ponto P:

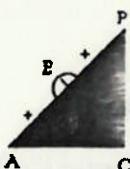


Fig. 3.17 - BQ à esquerda de P

$$(+ \quad) H_E = (H_A + BQ_A) - (B + \frac{R|Q_A|}{2})Q_E \quad (\overline{AE}) \quad (1)$$

$$(- \quad) H_E = (H_C - BQ_C) + (B + \frac{R|Q_C|}{2})Q_E \quad (\overline{CE}) \quad (2)$$

$$(+ \quad) H_P = (H_E + BQ_E) - (B + \frac{R|Q_E|}{2})Q_P \quad (\overline{EP}) \quad (3)$$

substituindo $H_E + BQ_E$ obtido em (1) na equação (3) vem:

$$H_P = H_A + BQ_A - \frac{R|Q_A|}{2} Q_E - (B + \frac{R|Q_E|}{2}) Q_P \quad (4)$$

mas de (1) = (2), resulta :

$$Q_E = \frac{(H_A - H_C) + B(Q_A + Q_C)}{2B + \frac{R(|Q_A| + |Q_C|)}{2}} \quad (5)$$

fazendo :

$$C_E = H_A + BQ_A - \frac{R|Q_A|Q_E}{2} \quad (6)$$

$$B_E = B + \frac{R|Q_E|}{2} \quad (7)$$

temos que a equação (4) é escrita

$$\underline{H_P = C_E - B_E Q_P} \quad (8)$$

De (8) e (16), temos:

$$H_p = C_E - B_E Q_p = C_D + B_D Q_p \text{ e, portanto:}$$

$$\boxed{Q_p = \frac{C_E - C_D}{B_D + B_E}} \quad (17)$$

Tal expressão permite o cálculo de Q_p (p/ os pontos interiores $2 \leq i \leq N$).

Obtido o valor de Q_p , obtém-se o valor de H_p de (8) ou (16) e , as coordenadas (Q_p , H_p) dos pontos interiores estão determinados.

3.7.5 Usando Notação Indexada:

$$Q_E = \frac{(H_{i-1} - H_i) + B(Q_{i-1} + Q_i)}{2B + R(|Q_{i-1}| + |Q_i|)}$$

$$Q_D = \frac{(H_i - H_{i+1}) + B(Q_i + Q_{i+1})}{2B + R(|Q_{i+1}| + |Q_i|)}$$

$$C_E = H_{i-1} + BQ_{i-1} - \frac{R|Q_{i-1}|}{2} Q_E$$

$$B_E = B + \frac{R|Q_E|}{2}$$

$$C_D = H_{i+1} - BQ_{i+1} + \frac{R|Q_{i+1}|}{2} Q_D$$

$$B_D = B + \frac{R|Q_D|}{2}$$

$$Q_{pi} = (C_E - C_D)/(B_D + B_E)$$

$$H_{pi} = C_D + B_D Q_{pi} \quad \text{ou}$$

$$H_{pi} = C_E - B_E Q_{pi}$$

3.7.7 Verificação da Zona de Silêncio:

$$Q_A = Q_B = Q_C = 0$$

$$H_A - H_C = \frac{f \cdot \Delta x}{D} \frac{Q^2}{2gA^2} = R \cdot Q^2$$

$$H_C - H_B = RQ^2$$

de (5)

$$Q_E = \frac{RQ^2 + B(2Q)}{2B + R(2Q)} = \frac{(RQ + 2B)Q}{(RQ + 2B)} \text{ portanto:}$$

$Q_E = Q$, substituindo em (6) e (7) vem:

$$C_E = H_A + BQ - \frac{R \cdot Q^2}{2}$$

$$B_E = B + \frac{R|Q|}{2}$$

$$\text{analogamente: } Q_D = Q \text{ e } C_D = H_B - BQ + \frac{R \cdot Q^2}{2}$$

$$B_D = B + \frac{R|Q|}{2}$$

com o emprego de (17)

$$Q_P = \frac{C_E - C_D}{B_E + B_D} = \frac{(H_A - H_B) + 2BQ - RQ^2}{2B + R|Q|} = \frac{RQ^2 + 2BQ}{2B + R|Q|} = Q$$

e a Carga no ponto P, pode ser obtido:

$$H_P = C_D + B_D Q_P = H_B - BQ + \frac{RQ^2}{2} + (B + \frac{R|Q|}{2})Q = H_B + \frac{RQ^2}{2}$$

ou,

$$H_P = C_E - B_E Q_P = H_A + BQ - \frac{RQ^2}{2} - (B + \frac{R|Q|}{2})Q = H_A - \frac{RQ^2}{2}$$

d.) caso particular $N = 2 \quad U = 2$

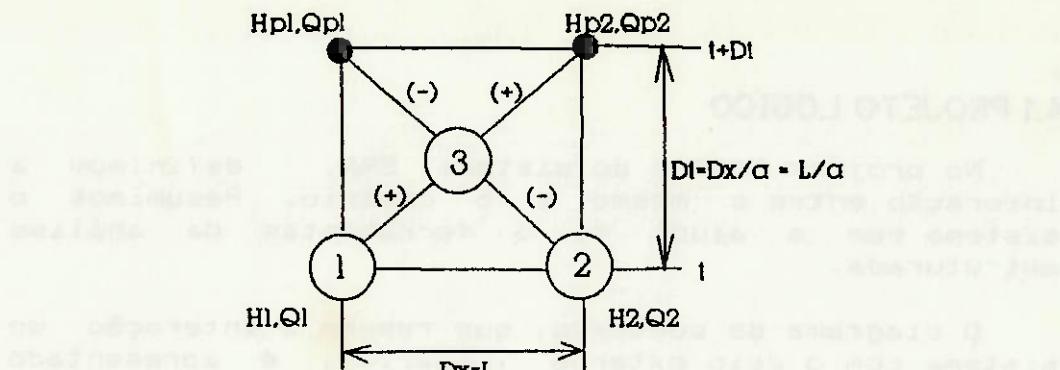


Fig. 3.19 - Caso Particular

$$R = \frac{f \cdot L}{2gDA^2}$$

$$B = \frac{a}{g \cdot A} = \frac{L/\Delta t}{g \cdot A}$$

$$\text{neste caso } Q_D = Q_E = Q_s = \frac{(H_1 - H_2)}{\frac{2B}{\bar{Z}} + \frac{R(|Q_1| + |Q_2|)}{2}} + B \cdot (Q_1 + Q_2)$$

$$Q_D = H_2 - BQ_2 + \frac{R|Q_2|Q_s}{2}$$

$$Q_E = H_1 + BQ_1 - \frac{R|Q_1|Q_s}{2}$$

$$B_D = B_E = B + \frac{R|Q_s|}{2} = B_R \text{ resultando}$$

$H_{P1} = Q_D + B_R Q_{P1}$
$H_{P2} = Q_E - B_R Q_{P2}$

Estas equações são compatíveis com a solução proposta para o modelo rígido.

O D.F.D. (diagrama de fluxo de dados) , a segunda ferramenta utilizada, é mostrada em sua primeira explosão.

Nesse nível (0), vê-se os principais processos , que simbolizam os módulos básicos. Nota-se também, o aparecimento de depósitos de dados e os respectivos fluxos de dados que acessam esses depósitos.

Esse diagrama coincide e resume todo o funcionamento do sistema. As explosões subsequentes, apresentadas nesse trabalho até o 1. nível, estão esclarecidas no apêndice A.

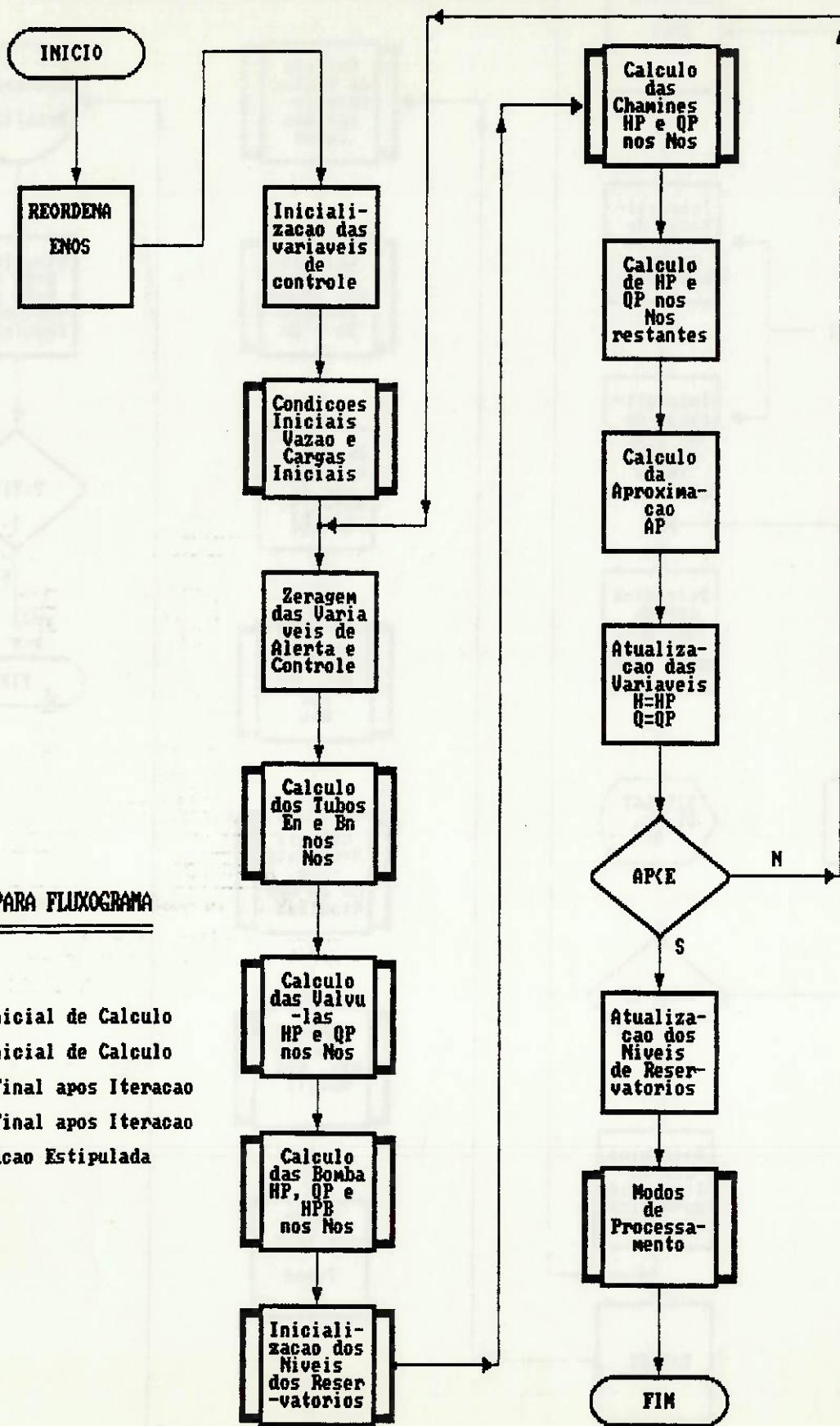
Apresentamos ainda , como elucidação à compreensão do modelo desenvolvido, os fluxogramas do regime permanente e do regime transitório/oscilatório.

O núcleo do módulo de regime permanente , com seus critérios de convergência e acesso a subrotinas está esclarecido no fluxograma basico do regime permanente. Perceba que as subrotinas de cálculo estão simbolizadas com dois retângulos. A existência de rotinas de reordenação dos ENDS diminui o tempo de processamento para o estabelecimento da convergência , pois evitam instruções do tipo "if".

O fluxograma basico do regime transitorio não busca uma convergência de resultado, mas apenas as variáveis de estado a cada tempo de cálculo. Existem aqui também subrotinas de cálculo , que apresentamos com dois retângulos. Note que , no começo do processamento, o programa sugere um At de cálculo, que pode ser alterado pelo usuário.

São armazenados resultados das variáveis de estado nos nós e nos pontos interiores em disco, a cada iteração. Isso tornou-se necessário pela ausência de memória suficiente para toda uma simulação.

FLUXOGRAMA BASICO DO REGIME PERMANENTE



4.2 PROJETO FISICO

Os módulos principais do Sistema:

- PERCOO: Módulo de acesso aos demais módulos do sistema SRA.
- PERC11: Gerenciador de dados de entrada e condições iniciais. Função de Pré-processador de Dados.
- PERC22: Processador Regime Permanente - Equilíbrio Hidráulico .Com pós - processador de dados embutido.
- PERC33: Processador Regime Transitório - Simulação Dinâmica.
- PERCK33: Respostas da Simulação Dinâmica. Pós - processador de dados.
- PERC44: Processador Regime Oscilatório - Simulação Vibratória.
- PERCK44: Respostas da Simulação Oscilatória a maneira do K33.

A figura 4.1 representa a topologia dos módulos pertencentes ao sistema e o acesso dos mesmos às bases de dados . A diferença desse gráfico em relação aos diagramas do projeto lógico reside na concepção física que os módulos dão aos processos. Nota-se que o módulo PERCOO tem função de ligação e ponte de acesso ao módulos independentes. Esse tipo de solução foi adotado para que o sistema SRA tivesse, o que pode se chamar de, um sistema operacional dedicado, rodando abaixo do DOS e acima dos módulos específicos de análise hidráulica. Assim o controle do sistema SRA é sempre devolvido ao módulo PERCOO. Esse módulo PERCOO serve ainda como a única entrada do sistema , possuindo rotinas de segurança.

Detalhes do projeto físico estão esclarecidos no apêndice A.

5.1 INSTALAÇÕES TESTADAS

5.1.1 Dados dos Enos:

Visando elucidar a aplicação do programa desenvolvido e apresentado neste trabalho, iremos mostrar simulações numéricas, que objetivam obter a condição de regime permanente em redes hidráulicas.

A validação dos resultados é alcançada se simularmos as topologias apresentadas no trabalho de Pereira [6]. Desta forma, para cada configuração topológica, processamos os cálculos, e os resultados são formalmente apresentados pelas próprias saídas do programa.

Nos primeiros exemplos não foram considerados simulações com períodos extensivos e, portanto, as variáveis de estado, vazão nos tubos e cargas nos nós, referem-se a uma dada configuração da rede (topologias da dissertação de mestrado de Pereira A,B,C,D,E).

Nos exemplos subsequentes, modificamos a topologia final E, acrescentando a ela novos ENOS (topologias F,G,H,I,J). Com isso pode-se verificar as potencialidades do uso do simulador desenvolvido para permitir análises de operação da rede, com possibilidades latentes de implantação imediata para controle de rede hidráulica em tempo real.

REDES HIDRAULICAS PARA TESTE
PARA EQUILIBRIO HIDRAULICO
REGIME PERMANENTE

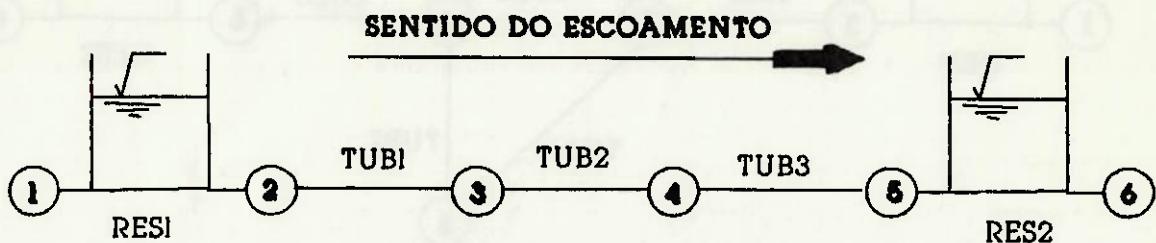


Fig. 5.1 Topologia Teste A

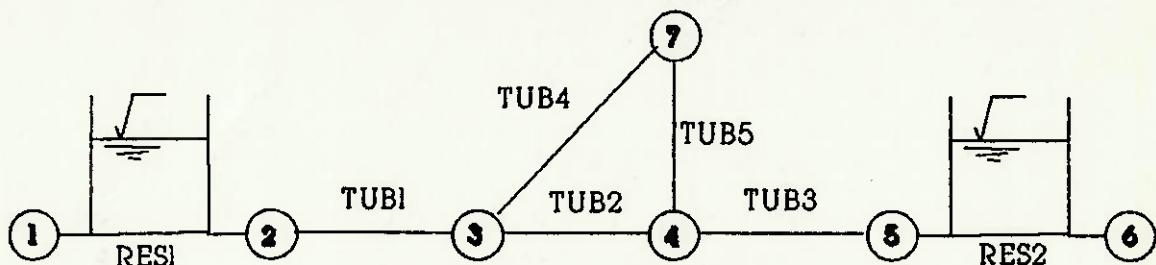


Fig. 5.2 Topologia Teste B

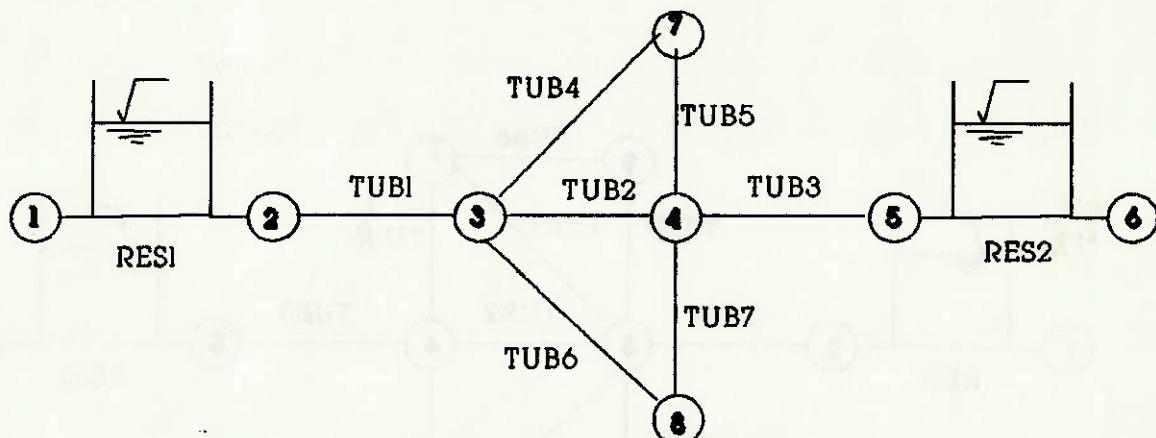


Fig. 5.3 Topologia Teste C

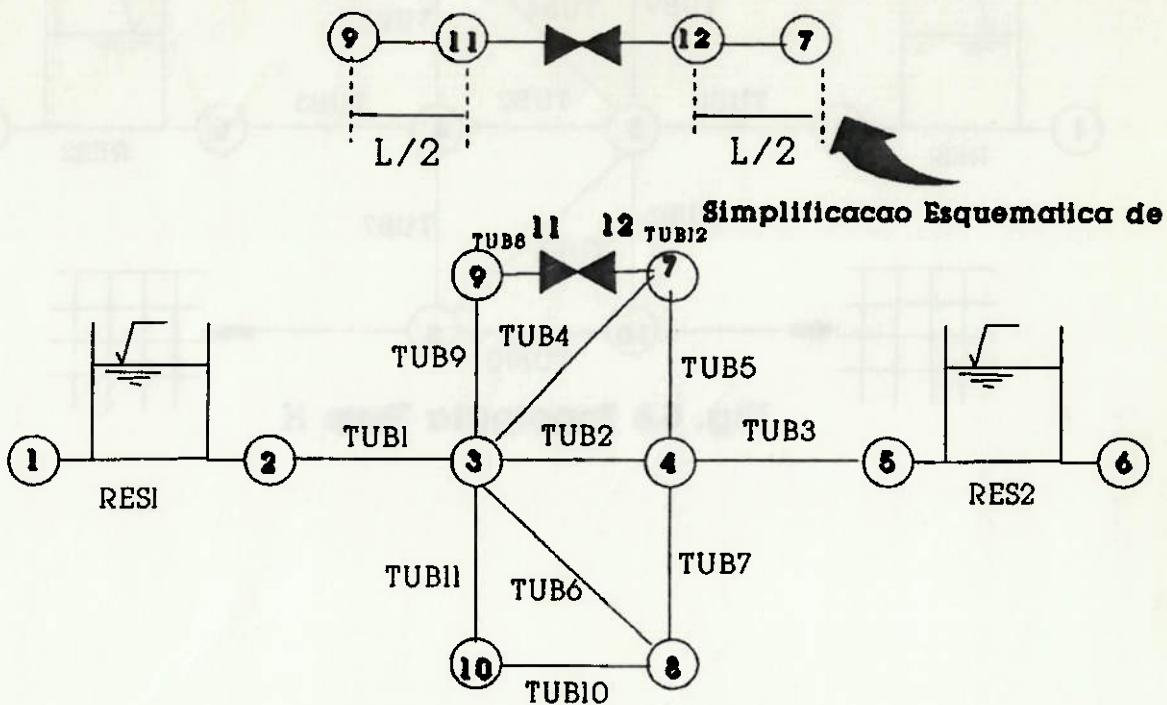


Fig. 5.6 Topologia Teste F

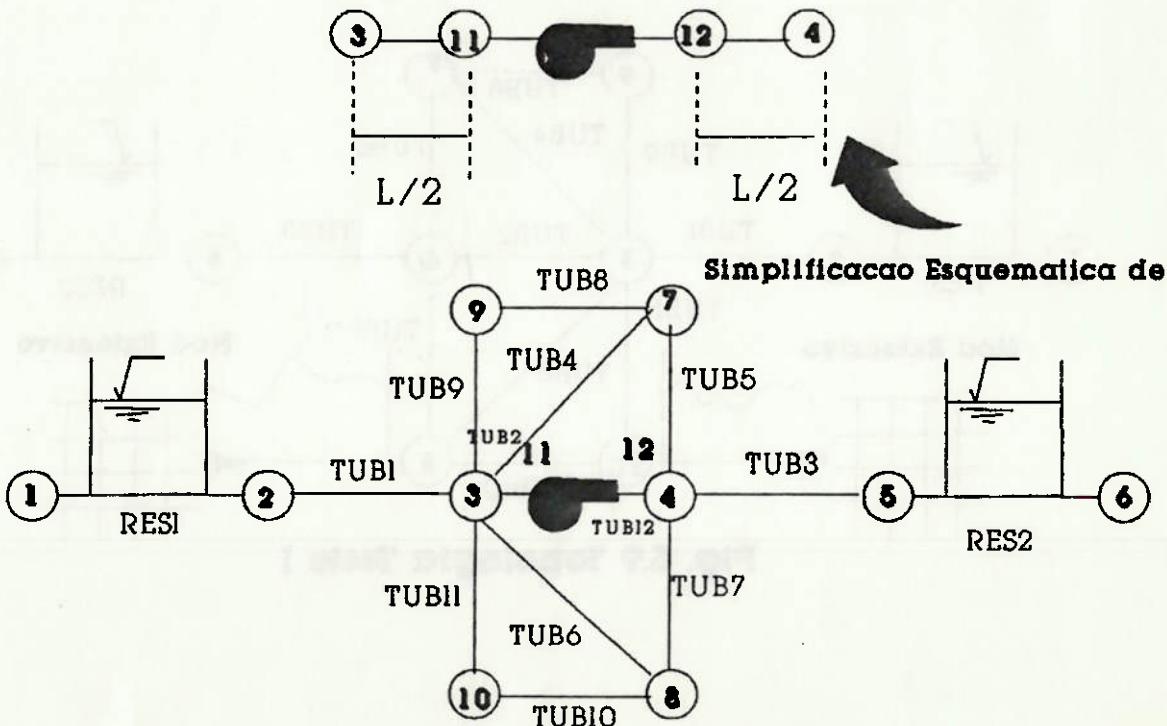


Fig. 5.7 Topologia Teste G

Simplificacoes Esquematicas Conforme Ex anteriores

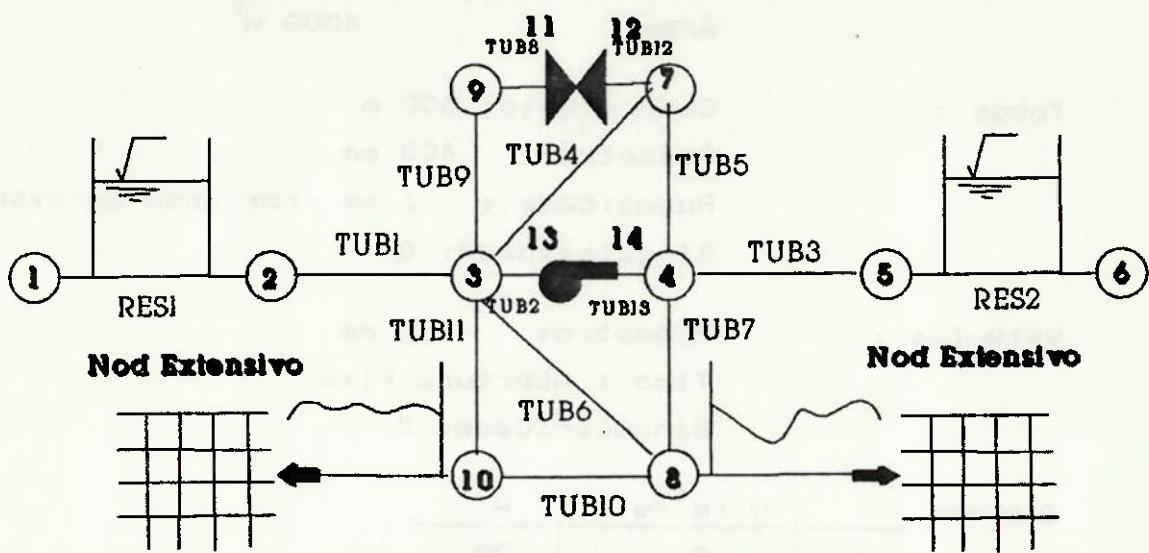
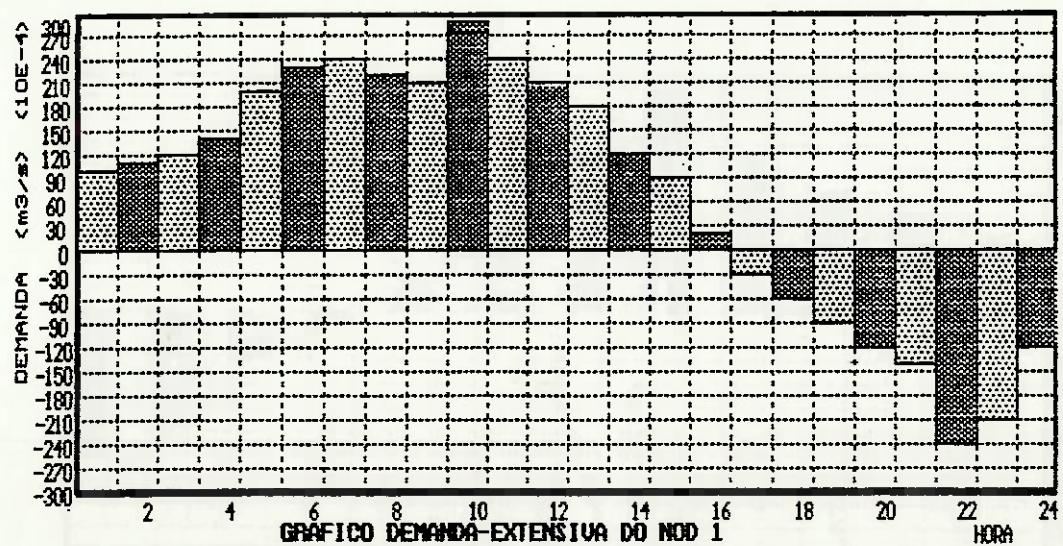


Fig. 5.10. Topologia Teste J

Nods Extensivos : Tabelas:

SIMULACAO EM REDES DE AGUA		
NOD COM TEMPO EXTENSIVO		
[NOD nº 1]	[N. DO NOD= 10]	[Demanda em (m³/s)]
Tempo (hora/dia).= HORA		N. de pontos diagrama = 24
D.1= 0.0100	D.9= 0.0210	D.17=-0.0030
D.2= 0.0110	D.10=0.0290	D.18=-0.0060
D.3= 0.0120	D.11=0.0240	D.19=-0.0090
D.4= 0.0140	D.12=0.0210	D.20=-0.0120
D.5= 0.0200	D.13=0.0180	D.21=-0.0140
D.6= 0.0230	D.14=0.0120	D.22=-0.0240
D.7= 0.0240	D.15=0.0090	D.23=-0.0210
D.8= 0.0220	D.16=0.0020	D.24=-0.0120

<CR>



5.1.2 Resultados das Instalações Testadas:

Apresentamos os resultados das instalações, as soluções numéricas para as mesmas e gráficos gerados pelo SRA para instalações que possuem Nods extensivos.

a.1) TOPOLOGIA A - RESULTADOS:

SULTADOS GERAIS DA REDE : PERIODO 1

[N. do Eno]	[Eno]	[Vazao] (L/S)	[No-M]	[Carga-M] (M)	[No-J]	[Carga-J] (M)
1	RES1		1	80.00	2	80.00
2	TUB1	180.93	2	80.00	3	76.67
3	TUB2	180.93	3	76.67	4	73.33
4	TUB3	180.93	4	73.33	5	70.00
5	RES2		5	70.00	6	70.00

SULTADOS NOS TUBOS DA REDE : PERIODO 1

Eno	[Eno]	[Vazao]	[No-M]	[Carga-M]	[No-J]	[Carga-J]	[Perda de carga]	[Velocidade]	[Diamt.]	[Compr.]	[Rug.]	[KS]
		(L/S)		(M)		(M)	(M/KM)	(M/S)	(MM)	(M)	(MM-DW)	
TUB1	180.93	2	80.00	3	76.67	6.667	1.44	400.00	500.00	1.00	0.00	
TUB2	180.93	3	76.67	4	73.33	6.667	1.44	400.00	500.00	1.00	0.00	
TUB3	180.93	4	73.33	5	70.00	6.667	1.44	400.00	500.00	1.00	0.00	

b.2) TOPOLOGIA B - DADOS COMPLEMENTARES:

Para a computação necessitamos de 17 iterações, com precisão de 8 casas decimais. O tempo total de processamento em um PC-XT/12 MHZ foi de 4s.

c.1) TOPOLOGIA C - RESULTADOS:

ESULTADOS GERAIS DA REDE : PERIODO 1

[N. do Eno]	[Eno]	[Vazao] (L/S)	[No-M]	[Carga-M] (M)	[No-J]	[Carga-J] (M)
1	RES1		1	80.00	2	80.00
2	TUB1	212.70	2	80.00	3	75.40
3	TUB2	88.35	3	75.40	4	74.60
4	TUB3	212.70	4	74.60	5	70.00
5	RES2		5	70.00	6	70.00
6	TUB4	62.17	3	75.40	7	75.00
7	TUB5	62.17	7	75.00	4	74.60
8	TUB6	62.17	3	75.40	8	75.00
9	TUB7	62.17	8	75.00	4	74.60

ESULTADOS NOS TUBOS DA REDE : PERIODO 1

[E Enó]	[Eno]	[Vazao] (L/S)	[No-M]	[Carga-M] (M)	[No-J]	[Carga-J] (M)	[Perda de carga] (M/KM)	[Velocidade] (M/S)	[Diamt.] (MM)	[Compr.] (M)	[Rug.] (HW-DW)	[KS]
2	TUB1	212.70	2	80.00	3	75.40	9.195	1.69	400.00	500.00	1.00	0.00
3	TUB2	88.35	3	75.40	4	74.60	1.610	0.70	400.00	500.00	1.00	0.00
4	TUB3	212.70	4	74.60	5	70.00	9.195	1.69	400.00	500.00	1.00	0.00
6	TUB4	62.17	3	75.40	7	75.00	0.805	0.49	400.00	500.00	1.00	0.00
7	TUB5	62.17	7	75.00	4	74.60	0.805	0.49	400.00	500.00	1.00	0.00
8	TUB6	62.17	3	75.40	8	75.00	0.805	0.49	400.00	500.00	1.00	0.00
9	TUB7	62.17	8	75.00	4	74.60	0.805	0.49	400.00	500.00	1.00	0.00

ESULTADOS NOS TUBOS DA REDE : PERIODO 1

[Eno]	[Eno]	[Vazao]	[No-M]	[Carga-M]	[No-J]	[Carga-J]	[Perda de carga]	[Velocidade]	[Diamat.]	[Compr.]	[Rug.]	[KS]
		(L/S)		(M)		(M)	(M/KM)	(M/S)	(MM)	(M)	(HW-DW)	
2	TUB1	213.70	2	80.00	3	75.36	9.281	1.70	400.00	500.00	1.00	0.00
3	TUB2	83.42	3	75.36	4	74.64	1.438	0.66	400.00	500.00	1.00	0.00
4	TUB3	213.70	4	74.64	5	70.00	9.281	1.70	400.00	500.00	1.00	0.00
6	TUB4	42.09	3	75.36	7	75.17	0.374	0.33	400.00	500.00	1.00	0.00
7	TUB5	71.59	7	75.17	4	74.64	1.063	0.57	400.00	500.00	1.00	0.00
8	TUB6	58.69	3	75.36	8	75.00	0.719	0.47	400.00	500.00	1.00	0.00
9	TUB7	58.69	8	75.00	4	74.64	0.719	0.47	400.00	500.00	1.00	0.00
0	TUB9	29.50	3	75.36	9	75.27	0.187	0.23	400.00	500.00	1.00	0.00
1	TUB8	29.50	9	75.27	7	75.17	0.187	0.23	400.00	500.00	1.00	0.00

d.2) TOPOLOGIA D - DADOS COMPLEMENTARES:

Para a computação necessitamos de 133 iterações, com precisão de 8 casas decimais. O tempo total de processamento em um PC-XT/12 MHZ foi de 51s. Obtivemos um aumento grande no tempo necessário para convergência de solução em virtude da adição de um entroncamento a mais. Os tempos computados são estabelecidos com um processamento sem utilização de arquivos de condições iniciais que aceleram a convergência.

Assim sendo esses tempo refletem a pior condição de operação.

e.2) TOPOLOGIA E - DADOS COMPLEMENTARES:

Para a computação necessitamos de 180 iterações, com precisão de 8 casas decimais. O tempo total de processamento em um PC-XT/12 MHZ foi de 1min 24s.

A adição de elementos tende a aumentar o cálculo pois mais subrotinas são acessadas durante o cálculo.

Das instalações A,B,C,D em comparação com a E, percebe-se que a inclusão de mais tubos em paralelo com o tubo 2, causou um aumento de vazão nos tubos 3 e 1 , respectivamente os que se ligam aos reservatórios 2 e 1.

A configuração da rede inicial na topologia B , com a inclusão do primeiro entrocamento (nó 7) , causou um aumento da vazão no reservatório 2 de cerca de 25 l/s.

A configuração da rede na topologia C , com a inclusão do entrocamento (nó 8) adicionado a B, causou um aumento de vazão em relação a instalação anterior (B) no reservatório 2 de cerca de 8 l\s .

As topologias seguintes aumentaram a vazão em 1 l/s apenas.

Isso nos dá uma idéia da vantagem de utilizarmos o método descrito na procura de uma instalação ideal. Se o objetivo, em projeto, fosse provocar dentro de certos parâmetros uma vazão alta na transferência de fluido do reservatório 1 para 2 (considerando-se os dados iniciais), verificariamos que provavelmente, dentre as 5 instalação testadas a mais favorável fosse a B.

As topologias testadas mostraram que o fluido escoa do reservatório 1 em direção ao 2. Note que o sinal negativo , caso ocorra, em uma indicação de vazão, significa que o fluido escoa do nó de jusante para o de montante. (Sentido contrário).

f.2) TOPOLOGIA F - DADOS COMPLEMENTARES:

Para a computação necessitamos de 232 iterações, com precisão de 8 casas decimais. O tempo total de processamento em um PC-XT/12 MHZ foi de 2min 3s. A válvula colocada na instalação está em posição de grande abertura pois estabelece uma perda de carga singular pequena.

g.1) TOPOLOGIA G - RESULTADOS:

SIMULAÇÃO EM REDES DE ÁGUA			
ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO DA REDE		CURVA CARACTERÍSTICA	
N. do Eno.....	= 14	Vazao (0)	(l/s)= 0.00
Eno.....	= EBA1	Vazao (QR)	(l/s)= 100.00
No de montante.....	= 11	Vazao (QT)	(l/s)= 150.00
Carga-Montante (MSNM) ..	= 72.95	Altura (HS)	(M) ..= 25.00
No de jusante.....	= 12	Altura (HR)	(M) ..= 18.00
Carga-Jusante (MSNM) ..	= 77.05	Altura (HT)	(M) ..= 12.00
Vazao das Bombas (l/s) ..	= 201.00	Vazao mínima op. (l/s) ..= 80.00	
Altura das Bombas (M) ..	= 4.14	D. Recalque (MM) ..= 500.00	
N. de bombas.....	= 1.00	KS de cada bomba.....	= 1.00

(CR)

g.2) TOPOLOGIA G - DADOS COMPLEMENTARES:

Para a computação necessitamos de 253 iterações, com precisão de 8 casas decimais. O tempo total de processamento em um PC-XT/12 MHZ foi de 2min 13s. Para esta instalação colocamos uma bomba que opera com uma vazão de 111.9 l/s aumentando evidentemente a vazão que atravessa os tubos 2 e 12 (inserido a jusante da bomba). Ambos possuem 250m de comprimento e uma vazão correspondente a da bomba. Note porém que o transporte de fluido de um reservatório a outro, que no equilíbrio da topologia E era de 214.55 l/s, aumentou com a adição dessa bomba nesse ponto em apenas 3 l/s. Isso ocorre pois usamos uma bomba com uma altura de elevação pequena (0.9mCA).

h.1) TOPOLOGIA H - RESULTADOS:

ESULTADOS GERAIS DA REDE : PERIODO 1

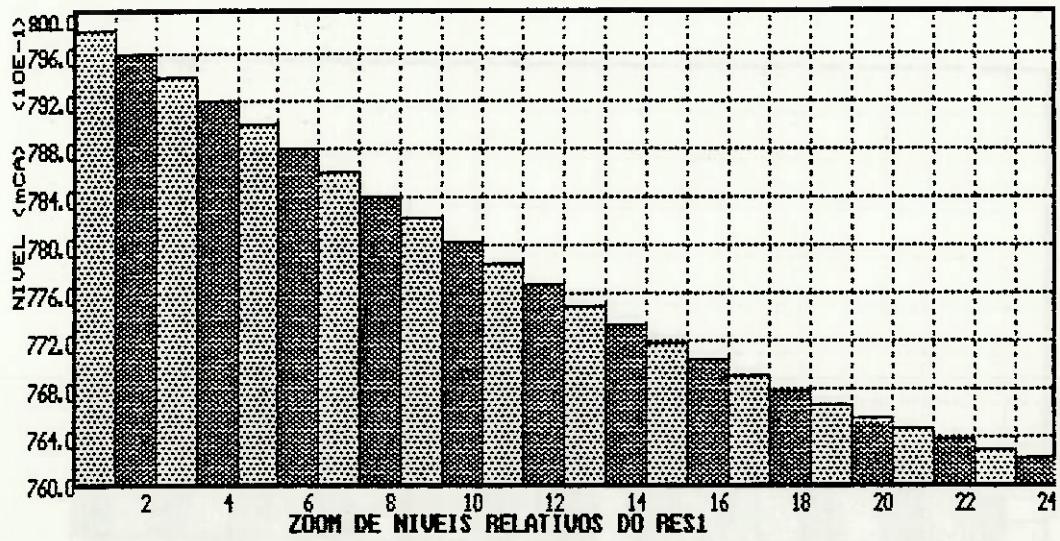
[N. do Eno]	[Eno]	[Vazao] (L/S)	[No-M]	[Carga-M] (M)	[No-J]	[Carga-J] (M)
1	RES1		1	80.00	2	80.00
2	TUB1	227.13	2	80.00	3	74.76
3	TUB2	76.59	3	74.76	4	74.15
4	TUB3	202.13	4	74.15	5	70.00
5	RES2		5	70.00	6	70.00
6	TUB4	38.64	3	74.76	7	74.60
7	TUB5	65.70	7	74.60	4	74.15
8	TUB6	47.14	3	74.76	8	74.53
9	TUB7	59.84	8	74.53	4	74.15
10	TUB9	27.06	3	74.76	9	74.68
11	TUB8	27.06	9	74.68	7	74.60
12	TUB11	37.70	3	74.76	10	74.61
13	TUB10	27.70	10	74.61	8	74.53

i.1) TOPOLOGIA I - RESULTADOS : (tempo extensivo)

Reservatório n. 1 RES1

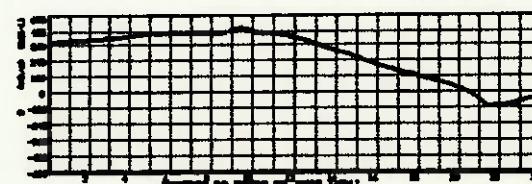
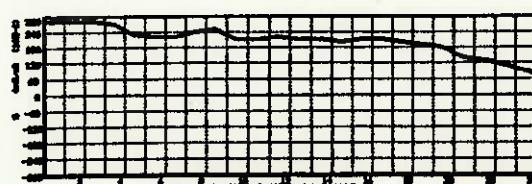
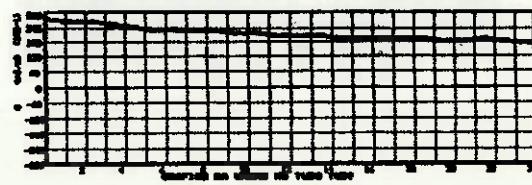
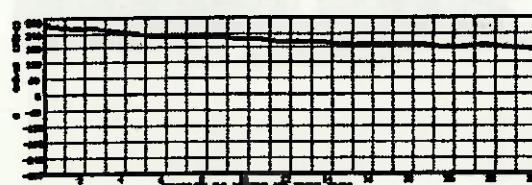
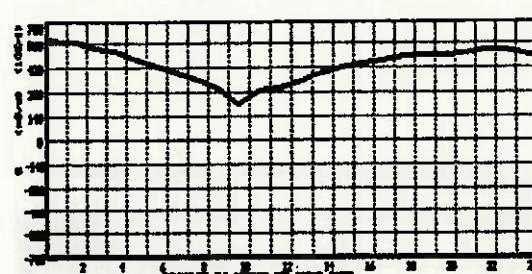
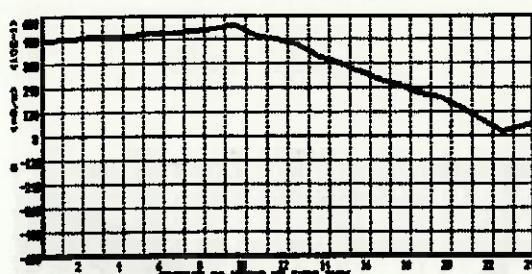
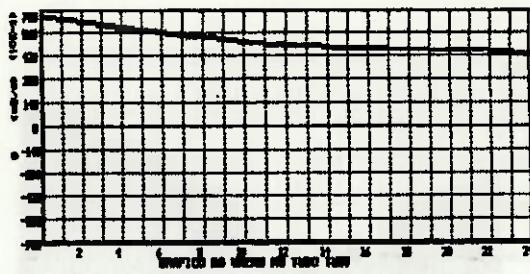
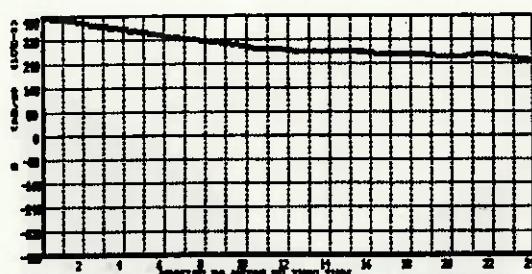
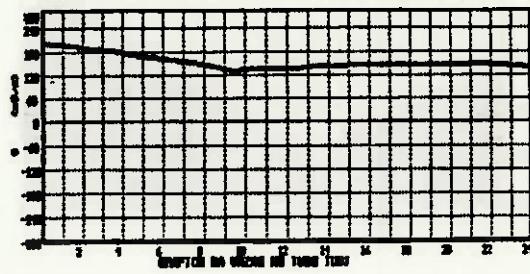
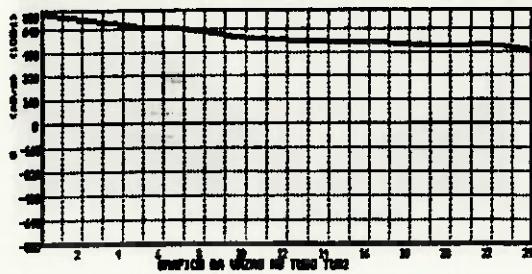
SIMULAÇÃO EM REDES DE ÁGUA		
VERIFICAÇÃO DO NÍVEL DOS RESERVATÓRIOS SOB CONTROLE		
RESULTADOS NUMÉRICOS DOS NÍVEIS OBTIDOS		
N.1= 79.80	N.9= 78.22	N.17=76.91
N.2= 79.59	N.10=78.02	N.18=76.78
N.3= 79.39	N.11=77.84	N.19=76.67
N.4= 79.19	N.12=77.66	N.20=76.56
N.5= 78.99	N.13=77.49	N.21=76.46
N.6= 78.80	N.14=77.33	N.22=76.37
N.7= 78.60	N.15=77.18	N.23=76.29
N.8= 78.41	N.16=77.04	N.24=76.21

<CR>



i.1) TOPOLOGIA I - RESULTADOS : (continuação)

Vazões nos Tubos



i.2) TOPOLOGIA I - RESULTADOS APOS 24 HORAS:

ESULTADOS GERAIS DA REDE : PERIODO 24

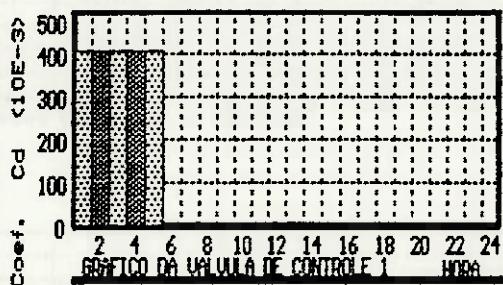
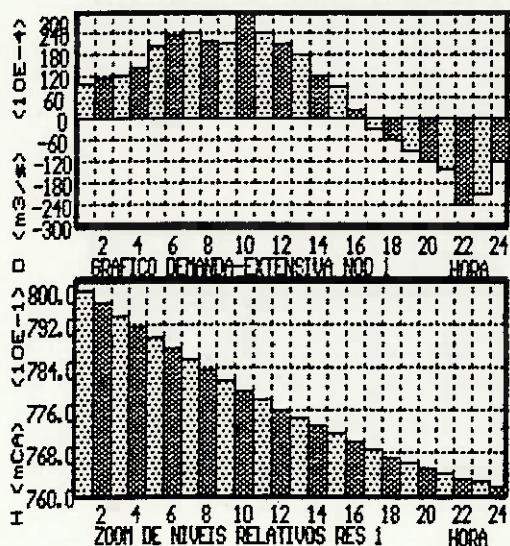
[N. do Eno]	[Eno]	[Vazao] (L/S)	[No-M]	[Carga-M] (M)	[No-J]	[Carga-J] (M)
1	RES1		1	76.29	2	76.29
2	TUB1	91.64	2	76.29	3	75.43
3	TUB2	48.70	3	75.43	4	75.18
4	TUB3	138.64	4	75.18	5	73.22
5	RES2		5	73.22	6	73.22
6	TUB4	24.54	3	75.43	7	75.36
7	TUB5	41.67	7	75.36	4	75.18
8	TUB6	5.76	3	75.43	8	75.43
9	TUB7	48.27	8	75.43	4	75.18
10	TUB9	17.13	3	75.43	9	75.40
11	TUB8	17.13	9	75.40	7	75.36
12	TUB11	-4.49	3	75.43	10	75.43
13	TUB10	7.51	10	75.43	8	75.43

ESULTADOS OBTIDOS NA DEMANDA 24

[Eno]	[Eno]	[Vazao] (L/S)	[No-M] (M)	[Carga-M] (M)	[No-J] (M)	[Carga-J] (M)	[Perda de carga] (M/KM)	[Velocidade] (M/S)	[Diamt.] (MM)	[Compr.] (M)	[Rug.] (HW-DW)	[KS]
2	TUB1	91.64	2	76.29	3	75.43	1.731	0.73	400.00	500.00	1.00	0.00
3	TUB2	48.70	3	75.43	4	75.18	0.498	0.39	400.00	500.00	1.00	0.00
4	TUB3	138.64	4	75.18	5	73.22	3.930	1.10	400.00	500.00	1.00	0.00
6	TUB4	24.54	3	75.43	7	75.36	0.131	0.20	400.00	500.00	1.00	0.00
7	TUB5	41.67	7	75.36	4	75.18	0.367	0.33	400.00	500.00	1.00	0.00
8	TUB6	5.76	3	75.43	8	75.43	0.008	0.05	400.00	500.00	1.00	0.00
9	TUB7	48.27	8	75.43	4	75.18	0.490	0.38	400.00	500.00	1.00	0.00
0	TUB9	17.13	3	75.43	9	75.40	0.056	0.14	400.00	500.00	1.00	0.00
1	TUB8	17.13	9	75.40	7	75.36	0.056	0.14	400.00	500.00	1.00	0.00
2	TUB11	-4.49	3	75.43	10	75.43	0.005	0.04	400.00	500.00	1.00	0.00
3	TUB10	7.51	10	75.43	8	75.43	0.014	0.06	400.00	500.00	1.00	0.00

j.1) TOPOLOGIA J - RESULTADOS:

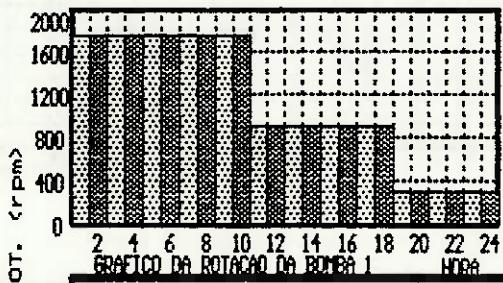
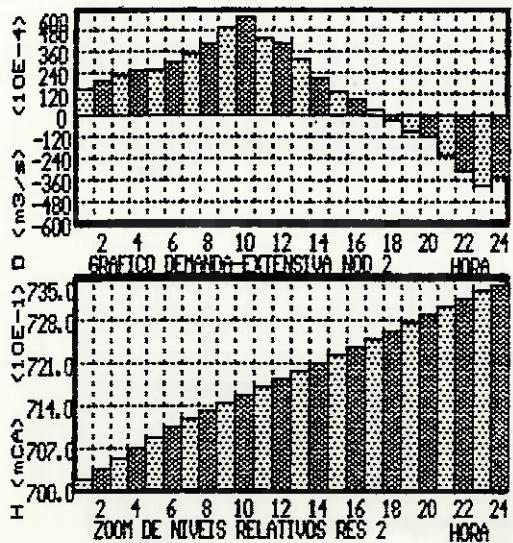
Comparação Gráfica entre Reservatórios, Demandas e Manobras.



QUADRO GRAFICO COMPARATIVO

Verifique Níveis Comparativos
 Z op. = 80
 Z max = 83
 Z min = 75

(CR)



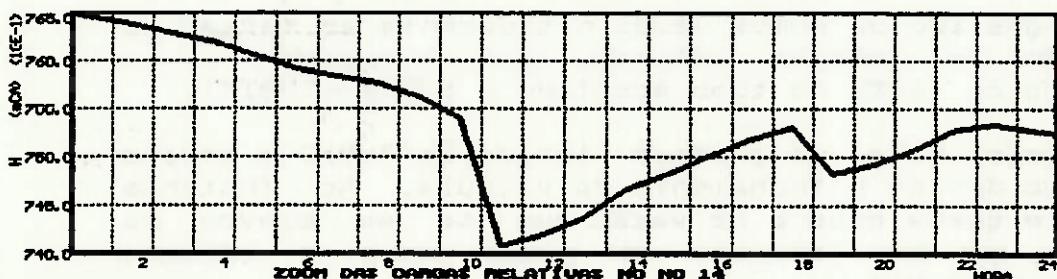
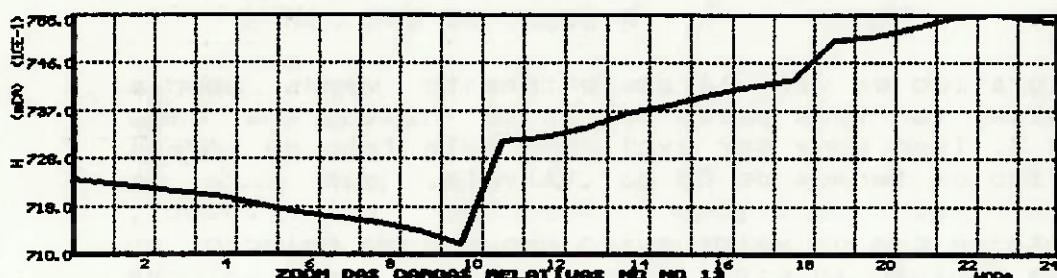
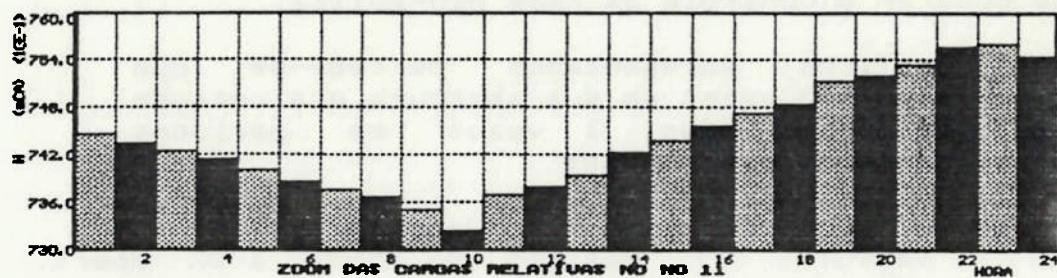
QUADRO GRAFICO COMPARATIVO

Verifique Níveis Comparativos
 Z op. = 70
 Z max = 75
 Z min = 67

(CR)

j.1) TOPOLOGIA J - RESULTADOS:

Cargas nos Nós:



5.2 CONTROLE DE REDES HIDRAULICAS

5.2.1 Dados dos Enos :

Utilizaremos uma rede hidráulica de para simular o controle hidráulico em redes para períodos extensivos. A topologia da rede está mostrada na figura 5.11 e os dados relativos aos enos são:

Reservatórios: 1. Nível operacional : 740 mCA

Nível máximo : 770 mCA

Nível mínimo : 738 mCA

Área : 4000 m²

2. Nível operacional : 770 mCA

Nível máximo : 800 mCA

Nível mínimo : 768.5mCA

Área : 4000 m²

3. Nível operacional : 760 mCA

Nível máximo : 762 mCA

Nível mínimo : 680 mCA

Área : 2000 m²

Tubos : Comprimento: 500 m

Diâmetro: 300 mm

Rugosidade : 0.2 mm

Singularidade: 0

Celeridade: 1000 m/s

Válvulas : Diâmetro: 500 mm

Tipo : Controle a jusante.

(Carga máxima = 770 mCA)

Singularidade: 2

SIMULAÇÃO EM REDES DE ÁGUA

NOD COM TEMPO EXTENSIVO

[NOD nº 2]

[N. DO NOD= 12]

[Demanda em (m³/s)]

Tempo (hora/dia).= HORA

N. de pontos diagrama = 12

D.1= 0.2100 D.9= 0.1200
D.2= 0.2200 D.10=0.2000
D.3= 0.1000 D.11=0.1300
D.4= 0.1500 D.12=0.1800
D.5= 0.1100
D.6= 0.1600
D.7= 0.1000
D.8= 0.1800

<CR>



5.2.2 Objetivos do Controle:

O objetivo central na instalação é o de fornecer a demanda aos nods , mantendo os reservatórios em estado operacional, e as variáveis de estado em valores adequados.

Percebe-se que a tarefa não será simples, pois os limites impostos de operacionalidade dos reservatórios são estreitos e as áreas não muito grandes , o que fará certamente o nível variar bastante.

Pela disposição da topologia apresentada na figura 5.11 notamos que o reservatório n. 1 terá sua água impulsionada para o RES2 e este alimentará os nods, juntamente ou não, com o RES3.

Temos dois enos de manipulação que deverão ser acionados se necessário durante o processamento.

Nenhum dos reservatórios poderá sair dos níveis estabelecidos.

A válvula de controle a jusante garantirá carga máxima no nó 11 de 770 mCA, ou seja, não são admitidos para esse ponto valores superiores a este.

Esta válvula poderá atuar durante o processamento automaticamente.

Iremos processar a rede com a opção de alarme ligado para correção (com as manobras de enos) dos níveis.

O processamento aqui efetuado, utilizou uma opção intrínseca ao programa , que avisa o operador sobre condições de operação inadequadas . O programa operando com esta alternativa , força o usuário a manobrar um ENO , e resimula com a manobra efetuada a demanda de parada. O procedimento é repetido até que o usuário acerte uma manobra correta. Para cada demanda de cálculo esse tipo de verificação é efetuada, o que garante , ao final do período, a existência de manobras que satisfazem as condições de boa estabilidade da rede.

SIMULACAO EM REDES DE AGUA

DEMANDA: 6 VALOR= 0.1600
KK= 60 AF= 1.1E-07

ALERTA RESERVATORIO IRREGULAR

RES n.3 EXTRAVASOU
Z Nominal=760.00
Z Maximo =762.00
Volume extravazado = 53.30 m3
--Altere Condicoes p/ prosseguir--
<CR>

SIMULACAO EM REDES DE AGUA

DEMANDA: 7 VALOR= 0.1000
KK= 60 AF= 1.1E-07

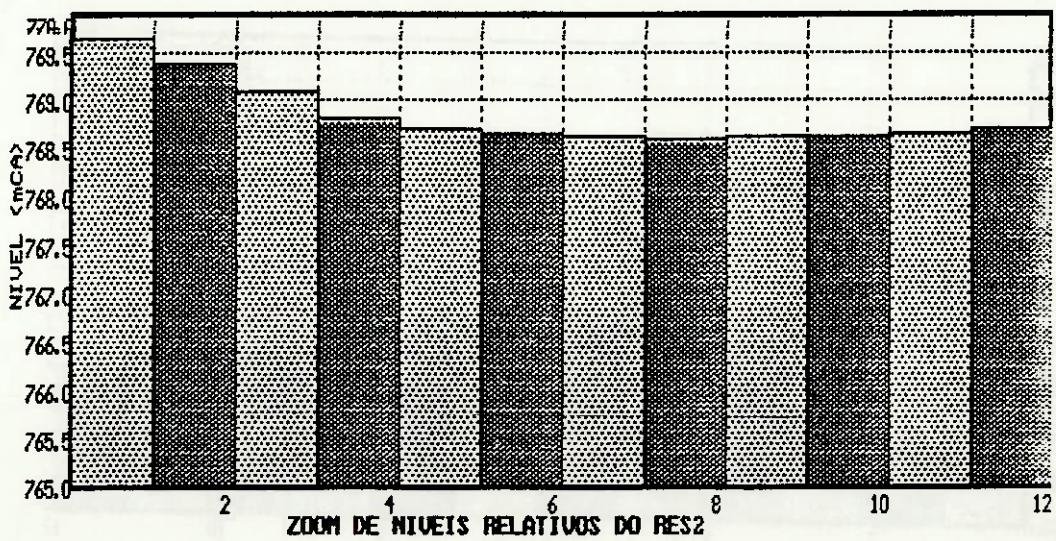
ALERTA RESERVATORIO IRREGULAR

RES n.3 EXTRAVASOU
Z Nominal=760.00
Z Maximo =762.00
Volume extravazado = 168.58 m3
--Altere Condicoes p/ prosseguir--
<CR>

5.2.4 Resultados do Controle:

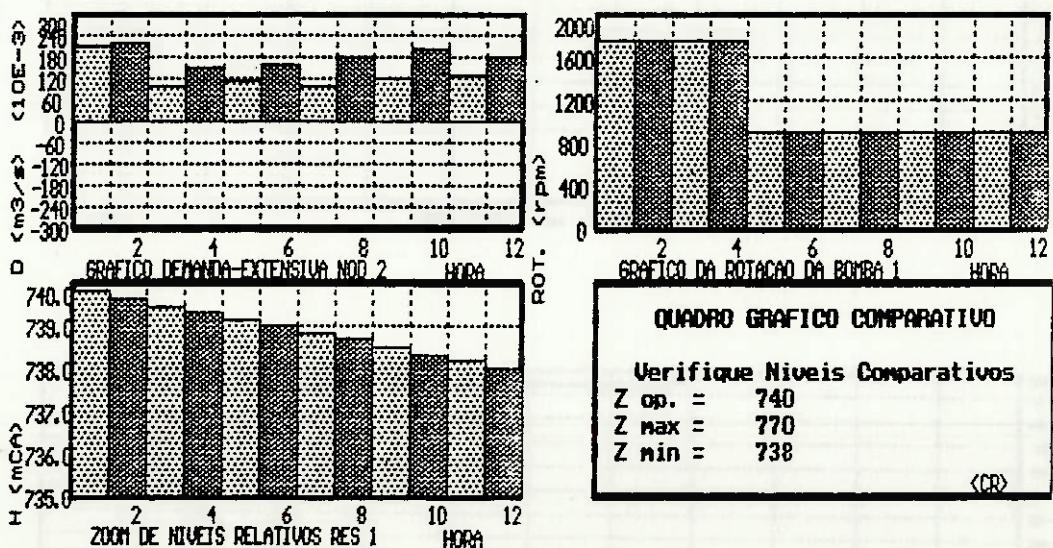
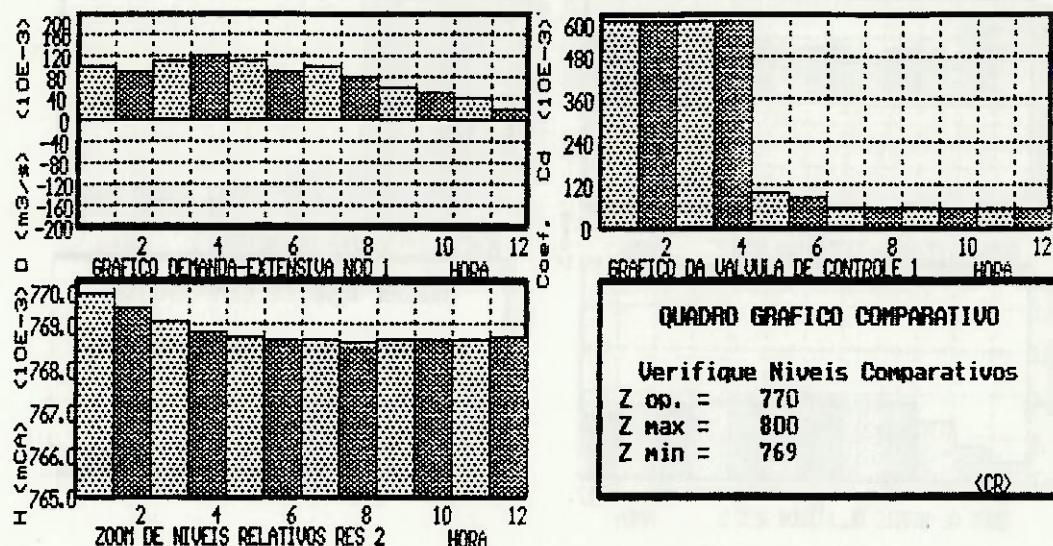
Reservatórios : n. 2 RES2

SIMULACAO EM REDES DE AGUA	
VERIFICACAO DO NIVEL DOS RESERVATORIOS SOB CONTROLE	
RESULTADOS NUMERICOS DOS NIVEIS OBTIDOS	
N.1= 769.68	N.9= 768.60
N.2= 769.38	N.10=768.62
N.3= 769.09	N.11=768.64
N.4= 768.81	N.12=768.68
N.5= 768.69	
N.6= 768.63	
N.7= 768.60	
N.8= 768.59	
<CR>	



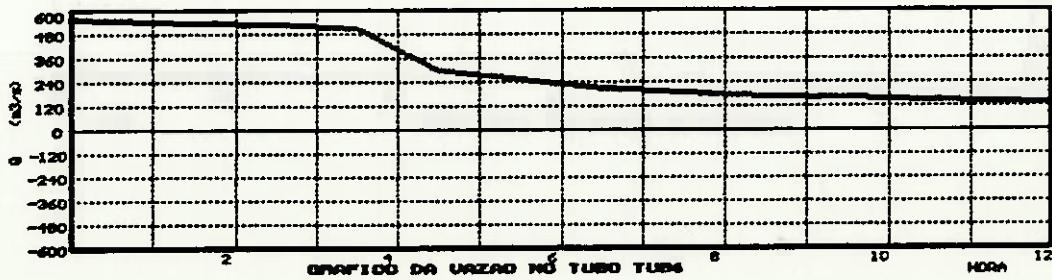
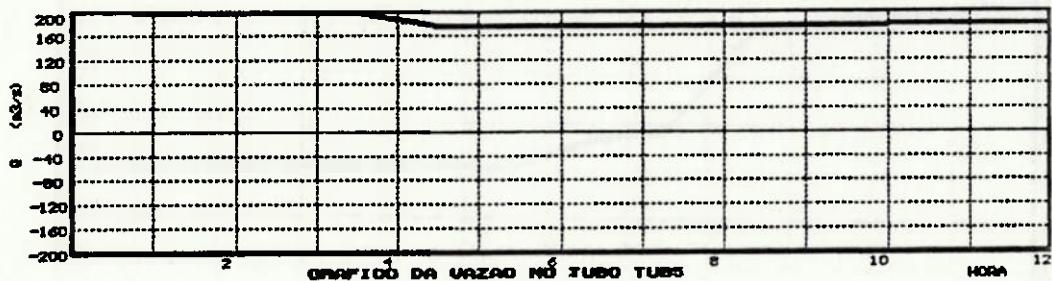
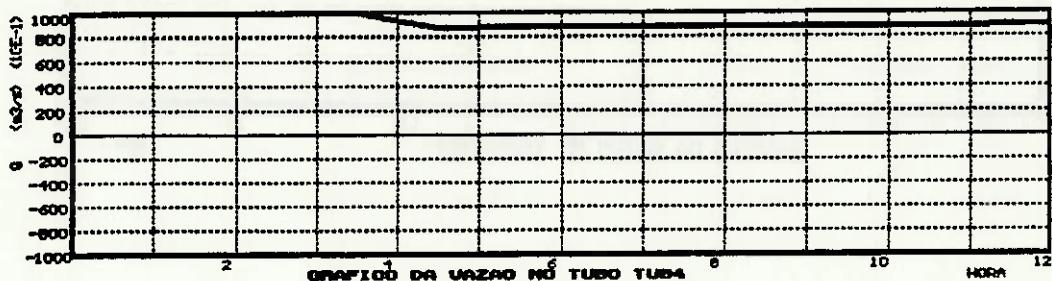
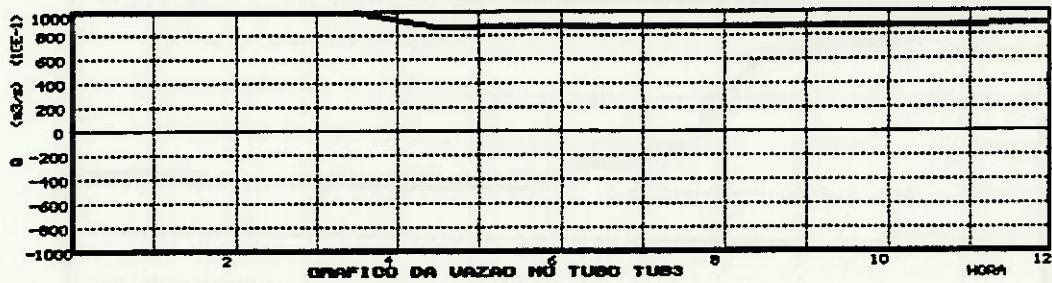
5.2.4 Resultados do Controle:

Comparação Gráfica: Reservatórios , Demandas Manobras



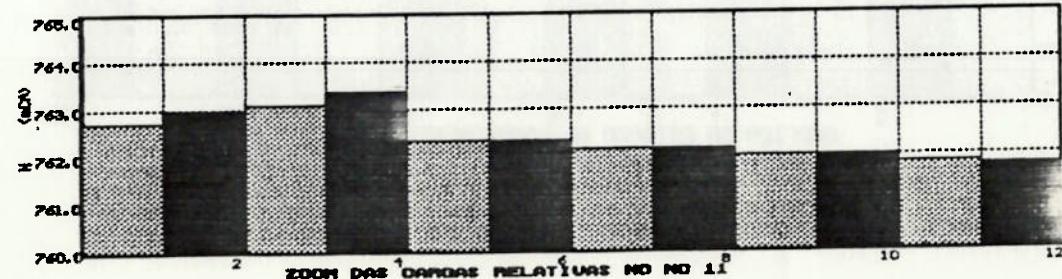
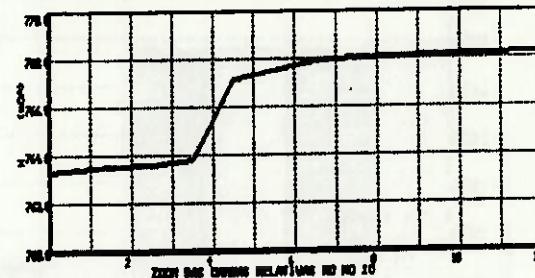
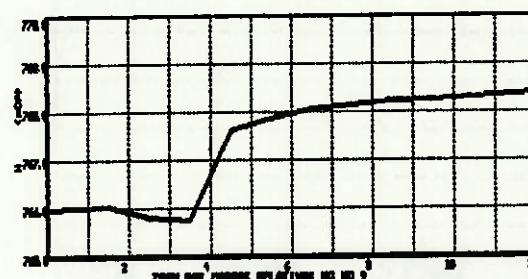
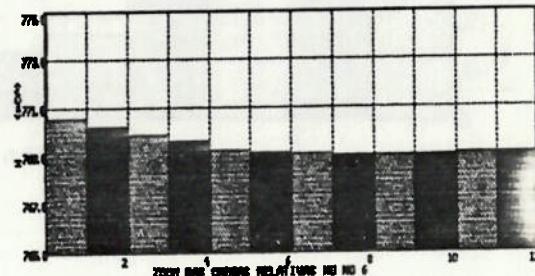
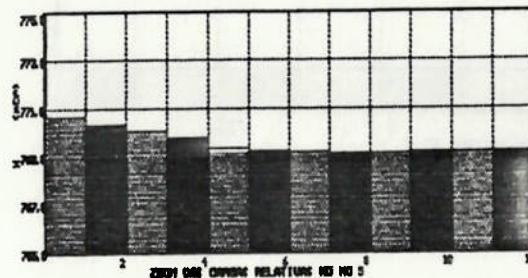
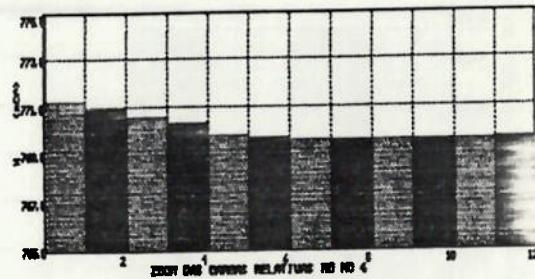
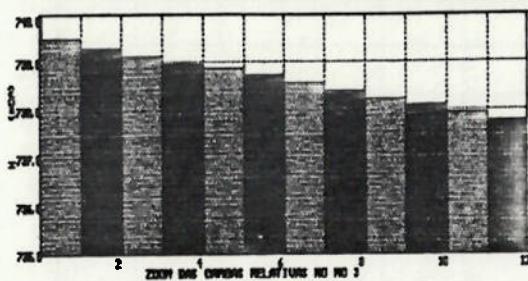
5.2.4 Resultados do Controle:

Vazões nos Tubos



5.2.4 Resultados do Controle:

Cargas nos Nós



5.2.5 Dados Complementares do Controle:

Analisando-se o quadro de respostas podemos verificar , quando e qual manobra foi necessária durante 12 horas de simulação.

Manipulamos a válvula em 4 oportunidades e a bomba em duas.

Na quinta demanda ocorreu uma condição inadequada:
RES3 ficou acima do limite.

Com o alarme ligado fomos obrigados a proceder uma nova alteração, e o sistema resimulou a demanda 5 com as alterações .

Decidimos alterar a abertura da válvula VAL1 que diminuiria o fluxo para o RES3, e manteria o fornecimento aos nós com demanda 9 e 12. O fechamento considerado satisfatório, foi a alteração de Cd de 0.577 ($K_v=2$) para 0.050.

Reduzimos também a rotação da bomba para diminuir a altura manométrica do reservatório RES2, de modo conveniente para mantê-lo no limite operacional contribuindo para evitar o maior enchimento do reservatório RES3.

Na demanda n. 6 o RES3 ficou novamente acima do limite operacional. Encontramos como causa provável novamente um fechamento ainda pequeno da válvula VAL1.

A medida tomada, foi novamente o fechamento da válvula VAL1 mantendo a rotação da bomba em 900 rpm pois uma redução maior poderia retirar o RES@ da condição de operacionalidade. A válvula teve o Cd alterado para Cd = 0.020 , o que deveria manter o reservatório em condição operacional adequada . Para esta demanda 6 a decisão foi satisfatória.

Na demanda seguinte n. 7 verificamos claramente que as atitudes tomadas no período anterior apenas satisfizeram aquele período (6).

6.1 INSTALACOES TESTADAS

6.1.1 Dados Iniciais:

Para exemplificar o cálculo do transiente hidráulico, apresentamos inicialmente dois exemplos didáticos.

Esses exemplos elucidam a validação do cálculo para o regime transitório. O primeiro exemplo, clássico, representa apenas uma manobra de fechamento em uma válvula de descarga livre (VAT). Essa instalação é constituída por um reservatório, uma VAT, e um tubo. O segundo exemplo apresentado, é uma variação do primeiro exemplo, onde acrescentamos, no centro do tubo, uma chaminé de equilíbrio. O objetivo básico desse último exemplo é o de introduzir as alterações provocadas pela utilização de uma chaminé na instalação. As figuras 6.1 e 6.2 mostram a topologia das instalações.

Os dados dos ENOS são:

Reservatórios: 1. Nível operacional : 150 mCA

Nível máximo : 160 mCA

Nível mínimo : 140 mCA

Área : 2000 m²

Tubos : Comprimento: 600 m

Diâmetro: 500 mm

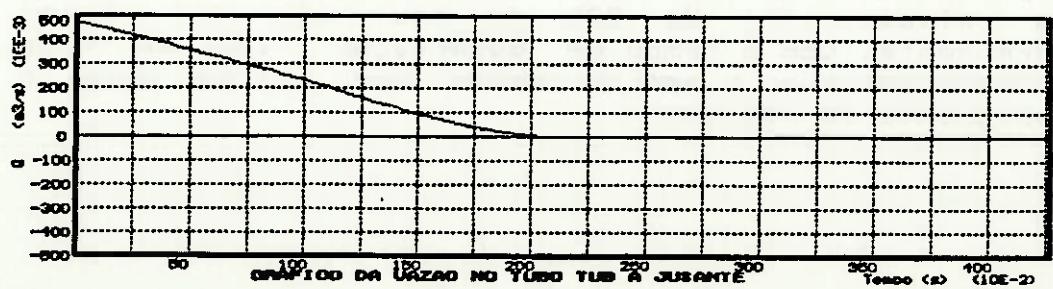
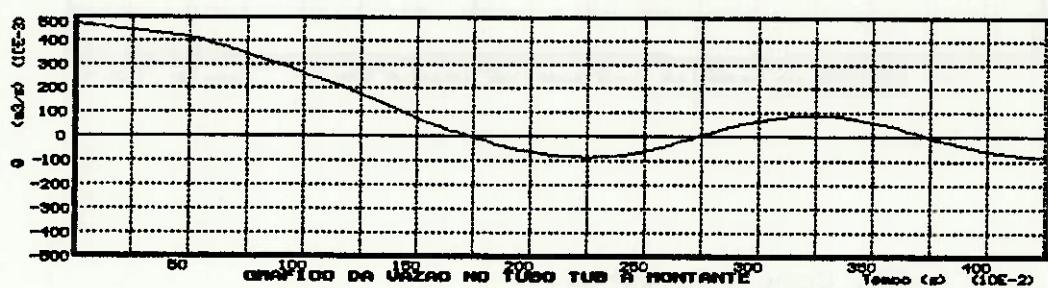
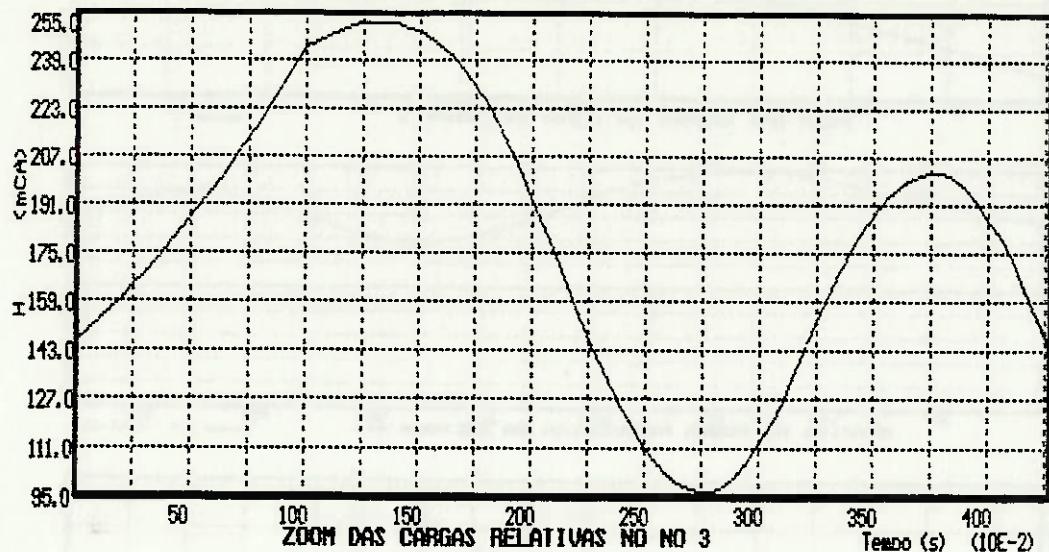
Rugosidade : 0.018 mm

Singularidade: 0

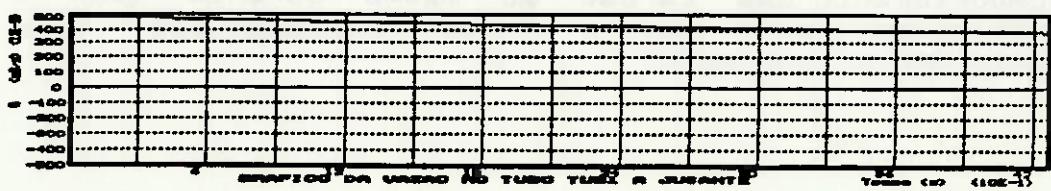
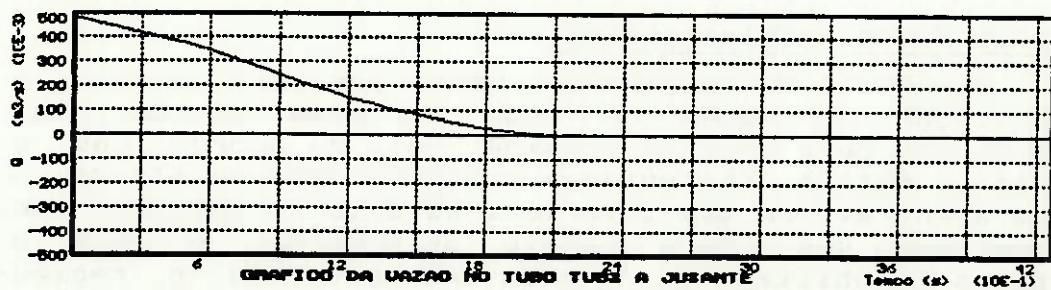
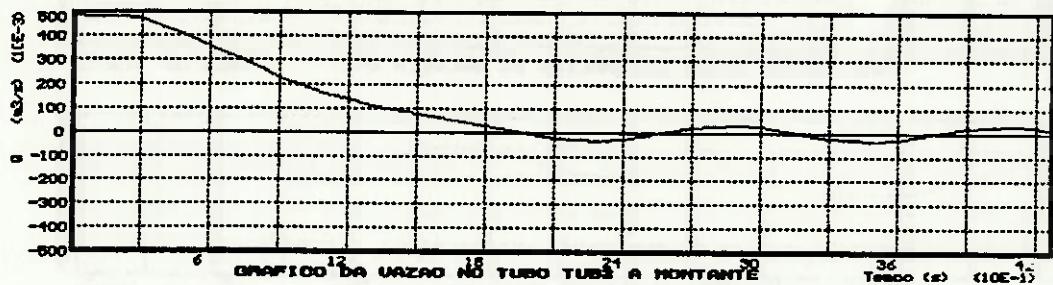
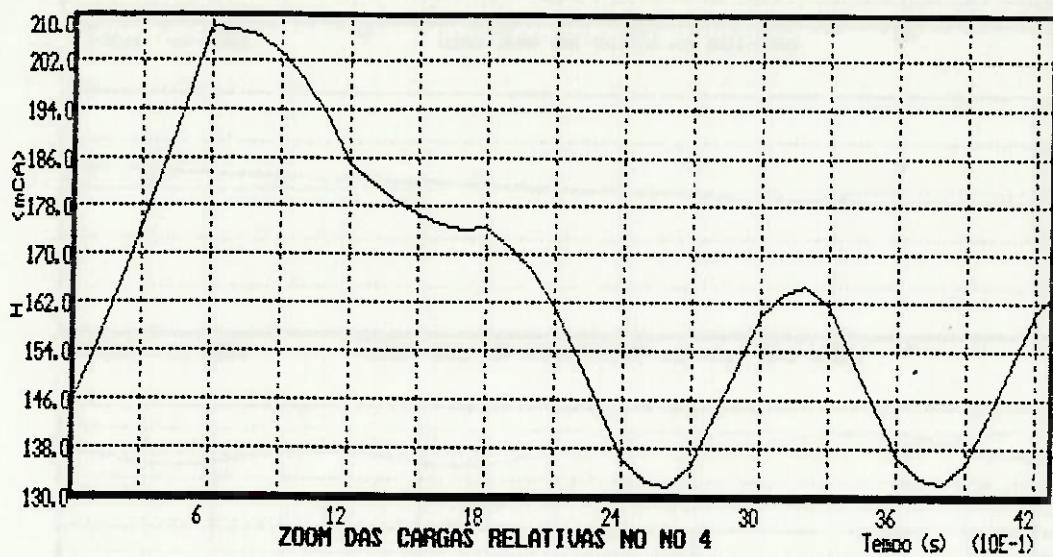
Celeridade: 1200 m/s

(Para o segundo exemplo usamos dois tubos com metade do comprimento cada um)

6.1.2 Resultados do Exemplo 1:



6.1.4 Resultados do Exemplo 2:



6.2 PROJETO BASICO DE VALVULA DE BLOQUEIO

6.2.1 Condições simuladas:

Como exemplo de aplicação para o sistema SRA, apresentamos o projeto básico de uma válvula de bloqueio para usinas hidrelétricas. Procuramos nos ater especificamente a determinação dos esforços hidráulicos, por serem os demais, dependentes da geometria do acionamento mecânico, e de resolução imediata.

Essas válvulas de bloqueio em usinas hidrelétricas, são colocadas à montante da entrada de caixas espirais. Possuem o objetivo de isolar a instalação para eventual manutenção, e de se constituir em um elemento que garanta o corte do fluxo de água , para casos em que não atue o distribuidor. Isso dá a válvula uma grande importância na garantia de funcionamento e estabilidade em uma condição de operação anormal.

Comparamos a atuação de uma válvula cujo modelo hidráulico era conhecido (e portanto sua lei característica), com uma válvula representada por uma lei matemática. O intuito era verificar, se a lei característica do modelo teria ,ou não , um melhor comportamento do que uma lei matemática ajustada a válvula dos exemplos didáticos mostrados na seção 6.1.

Fizemos não só uma verificação de esforços para uma válvula cujo modelo era conhecido, mas compararamos sua atuação com um outra válvula que se comportava como uma lei matemática.

Para garantir o isolamento da turbina, caixa espiral, e tubo de sucção, existem três operações possíveis a considerar. As operações descritas foram simuladas no sistema SRA.

A primeira , condição normal, o fechamento é realizado pelo distribuidor. Consideramos um distribuidor fechando quando a turbina oferecia uma potência 40 % abaixo da máxima. Nesta condição ocorre o aparecimento de um vórtice no tubo de sucção que foi considerado na simulação.

A terceira, condição anormal extrema, o fechamento também é realizado pela válvula de bloqueio. Por hipótese, consideramos a turbina operando a 60% de sua potência, conforme condição normal de operação. Mas nesta terceira, existe desconexão do gerador, a turbina está em rotação de fuga e no fechamento o distribuidor não atua. Como a condição de operação favorece o aparecimento de vórtice também o consideramos na simulação. A vazão aproximada nesta condição corresponde ao dobro da verificada para a operação em rotação nominal a 60 % de carga.

As duas válvulas foram simuladas na instalação considerando-se também dois tempos diferentes de fechamento, para se observar qual das duas melhor se adaptaria as condições operacionais, e qual o tempo de fechamento adequado. A figura 6.3 ilustra a topologia da instalação de uma máquina da usina hidrelétrica. A figura 6.4 ilustra o aspecto da válvula de bloqueio.

USINA HIDRELÉTRICA

(maquina FRANCIS)

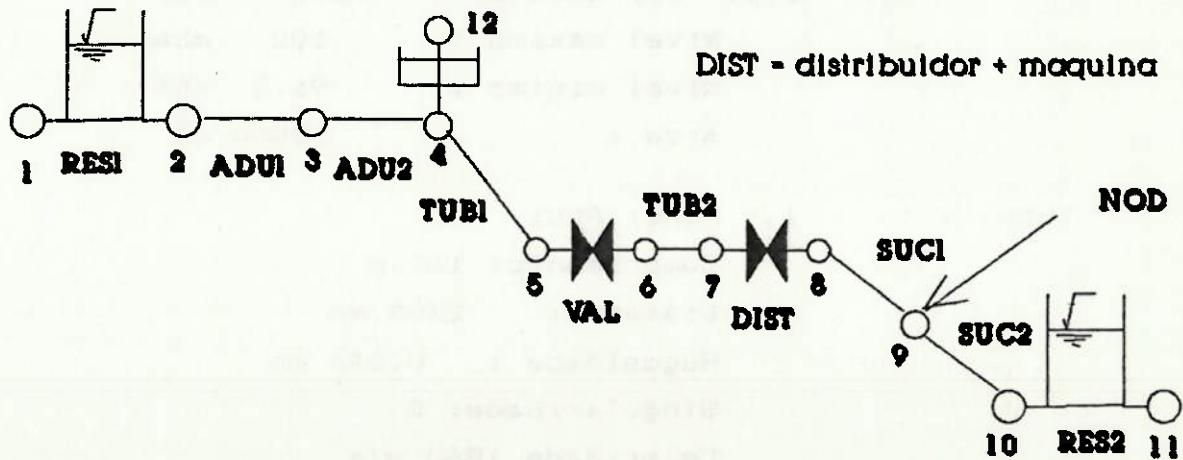


Fig. 6.3 - Instalação para Válvula de Bloqueio

2. Nome: ADU2
Comprimento: 160 m
Diâmetro: 2300 mm
Rugosidade : 0.046 mm
Singularidade : 0
Celeridade : 860 m/s

3. Nome: TUB1
Comprimento: 136 m
Diâmetro: 2050 mm
Rugosidade : 0.046 mm
Singularidade : 0.2
Celeridade : 860 m/s

4. Nome: TUB2
Comprimento: 6 m
Diâmetro: 1900 mm
Rugosidade : 0.046 mm
Singularidade 0
Celeridade : 860 m/s

5. Nome: SUC1
Comprimento: 2.37 m
Diâmetro: 893.25 mm
Rugosidade : 0.046 mm
Singularidade 0
Celeridade : 860 m/s

5. Nome: SUC2
Comprimento: 3.89 m
Diâmetro: 1445.75 mm
Rugosidade : 0.046 mm
Singularidade : 1.2
Celeridade : 860 m/s

6.2.3 Resultados da 1. Condição de Operação:

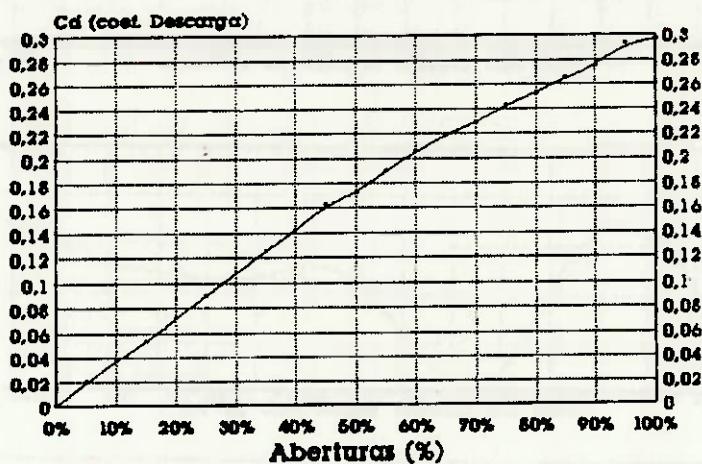
60 % da potência 2400 kW

Excitação de vórtice nº 9

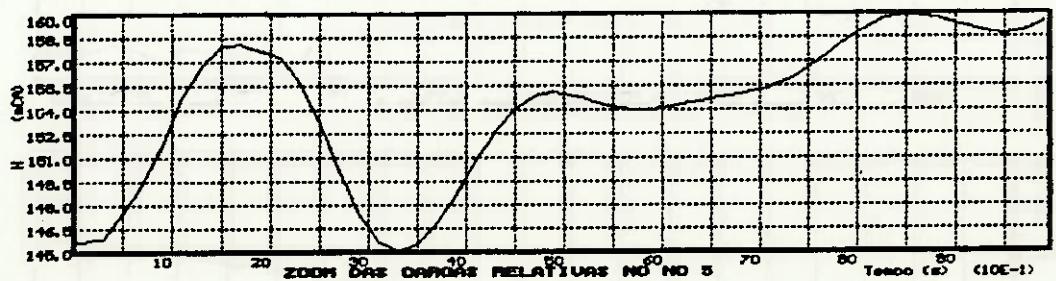
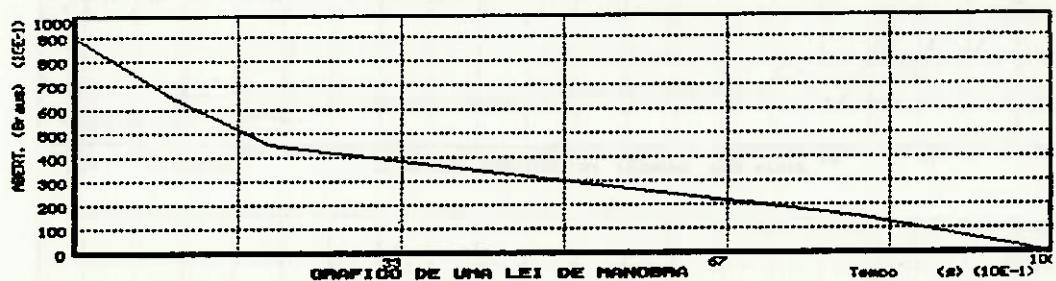
Manobra do distribuidor

Apresentamos o gráfico da manobra do distribuidor e os gráficos das cargas nos nós e vazões nos tubos.

Cd do Distribuidor de
(2400kW)

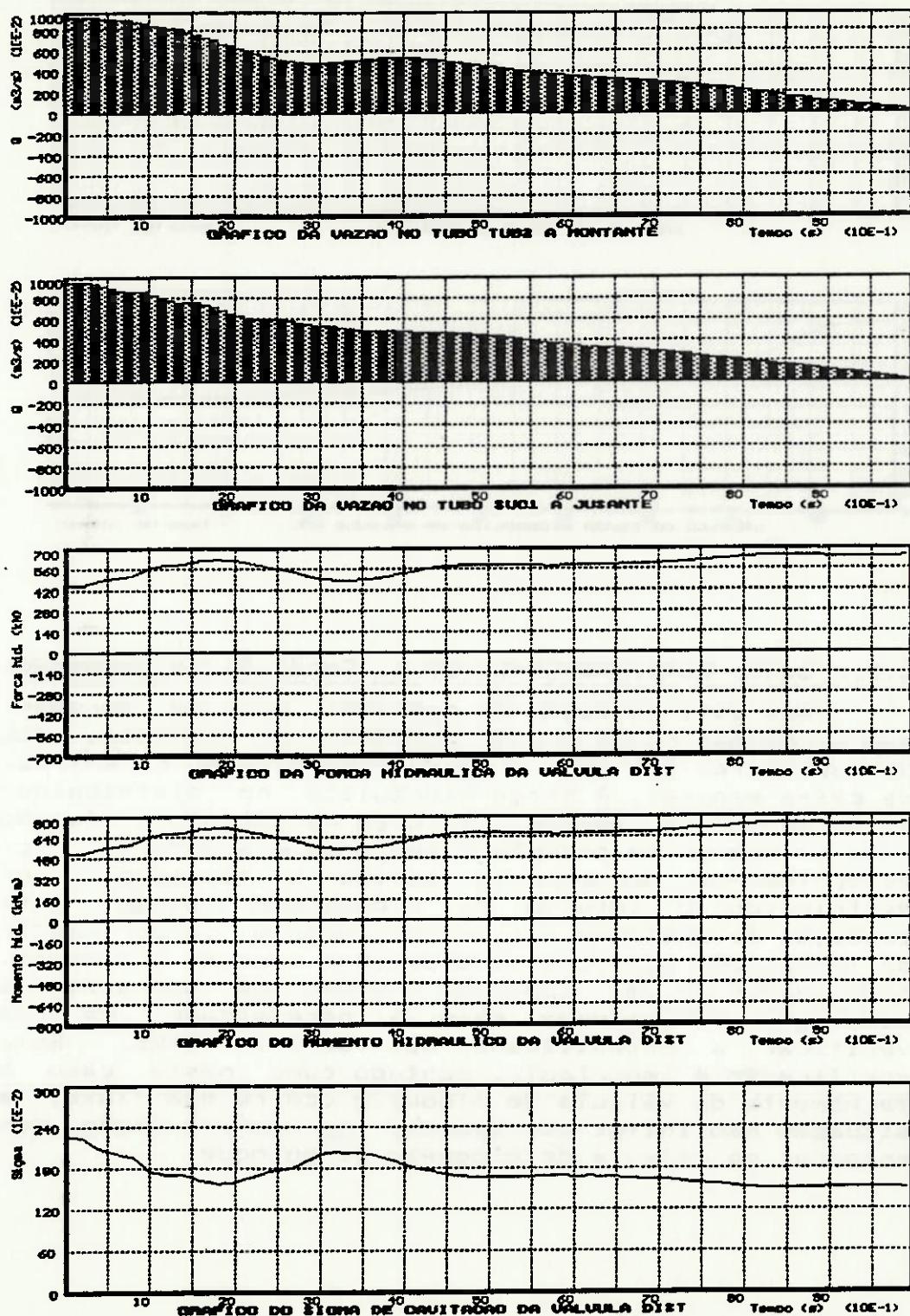


Da Curva 2400kW



6.2.3 Resultados da 1. Condição de Operação:

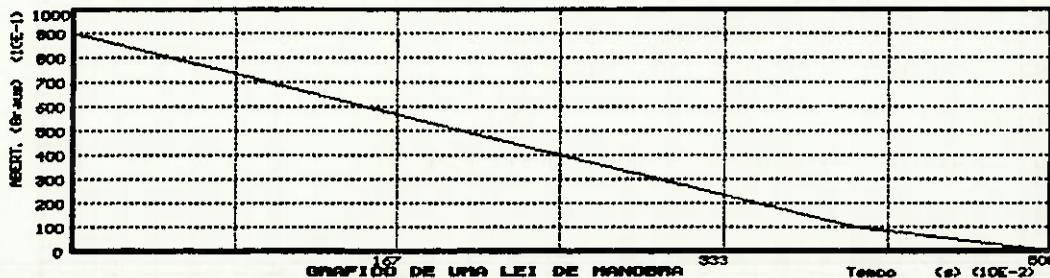
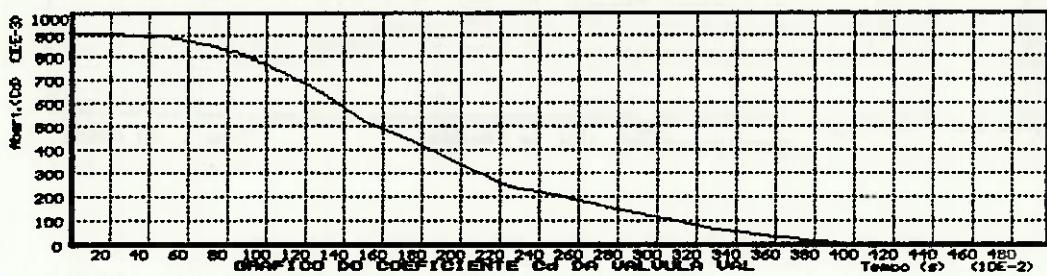
(Continuação)



6.2.4 Gráficos Característicos das Válvulas:

Incialmente comparamos os gráficos das leis características das válvulas postas em teste na instalação. O gráfico da válvula de bloqueio (1) plotado, representa a variação do coeficiente de descarga em função do tempo de fechamento. Este gráfico originou-se da composição de dois outros : O característico da válvula , e o da manobra para um determinado t_f . Como simulamos esta válvula para 3 tempos de fechamento 5,9, e 20 s na 2. condição de operação, temos 3 leis de manobra e $f(t)$.

Para a válvula (2), ajustada por lei matemática , apresentamos apenas a lei do coeficiente de descarga em função do tempo de fechamento. Esta válvula foi simulada na instalação para a 2. condição de operação em um tempo de fechamento de 5,9 e 15s.



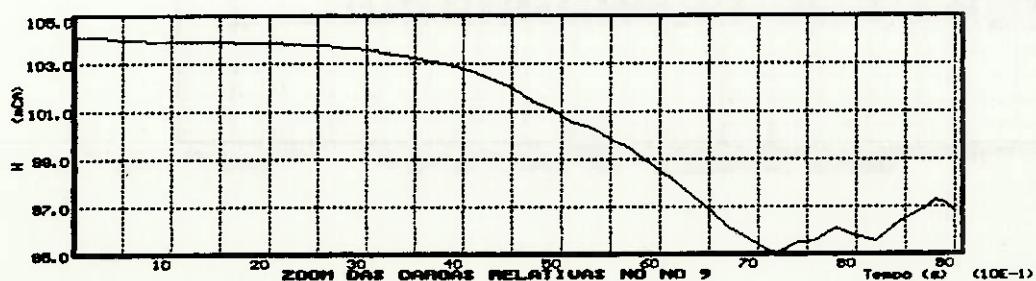
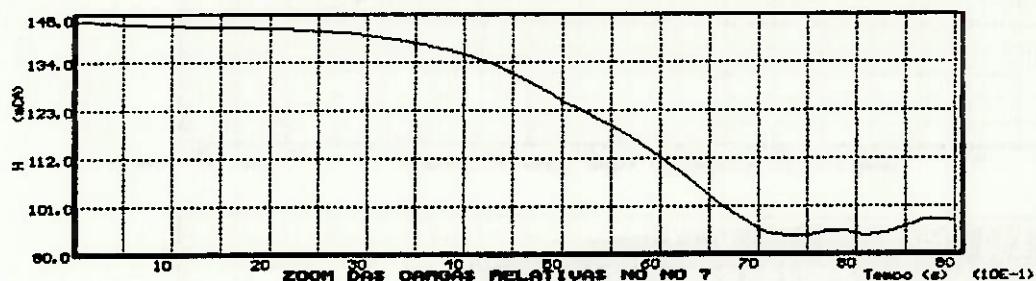
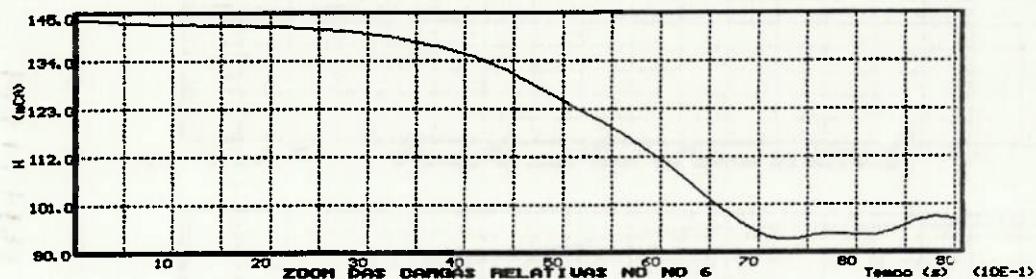
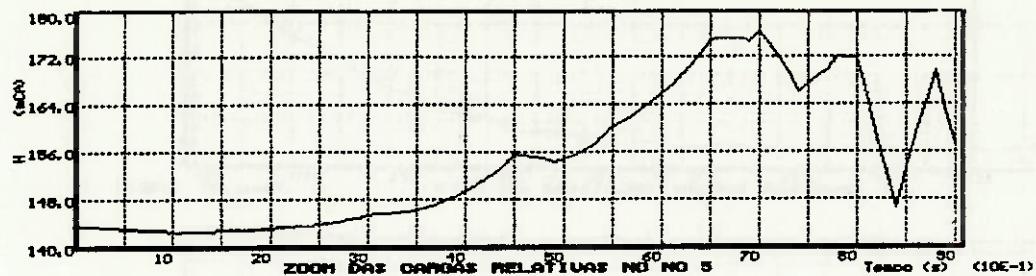
6.2.5 Resultados da 2. Condição de Operação:

100 % da potência 5000 kW

Manobra da válvula

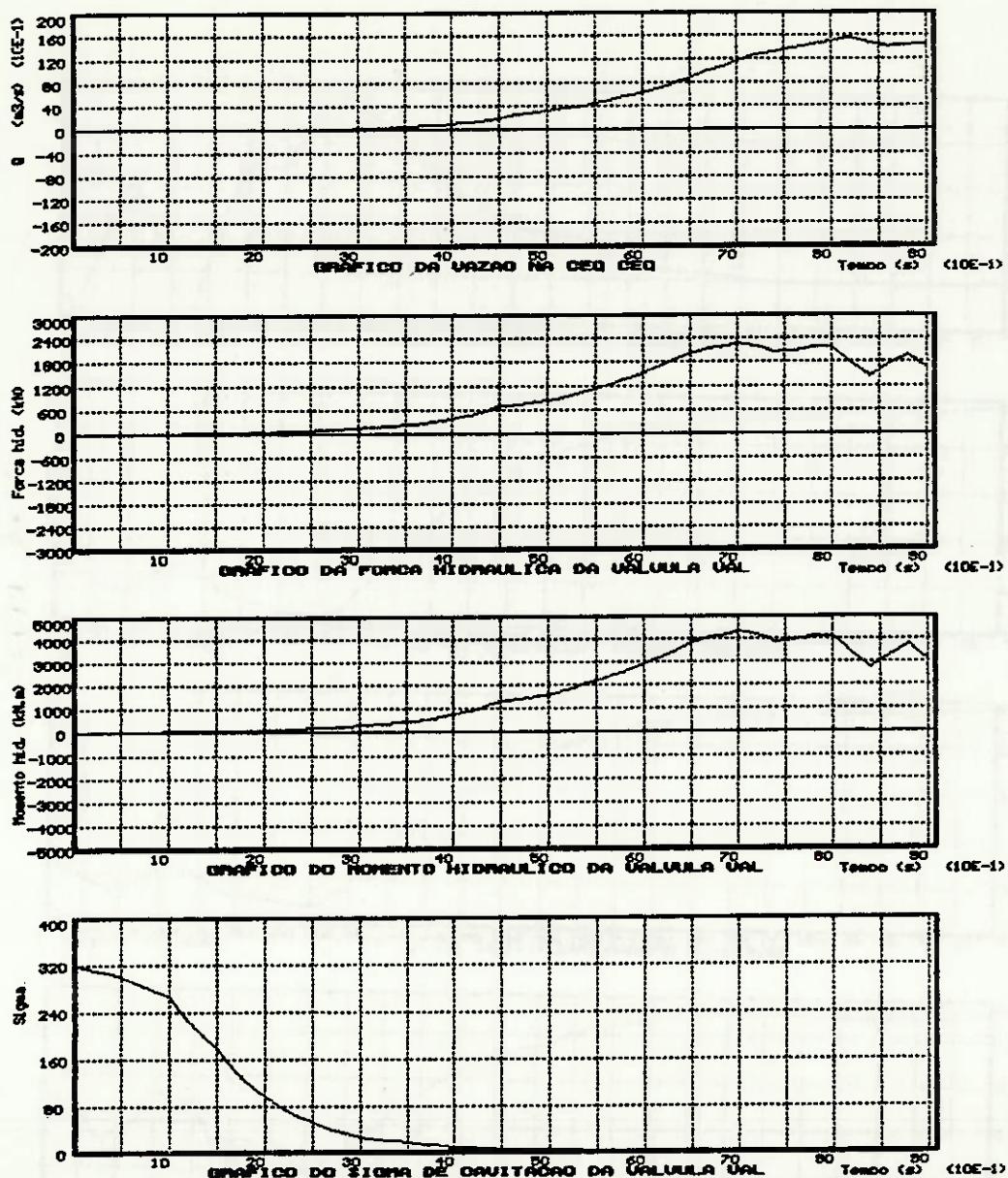
Condição de disparo 755 rpm.

Válvula (1) tempo de fechamento 9s.



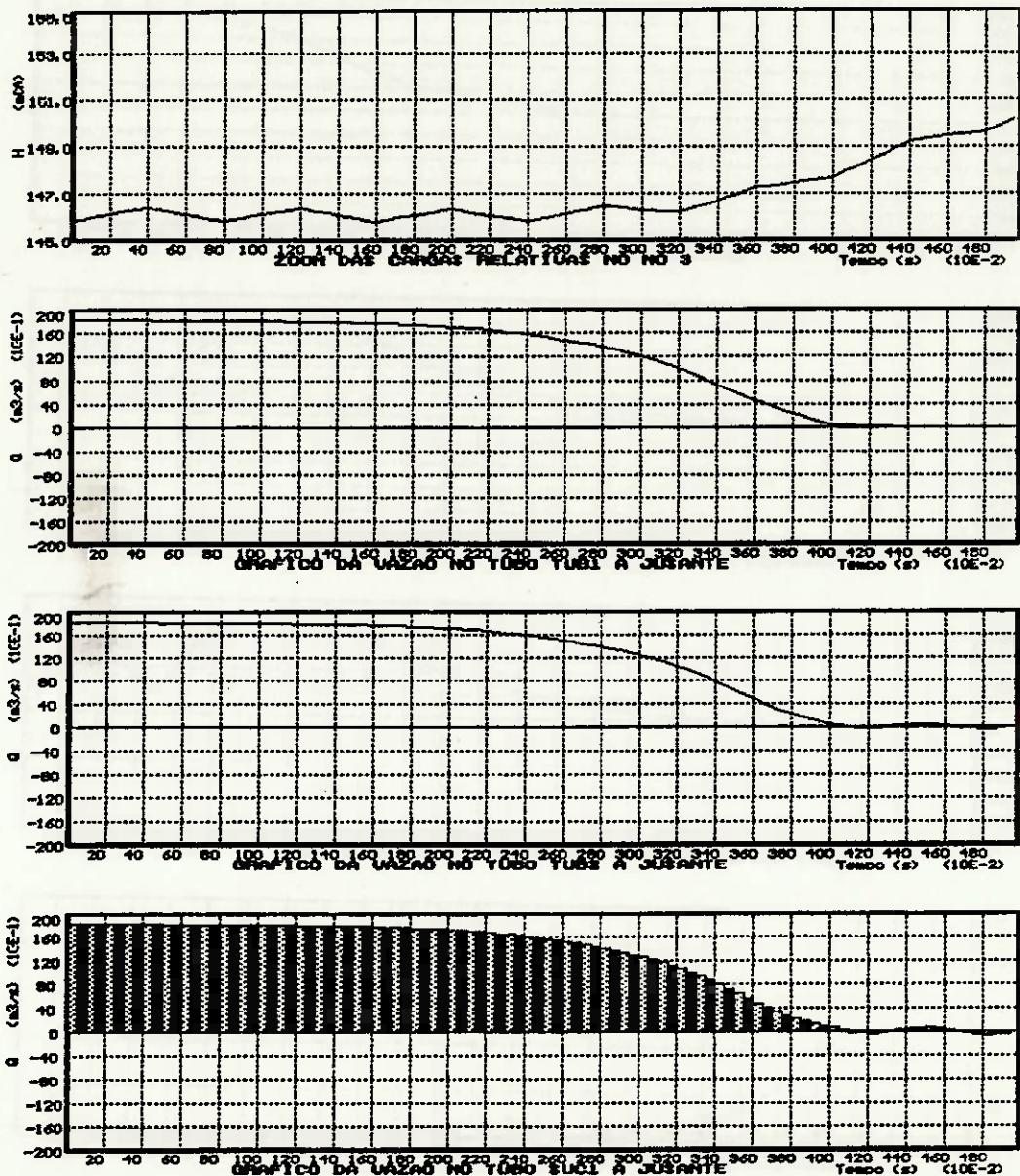
6.2.5 Resultados da 2. Condição de Operação:

Válvula (1) tempo de fechamento 9s



6.2.5 Resultados da 2. Condição de Operação:

Válvula (1) tempo de fechamento 5s



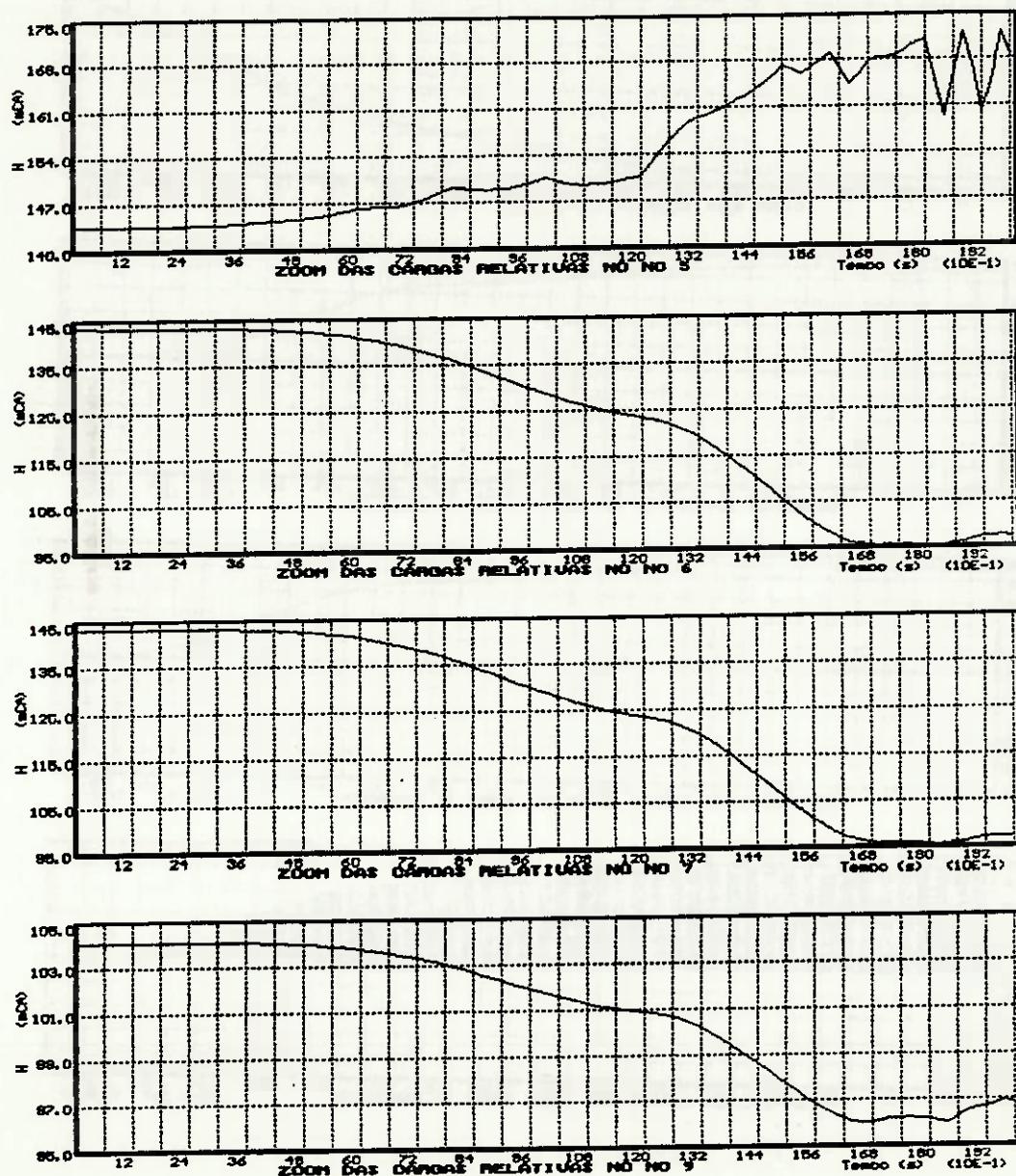
6.2.5 Resultados da 2. Condição de Operação:

100 % da potência 5000 kW

Manobra da válvula

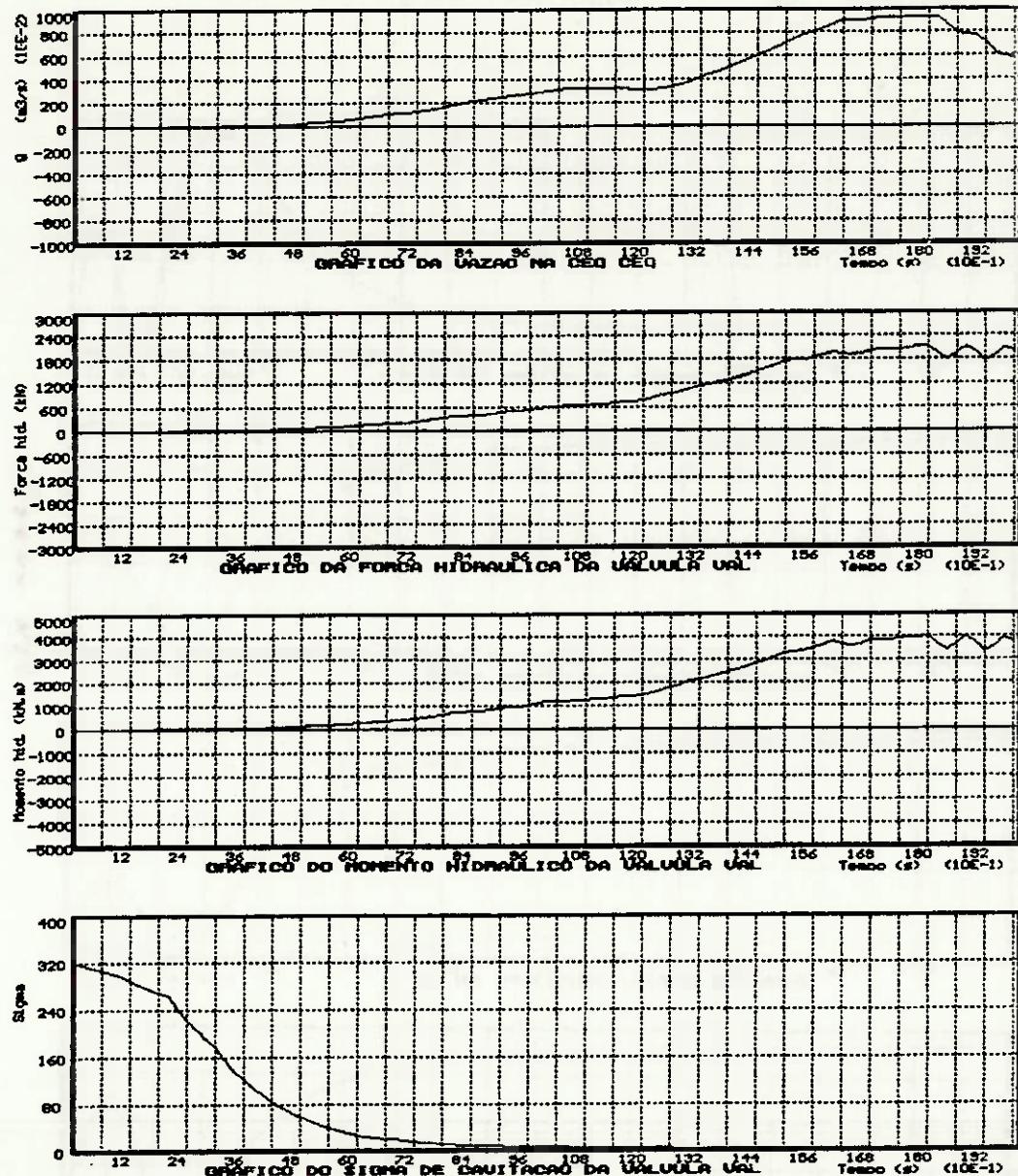
Condição de disparo 755 rpm.

Válvula (1) tempo de fechamento 20s.



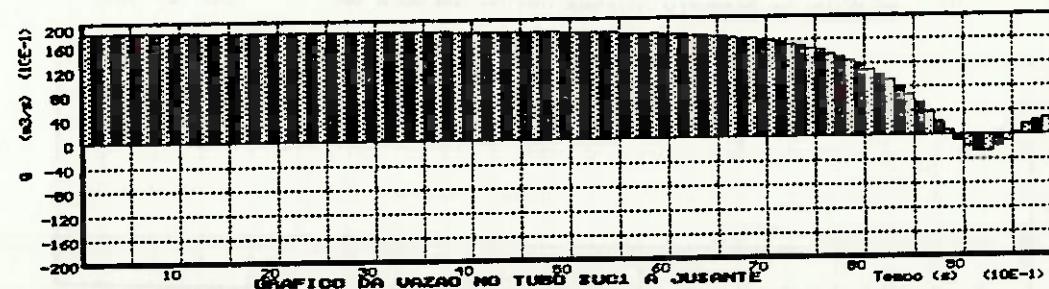
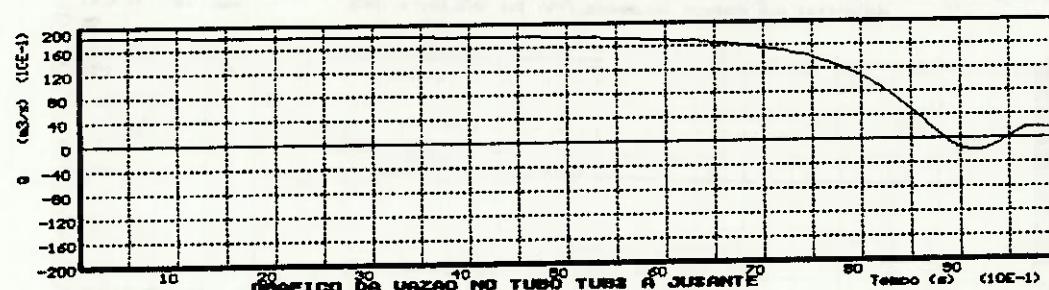
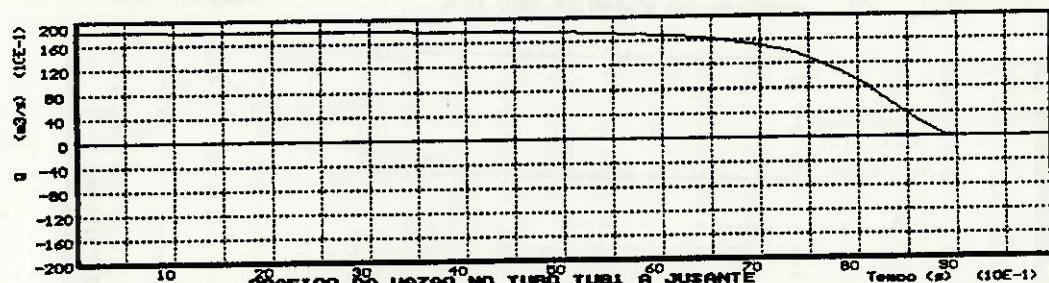
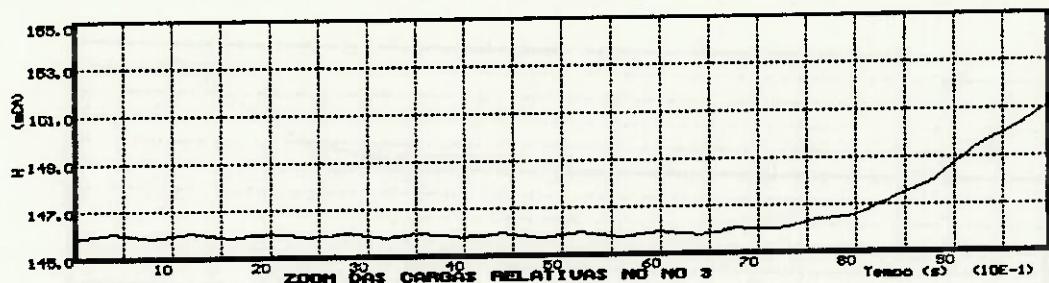
6.2.5 Resultados da 2. Condição de Operação:

Válvula (1) tempo de fechamento 20s



6.2.5 Resultados da 2. Condição de Operação:

Válvula (2) tempo de fechamento 9s



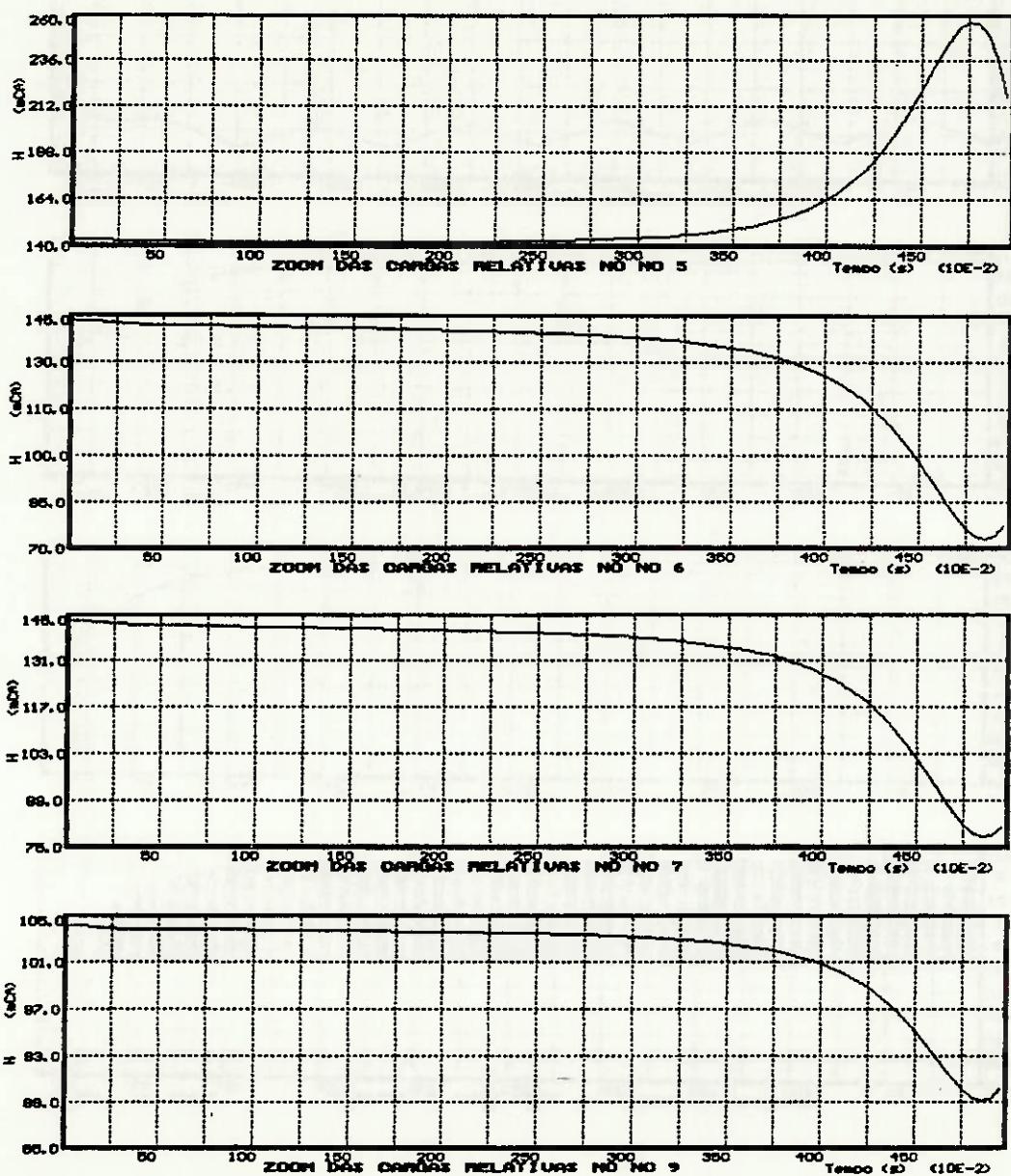
6.2.5 Resultados da 2. Condição de Operação:

100 % da potência 5000 kW

Manobra da válvula

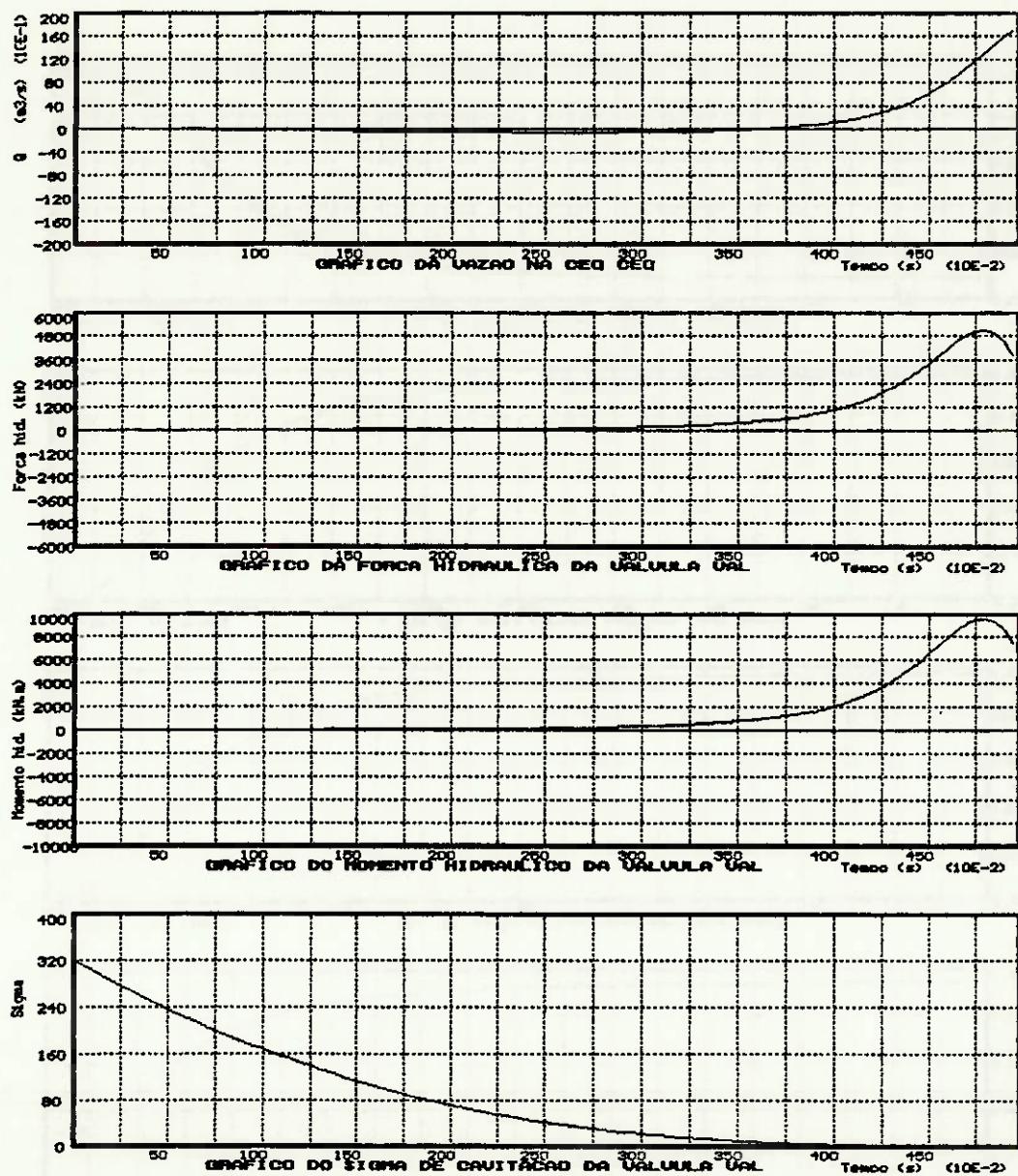
Condição de disparo 755 rpm.

Válvula (2) tempo de fechamento 5s.



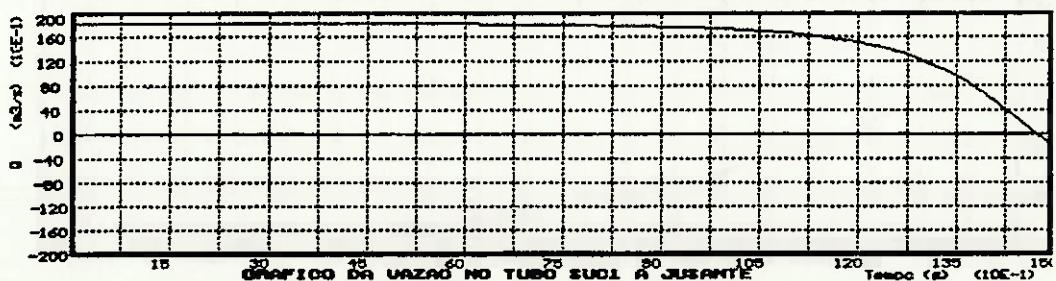
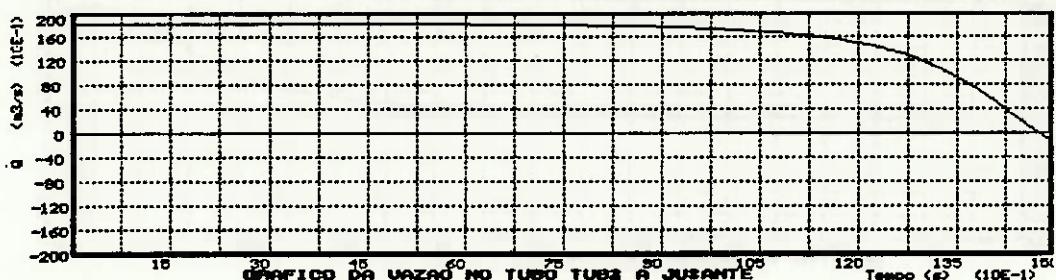
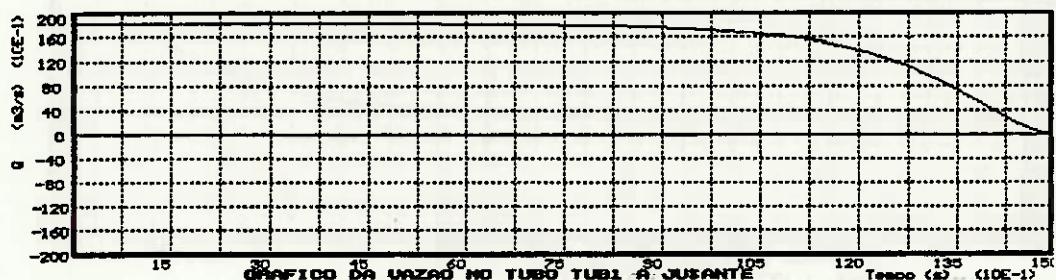
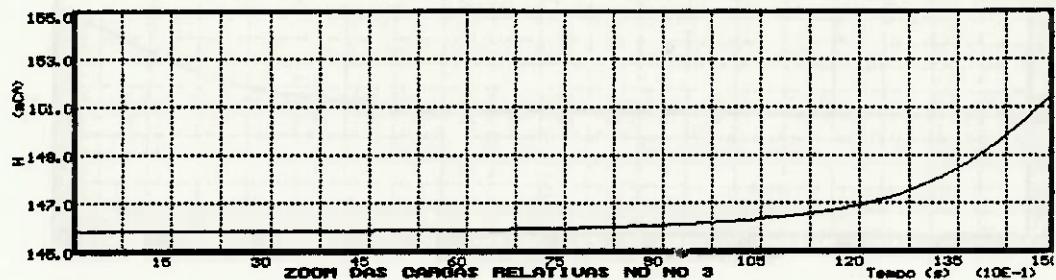
6.2.5 Resultados da 2. Condição de Operação:

Válvula (2) tempo de fechamento 5s



6.2.5 Resultados da 2. Condição de Operação:

Válvula (2) tempo de fechamento 15s



6.2.6 Dados Complementares da 2. Condição de Operação:

Sobre esta condição de operação pode-se dizer, que na comparação entre o comportamento geral das válvulas, a válvula (1) apresentou uma lei de fechamento favorável em relação à válvula (2) considerando-se os mesmos tempos de fechamento.

A melhor condição testada para utilização da válvula (1) é um fechamento de 9s, onde garantiríamos um esforço de 2274 kN no obturador. Note que para um fechamento em 20s a redução do esforço não é tão significativo.

Para a válvula (2), conclui-se, que nesta condição testada, ela apresentou cargas muito extremas nos nós de análise. Um tempo satisfatório para utilização desta válvula é o fechamento em 15s, que provocaria um esforço máximo de 2355 kN e um momento de 4475 kN.m.

As cargas apresentadas nos principais nós resumem-se abaixo. Os pontos principais para o dimensionamento da válvula são os nós 5 e 6.

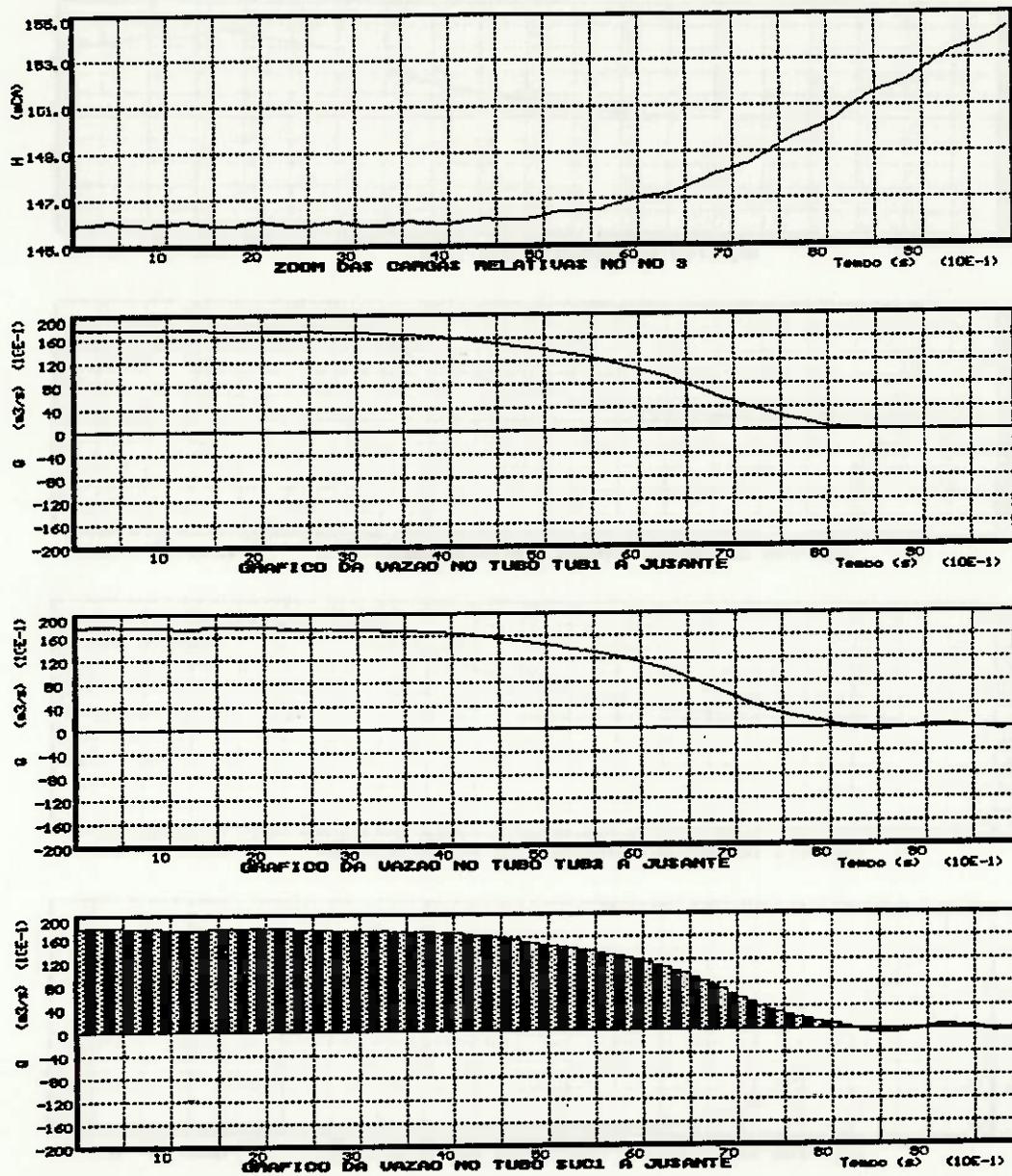
- A-Válvula (1) tf=9s.
- B-Válvula (1) tf=5s.
- C-Válvula (1) tf=20s.
- D-Válvula (2) tf=9s.
- E-Válvula (2) tf=5s.
- F-Válvula (2) tf=15s.

Valores Máximos:

Nós (mCA)	A	B	C	D	E	F
5	176	210	172	197	256	177
6	143	143	143	143	143	143
9	104	104	104	104	104	104
Força Hidráulica (kN)	2274	3375	2112	3013	5053	2355
Mom. Hidráulico (kN.m)	4320	6412	4013	5724	9601	4475

6.2.7 Resultados da 3. Condição de Operação:

Válvula (1) tempo de fechamento 9s



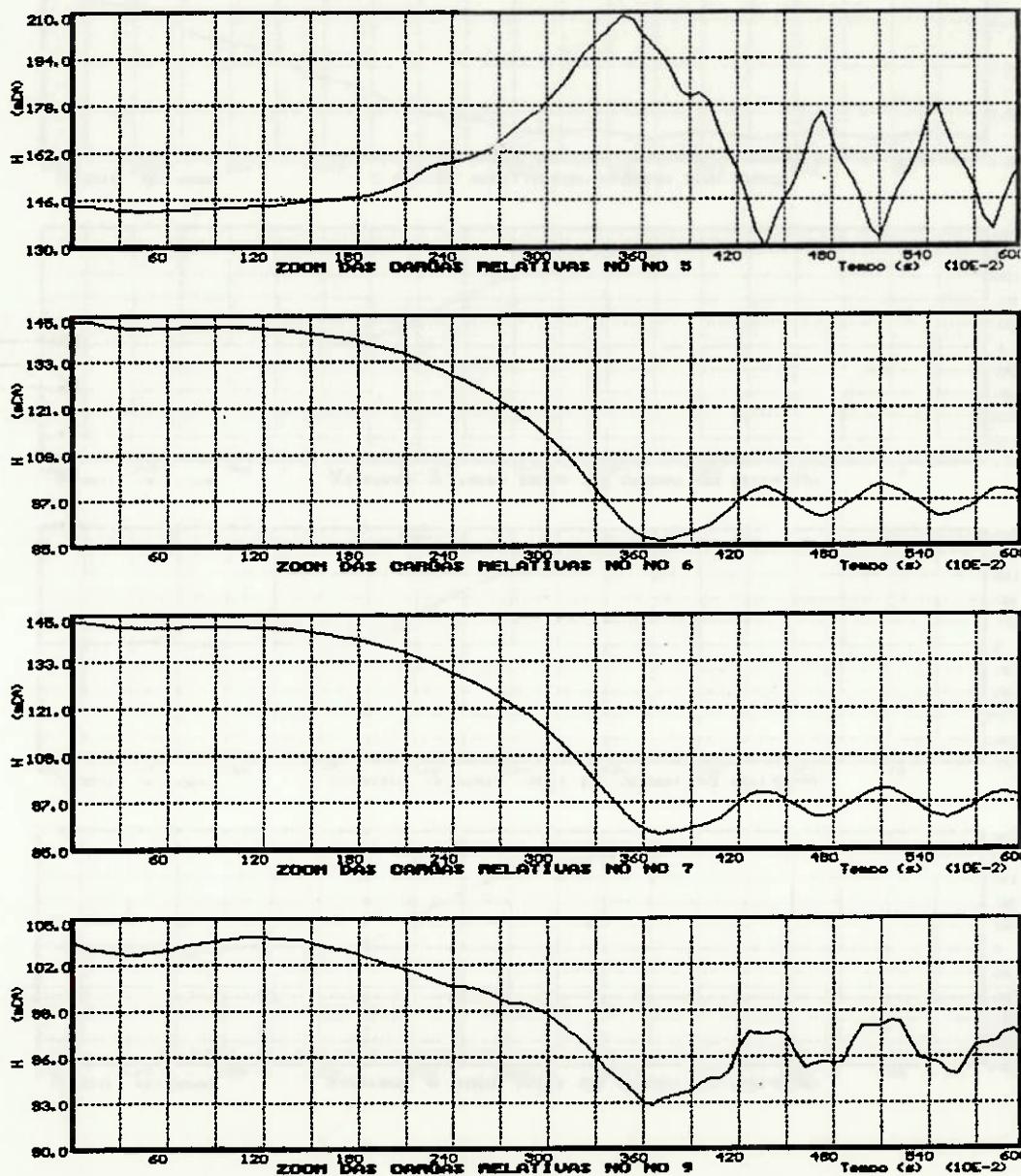
6.2.7 Resultados da 3. Condição de Operação:

60 % da potência 2400 kW

Manobra da válvula

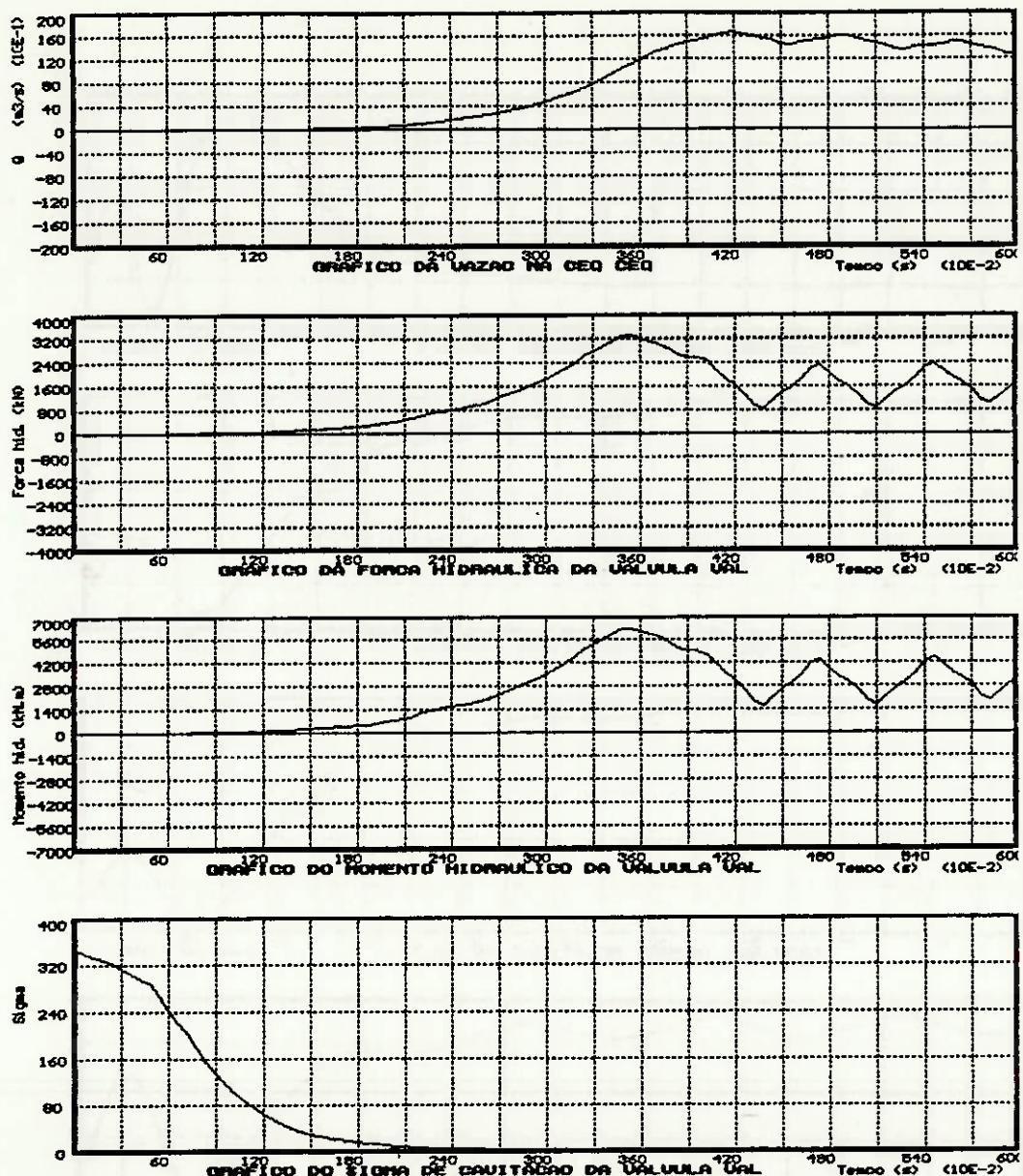
Condição de disparo 755 rpm.

Válvula (1) tempo de fechamento 5s.
tempo de observação 6s.



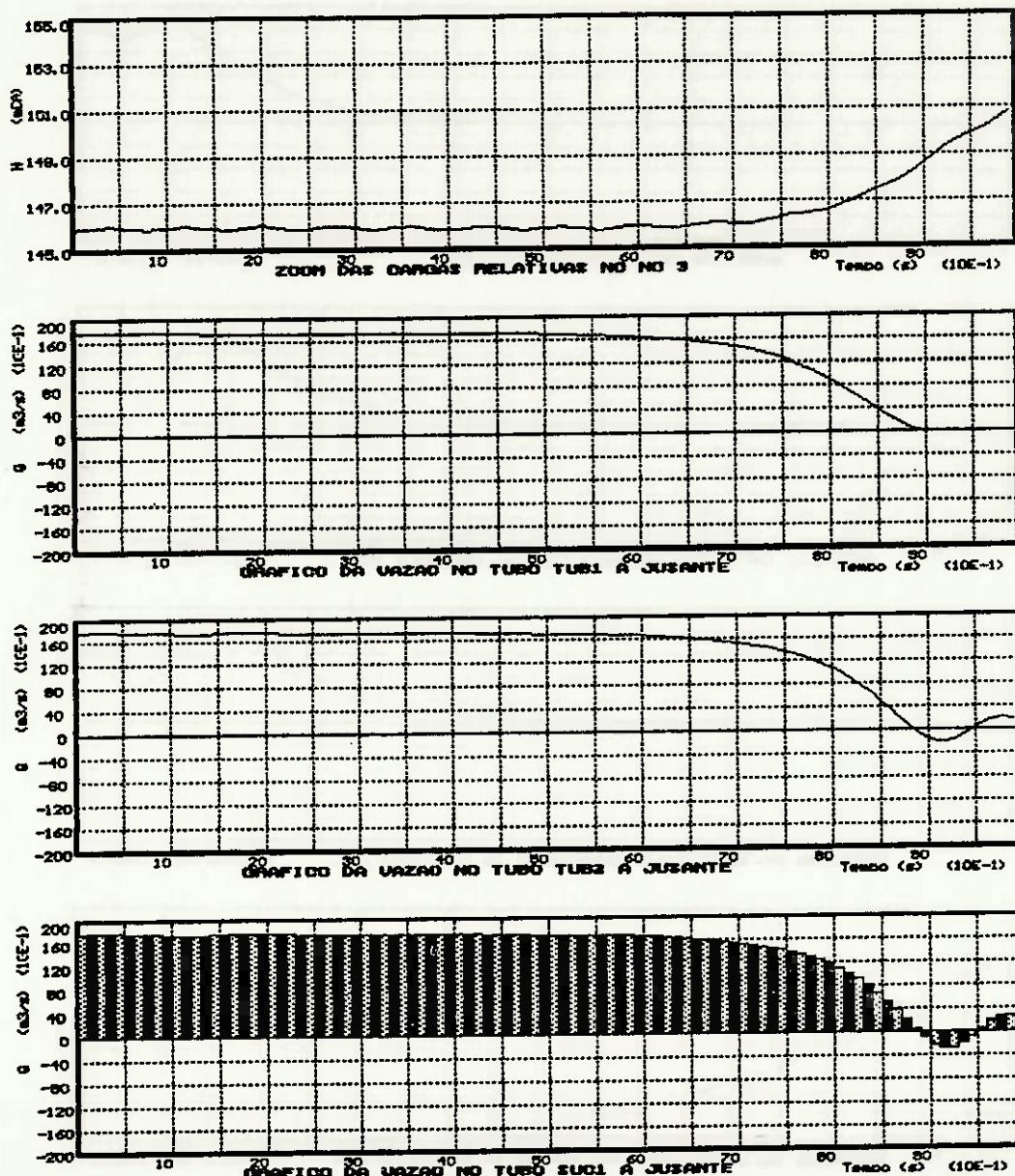
6.2.7 Resultados da 3. Condição de Operação:

Válvula (1) tempo de fechamento 5s



6.2.7 Resultados da 3. Condição de Operação:

Válvula (2) tempo de fechamento 9s



6.2.7 Resultados da 3. Condição de Operação:

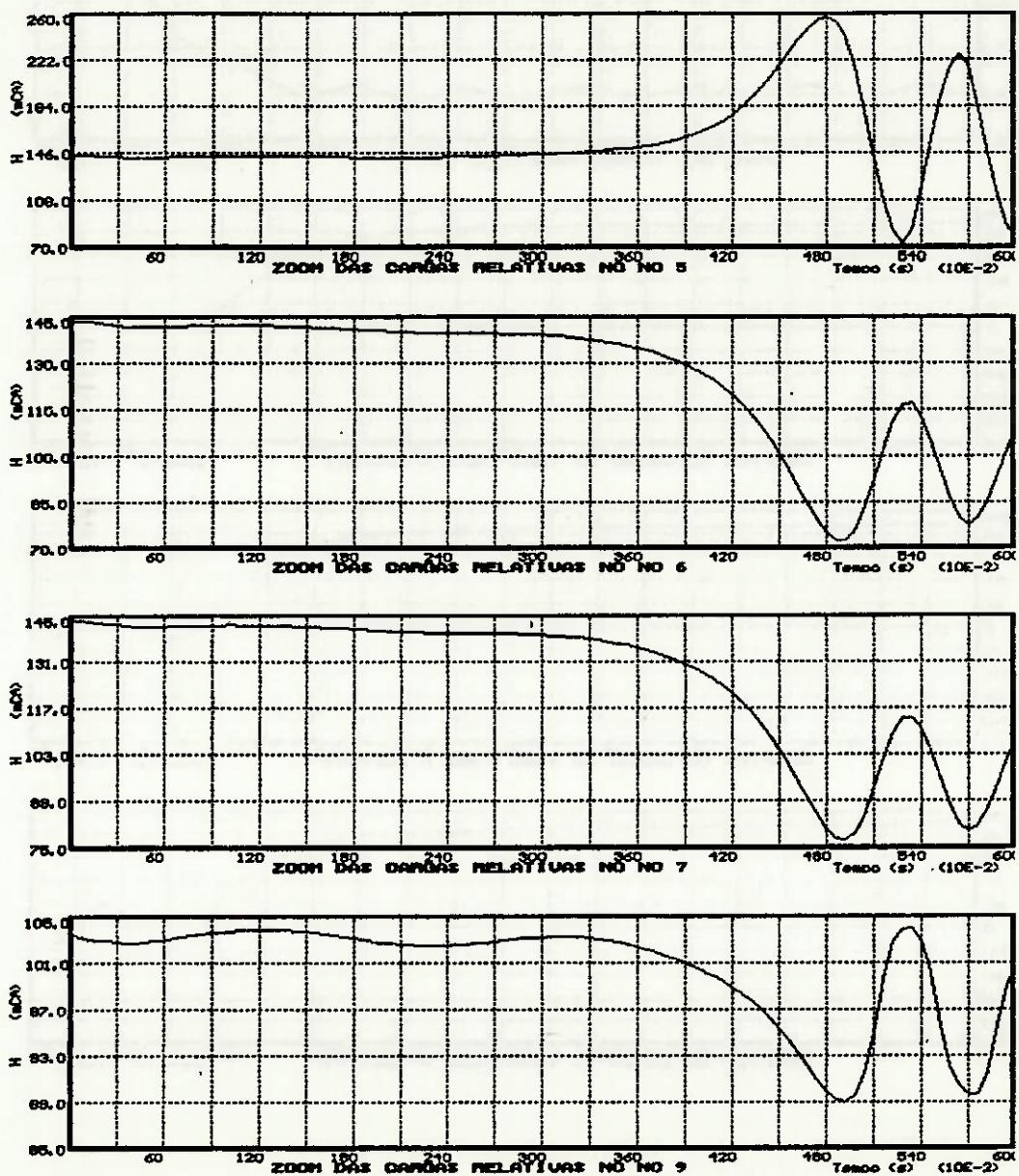
60 % da potência 2400 kW

Manobra da válvula

Condição de disparo 755 rpm.

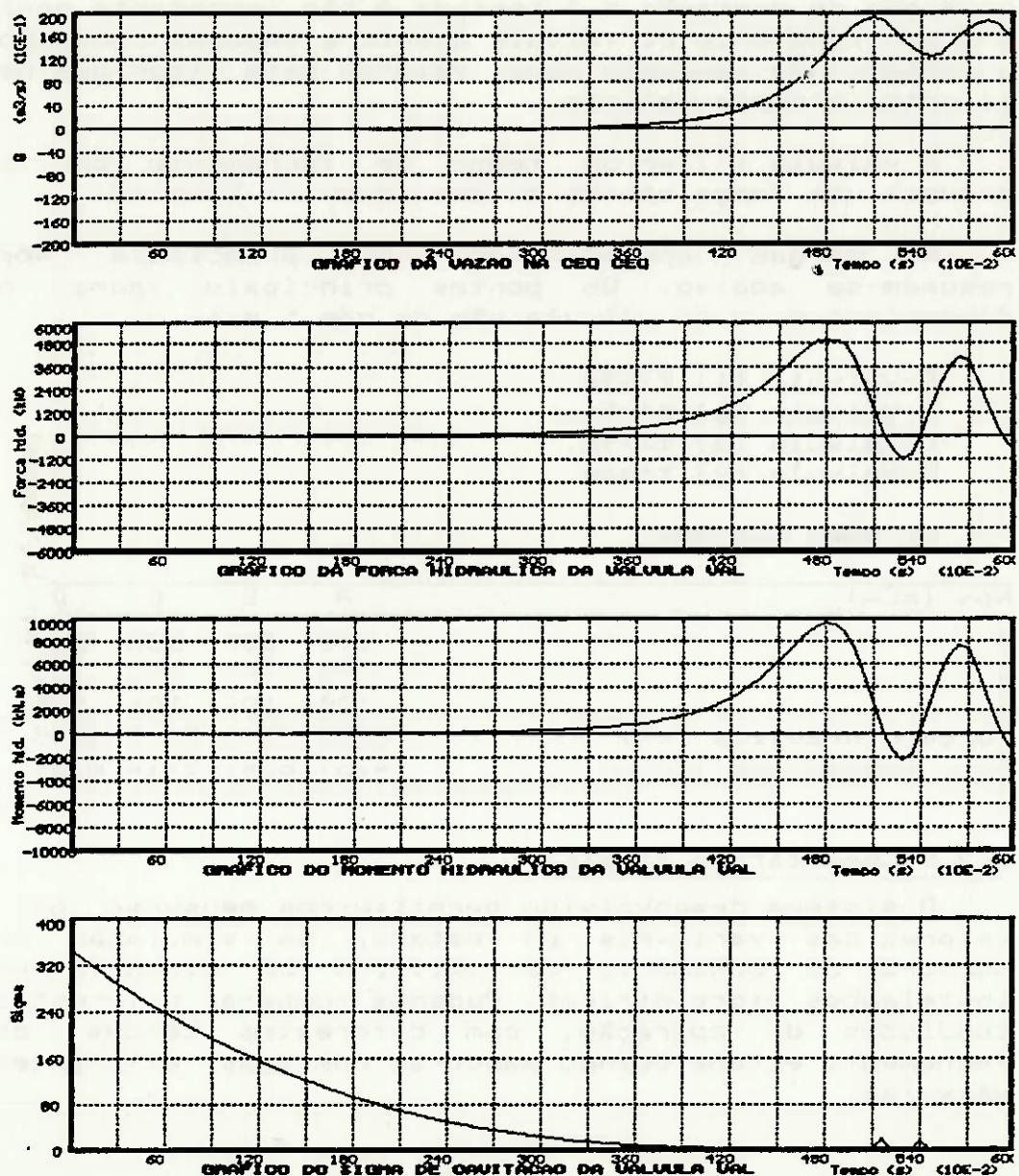
Válvula (2) tempo de fechamento 5s.

tempo de observação 6s.



6.2.7 Resultados da 3. Condição de Operação:

Válvula (2) tempo de fechamento 5s



Para ambas as válvulas partiu-se da premissa inicial de dimensionamento:

$$\frac{S}{D_a} = 0.215 \text{ onde } S = \text{Seção transversal do Obturador}$$
$$D_a = \text{Diâmetro da Válvula}$$

Para os Nós 6 e 9 mostrados nas tabelas, tivemos valores constantes nas simulações. Isto ocorreu, porque a maior diferença entre o comportamento das cargas atuantes no nó, é proporcional a forma da curva de amortecimento originada. Evidentemente que esse valores máximos mostrados correspondem a instantes em que as válvulas não entravam na faixa em que o Kv é fortemente variado.

Obtivemos para ambas válvulas um valor máximo referente ao esforço e um tempo mínimo de fechamento, garantindo para essas condições um dimensionamento mecânico satisfatório.

A válvula (1) que representou uma válvula cujo modelo de ensaio era conhecido, apresentou um comportamento bastante satisfatório, em relação aos resultados encontrados com a válvula (2).

Fixando um referencial de 5s pode-se explicar, de acordo com observações sobre a lei característica, que a válvula n. 1 possui uma curva, em que o valor de sua singularidade (Kv) atinge a casa dos dois dígitos passados apenas 2.05 s (angulo de 49°). A partir desse ponto a curva converge linearmente para valores mais altos atingindo a casa dos 3 dígitos em 3.1 s e a casa dos 4 dígitos em 3.65 s. Logo existe uma suavidade ascendente na curva da válvula (1) testada.

Para o mesmo referencial a válvula (2) apresenta um fechamento significativo a partir dos 4.4 s, ou seja ocorre um crescimento do valor de Kv apenas nos instantes finais (final do fechamento). Trata-se de uma lei insatisfatória a este tipo de instalação.

Assim em projeto pode-se definir finalmente uma válvula que suporte 230 toneladas no obturador. Os limites de garantia, função do índice de cavitação, podem ser delimitados com a ajuda dos gráficos respectivos para as condições de manobra impostas.

7.1 INSTALACOES TESTADAS

7.1.1 Dados Iniciais:

Existe uma grande variedade de instalações hidráulicas, que ao longo de anos recebem modificações para atender outros objetivos. Essas instalações, quando modernizadas, operam com outras variáveis que são significativas no sistema.

Para esses casos, uma análise cuidadosa das frequências de ressonância faz-se necessário, para prevenir tensões extremas nos componentes da instalação.

Os fenômenos de oscilação em turbinas Francis são particularmente conhecidos devido a ocorrência de um vórtice no tubo de sucção. Esse caso foi considerado no capítulo anterior em certas condições de operação onde se aproximou o fenômeno por uma excitação harmônica do tipo $\Delta Q \cdot \text{sen}(w.t)$. Os termos ΔQ e w dependem como se viu das condições de operação da turbina.

Para ilustrar aplicação do modelo desenvolvido simulamos uma instalação didática composta de um reservatório, um tubo e uma válvula fechada. Com a variação da frequência da vibração forçada podemos determinar os modos naturais de vibração.

A lei de excitação é aplicada imediatamente antes da válvula nº 3.

Reservatórios: 1. Nível operacional : 1000 mCA

Nível máximo : 1100 mCA

Nível mínimo : 900 mCA

Área : 10000 m²

7.1.3 Dados Complementares:

Verificamos pelos resultados obtidos que as frequências de ressonância caracterizam o pico do gráfico para o nó 3. Existe um erro na representação do mesmo pois o valor exato da carga na frequência de ressonância corresponde a infinito. Contudo como o SRA , em seu módulo gráfico , une pontos consecutivos, o ponto máximo delimita o intervalo de localização exata do valor procurado.

Essa necessidade foi abordada de modo extensivo neste trabalho, onde procuramos ressaltar os resultados significativos da aplicação do modelo em suas diversas possibilidades.

O simulador apresentado neste trabalho , em sua versão inicial, deverá ser otimizado para proporcionar reduções significativas do tempo de processamento e facilidades ainda maiores na interação com os usuários, através de uma linguagem conversacional que permita a ação em tempo real no controle da rede hidráulica.

O tempo disponível para a realização do trabalho foi principalmente utilizado na validação do modelo numérico (MOC) para a simulação dos três regimes de escoamento.

O sistema foi desenvolvido em um equipamento PC-XT-12MHZ que tem uma memória RAM limitada a 640 Kb acessáveis. A linguagem em que o sistema foi desenvolvido (Turbo Pascal 5.5) apresenta um campo relativamente restrito às variáveis globais e locais. Isso nos mostra a necessidade de se armazenar dados durante o processamento.

Estes dados são convenientemente resgatados para inspeção em blocos bem definidos. Esses blocos refletem as variáveis de estado referentes a um ENO, durante todos os segundos de processamento. Nessas recuperações de dados é importante criar condições para consistências e compatibilizações entre o instante de cálculo e a variável correspondente. Uma recuperação falha pode provocar uma conclusão errônea na observação de um gráfico gerado.

O planejamento inicial do simulador como um todo, deve ser ressaltado. A sua importância fica explícita se considerarmos o tamanho final de todas as unidades componentes. A utilização de recursos de compilação como UNITS, OVERLAYS, bibliotecas INCLUDE incluídas em uma linguagem de desenvolvimento moderna são extremamente necessárias e, portanto, recomendáveis.

Ressaltamos também a importância da verificação da exatidão das equações introduzidas nos programas. As equações tomam uma forma bastante complexa quando escritas em linguagem de programação. Sugere-se que possuam seus fatores previamente calculados e verificados em atenção especial aos termos em módulo e a exponenciação, cuja execução nem sempre é imediata na linguagem utilizada.

A.1 PROJETO LOGICO

A.1.1 Diagrama de Fluxo de Dados (D.F.D.) Nível 1:

O diagrama de fluxo de dados apresentado no capítulo 4, que caracteriza de uma maneira bastante geral o funcionamento do sistema, é "explodido", visando detalhar os processos apresentados. Com o detalhamento dos processos podemos visualizar que um processo origem , definido no nível 0, possui vários processos concatenados que originados do anterior serão chamados de filhos. Os processos do nível 0, agora expandidos, são apresentados em detalhe a cada página . Note que o retângulo maior simboliza um mesmo processo do nível 0, e os processos contidos neste retângulo são as expansões originadas.

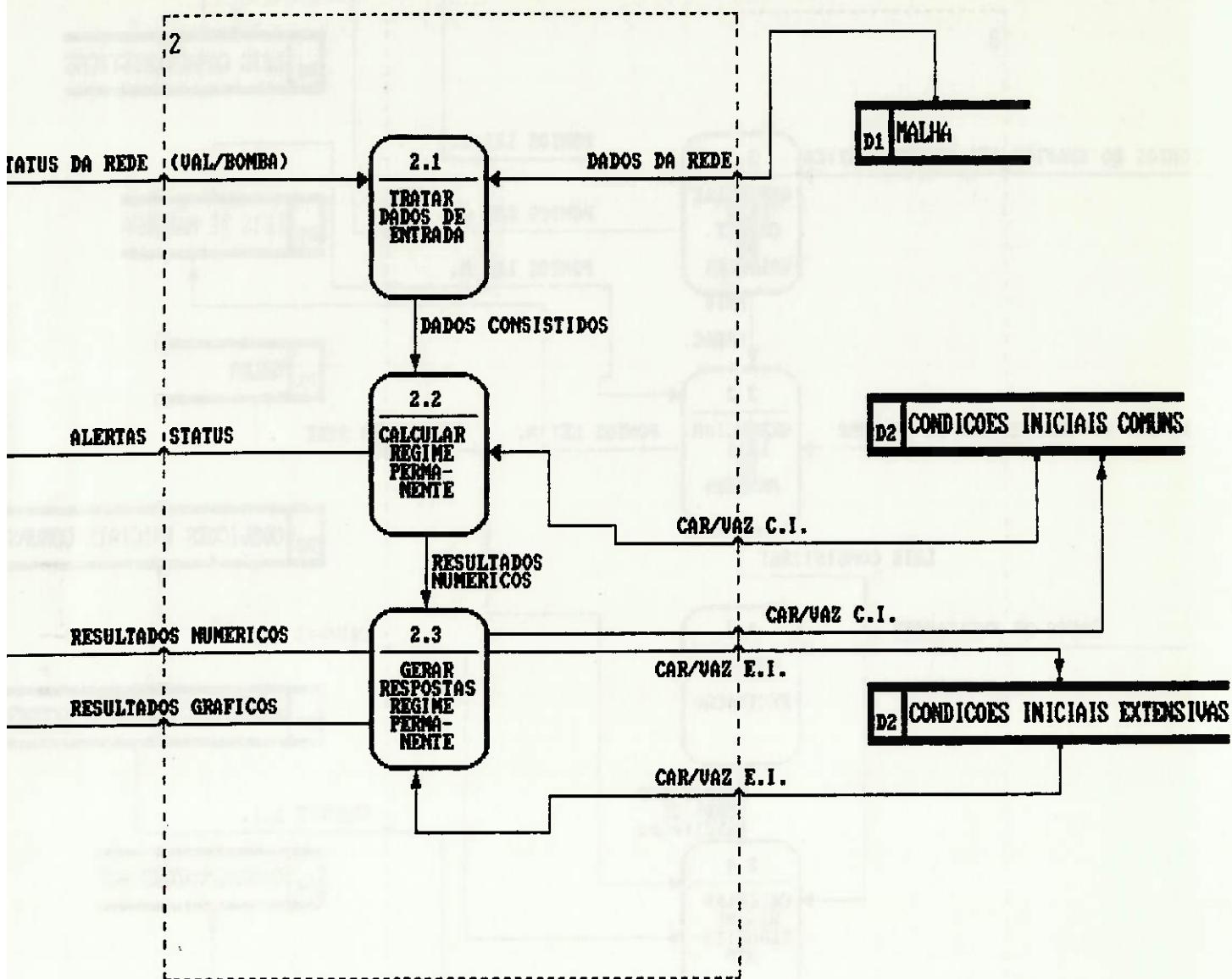
Ater-nos-emos somente as expansões deste primeiro nível, pois "explosões" posteriores, fazem-se desnecessárias para a compreensão do sistema como um todo, acarretando normalmente detalhes fora do objetivo imediato do trabalho.

A explosão do diagrama de fluxo de dados, juntamente com os fluxogramas das rotinas principais de cálculo elucidam o funcionamento do sistema.

A nossa intenção, aqui , não é somente de simples elucidação do modelo lógico empregado na concepção do simulador, mas de "sugestão" para futuros desenvolvimentos e melhorias do mesmo.

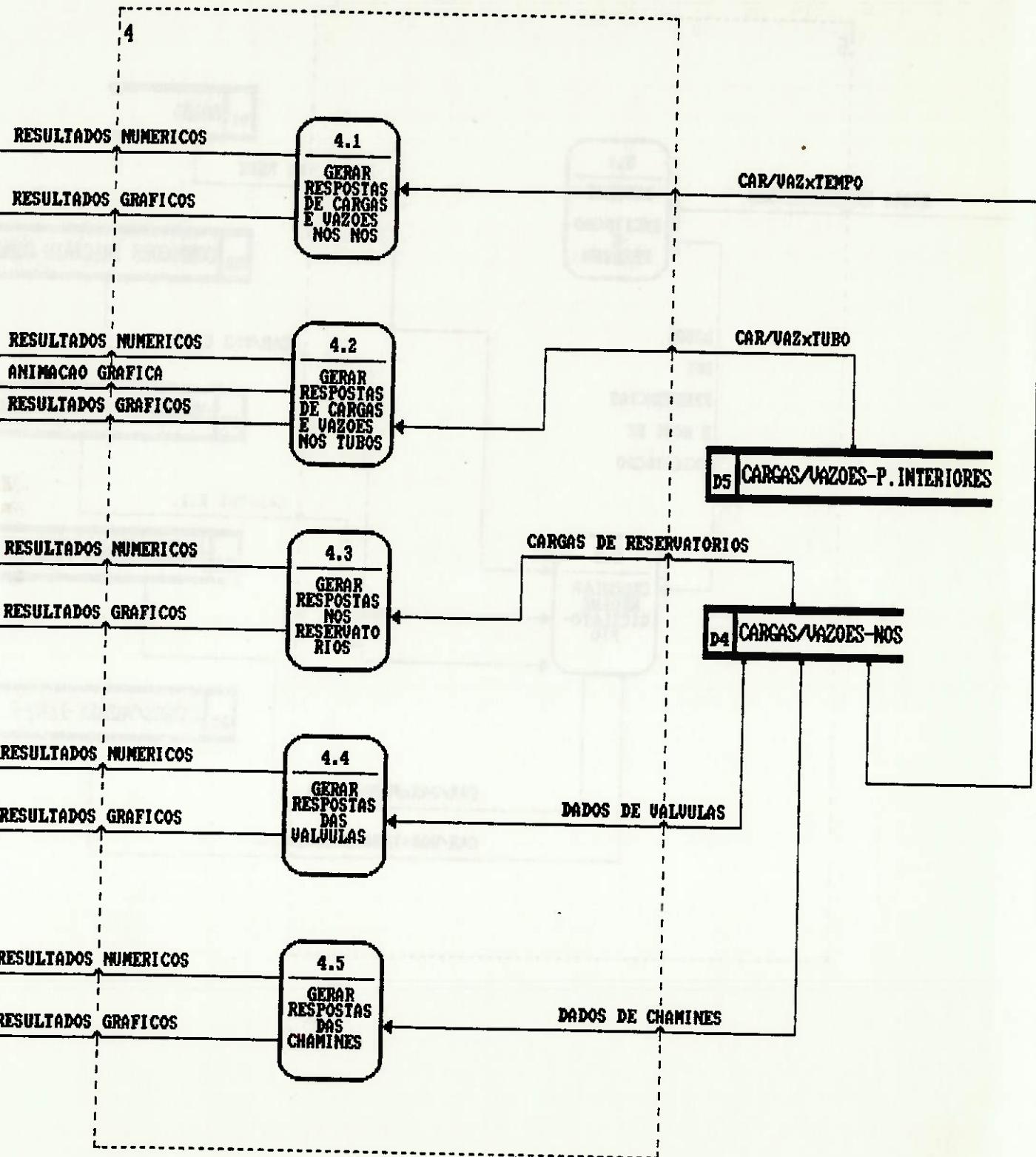
D.F.D. NIVEL 1

EXPANSAO POR PROCESSO



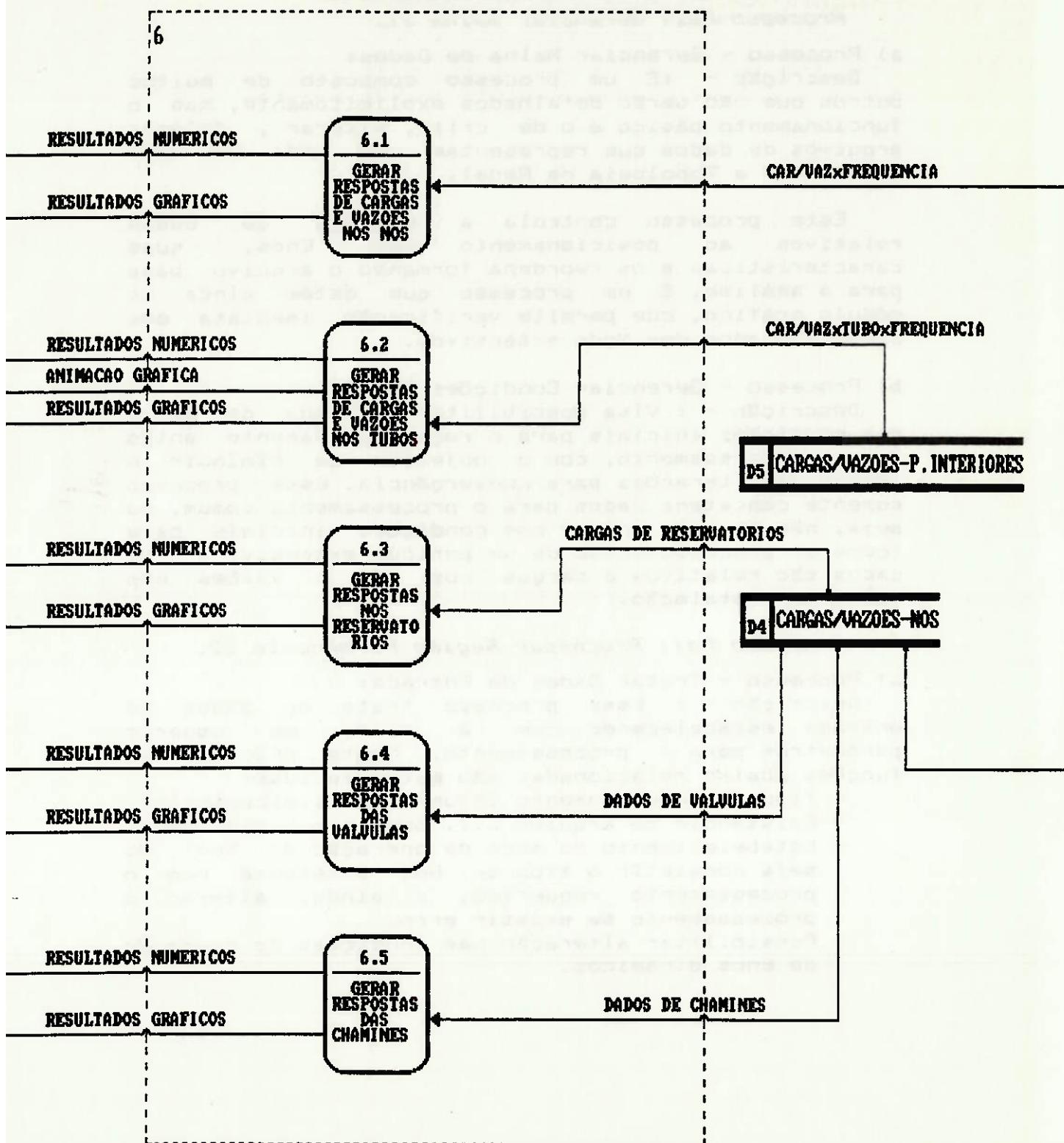
D.F.D. NIUEL 1

EXPANSAO POR PROCESSO



D.F.D. NIVEL 1

EXPANSAO POR PROCESSO



b) Processo - Calcular Regime Permanente:

Descrição - : Formado por processos concatenados de cálculo do regime permanente e processos que direcionam a resposta do cálculo. Basicamente pode-se decidir quanto a convergência ser do tipo:

Normal ou Acelerada para $L_i >> L_s$ onde L =comprimento de tubos. E ainda recebe-se o parâmetro de entrada de tipo de processamento:

- Com parada por demanda: Que estabelece o processamento extensivo a cada unidade de tempo determinada pelos Nods, permitindo variações do estado de Enos dinâmicos.

- Sem parada com Alarme Desligado: Que estabelece um processamento total das demandas com armazenamento de resultados mesmo que reservatórios estejam operando em situação irregular.

- Sem parada com Alarme Ligado: Que estabelece um tipo de processamento em que a situação irregular é constantemente detetada, e, existindo irregularidade o processamento é travado obrigando mudança em Enos dinâmicos. A continuidade é liberada só quando se atingir uma manobra satisfatória.

c) Processo - Gerar Respostas do R.P.:

Descrição - : A função básica do processo é a de tratar os dados gerados de processamentos , comuns ou de controle extensivo, produzindo relatórios ,telas e gráficos. Existem vários processos adjacentes que permitem saídas relativas de cargas, operações , vazões e níveis de reservatórios. Os principais processos concatenados permitem a comparação de estado e operação de Nod x Eno Dinâmico x Reservatório, no tempo.

São obtidas respostas dos cálculos por demanda, de Enos dinâmicos como bombas, válvulas. Também obtemos dados relativos a reservatórios, chaminés, tubos, e um resumo de cargas e vazões a cada demanda na instalação. Produz-se um histórico das respostas durante todo o processamento extensivo incluindo gráficos de cargas, vazões e níveis de reservatórios. numéricos.

- Nível variável com Alarme desligado: A maneira do regime permanente mantém o nível variando, e informa ao final da simulação se os reservatórios saíram da condição de operação adequada.

- Nível variável com Alarme Ligado: A maneira do nível é variado, e o usuário tem a informação sobre a irregularidade no instante certo. Nesse caso o usuário deve mudar a manobra, ou pode processar com alarme desligado para obter a real situação da simulação com a verificação das irregularidades.

Processo Pai : Gerenciar Respostas do Transitorio K33.

a) Processo - Gerar respostas de cargas e vazões nos Nós:

Descrição - : Gráficos e resultados de cargas nos Nós da instalação e vazões a montante e a jusante de tubos são gerados. A base do eixo X é o tempo.

b) Processo - Gerar respostas de cargas e vazões nos Tubos:

Descrição - : Gráficos e resultados de pontos interiores de tubos são gerados. Permite-se a inspeção de uma seção em particular, de todas as seções em um determinado instante e das três variáveis concomitantemente, o que resulta em animação gráfica tanto de cargas quanto vazões em um tubo específico.

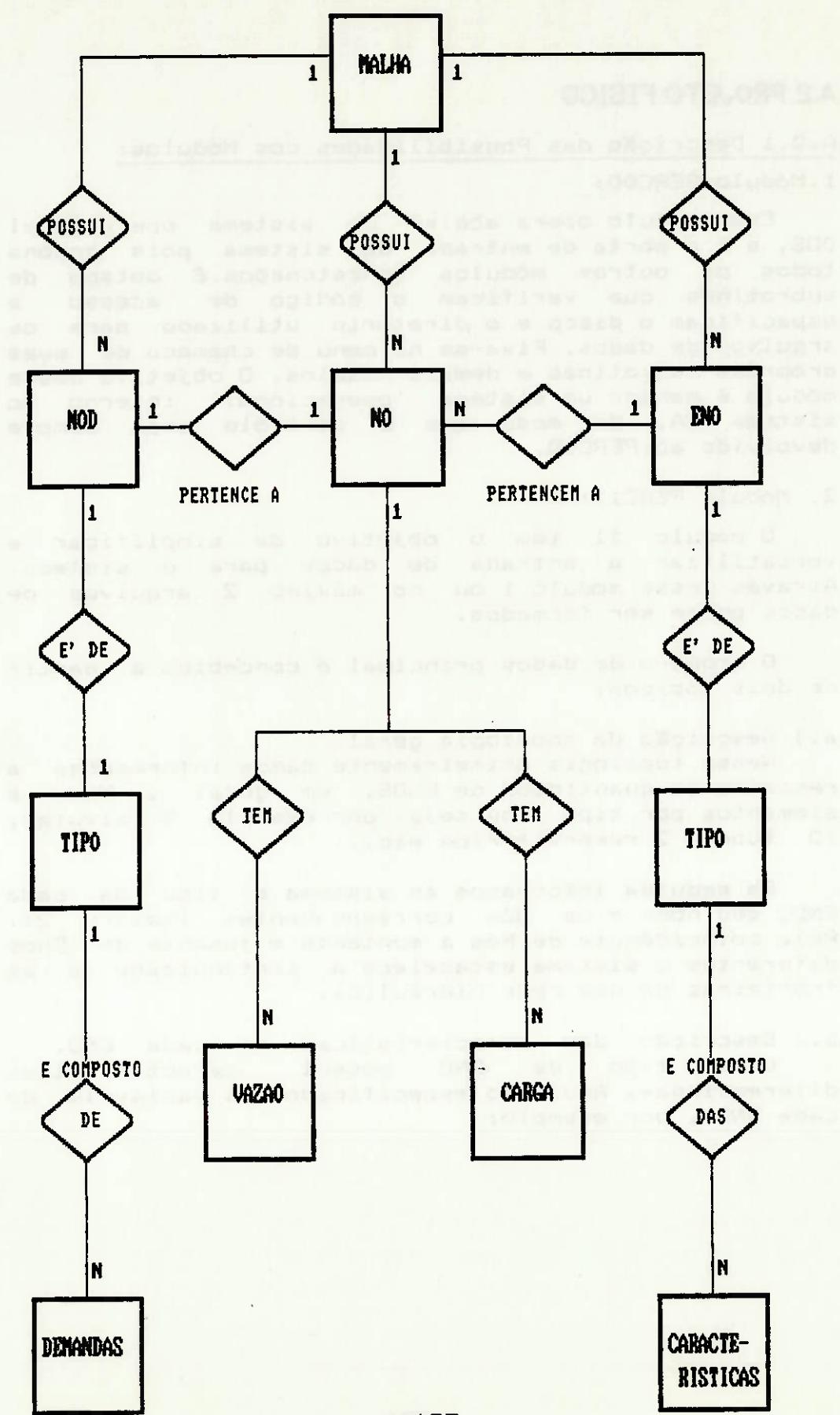
c) Processo - Gerar respostas dos Reservatórios:

Descrição - : A exemplo do 22 gera os resultados dos níveis dos reservatórios que variarão se o processamento 33 permitir.

d) Processo - Gerar respostas das válvulas:

Descrição - : Gera respostas específicas ao dimensionamento da válvula, como dados e gráficos a respeito do momento hidráulico no obturador , força hidráulica, índice de cavitação , coeficientes de descarga, e velocidade de descarga.

Modelo Entidades Relacionamento



Para reservatórios temos:

níveis: operacional (1) (msnm) , mínimo (2) (msnm) e máximo (3) (msnm), além da área (4) (m^2) do mesmo. Esses dados de mínimo e máximo, e área são importantes para processamento tanto em regime permanente quanto transitório, pois serão utilizados no controle dos mesmos.

Para tubos temos:

Comprimento (1) (m), diâmetro (2) (mm), rugosidade (3) ϵ (mm) ou C, perda de carga singular K_s (4), e celeridade do tubo (5) (m/s). Para a rugosidade existe a possibilidade de ser tanto a de Darcy-Weisbach como a de Hazen-Williams, sendo computadas as superiores a 40 como Hazen-Williams. O dado da celeridade possui utilização apenas no cálculo do regime transitório.

Para bombas temos:

N. de bombas em paralelo (1), dados do gráfico como carga de shut-off (2) (msnm) , vazão de rendimento máximo (3) (m^3/s), carga correspondente (4) (msnm) , vazão máxima operacional (5) (m^3/s), carga correspondente (6) (msnm), vazão mínima operacional (7) (m^3/s), diâmetro (8) (mm), coeficiente K_s (9) de cada bomba, rotação base gráfico (10) e rotação de simulação (11) (rpm), rotação de gráfico (12) (rpm). Todos esses dados são utilizados para estabelecimento das cargas e vazões em regime permanente.

Para válvulas temos:

Tipo de válvula (1) podendo atual variar de 1 a 7 correspondendo:

- 1- Válvula de retenção que impede refluxo de fluido .
- 2- Válvula de controle de pressão a montante , que estabelece pressão limite de controle à montante, regulando-se automaticamente para garantia do controle.
- 3- Válvula de controle de pressão à jusante , que possui o mesmo funcionamento da anterior, só que à jusante da válvula.
- 4- Válvula de controle de vazão , que se regula automaticamente garantindo a vazão estabelecida pelo usuário.

O módulo 11 também permite a configuração de arquivo de condições iniciais do tipo comum , ou seja valores de cargas e vazões nos nós para apenas uma demanda no Nod. Esse arquivo possui assim dados que podem ser utilizados como aproximação inicial para o cálculo do regime permanente, que é iterativo e convergente. Isso significa que dados iniciais, próximos dos valores reais, aceleram o cálculo.

Note que os valores serão alterados ao término do cálculo do regime permanente, e os dados contidos neste arquivo são substituídos pelos valores finais calculados.

3.0 Módulo PERC22:

a.) Processamento:

Esse módulo tem como aspectos principais as possibilidades:

- processar uma rede com Nods do tipo Comum.
- processar uma rede com Nods do tipo Extensivos com retroalimentação de dados obtidos a cada unidade de tempo.

Nessa última opção pode-se por exemplo verificar o estado de reservatórios durante e ao final do processamento extensivo.

De acordo com as opções de processamento pode-se alterar condições de estado de válvulas e bombas, no sentido de se garantir vazão a um determinado Nod ou manter reservatórios em estado operacional, uma vez que o programa se encarrega de enviar ao usuário um alerta caso estes últimos estejam fora dos limites de níveis impostos.

O módulo de regime permanente com tempo extensivo é adequado para simular matematicamente uma previsão de manobras em tempo real na operação da rede, fornecendo uma série de resultados gráficos de fácil e rápida compreensão.

Evidentemente deve-se notar, que se dispomos de válvulas de controle na rede, poderemos ter alterações de abertura durante o processamento, sem aviso prévio. Isso ocorre, por exemplo, se uma válvula de controle de pressão, é submetida a uma pressão superior a estabelecida. O seu sensor receberia sinal para manobrá-la. Com esse tipo de processamento pode-se verificar imediatamente se houve, ou não, alteração de abertura desse tipo de válvula no final do processamento.

Além do exposto pode-se dizer que em termos gerais, tal processamento é útil para verificação rápida do que ocorreria com uma instalação após determinado período de operação. Com esse dados pode-se reprocessar Com Parada Por Demanda estabelecendo os pontos onde devemos alterar manobras de ENOS.

3. Sem Parada Com Alame On: Esse tipo de processamento é uma variação dos dois expostos acima. O objetivo principal é o de manter-se uma instalação em estado operacional adequado, realizando-se um mínimo de manobras. O sistema nos informa no período em que ocorrer a irregularidade, qual reservatório está fora de condições de operação , e o volume faltante ou extravasado. O processamento naquele período é travado, obrigando assim, o usuário a alterações de condições de operação de um ENO (bomba, válvula).

Após efetuada a alteração o simulador recalcula o período em que ocorreu a parada. Caso a operação esteja satisfatória, o processamento prossegue para o período seguinte. Em caso contrário um boletim de aviso semelhante ao anterior , aparece, com o valor do volume . Se após uma manobra existir valor retornado então, a operação não foi satisfatória e devemos abrir ou fechar mais uma válvula , por exemplo, ou aumentar-diminuir, desligar-ligar, uma bomba.

A vantagem desse processamento reside em se obter uma sugestão de alteração mínima, que deve ser satisfatória no período de simulação,

Arquivos do tipo Extensivo E.I. servem não só apenas para arquivar os dados relativos ao processamento, mas para alimentar os módulos de cálculo de transiente e oscilatório quando se deseja um desses processamentos.

Arquivos do tipo Comum C.I. permitem acelerar a convergência durante o processamento nesse módulo 22, e, podem também, alimentar os módulos transitório e oscilatório. No caso do transitório podem ser utilizados para verificar e simular a instalação de várias formas, mas sempre respeitando a posição inicial do obturador das válvulas (Kvo, Cdo), em que esses resultados foram obtidos. Isto significa que para o transiente, a posição inicial da válvula é a estabelecida no regime permanente.

4.0 Módulo PERC33:

Esse módulo simula o regime transitório em uma instalação hidráulica. Isso é obtido com a simulação de operações dinâmicas de manobras em válvulas de uma rede. As válvulas são manobradas a partir de uma posição inicial estabelecida no processamento em regime permanente.

O módulo possui outras três subdivisões que permitem gerenciar e consistir leis características ou de manobra para válvulas e configurar ainda Nods de excitação do tipo $QD = A + Bt + Ct^2 + D\sin(2\pi xf + \phi)$. Esses recursos possibilitaram a verificação das simulações dinâmicas em uma usina hidrelétrica (Capítulo 6).

a.) Definicao de Leis:

Esse submódulo possui 3 atribuições principais:

- Gerenciar Leis Características.

- Gerenciar Leis de Manobra.

- Associar a cada válvula de uma rede uma lei de manobra e eventualmente uma lei característica. Realiza a consistência da lei de manobra com a posição inicial, ou seja o valor de Kvo com o qual a válvula permaneceu durante o regime permanente.

Gerenciar Leis de Manobra: Essa rotina se encarrega de montar as leis da variação de θ em função do tempo t . Automaticamente o tempo inicial deve ser 0 e o final de manobra do ENO, o plotado no último ponto. Existe a necessidade de se colocar para $t=0$ a posição exata da válvula em que foi calculado o regime permanente.

Para sabermos esse dado foi prevista uma subrotina auxiliar que, especificada a lei característica, realiza o processo inverso, ou seja, tendo o valor de K_v do regime permanente, obtemos por interpolação o valor de θ que é agora entrado como posição inicial na lei de manobra.

Esse processo é muito importante no sentido de se compatibilizar os cálculos realizados no regime permanente com esse do transitório. Essas leis são gravadas em disco com a extensão .LEM .

Associação de Leis às válvulas: Esse submódulo é o que efetivamente associa uma lei característica, e, ou uma lei de manobra a uma determinada válvula. São consistidos, o valor inicial estabelecido pela lei de manobra e o valor inicial do regime permanente. Além das opções de leis por pontos, temos outras alternativas de definir leis características:

1. Lei para Válvula borboleta: $K_v = 0.14\theta^{0.12}$
2. Lei para Válvula gaveta : $K_v = 220.13\theta^{-9.16xh/Do}$
3. Lei para Válvula Loud. : $K_v = 187.14\theta^{-7.03xh/Do}$
4. Lei para Válvula esférica : $K_v = 0.06\theta^{0.15}$
5. Lei conjunta : $\tau = (1-t/t_f)^\epsilon$ onde parâmetros ϵ , K_{vo} , t_f e t de observação são definidos para possibilitar variação matemática dessas leis de aproximação.

As leis de 1,2,3,4 necessitam de uma lei de manobra escolhida onde a posição de fechamento é o angulo de 90° . Para leis de interpolação gráfica 6,8 o angulo de fechamento é 0° , e também necessitam obviamente de uma lei de manobra. As leis 7,5 são ambas semelhantes não necessitando de lei de manobra $\theta = f(t)$, sendo uma matemática e uma de interpolação gráfica.

2. Níveis variáveis com alarme Off: Do mesmo modo que o 22 o nível, varia durante o processamento sendo informado ao usuário ocorrência de irregularidade na condição de operação dos reservatórios. Normalmente como a área dos reservatórios é grande, a variação de nível durante os segundos de manobra não é significativa.
3. Níveis variáveis com alarme On: Os níveis variam contudo com o alarme ligado o programa trava o processamento caso os níveis estejam irregulares. É informado ao usuário que a lei de manobra está incorreta.

Com a opção feita com relação ao tipo de processamento o sistema sugere um Δt de cálculo com o qual ele contabiliza (ver fluxograma projeto lógico) os valores das divisões dos tubos e iterações. Em caso de necessidade altera-se esse valor.

Durante o processamento são criados e acessados dois arquivos que recebem um número característico definido também antes do processamento. Isto diferencia arquivos de processamentos diferentes entre si, o que permite simulação de uma mesma instalação com válvulas ou leis diferentes, e compará-las a seguir no módulo PERCK33.

Os arquivos criados possuem extensões .TRT para dados a respeito de Nós, e .INT para pontos interiores aos tubos.

d.) Processamento Conjunto Regime Extensivo:

Uma análise realizada no regime permanente em tempo extensivo determina mudanças nas posições de válvulas.

Com o regime transitório acoplado pode-se entrar na opção de definição de demanda, quando da utilização de arquivos E.I., e o programa estabelece automaticamente as demandas onde ocorreram mudanças de posições de válvulas. O cálculo é efetuado para todos os períodos em que ocorreram mudança de posição determinadas no regime permanente. A posição inicial é a definida no período (extensivo) anterior e a final é a do período atual. O objetivo é validar a operação determinada no R.P. através da comprovação dos efeitos dinâmicos obtidos no transiente.

Cargas nos Pontos Interiores: São mostrados a variação de cargas durante o tempo de observação designado, para os pontos interiores do tubo escolhido.

Gráfico das Cargas por Tempo no Tubo: Após escolhido o tubo de observação opta-se por um instante de simulação. O sistema busca os valores respectivos e plota o gráfico da linha de cargas ao longo do tubo para cada seção de cálculo.

Gráfico das Cargas por Seção no Tubo: Nessa opção após termos determinado o tubo de observação, a seção interior, que tem sua variação de carga plotada em função do tempo.

Gráfico Animado HxtxSeções do Tubo: É a junção das três variáveis plotadas em separado (duas a duas) das opções anteriores, que dão como resultado uma animação na tela, onde é mostrado a variação das cargas ao longo do tubo durante a duração do fenômeno.

Vazões nos Pontos Interiores: Mostramos as vazões por seção nos tubos escolhidos.

Gráfico das Vazões por Tempo no Tubo: Essa opção permite mostrar o gráfico das vazões em um tubo em um determinado instante.

Gráfico das Vazões por Seção no Tubo: Mostramos a variação das vazões no tempo, para uma seção interna ao tubo previamente escolhida. Seções externas, que coincidem com os nós também podem ter sua variação plotada.

Gráfico Animado QxtxTodas as Seções do Tubo: Trata-se da junção dos modos de apresentação acima. Utilizamos as variáveis, Seções x Vazões variando no instante t com incremento Δt (de processamento).

c.) Níveis dos Reservatórios:

Essa opção permite verificar os valores dos níveis numericamente e graficamente utilizando-se valores relativos e gerais

Gráfico das Vazões na Chaminé: É mostrado a variação da vazão que penetra ou deixa a chaminé de equilíbrio em função do tempo.

O Módulo PERC44:

Esse módulo utiliza a mesma rotina de cálculo do regime transitório e configura-se numa opção de pesquisa e análise de respostas para processamentos que simulam vibrações forçadas nesses sistemas. É possibilitado pesquisa de frequências para avaliação da frequência de ressonância. sistema. Recordando as funcionalidades do módulo PERC33, tínhamos além da opção de simular uma manobra, alternativa de concatenar uma vibração forçada através de um Nod de excitação previamente definido. Aqui essa última opção de simular um Nod de excitação também funciona de maneira idêntica, mas para esse módulo acoplamos um 'loop' a mais permitindo a variação da frequência f na busca dos estados de ressonância. Esse módulo possui 3 divisões:

Definição de Excitação e Frequências de Pesquisa: Do mesmo modo que a subrotina de mesmo nome no módulo 33 definimos os parâmetros para lei de excitação do tipo $QD = A + Bt + Ct^2 + D\sin(2\pi\omega t + \phi)$. Contudo é definida a faixa de frequências que devem ser avaliada e o intervalo dessa faixa, para pesquisa automática. Assim o termo último do Nod de excitação é variado.

Processamento: Existem dois tipos de processamento possíveis que compreendem:

- Pesquisa de Frequências: no qual o f é variado.
- Frequência Fixa.

Para o primeiro tipo de processamento um tempo de observação é determinado. Ao final de cada processamento a frequência do Nod varia dentro da faixa pré-estabelecida, sendo recolhidos apenas os valores das variáveis de estado máximos e mínimos para nós e pontos interiores.

O segundo tipo de processamento é idêntico ao do módulo 33 somente com a presença do Nod de excitação, formando inclusive os mesmos tipos de arquivos.

Leitura de Arquivos: Arquivos de entradas dos módulo quando em processo de leitura tem sua existência verificada previamente no diretório/disco especificado pelo módulo 00, não causando assim interrupções indesejáveis.

Saída de Resultados: Todas as telas dos módulos que respondem ao usuário resultados possuem opção para saída completa dos dados para impressora , consistindo se a mesma está ou não ligada e pronta para inicio de impressão. São impressos os resultados por coluna com salto automático no picote abrindo um cabeçalho a cada página nova.

Com a impressora selecionada no modo gráfico há a opção de utilizar-se o print-screen do teclado e imprimir as telas de apresentação dos resultados uma a uma com a moldura disposta na tela.

Saída de Gráficos: Os gráficos obtidos em todas as subrotinas no sistema são sempre mostrados na tela segundo duas curvas selecionadas. Temos assim as opções para cada gráfico de visualização em uma curva XxYz ou de um histograma, de duas tonalidades. A impressão do mesmo modo pode ocorrer por tecla print-screen ou utilizando-se os recursos de impressão que os módulos dispõe realizando-se 3 opções:

1. Desidade gráfica: Simples, Dupla-draft, Dupla-High, Quadrupla.
2. Tamanho relativo dos Gráficos: Grande, pequeno, e médio.
3. Posição na Impressora: Coluna de impressão para possibilitar dois ou mais gráficos em uma mesma faixa de papel.

BIBLIOGRAFIA

- [1] KOELLE, E.: Transientes Hidráulicos em Condutos forçados - Congresso Internacional sobre Casos e Acidentes em Sistemas Fluidos - Tese de Livre-Docência. 1. edição 1989.
- [2] KOELLE, E.: Notas de Aula . 1989.
- [3] WYLIE E.B.,STREETER,V.L.: Fluid Transients, FEB Press. Ann Arbor, USA, 1983.
- [4] PEREIRA, A.J.: Equilíbrios Hidráulicos de Sistemas pelos Métodos Estático e Elástico. Tese de mestrado. Portugal 1987.
- [5] CHAUDHRY, M.H.: Applied Hydraulic Transients, Van Nostrand Reinhold, 2. edição 1987.
- [6] PARMAKIAN, J.: Waterhammer Analysis, Dover publications, New York USA. 1. edição 1963.
- [7] SHAMIR, U.: Real-Time Control of Water Supply Systems, Paper. Israel.
- [8] SHIMADA, M.: Time-Marching Approach for Pipe Steady Flows, Paper published in th Journal of Hydraulic Engineering. Vol 114. n.11 November 1988.
- [9] SATTLER H.,WINKLER ST.: Druckstoßberechnung für Wasserkraftanlagen mit selbsttätig schließenden Absperrorganen, Paper in ÖZE Jg.41 Heft 3 März 1988.