

TESE

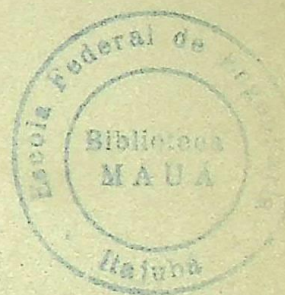
760

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

" ESTUDO DE TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS
ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO ANALÓGICO-DIGITAL
DE MODELOS NÃO LINEARES"

OSWALDO HONORATO DE SOUZA JÚNIOR



ORIENTADOR:

PROF. DR. AFONSO HENRIQUES MOREIRA SANTOS

CO-ORIENTADOR:

PROF. DR. SEBASTIÃO VARELLA

ITAJUBÁ-MG

1994

RESUMO

O estudo de transitórios hidráulicos em usinas hidrelétricas faz-se necessário, em função dos grandes distúrbios que ocorrem normalmente nessas usinas, causando grandes variações de frequência e potência no sistema elétrico, e grandes variações de pressão e subpressão no sistema hidráulico. Utilizou-se neste trabalho do método de simulação analógica não linear. A simulação é desenvolvida através de modelos matemáticos analógicos das equações que regem o fenômeno de transitórios bem como de modelo matemático para fechamento de um sistema com válvula ou mesmo de um conjunto distribuidor e rotor de uma turbina hidráulica. A simulação é executada utilizando-se de programas comerciais disponíveis no mercado.

Dentro deste amplo contexto, este trabalho propõe o estudo de um sistema hidráulico discretizado, com ênfase na análise de parâmetros hidráulicos.

Para a comprovação do método foram efetuadas simulações de exemplos da literatura elaborados através do método das características, bem como simulações de exemplos específicos compreendendo pequenas centrais, banco de ensaio de transitórios e turbinas hidráulicas de grande porte.

ABSTRACT

The study of hydraulic transients in hydroelectric power plants is important because of disturbances that often occur. These disturbances cause great frequency and power variations on the electrical system as well as great pressure and subpressure variations on the hydraulic turbine system. In this work, a method of non-linear analogic simulation is utilized. The simulation is developed using analogic mathematical models of the equations that govern the phenomenon of hydraulic transients as well as a mathematical model for the closing of a valve system or even for the closing of a wicket gate runner set of a hydraulic turbine. The simulation is performed using analogic simulation computer programs available in the market.

In this wide context, this work proposes the study of a discretized hydraulic system with emphasis on the analysis of hydraulic parameters.

In order to validate the analogic simulation method, literature examples solved using the method of characteristics are simulated here. Also, the present method is applied to problems in small power plants, as well as to transients test rig and large hydraulic turbine problems.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Afonso Henriques Moreira Santos pela amizade e orientação deste trabalho;

Ao Prof. Sebastião Varella, pela orientação durante todo o curso e pela co-orientação deste trabalho;

Ao Prof. Geraldo Lúcio Tiago Filho, pela amizade e apoio durante o período de trabalho;

Ao Prof. Hélio Mokarzel, pela amizade e apoio durante todo o período do curso, principalmente nos assuntos de computação;

Aos demais professores do curso de pós-graduação pela amizade e dedicação nas referidas disciplinas;

Ao Prof. Lúcio Benedito Rennó Salomon, pelo apoio durante o período de realização deste trabalho em Brasília-DF;

À Eletronorte - Centrais Elétricas do Norte do Brasil, que me propiciou a participação nesse curso de mestrado;

Ao Rafael, estagiário da Copel em engenharia, que elaborou os desenhos deste trabalho;

À minha família em especial, Mônica, Lara e Nataly, que sempre estiveram juntos nos momentos difíceis que enfrentei durante esse período.

CONTEUDO

RESUMO	1
SINOPSE	2
RESUMO EXECUTIVO	3
INTRODUÇÃO	4
JUSTIFICATIVA	5
OBJETIVOS	6
LISTA DE FIGURAS, QUADROS E TABELAS	8
ABSTRACT	10

Ao meu pai (in memoriam) que ainda me acompanhou durante o início do curso, e a minha mãe pelo carinho e apoio de sempre.

CONTEÚDO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
AGRADECIMENTOS	3
DEDICATÓRIA	4
CONTEÚDO	5
ÍNDICE	6
LISTA DE FIGURAS, QUADROS E TABELAS	8
SIMBOLOGIA	10

ÍNDICE

CAPITULO 1 - GENERALIDADES SOBRE TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

1.1 - INTRODUÇÃO.....	13
1.2 - CAUSAS DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS.....	16
1.3 - DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS PARA UM ESCOAMENTO.....	17
1.3.1 - PERMANENTE E NÃO PERMANENTE.....	17
1.3.2 - UNIFORME E NÃO UNIFORME.....	17
1.3.3 - TRANSITÓRIO, TRANSIENTE OU GOLPE DE ARIETE.....	17
1.3.4 - OSCILATÓRIO, PERIÓDICO OU PULSATIVO.....	17
1.4 - PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE PRESSÃO EM UM SISTEMA HIDRÁULICO..	17
1.5 - CELERIDADE DAS ONDAS DE PRESSÃO.....	20
1.6 - TEMPO DE REFLEXÃO DA ONDA NO CONDUTO.....	21

CAPITULO 2 - EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS PARA O ESCOAMENTO TRANSITÓRIO

2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	23
2.2 - EQUAÇÃO DO MOVIMENTO.....	23
2.3 - EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE.....	25
2.4 - CELERIDADE DAS ONDAS EM UM MEIO FLUIDO FINITO.....	26
2.4.1 - TUBULAÇÕES DE PAREDE FINA.....	27
2.4.2 - TUBULAÇÕES DE PAREDE GROSSA.....	27
2.4.3 - TÚNEIS CIRCULARES.....	28
2.4.4 - TÚNEIS CIRCULARES EM AÇO.....	28
2.4.5 - TÚNEIS DE CONCRETO.....	28
2.4.6 - TÚNEIS COM SEÇÃO RETANGULAR OU NÃO CIRCULARES.....	28

CAPITULO 3 - O MÉTODO DE SIMULAÇÃO ANALÓGICA NÃO-LINEAR

3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	30
3.2 - FORMA SIMPLIFICADA DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS.....	30
3.2.1 - EQUAÇÃO DO MOVIMENTO.....	30
3.2.2 - EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE.....	30

3.3 - FORMA ADIMENSIONAL DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS.....	31
3.4 - MODELOS ANALÓGICOS BÁSICOS PARA AS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS..	33
3.5 - CIRCUITO ANALÓGICO PARA UM TRECHO DISCRETIZADO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO.....	34
3.6 - MODELO ANALÓGICO PARA UM TRECHO DISCRETIZADO DE UM HIDRÁULICO.....	35
3.7 - MODELO NÃO LINEAR DE UMA TURBINA HIDRÁULICA.....	35
3.8 - DISCRETIZAÇÃO DO SISTEMA HIDRÁULICO.....	41

CAPITULO 4 - APLICAÇÕES DO MODELO

4.1 - COMPARAÇÃO DO MODELO A RESULTADOS OBTIDOS NA LITERATURA PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS.....	42
4.1.1 - EXEMPLO PROPOSTO POR CHAUDRY.....	42
4.1.2 - EXEMPLO PROPOSTO POR STREETER.....	48
4.2 - APLICAÇÃO A UM BANCO DE ENSAIOS DE GOLPE DE ARIETE.....	58
4.3 - ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS NA PEQUENA CENTRAL DE VÉU DAS NOIVAS.....	65
4.4 - ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS NA GRANDE CENTRAL HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ.....	74

CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 - CONCLUSÕES.....	88
5.2 - RECOMENDAÇÕES.....	89

APÊNDICE A - MODELOS MATEMÁTICOS DE SISTEMAS FÍSICOS E SIMULAÇÃO DIGITAL DE MODELOS ANALÓGICOS.....	90
--	----

APÊNDICE B - CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ.....	96
--	----

BIBLIOGRAFIA.....	100
-------------------	-----

LISTA DE FIGURAS, QUADROS E TABELAS

FIGURAS:

- 1.1 - Sequência de propagação das ondas de pressão após o fechamento instantâneo da válvula
- 1.2 - Oscilação de pressão na válvula sem atrito
- 1.3 - Oscilação de pressão na válvula com atrito
- 2.1 - Diagrama para determinação da equação do movimento
- 2.2 - Volume de controle para a equação da continuidade
- 3.1 - Modelo básico para a equação do movimento
- 3.2 - Modelo básico para equação da continuidade
- 3.3 - Circuito analógico para um trecho discretizado de tubulação
- 3.4 - Modelo analógico para um trecho discretizado de tubulação
- 3.5 - Modelo analógico da turbina
- 4.1 - Esquema hidráulico proposto por Chaudry
- 4.2 - Curva de fechamento do exemplo Chaudry
- 4.3 - Circuito analógico para o exemplo Chaudry
- 4.4 - Modelo analógico para o exemplo de Chaudry
- 4.5 - Resultado da simulação do exemplo Chaudry
- 4.6 - Esquema proposto por Streeter
- 4.7 - Curva de fechamento do exemplo Streeter
- 4.8 - Circuito analógico para o exemplo Streeter
- 4.9 - Modelo analógico para o exemplo Streeter
- 4.10- Resultado da simulação do exemplo Streeter
- 4.11- Resultado da simulação do exemplo Streeter com onze trechos
- 4.12- Resultado da simulação do exemplo Streeter através do método das características[2]
- 4.13- Esquema de um banco de ensaios
- 4.14- Curva de fechamento do banco de ensaios
- 4.15- Circuito analógico do banco de ensaios
- 4.16- Modelo analógico completo para o banco

- 4.17- Resultado da simulação do banco
- 4.18- Resultado de um ensaio real do banco
- 4.19- Esquema da usina Véu das Noivas
- 4.20- Curva de fechamento de Véu das Noivas
- 4.21- Circuito analógico de Véu das Noivas
- 4.22- Modelo analógico de Véu das Noivas
- 4.23- Resultado da simulação de Véu das Noivas
- 4.24- Resultado da simulação de Véu das Noivas pelo método das características[2]
- 4.25- Esquema da Usina Hidrelétrica de Tucuruí
- 4.26- Circuito analógico da UHE-Tucuruí
- 4.27a- Modelo analógico da UHE-Tucuruí (parte1)
- 4.27b- Modelo analógico da UHE-Tucuruí (parte2)
- 4.27c- Modelo analógico da UHE-Tucuruí (parte3)
- 4.28- Curva de fechamento da UHE-Tucuruí
- 4.29- Resultado da simulação da UHE-Tucuruí
- 4.30- Resultado de uma rejeição de carga de 355MW da Turbina
- A.1a- Sistema mecânico
- A.1b- Sistema elétrico
- A.2 - Circuito elétrico L-R-C
- B.1 - Corte da tomada de água e casa de força da UHE-Tucuruí

QUADROS:

- 4.1 - Listagem do arquivo do exemplo Chaudry
- 4.2 - Listagem do arquivo do exemplo Streeter
- 4.3 - Listagem do arquivo do banco de ensaios
- 4.4 - Listagem do arquivo para Véu das Noivas
- 4.5 - Listagem do arquivo da UHE-Tucuruí

TABELAS:

- 4.1 - Parâmetros para a simulação da UHE-Tucuruí
- 4.2 - Função $\bar{Q}(y)$
- 4.3 - Função $\bar{Q}/\bar{h}(y)$
- A.1 - Analogia sistema mecânico com sistema elétrico
- B.1 - Parâmetros do projeto da adução da UHE-Tucuruí

SIMBOLOGIA

a	celeridade da onda de pressão
A	área
B	largura da seção retangular na equação 2.14
C_1	constante relacionada ao engastamento do tubo
C	capacidade ou capacitância na equação 3.11
d	derivada total
D	diâmetro
e	espessura
E	módulo de elasticidade do material
E_r	módulo de elasticidade da rocha
f	fator de atrito
f	frequência na equação 3.14 e 3.15
F	representa função nas equações 3.14 e 3.15
g	aceleração da gravidade
\bar{h}	altura adimensional
h_e	altura estática
\bar{h}_r	altura residual adimensional
H_o	altura de referência
H	altura
H_d	queda líquida disponível
H_1	queda líquida em regime permanente
k	compressibilidade da água
L	comprimento
L	inertância ou tempo de inércia (t_w) na equação 3.9
M	momento de torque
M_o	momento inicial
$M_y(Y, H_1)$	função não linear do momento
p	pressão
\bar{q}	vazão adimensional
$ \bar{q} $	módulo da vazão adimensional
Q_o	vazão de regime
\bar{Q}_o	vazão de regime adimensional
Q	vazão

\bar{Q}	vazão adimensional
\bar{Q}_t	vazão total adimensional
$\bar{Q}(y)$	função adimensional da vazão para abertura y
$Q_y(Y, H_1)$	função não linear da vazão
$\bar{Q}/\bar{h}(y)$	função não linear da vazão em relação a altura para abertura y
$ Q $	módulo da vazão
R	fator retangular definido na equação 2.14
R	resistência na equação 3.10
t	variável independente
t	tempo
t_w	tempo de inércia da água
T	tempo de viagem da onda de pressão
u	velocidade na parede do tubo
V_0	velocidade inicial do escoamento
V	velocidade do escoamento
$ V $	módulo da velocidade
x	direção
x	variável independente
Y_0	abertura inicial
\bar{Y}_0	abertura inicial adimensional
Y	abertura
\bar{Y}	abertura adimensional
z	cota de referência
α	ângulo
γ	peso específico
ΔA	variação de área
Δf	variação de frequência
Δp	variação de pressão
$\Delta \bar{h}$	variação de altura adimensional
Δh	variação de altura
ΔH	perda de carga na equação 2.2
ΔH_1	variação de altura líquida disponível
ΔM	variação de momento
ΔQ	variação de vazão
$\Delta \bar{q}$	variação da vazão adimensional

ΔY	variação de abertura
Δx	variação na direção x
∂	derivada parcial
μ	coeficiente de Poisson
ρ	massa específica
τ_0	tensão de cisalhamento
ω	frequência de excitação
ω_n	frequência natural

CAPITULO 1

GENERALIDADES SOBRE TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS

1.1- INTRODUÇÃO:

Com a evolução computacional dos métodos de simulação nos últimos vinte anos permitindo a simulação digital de sistemas analógicos, tornou-se interessante principalmente para os engenheiros eletricitas a simulação de modelos lineares para o estudo de transitórios em redes e linhas de transmissão, em função da facilidade de modelagem e análise computacional através de programas comerciais disponíveis, bem como da compatibilidade com as ferramentas da área de controle.

A proposta deste trabalho é da utilização de um método de simulação de sistemas analógicos não lineares, através da analogia das equações fundamentais com circuitos que poderão ser facilmente solucionados por simulação em programas disponíveis em microcomputadores e computadores de grande porte.

Golpe de ariete e transiente ou transitário hidráulico segundo Streeter [15], são termos usados para descrever escoamentos não permanentes de fluidos em tubulações, cujas condições em um ponto qualquer variam com o tempo.

Todos os métodos de análises de um fluxo não permanente em condutos partem das equações do movimento e da continuidade, mais equações de estado e outras propriedades físicas. Para essas equações, diferentes métodos de solução e diferentes aplicações podem ser desenvolvidos. Pode-se listá-los e avaliá-los sob o enfoque de aplicabilidade ao estudo de transitórios, visando discorrer sobre o método empregado neste trabalho, como segue:

- a) método aritmético
- b) método gráfico
- c) método das características
- d) método algébrico
- e) método implícito
- f) método linear

Os métodos aritmético e gráfico permitem chegar à solução do problema, utilizando-se o primeiro do par de equações com condições de contorno particulares levantadas e o segundo da adaptação das equações aritméticas integradas a uma solução gráfica. O método aritmético fôra mais utilizado até 1930, sendo que a solução gráfica o foi até 1960.

O método das características transforma as duas equações diferenciais parciais, do movimento e continuidade, em quatro equações diferenciais totais. Essas equações são expressas sob a forma de diferenças finitas. Usando o método de intervalos de tempo especificado, a solução é desenvolvida com a utilização de processos numéricos e computador digital. Esse método apresenta-se como um procedimento adequado na solução de problemas de transitórios.

O método algébrico usa basicamente duas equações características para o pulso das ondas de pressão. Uma das vantagens é de que as equações podem ser aplicadas para diversas situações, porém para cada situação, deve-se selecionar apropriadamente o incremento de tempo $\Delta t = \Delta x/a$. Outra importante vantagem é de que são facilmente resolvidas para os intervalos de tempo iniciais, que constituem a base para a síntese do fluxo transitório.

O método implícito é um procedimento de diferenças finitas, que pode ser usado com sucesso para a solução de uma classe de problemas de fluxo não permanente. É particularmente aplicado em situações onde as forças de inércia não são tão importantes quanto os efeitos de armazenagem ou efeitos capacitivos. A vantagem

desse método é que existe liberdade para a malha de cálculo, podendo-se utilizar de longos intervalos de tempo nas interações, reduzindo o tempo de processamento. Porém, para que haja segurança na solução é necessário que o intervalo da malha seja reduzido, o que reduz as vantagens do método, motivo pelo qual não tem sido utilizado para a solução de problemas de transitórios.

O método de análise linear considera principalmente duas categorias, uma do estudo das flutuações de regime permanente e outra das vibrações livres de um sistema de tubulações. O nome de método da impedância tem sido dado ao estudo de oscilatórios em regime permanente. Este método é mais apropriado para o estudo de oscilatórios e não de transitórios.

Como pode-se avaliar, em função da análise dos métodos descritos na literatura, um método adequado para o estudo de transitórios é o método das características, sendo que alguns dos demais métodos podem também ser aplicados, porém para determinadas condições particulares ou até mesmo com limitações inerentes a cada um deles. O método das características constitui-se em um método mais trabalhoso e com uma visão de cunho mais hidráulico, transformando as equações fundamentais em equações características e aplicando-se processo numérico de diferenças finitas para o levantamento dos resultados.

A discretização de um sistema hidráulico já se constitui em uma análise interessante, assim como a facilidade de montagem do circuito correspondente e sua simulação permite levantar os gráficos de exemplos da literatura, bem como de exemplos específicos de usinas e bancos de ensaio, cujos resultados apresentam-se satisfatórios. Obviamente, encontram-se problemas e soluções ainda passíveis de serem melhor analisados e que recomendam estudos posteriores, cujo teor será abordado no capítulo de conclusões e recomendações. Portanto, é neste contexto que realiza-se este trabalho, objetivando análise e estudos de transitórios hidráulicos através de um procedimento que entende-se ser apropriado por sua rapidez e facilidade de

utilização, requerendo também tempos relativamente pequenos de simulação e arquivos analógicos de tamanhos reduzidos principalmente para microcomputadores. Ainda no capítulo 1, as causas, definições e conceitos básicos de um escoamento serão analisados, bem como a propagação das ondas de pressão em um sistema hidráulico com o respectivo tempo de reflexão da onda.

No capítulo 2 serão analisadas as equações fundamentais do escoamento transitório e a velocidade de propagação das ondas em um meio fluido finito. No capítulo 3 será analisado principalmente o método utilizado neste trabalho, simplificando as equações fundamentais, passando-as para a forma adimensional, trabalhando com modelos analógicos básicos para essas equações e montando os modelos e circuitos analógicos para um trecho discretizado de um sistema hidráulico. Um modelo de turbina também será analisado de maneira a propiciar a simulação do sistema hidráulico correspondente. No capítulo 4, serão efetuadas as aplicações do modelo não somente a exemplos da literatura, mas também casos específicos de centrais hidrelétricas de pequeno e grande porte e banco de ensaio de golpe de ariete. O capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações do trabalho e sua bibliografia.

1.2- CAUSAS DE TRANSIENTES HIDRÁULICOS :

As causas dos transientes hidráulicos ocorrem devido a alterações nas condições de contorno, que causam mudanças no estado permanente do escoamento. Dentre os vários tipos de condições de contorno que causam transientes, destacam-se [15]:

- a) mudanças de abertura de válvulas
- b) alterações de potência em turbinas (rejeições de carga)
- c) alteração da cota do reservatório
- d) ondas no reservatório
- e) instabilidade do regulador de velocidade
- f) vibrações nos distribuidores ou rotores de turbinas
- g) instabilidades no tubo de sucção

O estudo do golpe de ariete pode envolver a análise de problemas tendo uma ou mais destas condições de contorno, principalmente durante a fase de projeto de sistemas hidráulicos com mudanças de espessuras, acumuladores, válvulas antigolpe, etc...

1.3- DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS PARA UM ESCOAMENTO [15]:

1.3.1- PERMANENTE E NÃO PERMANENTE:

Em um escoamento permanente não há mudanças das condições em um dado ponto com o tempo. O escoamento permanente é um caso especial de escoamento não permanente, cujas equações deve também satisfazer.

1.3.2- UNIFORME E NÃO UNIFORME:

Em um escoamento uniforme a média da velocidade em todas as seções é a mesma a cada instante, sendo que no escoamento não uniforme a velocidade varia ao longo do conduto em um dado instante.

1.3.3- TRANSITÓRIO, TRANSIENTE OU GOLPE DE ARIETE

O escoamento transitório descreve um regime não permanente dos fluídos.

1.3.4- OSCILATÓRIO, PERIÓDICO OU PULSATIVO:

Ocorre quando as condições do escoamento se repetem identicamente a intervalos constantes de tempo, denominado período de oscilação.

1.4- PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE PRESSÃO EM UM SISTEMA HIDRÁULICO[15]:

A propagação das ondas de pressão em um sistema de adução será descrita abaixo, considerando-se o fechamento instantâneo de uma válvula e um caso sem atrito. O ciclo completo ou período, inicia-se quando do fechamento desta válvula ($t=0$) onde o fluído é comprimido e tem sua velocidade reduzida a zero (fig.1.1a) e a

parede do tubo é dilatada. A primeira camada é comprimida e o

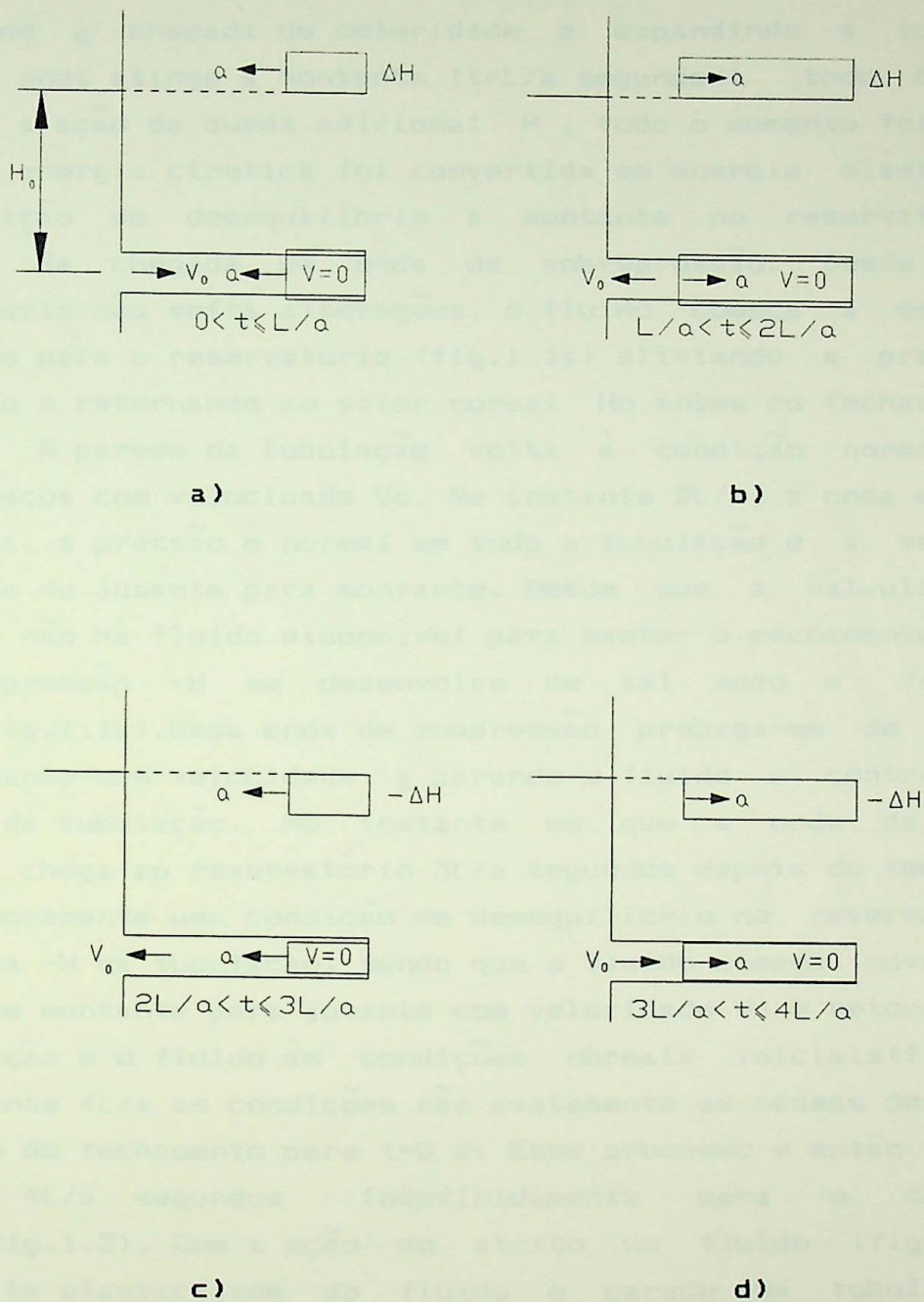


Figura 1.1- Sequência de propagação das ondas de pressão após o fechamento instantâneo da válvula

processo se propaga para as próximas camadas. O fluido continua a mover-se do reservatório para a válvula e a velocidade diminuindo até que as camadas sucessivas tenham sido comprimidas. A sobrepressão se propaga para o reservatório como uma onda, com velocidade a chamada de celeridade e expandindo a tubulação. Quando a onda atinge a montante ($t=L/a$ segundos) todo o fluido está sob a ação da queda adicional H , todo o momento foi perdido e toda a energia cinética foi convertida em energia elástica. Há uma condição de desequilíbrio a montante no reservatório no instante da chegada da onda de sobrepressão. Desde que o reservatório não sofra alterações, o fluido começa a escoar da tubulação para o reservatório (fig.1.1a) aliviando a pressão da tubulação e retornando ao valor normal H_0 antes do fechamento da válvula. A parede da tubulação volta à condição normal, e o fluido escoar com velocidade V_0 . No instante $2L/a$, a onda chega até a válvula, a pressão é normal em toda a tubulação e a velocidade V_0 ocorre de jusante para montante. Desde que a válvula esteja fechada, não há fluido disponível para manter o escoamento, assim uma subpressão $-H$ se desenvolve de tal modo a frenar o fluido (fig.1.1c). Essa onda de subpressão propaga-se de montante para jusante com velocidade a parando o fluido e contraindo as paredes da tubulação. No instante em que a onda de pressão negativa chega ao reservatório $3L/a$ segundos depois do fechamento, tem-se novamente uma condição de desequilíbrio no reservatório a uma carga $-H$ na tubulação, sendo que o fluido começa novamente a escoar de montante para jusante com velocidade V_0 e retornando com a tubulação e o fluido às condições normais iniciais (fig.1.1d). No instante $4L/a$ as condições são exatamente as mesmas do que no instante do fechamento para $t=0$ s. Esse processo é então repetido a cada $4L/a$ segundos indefinidamente para o caso sem atrito (fig.1.2). Com a ação do atrito no fluido (fig.1.3), a imperfeita elasticidade do fluido e parede da tubulação, as oscilações de pressão são amortecidas até que o fluido permanentemente retorne a condição de repouso.

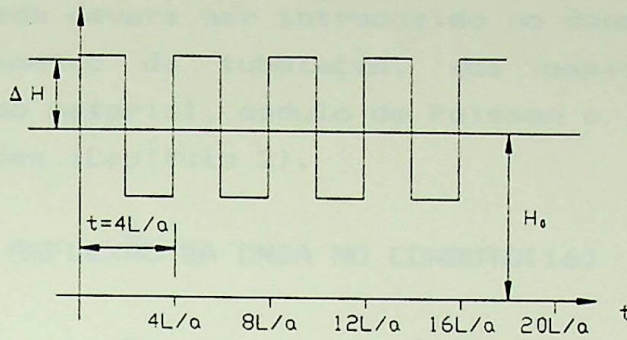


Figura 1.2- Oscilação de pressão na válvula sem atrito.

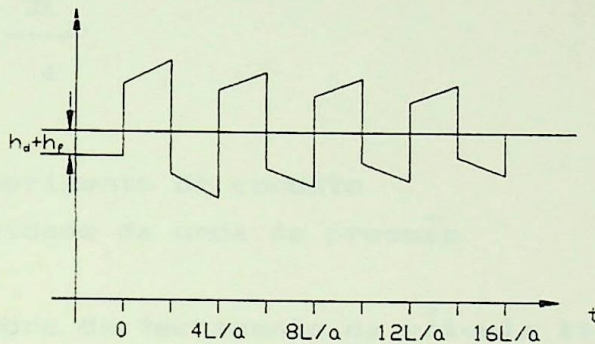


Figura 1.3- Oscilação de pressão na válvula com atrito.

1.5- CELERIDADE DAS ONDAS DE PRESSÃO[15]

Celeridade das ondas de pressão representa a velocidade de propagação do som em um meio fluido infinito com propriedades K e ρ , compressibilidade e massa específica respectivamente. É representada pela seguinte expressão:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1.1)$$

Considerando-se um meio não infinito, um elemento modificador dessa velocidade deverá ser introduzido no denominador levando-se em conta o diâmetro da tubulação, sua espessura e módulo de elasticidade do material, módulo de Poisson e modo de ancoragem das extremidades (Capítulo 2).

1.6- TEMPO DE REFLEXÃO DA ONDA NO CONDUTO[16]

Define-se por T o tempo que leva a onda de pressão para deslocar-se desde a válvula até o reservatório, retornando novamente até a válvula, onde:

$$T = \frac{2L}{a} \quad (1.2)$$

sendo:

L - o comprimento do conduto

a - celeridade da onda de pressão

Se a manobra de fechamento da válvula tiver uma duração t , pode-se classificá-la como:

- se $t < T$, manobra rápida, não recomendável para centrais hidrelétricas;
- se $t = T$, manobra crítica;
- se $t > T$, manobra lenta, recomendável para centrais hidrelétricas.

Se a manobra é rápida a sobrepressão máxima é dada pela equação :

$$\Delta H = \frac{a \cdot V_0}{g} \quad (1.3)$$

onde V_0 é a velocidade do escoamento em regime permanente e g a aceleração da gravidade.

CAPÍTULO 2

EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS PARA O ESCOAMENTO TRANSITÓRIO

2.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS:

Neste capítulo as equações diferenciais do movimento e continuidade serão apresentadas visando o desenvolvimento do método e a solução de problemas de transitórios hidráulicos. No estudo desse escoamento em regime transitório, são feitas as seguintes hipóteses:

- a) O escoamento é unidimensional;
- b) O tubo permanece cheio de água durante todo o tempo;
- c) A pressão mínima do fluido é superior a pressão de vaporização;
- d) A velocidade do fluido é uniforme em toda a seção do tubo;
- e) A tubulação e o fluido são perfeitamente elásticos;
- f) As perdas por atrito no regime transitório são as mesmas do regime permanente;

2.2- EQUAÇÃO DO MOVIMENTO[15]:

A equação do movimento é derivada do escoamento de um fluido em um tubo cônico ou cilíndrico. A equação considera a pressão na linha de centro do tubo $P(x,t)$ e a velocidade média $V(x,t)$. É então convertida para uma forma usando a linha da grade hidráulica $H(x,t)$ também chamada de altura, carga piezométrica ou simplesmente carga. A carga H e a vazão $Q(x,t)$ são as variáveis dependentes, x e t são as variáveis independentes. A figura 2.1 mostra um elemento de fluido de seção transversal com área A e espessura δx . A área é uma função de x . O tubo é inclinado em relação à horizontal de um ângulo α . As forças atuantes no sistema na direção x são as forças de pressão normais às superfícies transversais, a força lateral exercida pelo tubo no fluido e a

força cortante devida ao atrito do fluido. Em função da gravidade, adiciona-se uma componente da força peso na direção de x . A força de cisalhamento τ_0 age na direção $-x$.

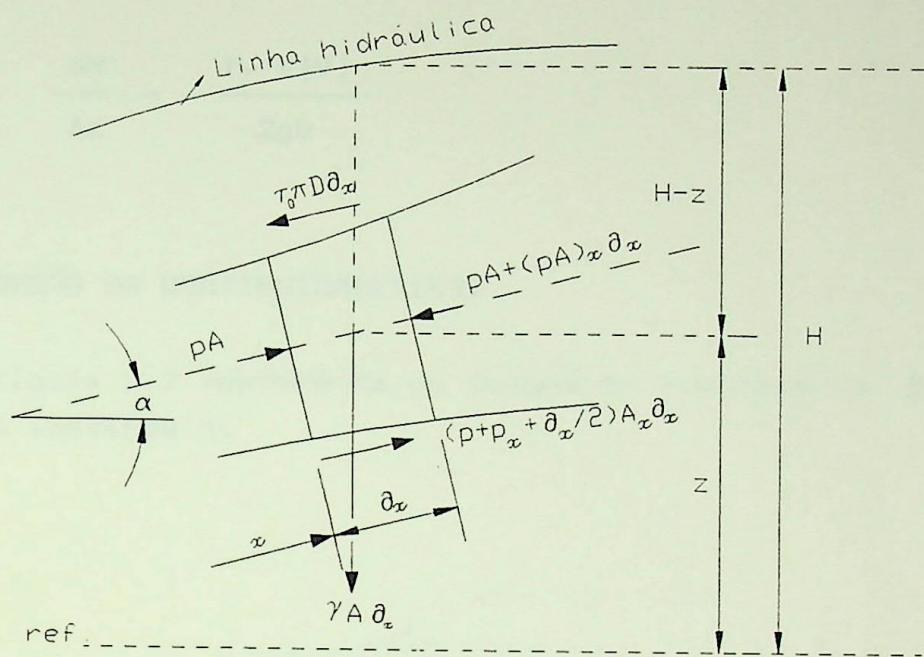


Figura 2.1- Diagrama para determinação da equação do movimento

O somatório de forças é igual à massa vezes a aceleração (segunda lei de Newton). Aplicando-se a segunda lei e fazendo-se as simplificações necessárias, obtém-se a equação diferencial do movimento:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (2.1)$$

A equação acima aplica-se a um escoamento não permanente e para o caso especial de escoamento permanente. Com as derivadas parciais do segundo e terceiro termos iguais a zero, tem-se a equação de Darcy-Wisbach, que fornece a perda de carga por unidade de comprimento:

$$\frac{\Delta H}{\Delta x} = - \frac{f \cdot V |V|}{2gD} \quad (2.2)$$

2.3- EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE [15]:

A figura 2.2 representa um volume de controle de comprimento ∂x em um instante t .

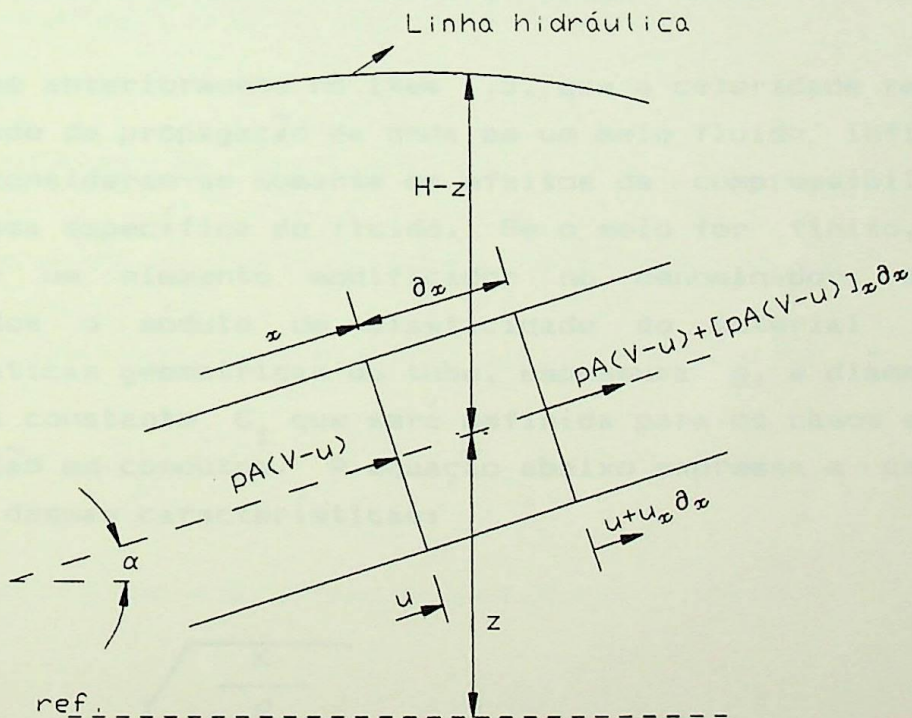


Figura 2.2- Volume de controle para a equação da continuidade

Aplicando-se a lei de conservação de massa para este volume de controle, e fazendo-se as simplificações e rearranjos necessários, obtém-se a equação diferencial da continuidade, que considera o efeito da compressibilidade da água bem como o efeito de elasticidade do tubo:

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} - V \operatorname{sen} \alpha + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

É uma forma conveniente para a equação da continuidade com V e H como variáveis dependentes e com x e t como variáveis independentes. A celeridade a representa as propriedades do fluido e da tubulação.

2.4- CELERIDADE DAS ONDAS EM UM MEIO FLUIDO FINITO:

Viu-se anteriormente no item 1.5, que a celeridade representa a velocidade de propagação da onda em um meio fluido infinito, e para tal consideram-se somente os efeitos de compressibilidade da água e massa específica do fluido. Se o meio for finito, deve-se introduzir um elemento modificador no denominador, onde são considerados o módulo de elasticidade do material E , as características geométricas do tubo, espessura e , e diâmetro D , bem como a constante C_1 que será definida para os casos especiais de aplicação em condutos. A equação abaixo expressa a celeridade em função dessas características:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K \cdot D}{e \cdot E} \cdot C_1}} \quad (2.4)$$

2.4.1- Tubulações de parede fina:

São aquelas em que a relação D/e é maior ou igual a 25

a) Tubulações engastadas com juntas de expansão:

$$C1 = 1 \quad (2.5)$$

b) Tubulações engastadas a montante e a jusante:

$$C1 = 1 - \mu^2 \quad (2.6)$$

c) Tubulações engastadas a montante:

$$C1 = 1 - \frac{\mu}{2} \quad (2.7)$$

μ representa o coeficiente de Poisson:

2.4.2- Tubulações de parede grossa:

São aquelas em que a relação D/e é menor que 25

a) Tubulações engastadas com junta de expansão:

$$C1 = \frac{2.e}{D} \cdot (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \quad (2.8)$$

b) Tubulações engastadas a montante e a jusante:

$$C1 = \frac{2.e}{D} \cdot (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \cdot (1 - \mu^2) \quad (2.9)$$

c) Tubulações engastadas a montante:

$$C1 = \frac{2.e}{D} \cdot (1 + \mu) + \frac{D}{D + e} \cdot \frac{(1 - \mu)}{2} \quad (2.10)$$

2.4.3- Túneis Circulares:

Neste caso, considera-se que a espessura da parede é muito grande, portanto a constante C1 aproxima-se do valor:

$$C1 = \frac{2.e}{D} \cdot (1 + \mu) \quad (2.11)$$

2.4.4- Túneis circulares em aço:

Um túnel em aço em contato direto com rocha tem sua celeridade aumentada. Desprezando-se o coeficiente de Poisson da rocha e do aço temos:

$$C1 = \frac{2.E.e}{E_r D + 2.E.e} \quad (2.12)$$

2.4.5- Túneis de concreto:

A celeridade em um túnel de concreto é estimada calculando-se uma espessura equivalente à tubulação em aço e considerando-se o coeficiente C1 = 1.

2.4.6- Túneis com seção retangular ou não circulares:

Para outras seções não circulares, a celeridade deve ser calculada pela seguinte equação:

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1 + (K/A)(\Delta A/\Delta p)} \quad (2.13)$$

Para seção retangular especificamente, de largura B e altura

$$\frac{\Delta A}{A \cdot \Delta p} = \frac{B^4 \cdot R}{15 \cdot e^3 \cdot E \cdot L} \quad (2.14)$$

onde R é chamado de "fator retangular".

A base da análise de um sistema mecânico de hidráulica são os circuitos elétricos. Para isso, o programa utilizado nos testes principais foram os conhecimentos no capítulo 2. Neste capítulo, trataremos principalmente da simplificação e transformação das equações fundamentais para sua forma dimensional, de modo a facilitar as análises dos parâmetros simulados. Também é possível derivar equações com as equações dos parâmetros elétricos verificadas no capítulo 2. Para analisar melhor os dados de trabalho, vamos estudar o fechamento de sistema hidráulico, seu comportamento distribuído de massa, bem como a análise de um sistema de massa constante de modo a facilitar a compreensão de como se comporta o sistema.

3.2- FÓRMULAS DIMENSIONAIS DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

3.2.1- EQUAÇÃO DE MOMENTUM (3.1)

Tomando-se a equação (2.1) de forma de volume V e área A , temos a seguinte expressão:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV = \int_V \rho \mathbf{g} dV + \int_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3.1)$$

3.2.2- EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE (3.2)

Tomando-se a equação (2.2) de forma de volume V e área A , temos a seguinte expressão:

CAPITULO 3

O MÉTODO DA SIMULAÇÃO ANALÓGICA NÃO LINEAR

3.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS:

A base de analogia de um sistema mecânico ou hidráulico com circuitos elétricos bem como o programa utilizado com suas principais funções são apresentados no apêndice A. Neste capítulo trata-se principalmente da simplificação e transformação das equações fundamentais para sua forma adimensional, de modo a facilitar as análises dos parâmetros simulados, fazendo a analogia destas equações com as equações dos parâmetros elétricos verificados no apêndice A. Será analisado também um modelo de turbina visando estudar o fechamento do sistema hidráulico, bem como a discretização do sistema deverá ser enfocada, avaliando-se as vantagens e desvantagens dessa discretização sob o ponto de vista de atrasos da onda e constante de tempo de simulação.

3.2- FORMA SIMPLIFICADA DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS:

3.2.1- EQUAÇÃO DO MOVIMENTO[15]:

Tomando-se a equação (2.1) em termos de altura H e vazão Q e desprezando-se o termo convectivo $V\partial V/\partial x$ tem-se:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (3.1)$$

3.2.2- EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE[15]:

Tomando-se a equação (2.3) em termos de altura H e vazão Q e desprezando-se o termo convectivo $V\partial H/\partial x$ e o terceiro termo, tem-se:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{gA}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

Nos condutos em que a celeridade apresenta-se com valores baixos (200 m/s), ou em que a quantidade de gás dissolvido na água é elevada, os termos convectivos bem como a inclinação do conduto passam a influenciar o fenômeno. Portanto, os termos desprezados deverão ser considerados visando maior precisão dos resultados. No estudo de transitórios em instalações hidráulicas consideradas neste trabalho, pode-se confiar que os resultados obtidos pelas equações (3.1) e (3.2) são adequados.

3.3- FORMA ADIMENSIONAL DAS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS:

Para escrever as equações fundamentais (3.1) e (3.2) na forma adimensional devem-se considerar as grandezas em p.u. (por unidade), relativas aos valores médios das variáveis.

Define-se como $\bar{h} = H/H_0$, $\bar{q} = Q/Q_0$, sendo que as derivadas parciais podem ser expressas da seguinte maneira:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = H_0 \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = Q_0 \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} \quad (3.4)$$

Substituindo nas equações (3.1) e (3.2), temos:

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + \frac{Q_0}{H_0} \frac{1}{gA} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{f \cdot Q_0^2}{2gA^2 D H_0} \cdot \bar{q} |\bar{q}| = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \frac{H_0}{Q_0} \frac{g A}{a^2} \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = 0 \quad (3.6)$$

Considerando-se não mais um elemento infinitesimal, e sim um trecho discretizado da tubulação, tem-se as equações da seguinte maneira:

$$\Delta \bar{h} = - \frac{Q_0}{H_0} \frac{\Delta x}{g A} \frac{d\bar{q}}{dt} - \frac{f \Delta x \cdot Q_0^2}{2gDA^2 H_0} \bar{q} |\bar{q}| \quad (3.7)$$

$$\Delta \bar{q} = - \frac{H_0}{Q_0} \frac{g A \Delta x}{a^2} \frac{d\bar{h}}{dt} \quad (3.8)$$

Pode-se definir os seguintes parâmetros:

$$L = \frac{Q_0}{H_0} \frac{\Delta x}{g A} ; \text{ chamado de inércia ou tempo de inércia (tw)} \quad (3.9)$$

$$R = \frac{f \Delta x Q_0^2}{2gDA^2 H_0} ; \text{ chamado de resistência} \quad (3.10)$$

$$C = \frac{H_0}{Q_0} \frac{g A \Delta x}{a^2} ; \text{ chamado de capacidade} \quad (3.11)$$

Portanto, as equações adimensionais (3.7) e (3.8) ficam da seguinte forma:

$$\Delta \bar{h} = - L \frac{d\bar{q}}{dt} - R \bar{q} |\bar{q}| \quad (3.12)$$

$$\Delta \bar{q} = - C \frac{d\bar{h}}{dt} \quad (3.13)$$

Estas equações serão utilizadas na simulação analógica dos sistemas hidráulicos propostos por Streeter [15] e Chaudry[4] para comprovação do modelo em questão, comparando os resultados obtidos pelos mesmos através de simulação utilizando-se do método das características. Também serão apresentadas as simulações de casos específicos, uma usina do Departamento Municipal de Energia, de Poços de Caldas -MG(Usina Vêu das Noivas), um banco de ensaios de golpe de ariete localizado no laboratório da Universidade de São Paulo, bem como a simulação de golpe de ariete da turbina hidráulica da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, com a potência de 360 MW em cada unidade, comparando os resultados dentro do possível com dados reais obtidos do campo.

3.4- MODELO ANALÓGICO BÁSICO PARA AS EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS:

Os fundamentos de analogia de sistemas mecânicos com sistemas elétricos encontram-se no Apêndice A.

Os modelos analógicos básicos para simulação estão representados nas figuras 3.1 e 3.2, para um trecho discretizado de tubulação:

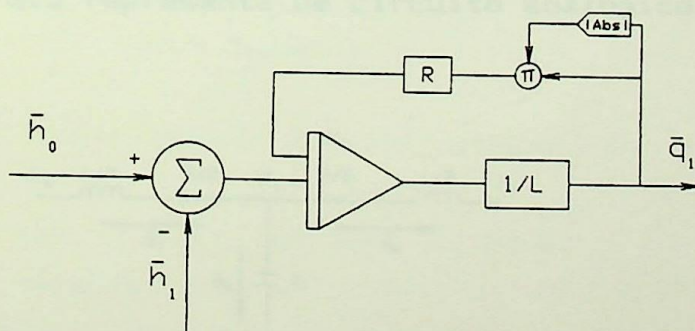


Figura 3.1 - Modelo básico para a equação do movimento

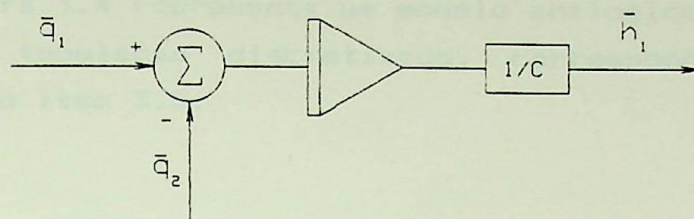


Figura 3.2 - Modelo básico para equação da continuidade

3.5- CIRCUITO ANALÓGICO PARA UM TRECHO DISCRETIZADO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO:

Pode-se representar um determinado trecho de uma linha de transmissão através de circuito analógico em Π ou em T, dependendo do tipo de circuito. Nos dois casos, os resultados apresentam-se próximos. Para o caso em estudo, será representado um trecho do sistema hidráulico através de circuito em T em função das características do sistema, onde os efeitos de capacidade nas extremidades não podem ser representados no circuito em Π , pois nas extremidades a variação do potencial energético é igual a zero. A figura 3.3 representa um circuito analógico de um trecho de tubulação:

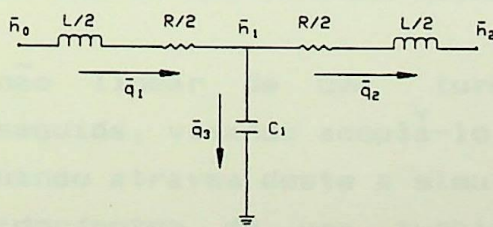


Figura 3.3 - Circuito analógico para um trecho discretizado de tubulação

3.6- MODELO ANALÓGICO PARA UM TRECHO DISCRETIZADO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO:

A figura 3.4 representa um modelo analógico completo para um trecho de tubulação discretizado, correspondente ao circuito analógico do item 3.5:

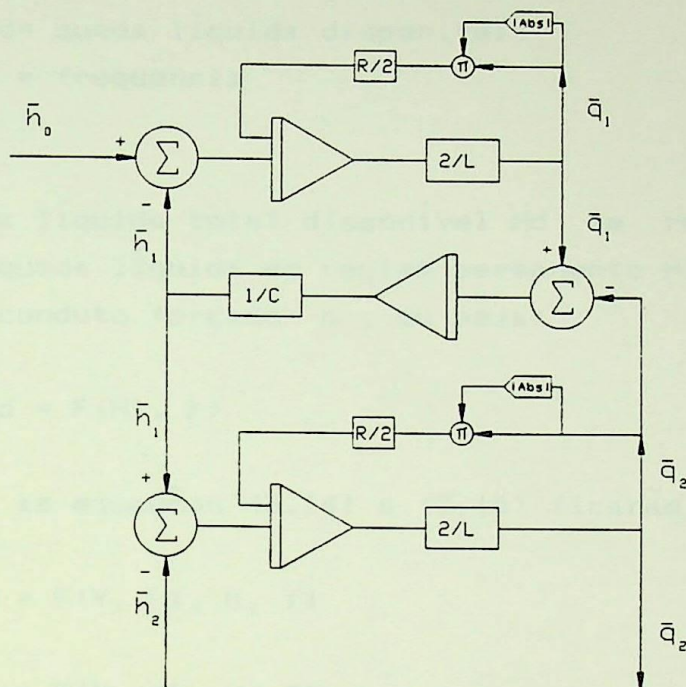


Figura 3.4- Modelo analógico para um trecho discretizado de tubulação

3.7- MODELO NÃO LINEAR DE UMA TURBINA HIDRÁULICA:

O modelo não linear de uma turbina hidráulica será desenvolvido em seguida, visando acoplá-lo ao modelo analógico da tubulação, e efetuando através deste a simulação de fechamento do sistema distribuidor/rotor de uma turbina ou de uma simples válvula.

As variáveis principais de interesse para a modelagem de uma turbina são o torque mecânico (M) e a vazão (Q), que serão

representadas da seguinte forma:

$$M = F(Y, H_d, f) \quad (3.14)$$

$$Q = F(Y, H_d, f) \quad (3.15)$$

onde: Y = abertura do distribuidor
H_d = queda líquida disponível
f = frequência

A queda líquida total disponível H_d em regime transitório, depende da queda líquida em regime permanente H_l e da variação de pressão no conduto forçado h, ou seja:

$$H_d = F(H_l, h) \quad (3.16)$$

Assim, as equações (3.14) e (3.15) ficarão da seguinte forma:

$$M = F(Y, H_l, h, f) \quad (3.17)$$

$$Q = F(Y, H_l, h, f) \quad (3.18)$$

Diferenciando as equações (3.17) e (3.18):

$$dM = \frac{\partial M}{\partial Y} dY + \frac{\partial M}{\partial H_l} dH_l + \frac{\partial M}{\partial h} dh + \frac{\partial M}{\partial f} df \quad (3.19)$$

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial Y} dY + \frac{\partial Q}{\partial H_l} dH_l + \frac{\partial Q}{\partial h} dh + \frac{\partial Q}{\partial f} df \quad (3.20)$$

Considerando as variações infinitesimais como pequenas variações tem-se:

$$\Delta M = \frac{\partial M}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial M}{\partial H1} \Delta H1 + \frac{\partial M}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial M}{\partial f} \Delta f \quad (3.21)$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial Q}{\partial H1} \Delta H1 + \frac{\partial Q}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f \quad (3.22)$$

Será adicionado nas equações (3.21) e (3.22) o valor inicial das variáveis principais, ou seja:

-Vazão inicial (Q_0)

-Momento inicial (M_0)

$$M_0 + \Delta M = (M_0 + \frac{\partial M}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial M}{\partial H1} \Delta H1) + \frac{\partial M}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial M}{\partial f} \Delta f \quad (3.23)$$

$$Q_0 + \Delta Q = (Q_0 + \frac{\partial Q}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial Q}{\partial H1} \Delta H1) + \frac{\partial Q}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f \quad (3.24)$$

O valor inicial do momento (M_0) somado à variação (ΔM) corresponde ao valor integral da variável principal (M), ou seja:

$$M_0 + \Delta M = M \quad (3.25)$$

O raciocínio é análogo para a variável principal (Q):

$$Q_0 + \Delta Q = Q \quad (3.26)$$

Os termos entre parênteses nas equações (3.23) e (3.24), podem ser representados por uma função não linear, ou seja:

$$M_0 + \frac{\partial M}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial M}{\partial H1} \Delta H1 = M_Y(Y, H1) \quad (3.27)$$

$$Q_0 + \frac{\partial Q}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial Q}{\partial H1} \Delta H1 = Q_y (Y, H1) \quad (3.28)$$

Substituindo as equações (3.25), (3.26), (3.27) e (3.28) nas equações (3.23) e (3.24) temos:

$$M = M_y (Y, H1) + \frac{\partial M}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial M}{\partial f} \Delta f \quad (3.29)$$

$$Q = Q_y (Y, H1) + \frac{\partial Q}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f \quad (3.30)$$

As equações (3.29) e (3.30) contêm termos lineares, tornando-se necessário então a obtenção de coeficientes variáveis que possam melhor representar os efeitos dos termos lineares para qualquer ponto de operação da turbina.

Para isso, serão substituídos os termos lineares pelas seguintes variações em função da abertura:

$$- \frac{\partial M}{\partial h} \text{ por } \frac{\Delta M}{\Delta h} (Y)$$

$$- \frac{\partial M}{\partial f} \text{ por } \frac{\Delta M}{\Delta f} (Y)$$

$$- \frac{\partial Q}{\partial h} \text{ por } \frac{\Delta Q}{\Delta h} (Y)$$

$$- \frac{\partial Q}{\partial f} \text{ por } \frac{\Delta Q}{\Delta f} (Y)$$

Substituindo estas curvas não lineares em (3.29) e (3.30) obtêm-se as equações não lineares completas que representarão a turbina em qualquer ponto de operação, ou seja:

$$M = M_y (Y, H1) + \frac{\Delta M}{\Delta h} (Y) \cdot \Delta h + \frac{\Delta M}{\Delta f} (Y) \cdot \Delta f \quad (3.31)$$

$$Q = Q_y (Y, H1) + \frac{\Delta Q}{\Delta h} (Y) \cdot \Delta h + \frac{\Delta Q}{\Delta f} (Y) \cdot \Delta f \quad (3.32)$$

onde os parâmetros das equações (3.31) e (3.32) podem ser assim descritos:

M - Momento mecânico total fornecido pela turbina;

$M_y (Y, H1)$ - Momento mecânico fornecido pela turbina em função da abertura do distribuidor e da queda líquida disponível;

$\frac{\Delta M}{\Delta h} (Y) \cdot \Delta h$ - Parcela adicional de momento gerado pela variação de pressão na caixa espiral;

$\frac{\Delta M}{\Delta f} (Y) \cdot \Delta f$ - Parcela de momento decorrente da variação de velocidade da turbina;

Q - Vazão total que passa através da turbina;

$Q_y (Y, H1)$ - Vazão que passa pela turbina em função da abertura do distribuidor e da queda líquida disponível;

$\frac{\Delta Q}{\Delta h} (Y) \cdot \Delta h$ - Parcela adicional de vazão decorrente da variação de pressão na caixa espiral;

$\frac{\Delta Q}{\Delta f}(Y) \cdot \Delta f$ - Parcela de vazão decorrente da variação de velocidade da turbina.

Portanto, obtêm-se as equações não lineares para a turbina, onde as curvas e coeficientes destas equações estão em função da abertura (Y).

Em seguida, será apresentado o modelo analógico correspondente à equação (3.32), tendo em vista que a equação (3.31) representa o momento total da turbina, o qual não será utilizado na modelagem deste trabalho, cujo objetivo é de efetuar as simulações em sistemas hidráulicos discretizados, verificando os níveis de pressão e vazão em qualquer ponto do sistema. Mesmo na simulação de turbinas hidráulicas, sem acoplar o modelo de regulador de velocidade ou de gerador, é possível efetuar simulações de rejeições ou absorções totais de carga, principalmente em turbinas com rotores normais, onde os coeficientes de variação da vazão em relação à frequência podem ser desprezados.

A figura 3.5 representa esse modelo, que acoplado ao modelo anterior permite efetuar as simulações dos exemplos propostos neste trabalho:

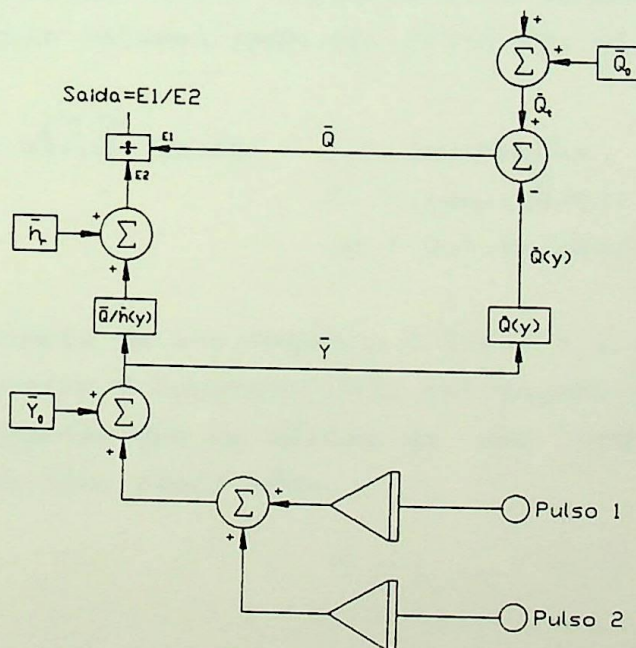


Figura 3.5 - Modelo analógico de fechamento

Na figura 3.5, o bloco divisor representa a divisão da função E1 pela função E2. O bloco $\bar{h}r$ representa um resíduo para efeito de simulação, impedindo a divisão por zero no bloco divisor. Isso causa um pequeno erro na saída do somador, porém pode-se considerá-lo desprezível, desde que os valores atribuídos sejam os menores possíveis.

3.8 - DISCRETIZAÇÃO DO SISTEMA HIDRÁULICO:

A questão de quantos trechos deverão ser considerados em um determinado exemplo é importante, porém necessita ser melhor avaliada com relação a simulações de transitórios hidráulicos. Inicialmente podem-se tecer algumas considerações dependendo do tipo de aplicação, ou seja, para uma linha pequena e com grande diâmetro, somente um simples capacitor será suficiente para a obtenção de bons resultados. Uma linha mais longa e com pequeno diâmetro pode necessitar de apenas um trecho para sua simulação, porém se essa linha estiver sujeita a uma alta frequência de excitação deverá ser dividida em vários trechos de modo que as frequências naturais sejam maiores do que a frequência de excitação ou qualquer outra frequência de interesse.

A frequência natural pode ser calculada da seguinte forma:

$$\omega_n = \sqrt{1/LC} \quad \text{sendo} \quad \begin{array}{l} L - \text{inertância} \\ C - \text{capacitância} \end{array}$$
$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n (\text{rad/s})$$

E a frequência de excitação $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 1/t$ (rad/s).

Conforme Mello e Koessier[24], aplicações práticas de modelos de simulação sugerem que um mínimo de dez trechos é necessário para se obterem bons resultados.

APLICAÇÕES DO MODELO

4.1 - COMPARAÇÃO DO MODELO A RESULTADOS OBTIDOS NA LITERATURA:

O objetivo desta comparação é comprovar que os resultados obtidos através de simulação analógica e os resultados obtidos por simulação de exemplos propostos por Streeter[15] e Chaudry[4], através da utilização do método das características, são próximos de modo a validar o modelo.

Será apresentado a seguir o primeiro exemplo proposto por Chaudry[4] e os resultados de sua simulação:

4.1.1- EXEMPLO PROPOSTO POR CHAUDRY:

O esquema do sistema hidráulico proposto é apresentado a seguir:

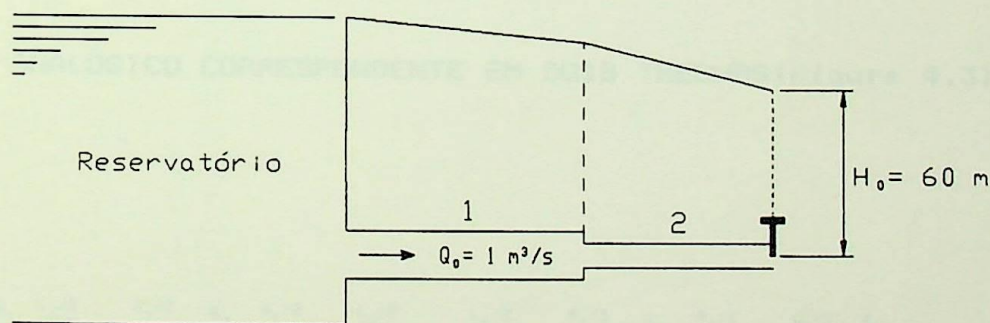


Figura 4.1 - Esquema hidráulico proposto por Chaudry.

DADOS:

Trecho 1 - $L = 550\text{m}$

$D = 0.75\text{m}$

$a = 1100\text{m/s}$

$f = 0.010$

Trecho 2 - $L = 450\text{m}$

$D = 0.6\text{m}$

$a = 900\text{m/s}$

$f = 0.012$

CURVA DE FECHAMENTO(Figura 4.2):

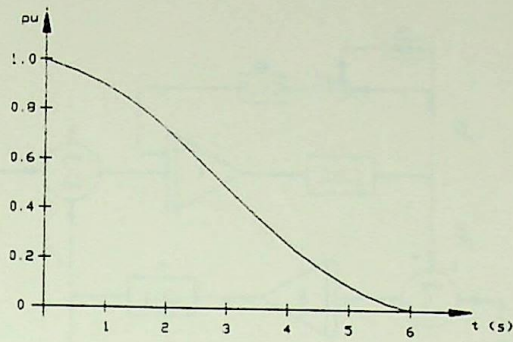


Figura 4.2 - Curva de fechamento do exemplo Chaudry

PARÂMETROS CALCULADOS PARA SIMULAÇÃO:

Trecho 1 - $L1 = 2.1236s$
 $C1 = 0.11772s$
 $R1 = 0.03217$

Trecho 2 - $L2 = 2.70s$
 $C2 = 0.0925s$
 $R2 = 0.09613$

CIRCUITO ANALÓGICO CORRESPONDENTE EM DOIS TRECHOS(Figura 4.3):

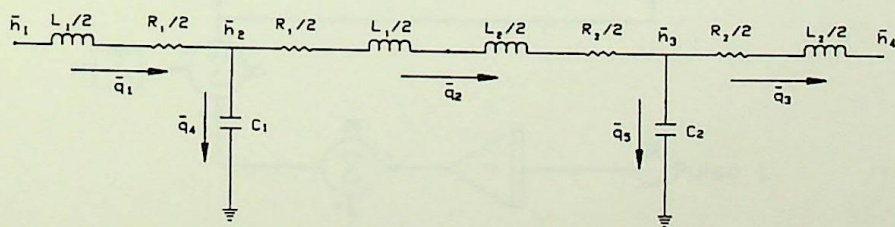


Figura 4.3 - Circuito analógico para o exemplo Chaudry

MODELO ANALÓGICO PARA SIMULAÇÃO (Figura 4.4):

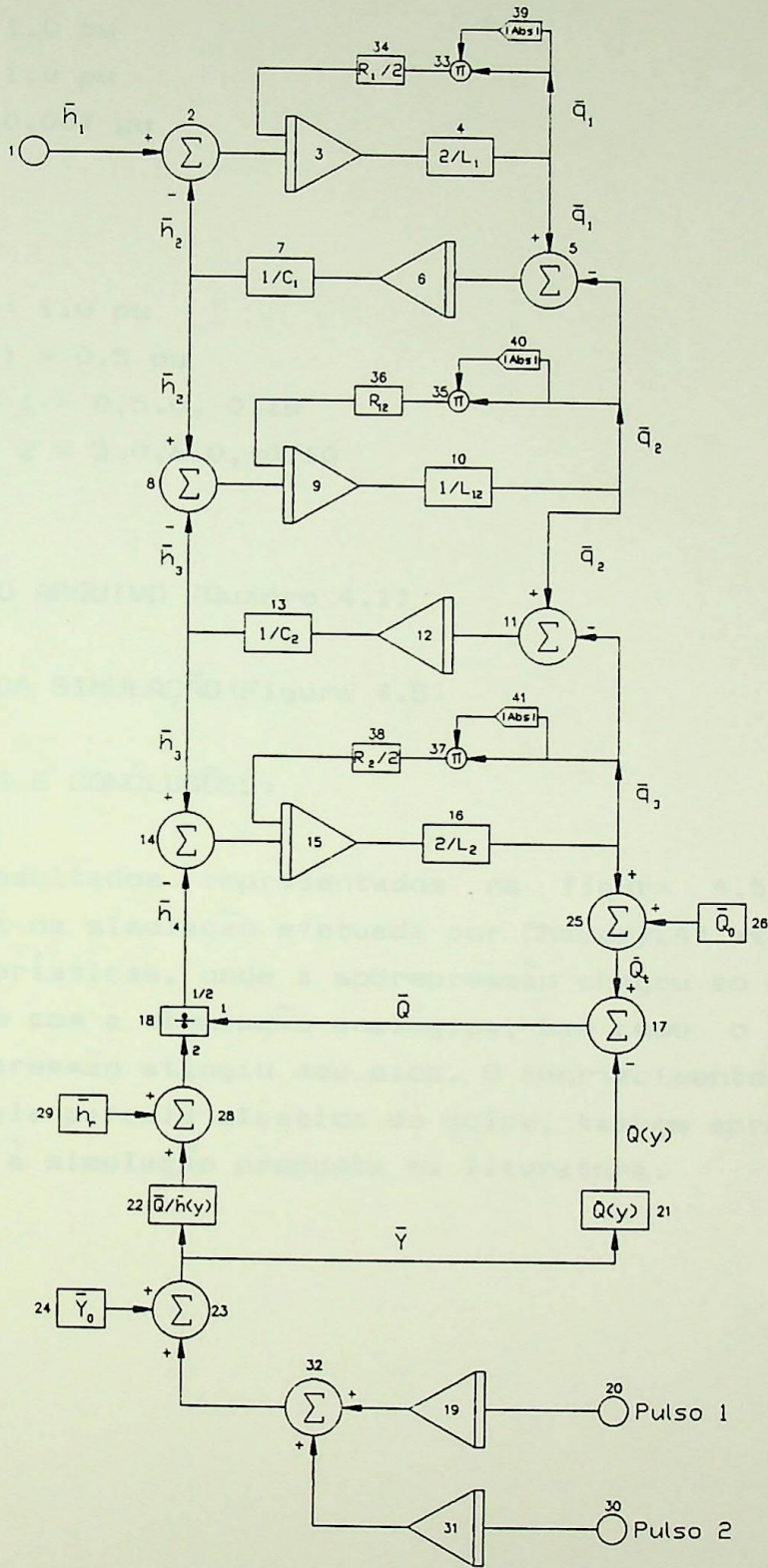


Figura 4.4 - Modelo analógico para o exemplo de Chaudry

DADOS PARA FECHAMENTO:

$$\bar{Q}_0 = 1.0 \text{ pu}$$

$$\bar{Y}_0 = 1.0 \text{ pu}$$

$$\bar{h}_r = 0.001 \text{ pu}$$

FUNÇÕES:

$$\bar{Q}(y) = 1.0 \text{ pu}$$

$$\bar{Q}/\bar{h}(y) = 0.5 \text{ pu}$$

$$\text{Pulso 1} = 0, 5.0, -0.18$$

$$\text{Pulso 2} = 5.0, 6.0, -0.10$$

LISTAGEM DO ARQUIVO (Quadro 4.1)

RESULTADO DA SIMULAÇÃO (Figura 4.5)

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES:

Os resultados representados na figura 4.5, podem ser verificados na simulação efetuada por Chaudry[4] através do método das características, onde a sobrepressão chegou ao valor de 150%, coincidindo com a simulação analógica, bem como o tempo em que esta sobrepressão atingiu seu pico. O amortecimento das oscilações causadas pela parcela elástica do golpe, também apresentou-se bem semelhante à simulação proposta na literatura.

Bloco no.	Escala min.	Escala max.	Comentarios
Horz: 0 ,	0.0000 ,	20.0000 ;	tempo
Y1: 18 ,	-2.0000 ,	2.0000 ;	sobrepressão
Y2: 16 ,	-1.0000 ,	1.0000 ;	vazão
Y3: 32 ,	-1.0000 ,	1.0000 ;	fechamento
Y4: 11 ,	-0.5000000 ,	0.5000000 ;	vazão de capacidade
2.0000	1 PLS		
20.0000			
0.0000			
	2 SUM	1 -7	
0.0000	3 INT	2 -34	
1.0618	4 ATT	3	
	5 SUM	4 -10	
0.0000	6 INT	5	
0.1177000	7 ATT	6	
	8 SUM	7 -13	
0.0000	9 INT	8 -36	
2.4100	10 ATT	9	
	11 SUM	10 -16	
0.0000	12 INT	11	
0.0925000	13 ATT	12	
	14 SUM	13 -18	
0.0000	15 INT	14 -38	
1.3500	16 ATT	15	
	17 SUM	25 -21	
	18 DIV	17 28	
0.0000	19 INT	20	
0.0000	20 PLS		
5.0000			
-0.1800000			
1.0000	21 GAI	23	
0.5000000	22 GAI	23	
	23 SUM	32 24	
1.0000	24 CON		
	25 SUM	16 26	
1.0000	26 CON		
	28 SUM	29 22	
0.0070000	29 CON		
5.0000	30 PLS		
6.0000			
-0.1000000			
0.0000	31 INT	30	
	32 SUM	19 31	
	33 MUL	4 39	
0.0161000	34 GAI	33	
	35 MUL	10 40	
0.0642000	36 GAI	35	
	37 MUL	16 41	
0.0481000	38 GAI	37	
	39 ABS	4	
	40 ABS	10	
	41 ABS	16	

Quadro 4.1 - Listagem do arquivo do exemplo Chaudry

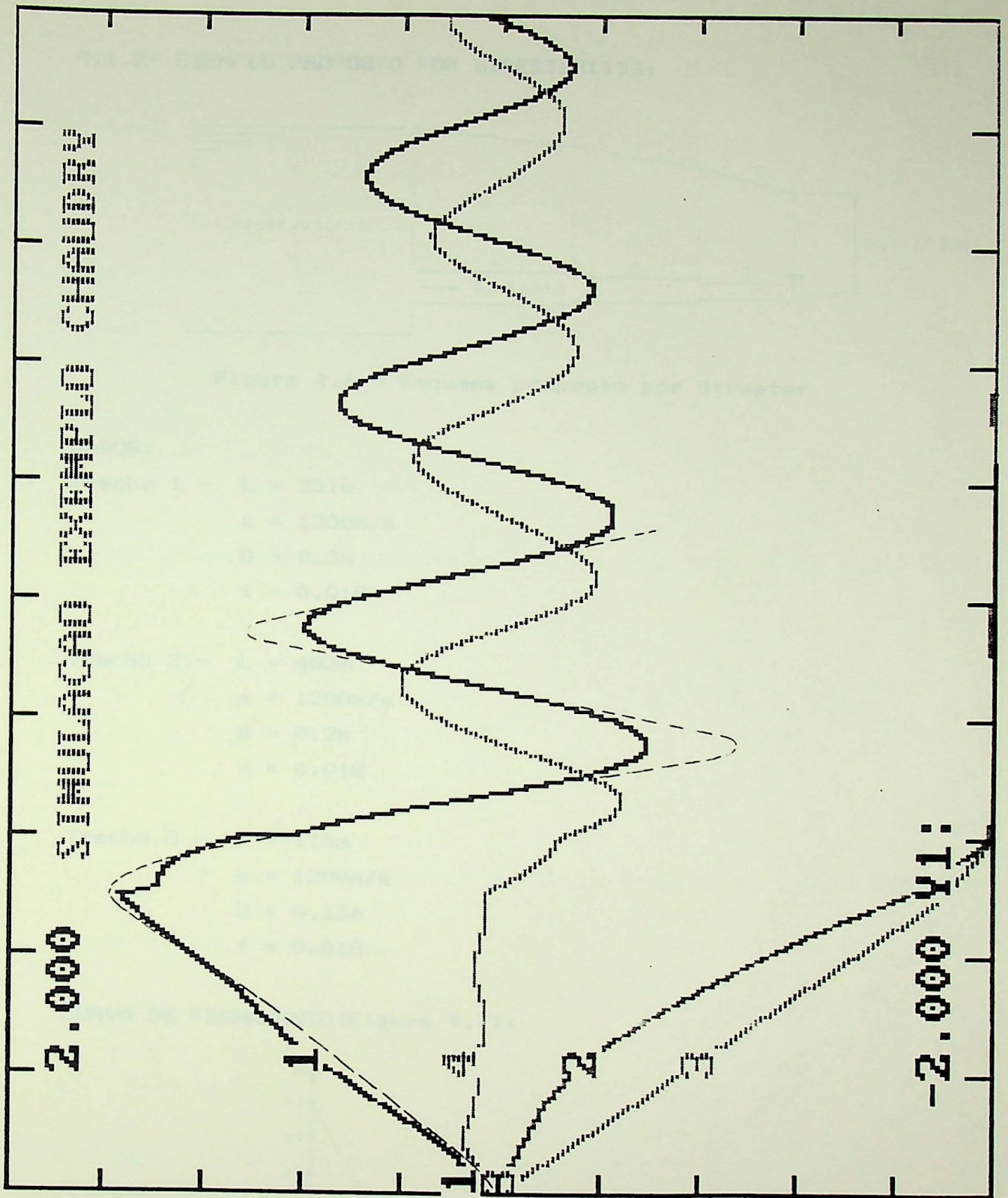


Figura 4.5 - Resultado da simulação do exemplo Chaudry
 Curva pontilhada - resultado da simulação
 pelo método das características(Chaudry)

4.1.2- EXEMPLO PROPOSTO POR STREETER[15]:

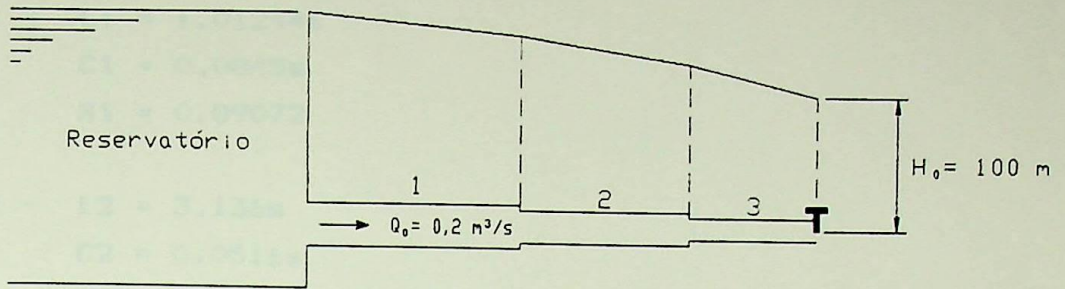


Figura 4.6 - Esquema proposto por Streeter

DADOS:

Trecho 1 - $L = 351\text{m}$
 $a = 1200\text{m/s}$
 $D = 0.3\text{m}$
 $f = 0.019$

Trecho 2 - $L = 483\text{m}$
 $a = 1200\text{m/s}$
 $D = 0.2\text{m}$
 $f = 0.018$

Trecho 3 - $L = 115\text{m}$
 $a = 1200\text{m/s}$
 $D = 0.15\text{m}$
 $f = 0.018$

CURVA DE FECHAMENTO (Figura 4.7):

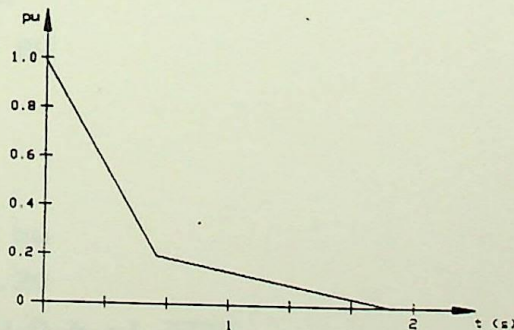


Figura 4.7 - Curva de fechamento do exemplo Streeter

PARÂMETROS CALCULADOS:

Trecho 1 - $L1 = 1.01244s$
 $C1 = 0.0845s$
 $R1 = 0.09072$

Trecho 2 - $L2 = 3.136s$
 $C2 = 0.0516s$
 $R2 = 0.8980$

Trecho 3 - $L3 = 1.32685s$
 $C3 = 6.92 \cdot 10E-3$
 $R3 = 0.901087$

CIRCUITO ANALÓGICO CORRESPONDENTE PARA TRÊS TRECHOS (Figura 4.8):

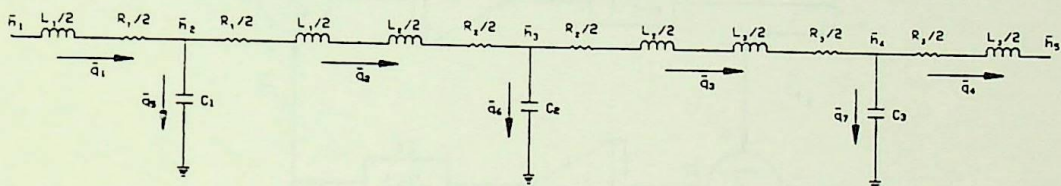


Figura 4.8 - Circuito analógico para o exemplo Streeter

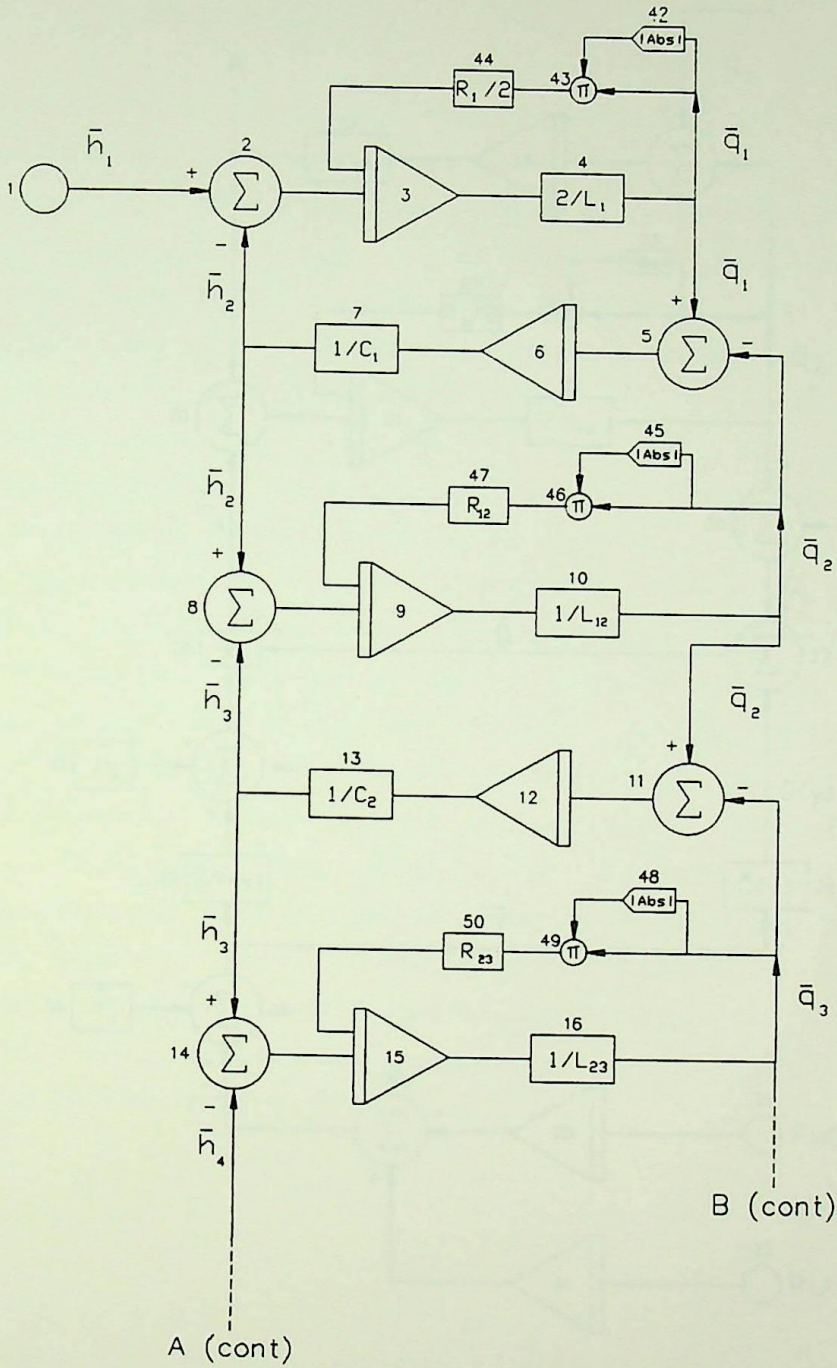
DADOS PARA O FECHAMENTO:

$\bar{Q}_0 = 1.0 \text{ pu}$
 $\bar{Y}_0 = 1.0 \text{ pu}$
 $\bar{h}_r = 0.008 \text{ pu}$

FUNÇÕES:

$\bar{Q}(y) = 1.0 \text{ pu}$
 $\bar{Q}/\bar{h}(y) = 0.20$
Pulso 1 = 0,0.6,-1.3333
Pulso 2 = 0.6,1.8,-0.1666670

MODELO ANALÓGICO PARA SIMULAÇÃO (Figura 4.9)



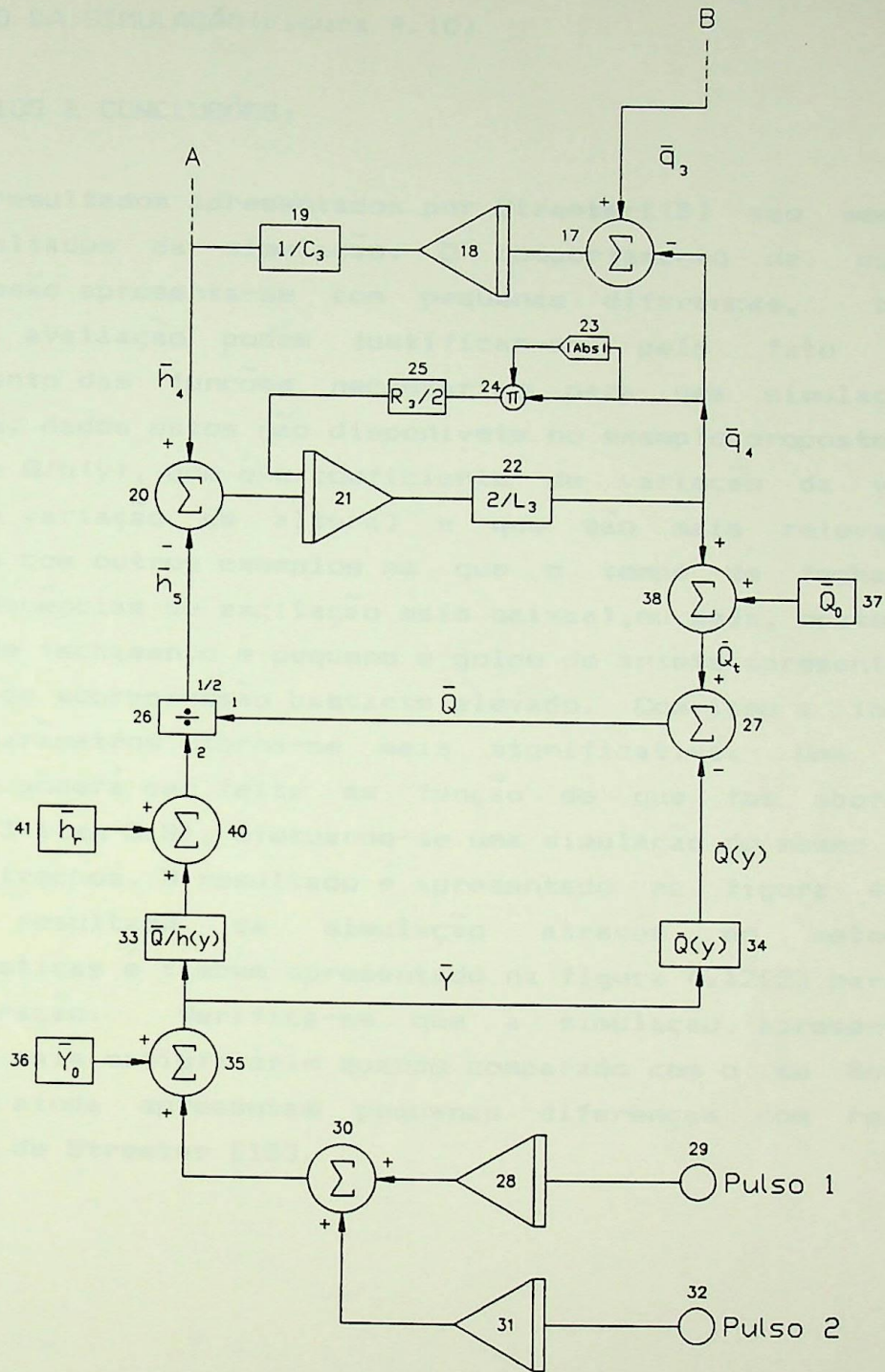


Figura 4.9 - Modelo analógico para o exemplo Streeter

LISTAGEM DO ARQUIVO (Quadro 4.2)

RESULTADO DA SIMULAÇÃO (Figura 4.10)

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES:

Os resultados apresentados por Streeter[15] são semelhantes aos resultados da simulação. O comportamento da curva de sobrepressão apresenta-se com pequenas diferenças, que numa primeira avaliação podem justificar-se pelo fato do não conhecimento das funções necessárias para uma simulação mais detalhada, dados estes não disponíveis no exemplo proposto [$Q(y)$ da válvula e $Q/h(y)$, que é o coeficiente de variação da vazão em função da variação de altura] e que são mais relevantes se comparado com outros exemplos em que o tempo de fechamento é maior (frequências de excitação mais baixas), ou seja, neste exemplo o tempo de fechamento é pequeno e golpe de ariete apresenta-se com um nível de sobrepressão bastante elevado. Com isso a influência destes parâmetros torna-se mais significativa. Uma segunda avaliação poderá ser feita em função do que foi abordado no Capítulo 3 (item 3.8), efetuando-se uma simulação do mesmo exemplo com onze trechos. O resultado é apresentado na figura 4.11 bem como o resultado da simulação através do método das características é também apresentado na figura 4.12[2] para efeito de comparação. Verifica-se que a simulação apresentou um resultado mais satisfatório quando comparado com o de Bordón[2], porém que ainda apresentam pequenas diferenças com relação a simulação de Streeter [15].

Horz:	Bloco no.	Escala min.	Escala max.	Comentários
	0	0.0000	5.0000	; tempo
Y1:	26	-10.0000	10.0000	; sobrepressão
Y2:	22	-1.0000	1.0000	; vazão
Y3:	30	-1.0000	1.0000	; fechamento
Y4:	17	-0.5000000	0.5000000	; vazão de capacidade
		2.0000		
		20.0000		
		0.0000		
			1 PLS	
		0.0000	2 SUM	1 -7
		0.5062200	3 INT	2 -44
			4 ATT	3
			5 SUM	4 -10
		0.0845000	6 INT	5
			7 ATT	6
			8 SUM	7 -13
		0.0000	9 INT	8 -47
		2.0742	10 ATT	9
			11 SUM	10 -16
		0.0000	12 INT	11
		0.0516000	13 ATT	12
			14 SUM	13 -19
		0.0000	15 INT	14 -50
		2.2314	16 ATT	15
			17 SUM	16 -22
		0.0000	18 INT	17
		0.0069200	19 ATT	18
			20 SUM	19 -26
		0.0000	21 INT	20 -25
		0.6634250	22 ATT	21
			23 ABS	22
			24 MUL	22 23
		0.4505400	25 GAI	24
			26 DIV	27 40
			27 SUM	38 -34
		0.0000	28 INT	29
		0.0000	29 PLS	
		0.6000000		
		-1.3333		
			30 SUM	28 31
		0.0000	31 INT	32
		0.6000000	32 PLS	
		1.8000		
		-0.1666670		
		0.2000000	33 GAI	35
		1.0000	34 GAI	35
			35 SUM	36 39
		1.0000	36 CON	
		1.0000	37 CON	
			38 SUM	22 37
		-1.0000	39 LIM	30
		1.0000		

0.0080000	40 SUM	33	41
	41 CON		
	42 ABS	4	
	43 MUL	4	42
0.0453600	44 GAI	43	
	45 ABS	10	
	46 MUL	10	45
0.4943600	47 GAI	46	
	48 ABS	16	
	49 MUL	16	48
0.8995400	50 GAI	49	

Quadro 4.2 - Listagem do arquivo do exemplo Streeter

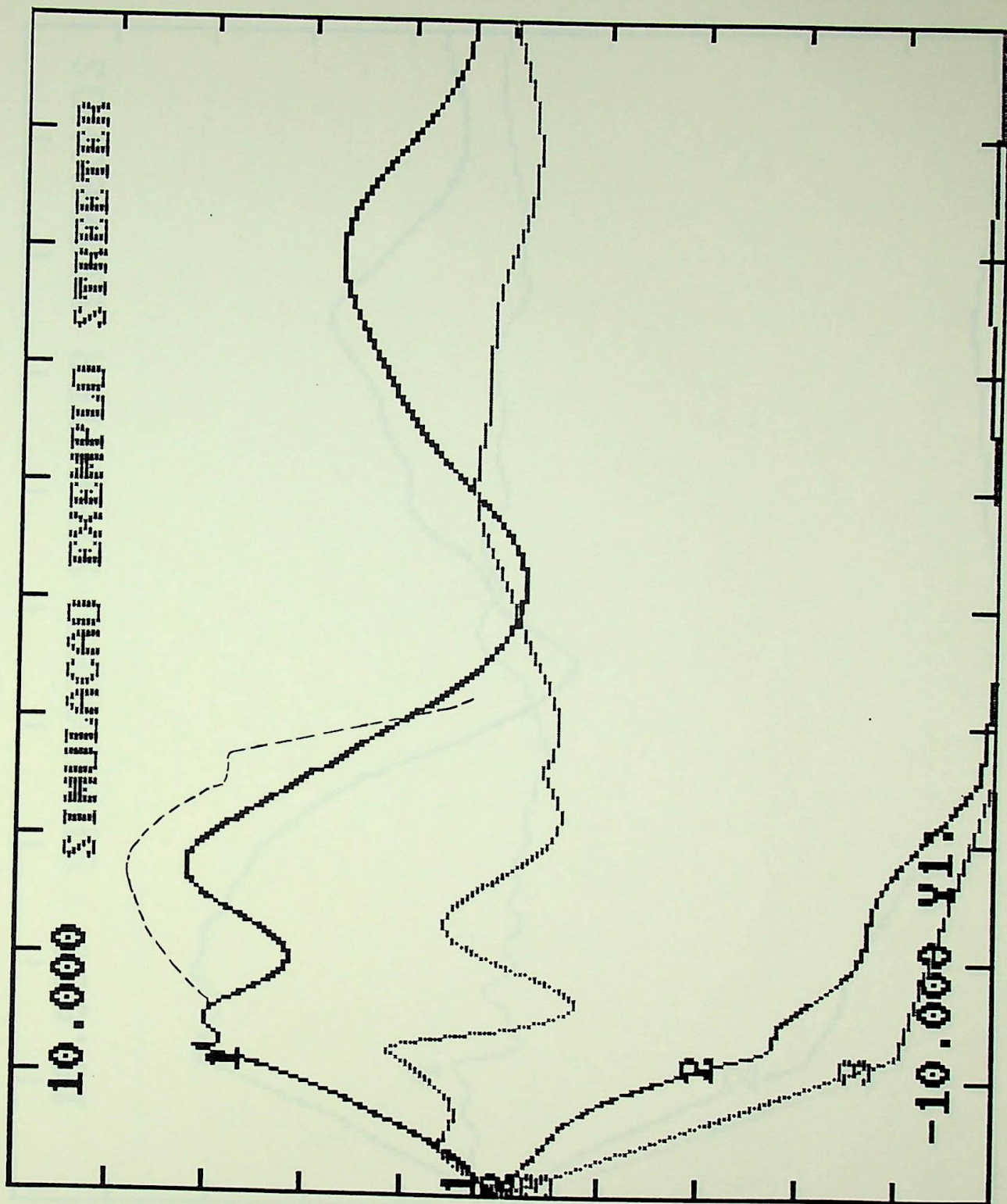


Figura 4.10 - Resultado da simulação do exemplo Streeter
 Curva pontilhada - resultado da simulação
 pelo método das características (Streeter)

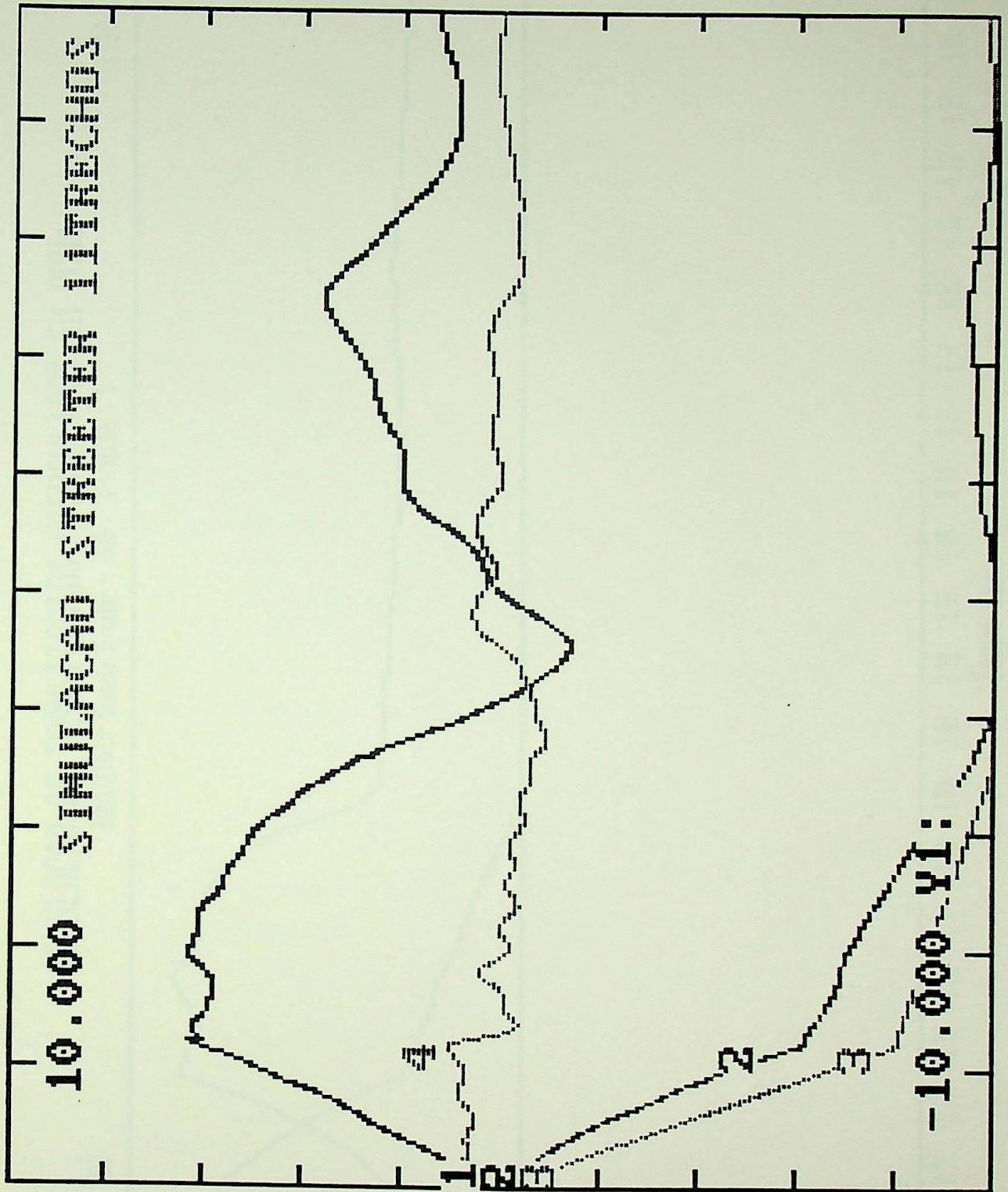


Figura 4.11 - Resultado da simulação do exemplo Streeter com onze trechos

SIMULACAO DE TRANSITORIOS HIDRAULICOS EM PCHS

MONITORIA: Exemplo Streeter - TUBO: 9 - DECHO: 2

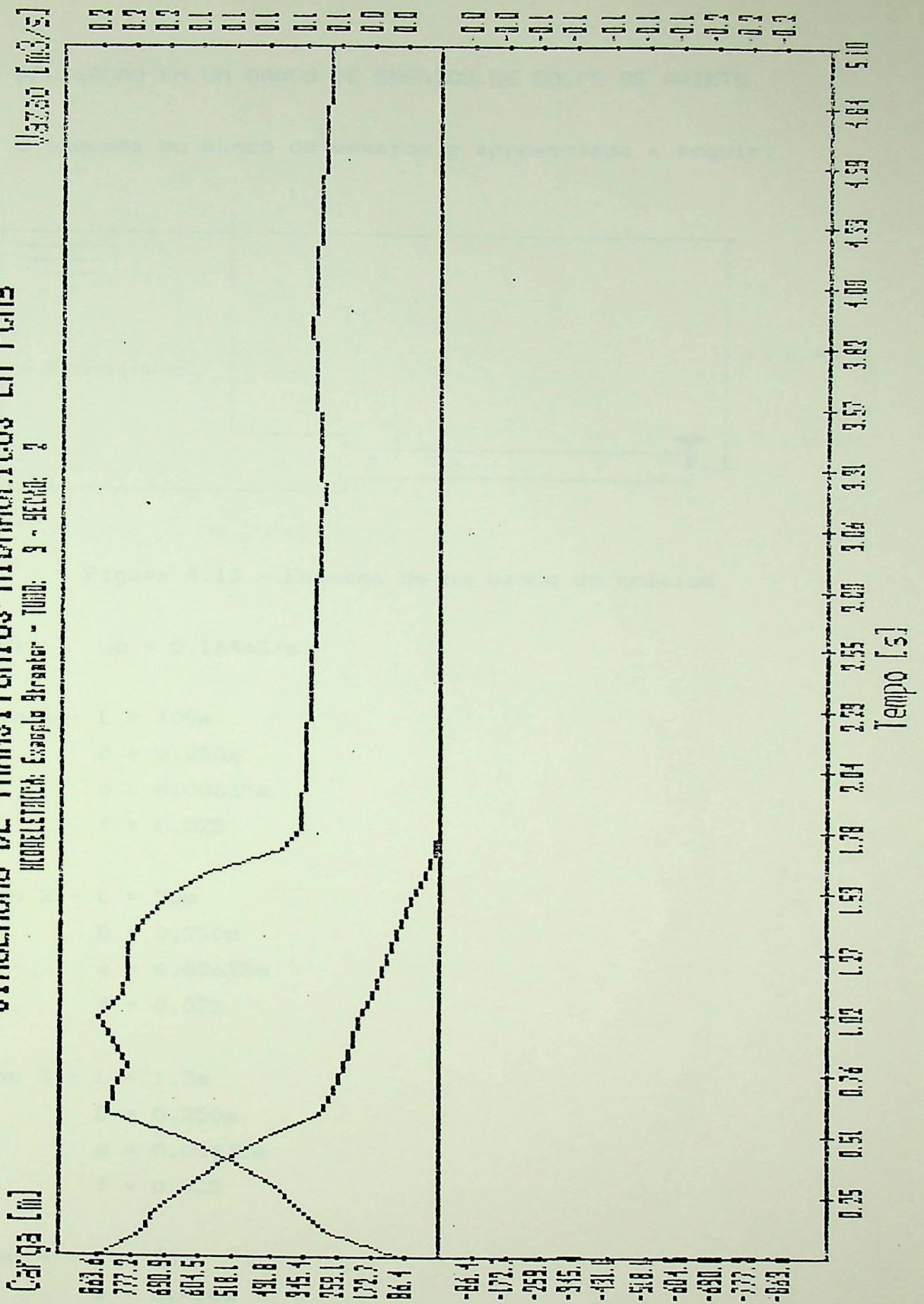


Figura 4.12 - Resultado da simulacão do exemplo Streeter através do método das características[2]

4.2- APLICAÇÃO EM UM BANCO DE ENSAIOS DE GOLPE DE ARIETE

O esquema do banco de ensaios é apresentado a seguir:

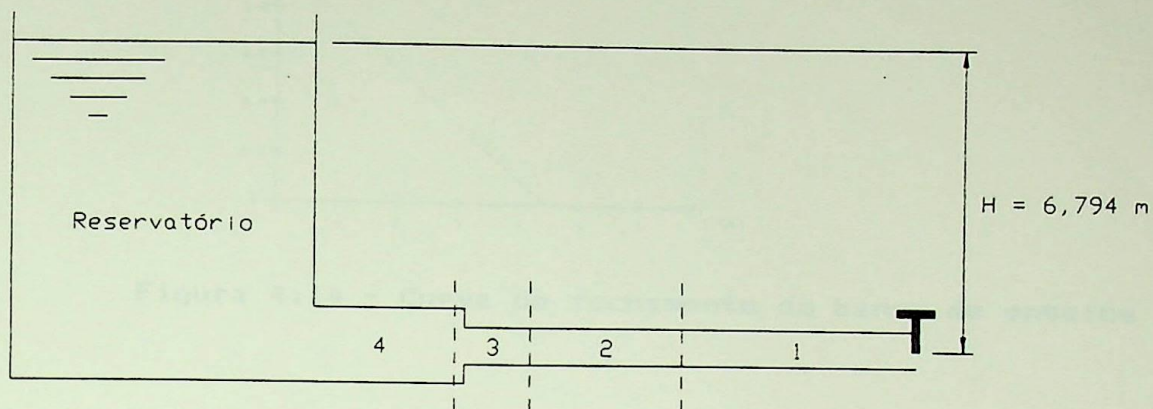


Figura 4.13 - Esquema de um banco de ensaios

DADOS: $Q_0 = 0.164 \text{ m}^3/\text{s}$

Trecho 1 - $L = 109 \text{ m}$

$D = 0.250 \text{ m}$

$e = 0.00635 \text{ m}$

$f = 0.025$

Trecho 2 - $L = 20 \text{ m}$

$D = 0.250 \text{ m}$

$e = 0.00635 \text{ m}$

$f = 0.025$

Trecho 3 - $L = 1.3 \text{ m}$

$D = 0.250 \text{ m}$

$e = 0.00635 \text{ m}$

$f = 0.025$

Trecho 4 - $L = 24 \text{ m}$

$D = 0.450 \text{ m}$

$e = 0.00635 \text{ m}$

$f = 0.025$

CURVA DE FECHAMENTO (Figura 4.14):

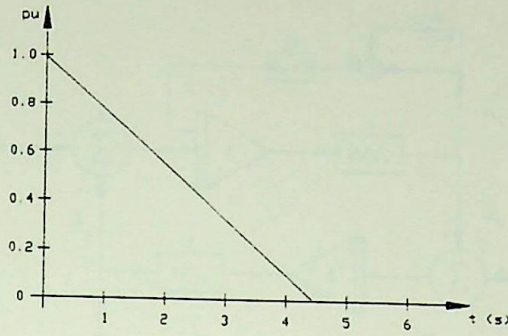


Figura 4.14 - Curva de fechamento do banco de ensaios

PARÂMETROS CALCULADOS PARA SIMULAÇÃO:

Trecho 1,2,3 - $L_{123} = 5.42628$

$C_{123} = 2.1689 \cdot 10E-3$

$R_{123} = 0.909690$

Trecho 4 - $L_4 = 0.308477$

$C_4 = 1.5926 \cdot 10E-3$

$R_4 = 8.84070 \cdot 10E-3$

CIRCUITO ANALÓGICO COM DOIS TRECHOS (Figura 4.15):

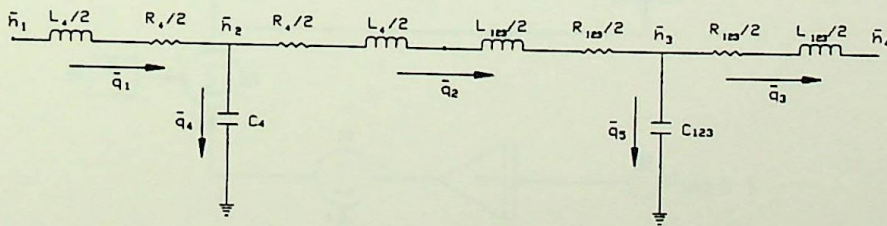


Figura 4.15 - Circuito analógico do banco de ensaios

MODELO ANALÓGICO (Figura 4.16):

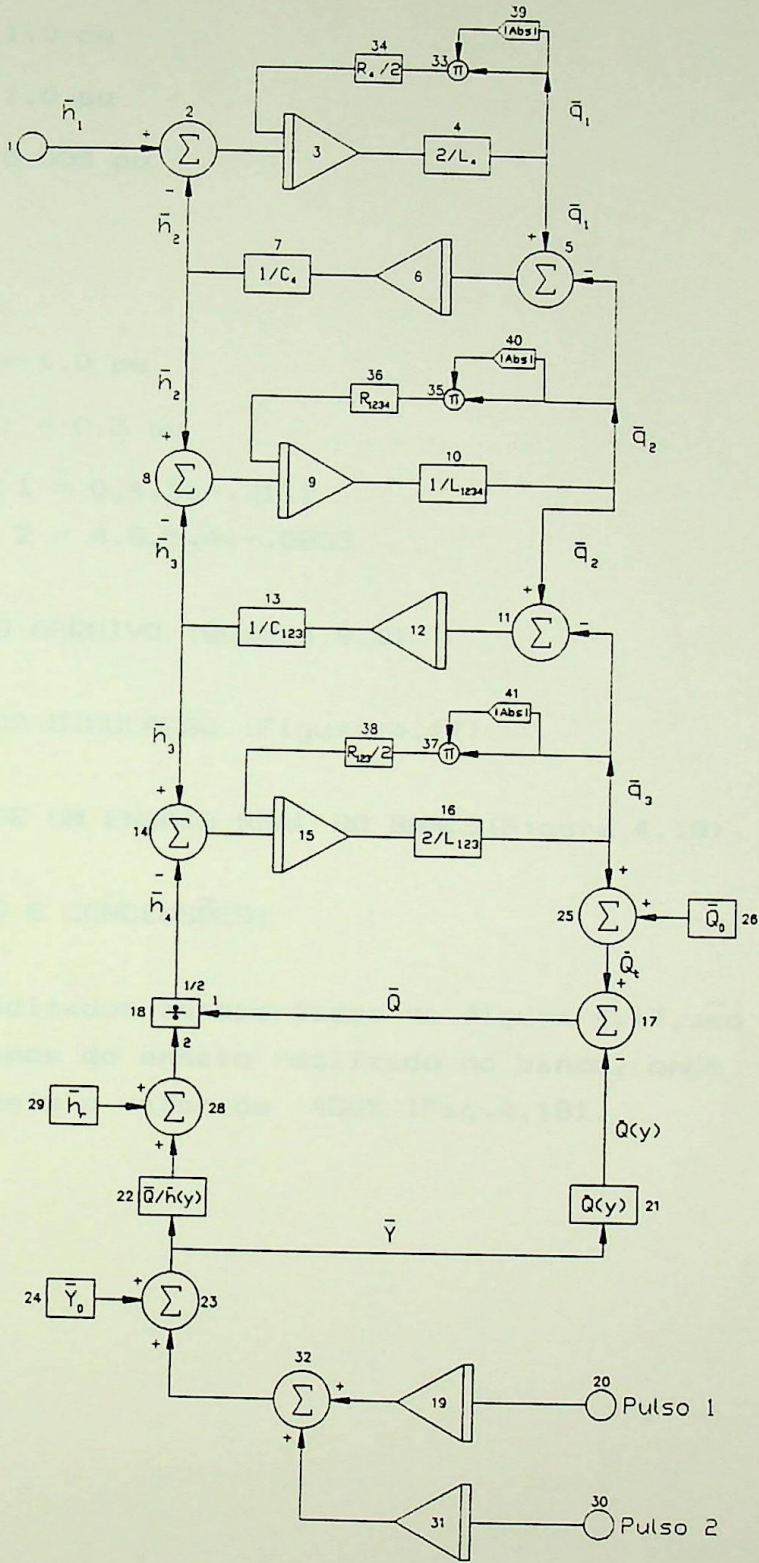


Figura 4.16 - Modelo analógico completo para o banco

DADOS PARA O FECHAMENTO:

$$\bar{Q}_0 = 1.0 \text{ pu}$$

$$\bar{Y}_0 = 1.0 \text{ pu}$$

$$\bar{h}_r = 0.005 \text{ pu}$$

FUNÇÕES:

$$\bar{Q}(y) = 1.0 \text{ pu}$$

$$\bar{Q}/\bar{h}(y) = 0.3 \text{ pu}$$

$$\text{Pulso 1} = 0, 4.5, -.2111$$

$$\text{Pulso 2} = 4.8, 5.4, -.0833$$

LISTAGEM DO ARQUIVO (Quadro 4.3)

RESULTADO DA SIMULAÇÃO (Figura 4.17)

RESULTADO DE UM ENSAIO REAL DO BANCO (Figura 4.18)

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES:

Os resultados apresentados na figura 4.17, são bem semelhantes aos resultados do ensaio realizado no banco, onde a sobrepressão máxima atingiu o valor de 430% (Fig.4.18).

Horz:	Bloco no.	Escala min.	Escala max.	Comentários
	0 ,	0.0000	20.0000	tempo
Y1:	18 ,	-5.0000	5.0000	sobrepressão
Y2:	16 ,	-1.0000	1.0000	vazão
Y3:	32 ,	-1.0000	1.0000	fechamento
Y4:	11 ,	-0.5000000	0.5000000	vazão de capacidade
0.0000		1 PLS		
20.0000				
0.0000				
		2 SUM	1	-7
0.0000		3 INT	2	-34
0.1542380		4 ATT	3	
		5 SUM	4	-10
0.0000		6 INT	5	
0.0015926		7 ATT	6	
		8 SUM	7	-13
0.0000		9 INT	8	-36
5.7347		10 ATT	9	
		11 SUM	10	-16
0.0000		12 INT	11	
0.0021689		13 ATT	12	
		14 SUM	13	-18
0.0000		15 INT	14	-38
2.7131		16 ATT	15	
		17 SUM	25	-21
		18 DIV	17	28
0.0000		19 INT	20	
0.0000		20 PLS		
4.5000				
-0.2111000				
1.0000		21 GAI	23	
0.3000000		22 GAI	23	
		23 SUM	24	32
1.0000		24 CON		
		25 SUM	16	26
1.0000		26 CON		
		28 SUM	22	29
0.0050000		29 CON		
4.8000		30 PLS		
5.4000				
-0.0833015				
0.0000		31 INT	30	
		32 SUM	19	31
		33 MUL	4	39
0.0044200		34 GAI	33	
		35 MUL	10	40
0.4592600		36 GAI	35	
		37 MUL	16	41
0.4548450		38 GAI	37	
		39 ABS	4	
		40 ABS	10	
		41 ABS	16	

Quadro 4.3 - Listagem do arquivo do banco de ensaios

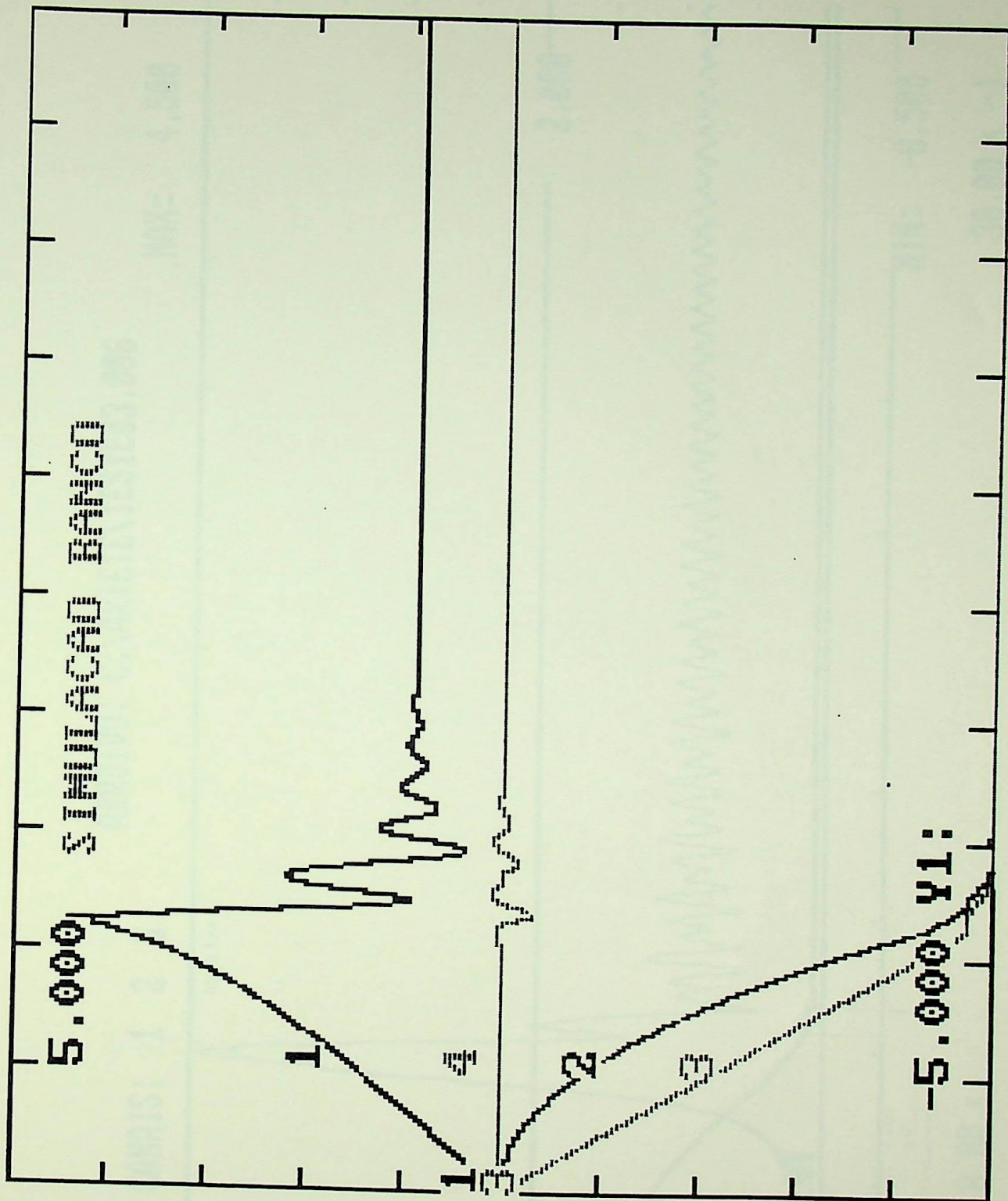
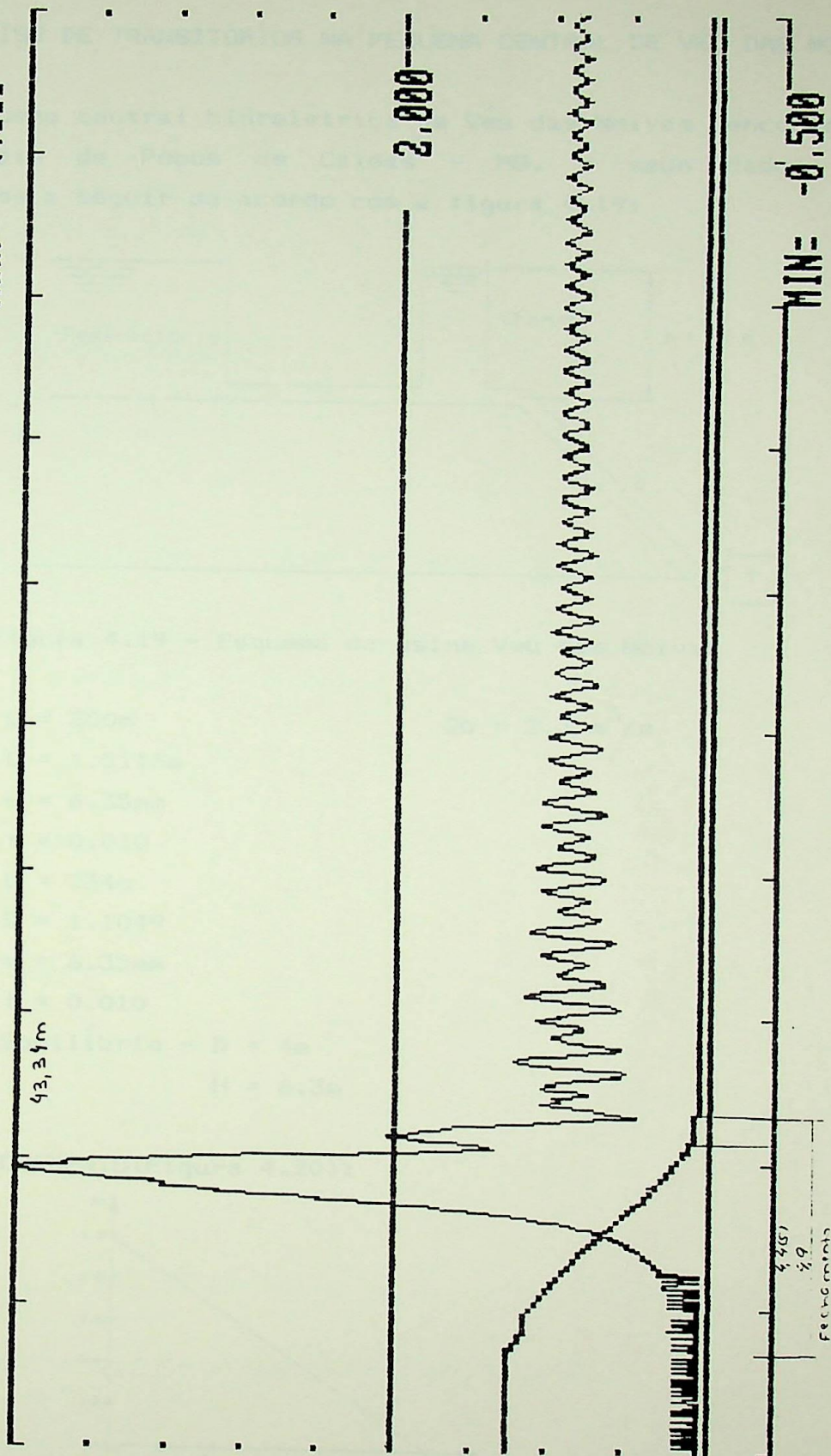


Figura 4.17 - Resultado da simulação do banco

ARQUIVO: C:\ARIETE\TESTE03.006

CANAIS: 1 2 3

MAX= 4.500



MIN= -0.500

30.00 s ->

<- 0.00 s

Figura 4.18 - Resultado de um ensaio real do banco

4.3 - ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS NA PEQUENA CENTRAL DE VÉU DAS NOIVAS

A pequena central hidrelétrica de Véu das Noivas encontra-se no município de Poços de Caldas - MG, e seus dados são apresentados a seguir de acordo com a figura 4.19:

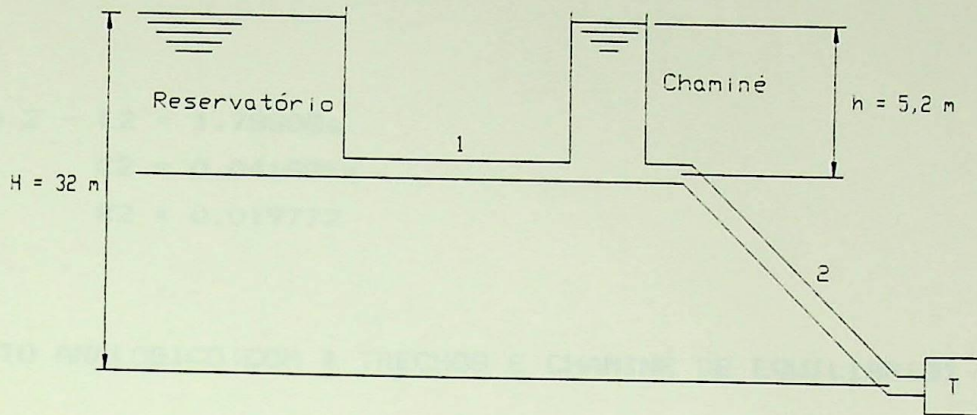


Figura 4.19 - Esquema da usina Véu das Noivas

Trecho 1 - $L = 300\text{m}$

$Q_0 = 2.3 \text{ m}^3/\text{s}$

$D = 1.5113\text{m}$

$e = 6.35\text{mm}$

$f = 0.010$

Trecho 2 - $L = 234\text{m}$

$D = 1.1049$

$e = 6.35\text{mm}$

$f = 0.010$

Chaminé de Equilíbrio - $D = 4\text{m}$

$H = 6.3\text{m}$

CURVA DE FECHAMENTO (Figura 4.20):

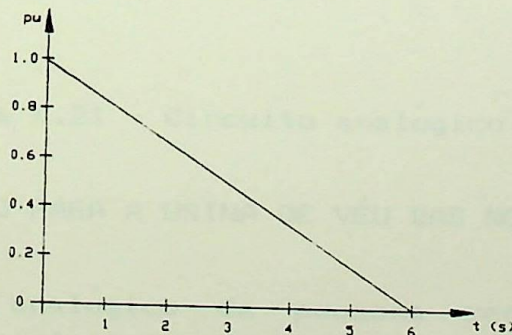


Figura 4.20 - Curva de fechamento de Véu das Noivas

PARÂMETROS CALCULADOS:

Trecho 1 - $L1 = 1.22529s$
 $C1 = 0.12538s$
 $R1 = 5.1975E-3$

Trecho 2 - $L2 = 1.78808s$
 $C2 = 0.041885s$
 $R2 = 0.019772$

CIRCUITO ANALÓGICO (COM 4 TRECHOS E CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO)

Para a simulação, foi considerado para o trecho 1, somente um circuito e o trecho 2 foi dividido em 3 circuitos (conforme figura 4.21):

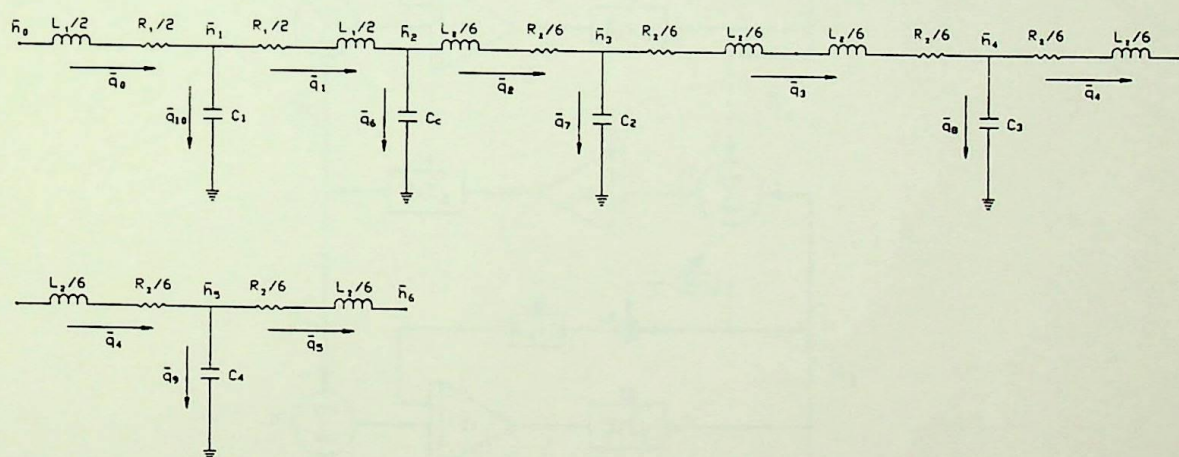
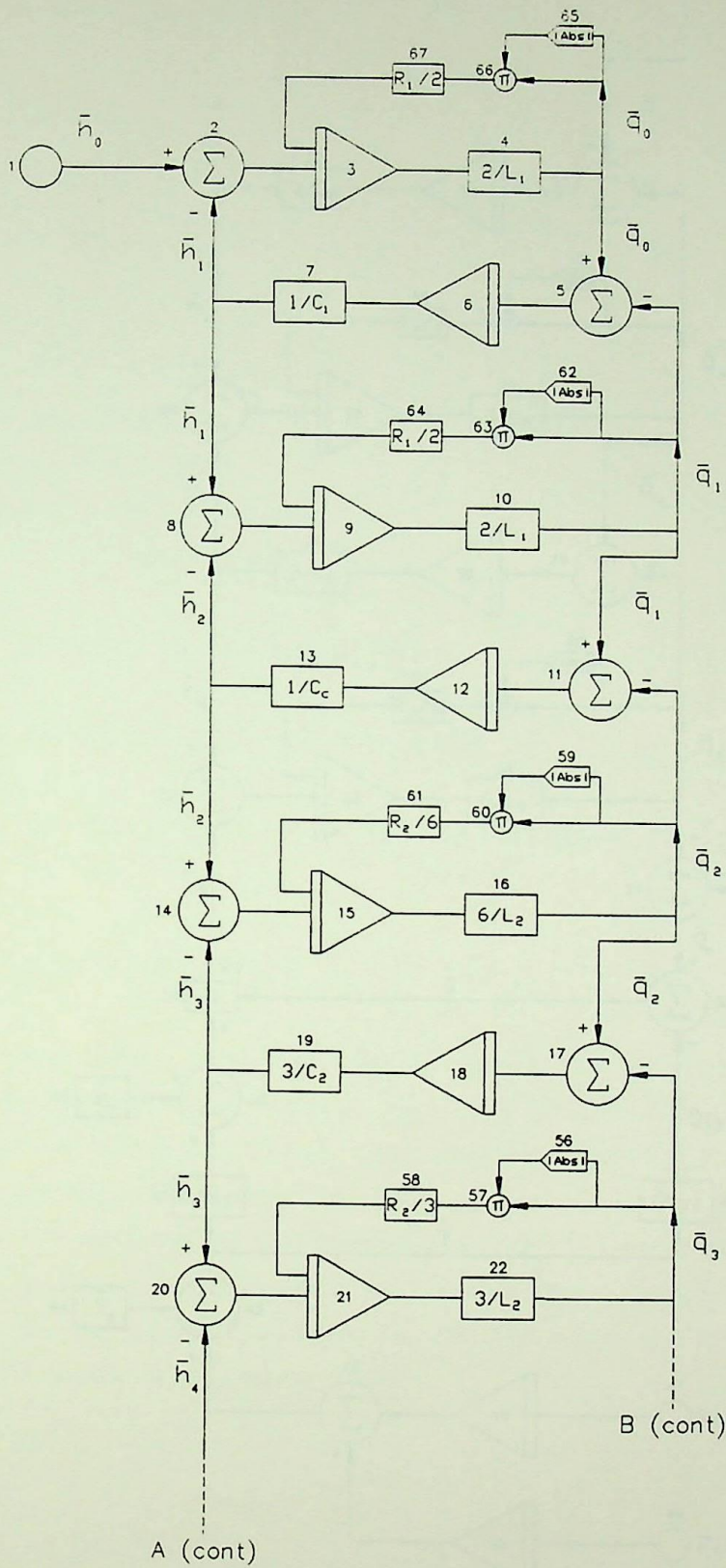


Figura 4.21 - Circuito analógico de Veu das Noivas

MODELO ANALÓGICO PARA A USINA DE VÉU DAS NOIVAS:

O modelo analógico da pequena central hidrelétrica é representado através da figura 4.22.



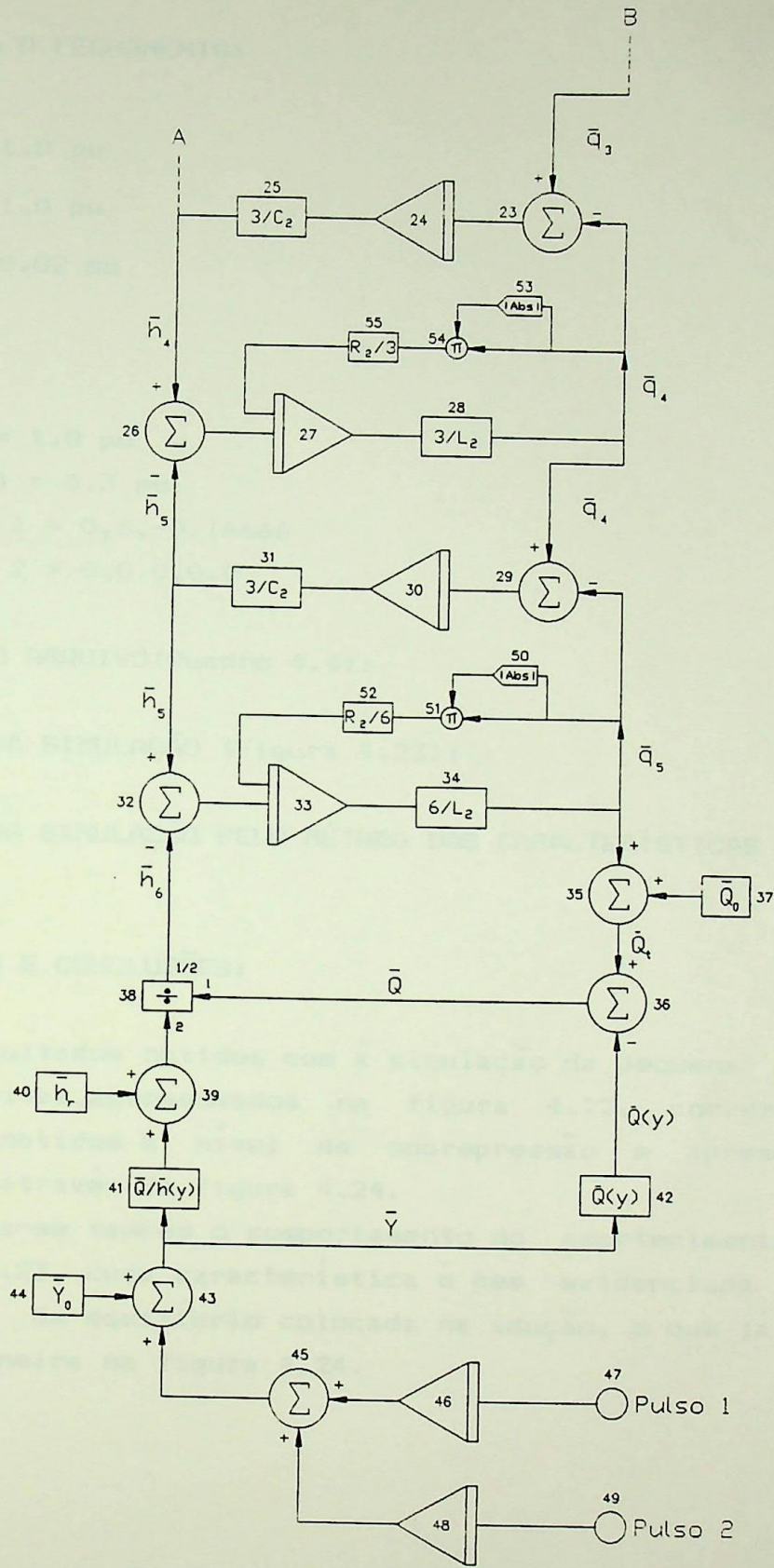


Figura 4.22 - Modelo analógico de Veu das Noivas

DADOS PARA O FECHAMENTO:

$$\bar{Q}_0 = 1.0 \text{ pu}$$

$$\bar{Y}_0 = 1.0 \text{ pu}$$

$$\bar{h}_r = 0.02 \text{ pu}$$

FUNÇÕES:

$$Q(y) = 1.0 \text{ pu}$$

$$Q/h(y) = 0.3 \text{ pu}$$

$$\text{Pulso 1} = 0,6,-0.16666$$

$$\text{Pulso 2} = 0,0.0,0.0$$

LISTAGEM DO ARQUIVO(Quadro 4.4):

RESULTADO DA SIMULAÇÃO (Figura 4.23):

RESULTADO DA SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS [2](Figura 4.24):

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES:

Os resultados obtidos com a simulação da pequena central de Veu das Noivas, apresentados na figura 4.23, correspondem aos resultados obtidos a nível de sobrepressão e apresentado por Bordón [2] através da figura 4.24.

Observa-se também o comportamento do amortecimento da onda na figura 4.23, cuja característica é bem evidenciada em função da chaminé de equilíbrio colocada na adução, o que já não ocorre da mesma maneira na figura 4.24.

Horz:	Bloco no.	Escala min.	Escala max.	Comentários
	0 ,	0.0000 ,	20.0000 ;	tempo
Y1:	38 ,	-0.5000000 ,	0.5000000 ;	sobrepressão
Y2:	34 ,	-1.0000 ,	1.0000 ;	vazão
Y3:	45 ,	-1.0000 ,	1.0000 ;	fechamento
Y4:	29 ,	-0.5000000 ,	0.5000000 ;	vazão de capacidade
	2.0000			
	20.0000			
	0.0000			
		1 PLS		
		2 SUM	1	-7
0.0000		3 INT	2	-67
0.6126450		4 ATT	3	
		5 SUM	4	-10
0.0000		6 INT	5	
0.1253800		7 ATT	6	
		8 SUM	7	-13
0.0000		9 INT	8	-64
0.6126450		10 ATT	9	
		11 SUM	10	-16
0.0000		12 INT	11	
174.8300		13 ATT	12	
		14 SUM	13	-19
0.0000		15 INT	14	-61
0.2980000		16 ATT	15	
		17 SUM	16	-22
0.0000		18 INT	17	
0.0139600		19 ATT	18	
		20 SUM	19	-25
0.0000		21 INT	20	-58
0.5960000		22 ATT	21	
		23 SUM	22	-28
0.0000		24 INT	23	
0.0139600		25 ATT	24	
		26 SUM	25	-31
0.0000		27 INT	26	-55
0.5960000		28 ATT	27	
		29 SUM	28	-34
0.0000		30 INT	29	
0.0139600		31 ATT	30	
		32 SUM	31	-38
0.0000		33 INT	32	-52
0.2980000		34 ATT	33	
		35 SUM	34	37
		36 SUM	35	-42
1.0000		37 CON		
		38 DIV	36	39
		39 SUM	40	41
0.0200000		40 CON		
0.3000000		41 GA I	43	
1.0000		42 GA I	43	
		43 SUM	44	45
1.0000		44 CON		

0.0000	45 SUM	46	48
0.0000	46 INT	47	
6.0000	47 PLS		
-0.1666660			
0.0000	48 INT	49	
0.0000	49 PLS		
0.0000			
0.0000			
0.0032953	50 ABS	34	
	51 MUL	34	50
	52 GAI	51	
	53 ABS	28	
0.0065900	54 MUL	28	53
	55 GAI	54	
	56 ABS	22	
0.0065900	57 MUL	22	56
	58 GAI	57	
	59 ABS	16	
0.0032953	60 MUL	16	59
	61 GAI	60	
	62 ABS	10	
0.0025987	63 MUL	10	62
	64 GAI	63	
	65 ABS	4	
0.0025987	66 MUL	4	65
	67 GAI	66	

Quadro 4.4 - Listagem do arquivo para Veu das Noivas

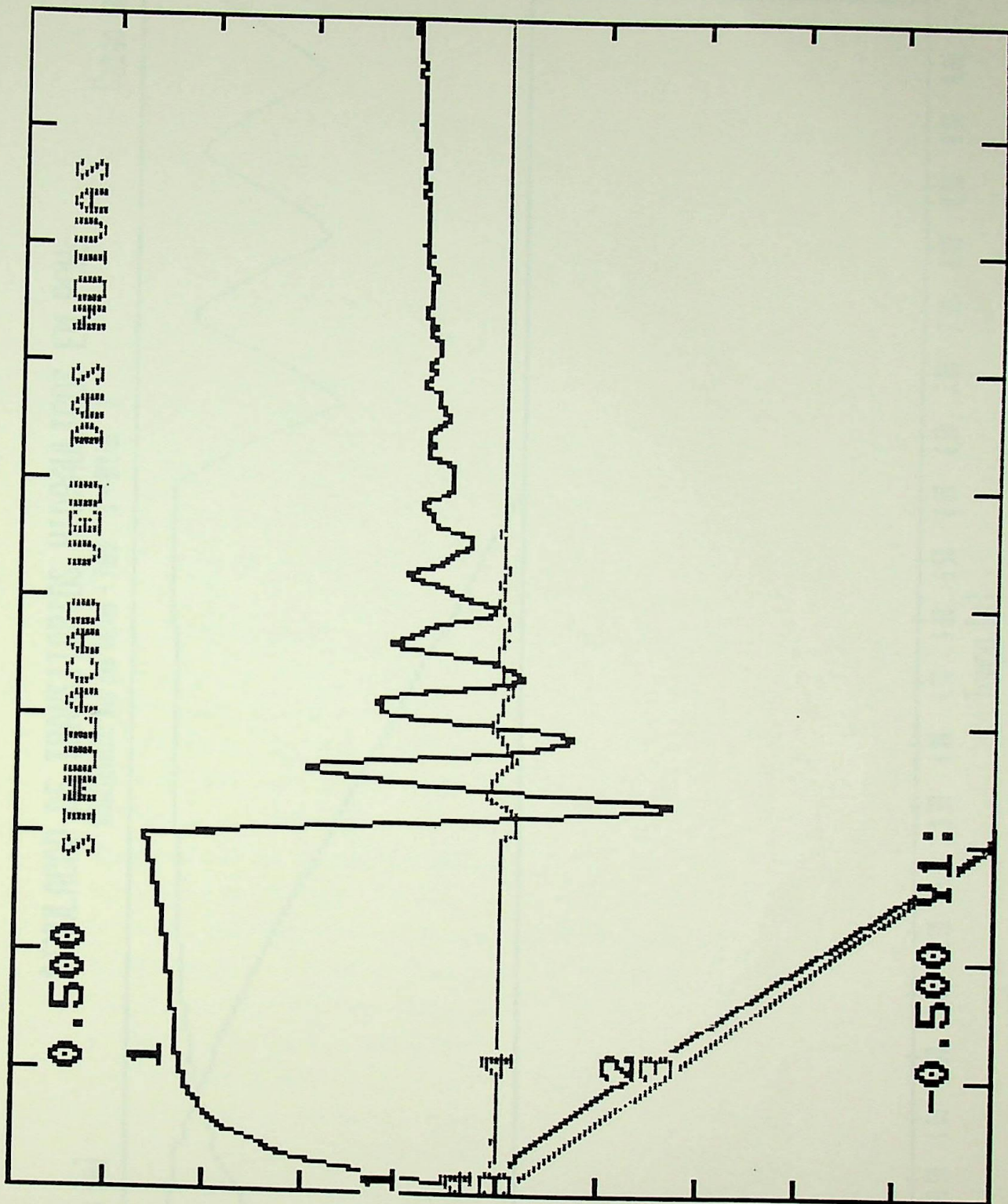


Figura 4.23 - Resultado da simulação de Véu das Noivas

SIMULAÇÃO DE TRANSITORIOS HIDRAULICOS EM PCHs

HIDROELÉTRICA: Veu das Noivas - TUBO: 9 - SEÇÃO: 7

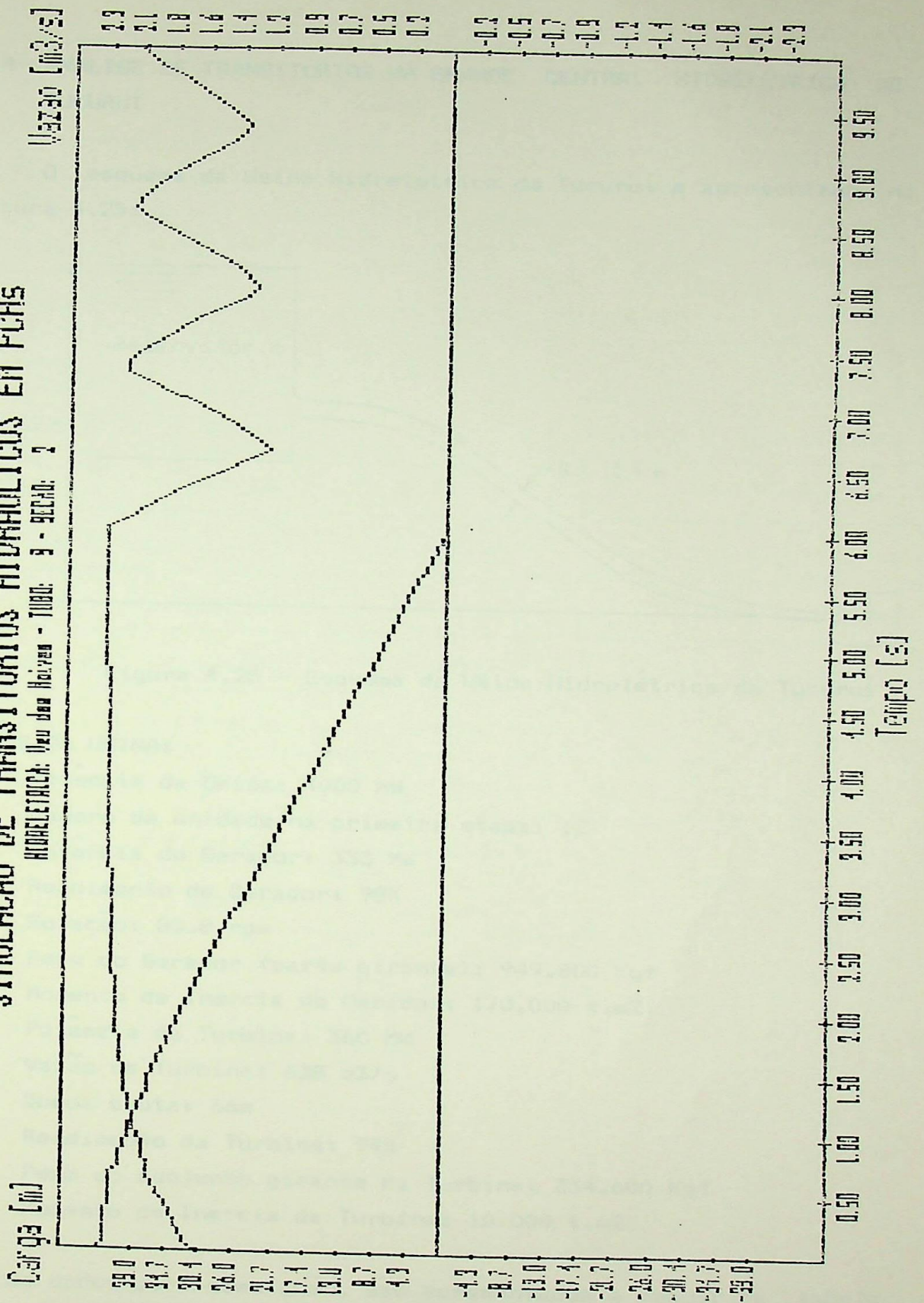


Figura 4.24 - Resultado da simulação de Veu das Noivas pelo Método das Características[2]

4.4- ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS NA GRANDE CENTRAL HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ

O esquema da Usina Hidrelétrica de Tucuruí é apresentado na figura 4.25:

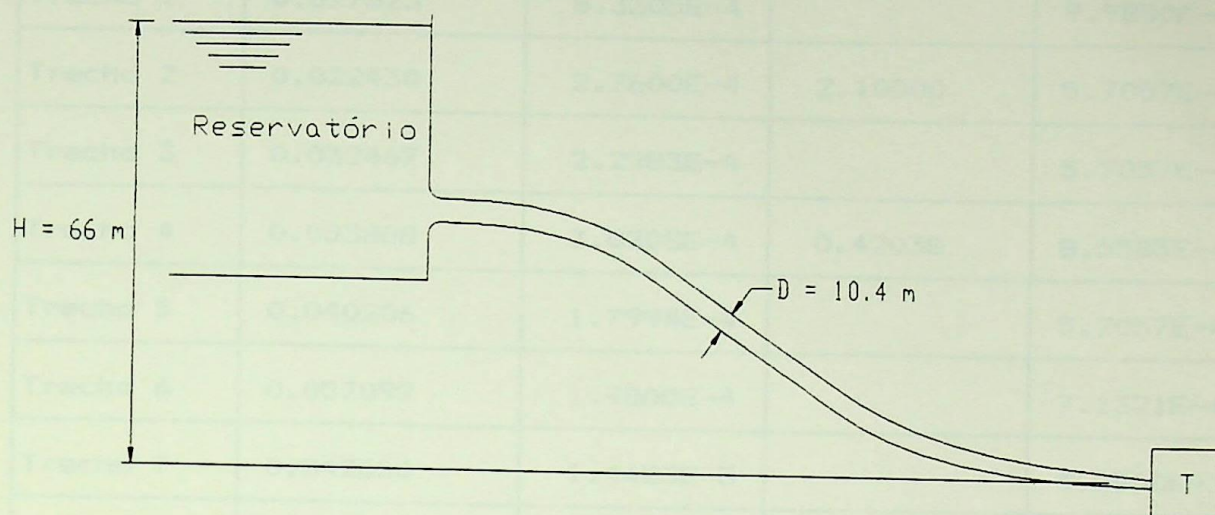


Figura 4.25 - Esquema da Usina Hidrelétrica de Tucuruí

DADOS DA USINA:

Potência da Usina: 4000 MW

Número de unidade na primeira etapa: 12

Potência do Gerador: 333 MW

Rendimento do Gerador: 98%

Rotação: 80.8 rpm

Peso do Gerador (parte girante): 949.800 Kgf

Momento de Inércia do Gerador: 170.000 t.m²

Potência da Turbina: 360 MW

Vazão da Turbina: 628 m³/s

Queda bruta: 66m

Rendimento da Turbina: 94%

Peso do conjunto girante da Turbina: 354.600 Kgf

Momento de Inércia da Turbina: 10.000 t.m²

Os dados para simulação, são apresentados a seguir na tabela 4.1, cujos cálculos foram feitos com base nos parâmetros e dados de projeto (Apêndice B):

PARÂMETROS PARA A SIMULAÇÃO (Tabela 4.1):

Trecho no.	Inércia L(s)	Capac.C(s)	Capac.Cc(s)	Resist.()
Trecho 1	0.027623	8.3305E-4		9.9850E-4
Trecho 2	0.022430	2.7600E-4	2.10000	5.7057E-4
Trecho 3	0.032467	2.2283E-4		5.7057E-4
Trecho 4	0.053888	3.0208E-4	0.42038	8.5585E-4
Trecho 5	0.040206	1.7994E-4		5.7057E-4
Trecho 6	0.057092	1.9800E-4		7.1321E-4
Trecho 7	0.342550	1.4423E-3		4.2800E-3
Trecho 8	0.342550	1.4423E-3		4.2800E-3
Trecho 9	0.076370	2.5875E-4		8.5585E-4
Trecho 10	0.153150	3.9459E-4		1.4977E-3
Trecho 11.1	0.068950	1.7800E-3		1.2827E-4
Trecho 11.2	0.082370	1.4900E-3		1.2837E-4
Trecho 11.3	0.185760	6.6240E-4		1.2837E-4
Trecho 11.4	0.283800	1.9142E-4		8.5585E-5

Tabela 4.1 - Parâmetros para a simulação da UHE-Tucuruí

CIRCUITO ANALÓGICO EM ONZE TRECHOS:

O circuito analógico de simulação é apresentado em onze trechos, sendo que o último trecho representa a caixa espiral, que foi dividida em quatro partes, e cujos valores equivalentes estão representados na figura 4.26:

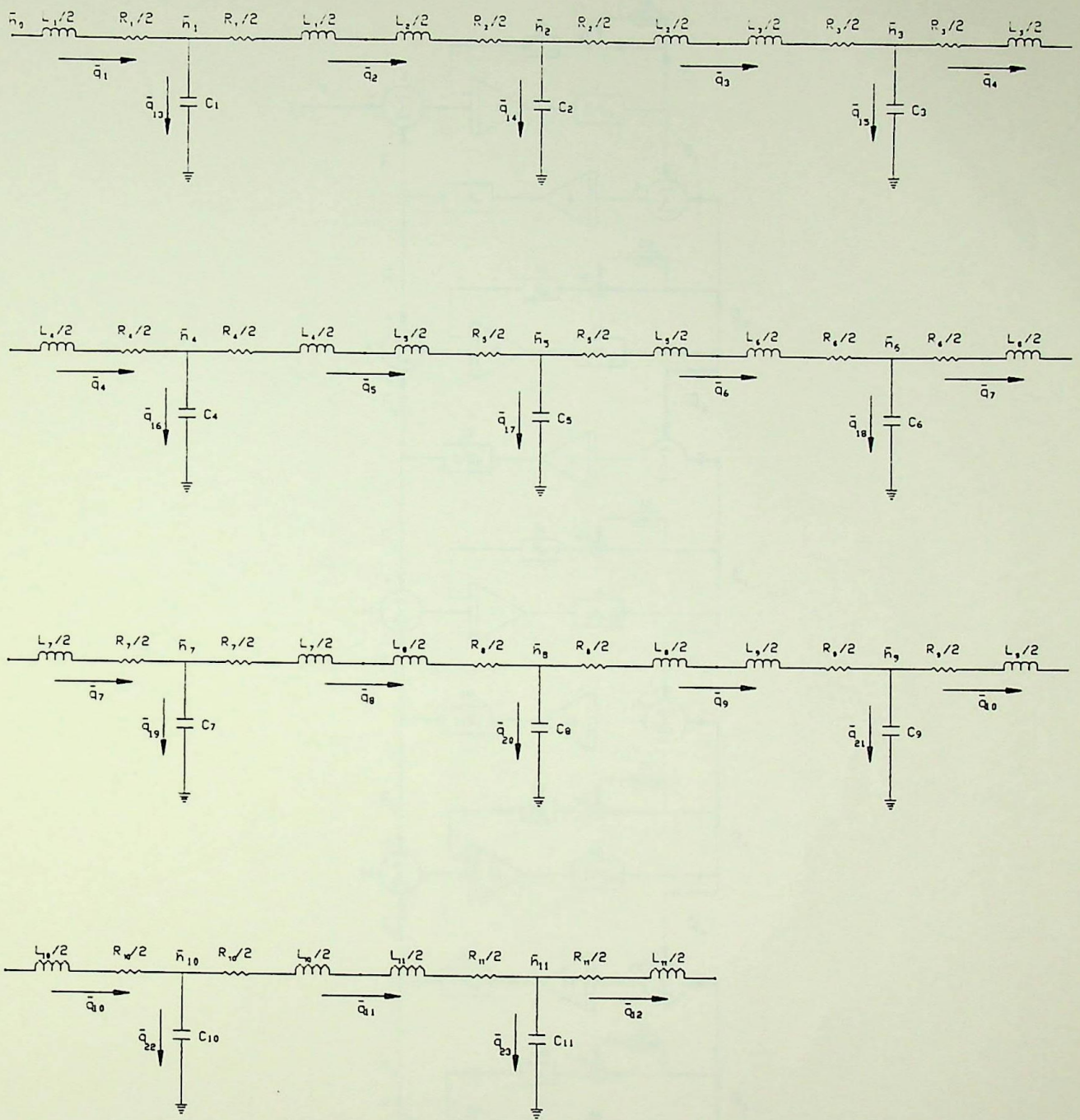


Figura 4.26 - Circuito analógico da UHE-Tucuruí

MODELO ANALÓGICO DA UHE - TUCURUÍ (Figuras 4.27a, 4.27b, 4.27c):

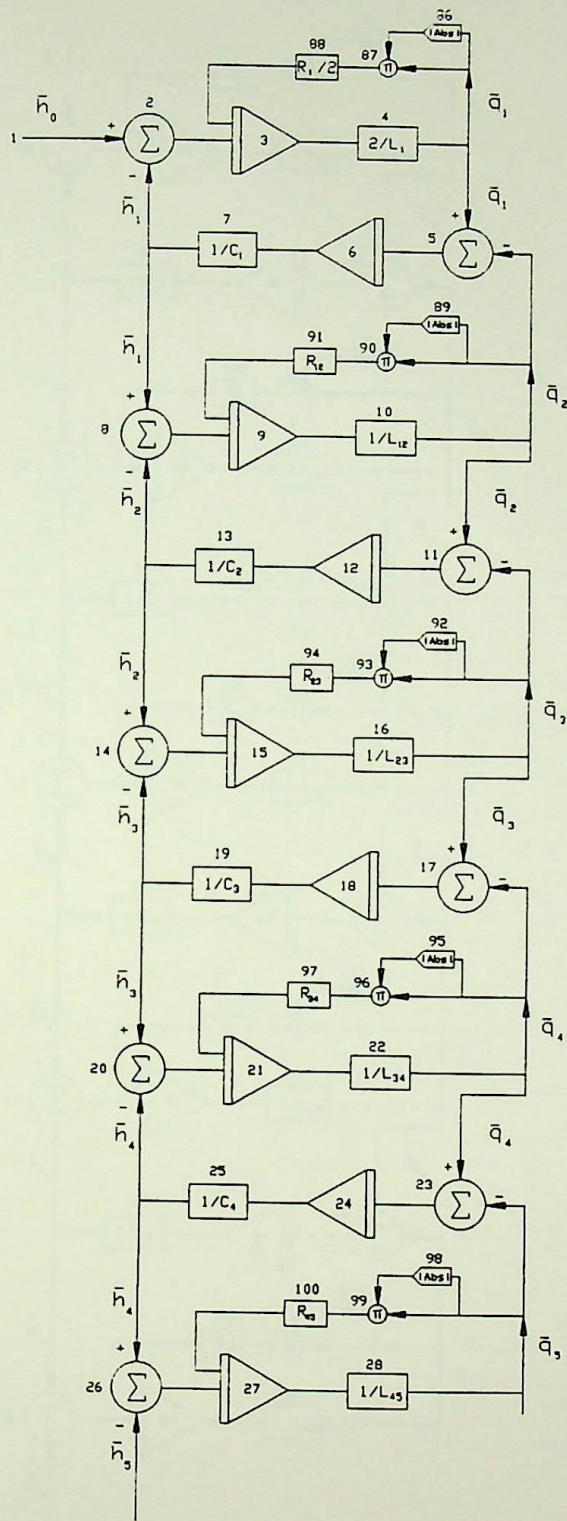


Figura 4.27a - Modelo analógico da UHE - Tucuruí (parte1)

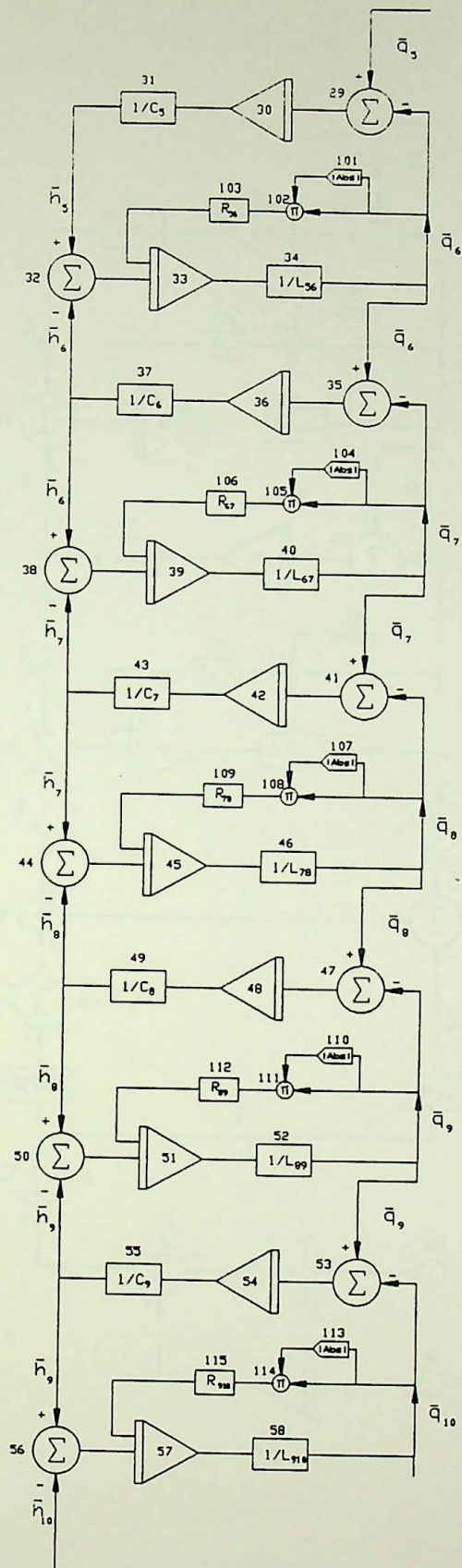


Figura 4.27b - Modelo analógico da UHE - Tucuruí (parte2)

DADOS PARA O FECHAMENTO:

$$\bar{Q}_0 = 1.11 \text{ pu}$$

$$\bar{Y}_0 = 1.0 \text{ pu}$$

$$\bar{h}_r = 0.10 \text{ pu}$$

FUNÇÕES:

As funções $\bar{Q}(y)$ e $\bar{Q}/\bar{h}(y)$ para a turbina da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, foram retiradas do modelo reduzido através das curvas de Colina, transpostas do modelo para o protótipo e apresentadas a seguir:

Função $\bar{Q}(y)$ (Tabela 4.2):

Abertura Y(pu)	Vazão (m ³ /s)	$\bar{Q}(y)$ (pu)
0.952	666.1	1.060
0.873	628.0	1.000
0.793	588.5	0.937
0.714	542.7	0.864
0.673	516.8	0.823
0.635	495.8	0.789
0.555	438.9	0.698
0.476	371.5	0.591
0.397	302.9	0.482
0.000	0.000	0.000

Tabela 4.2 - Funções $\bar{Q}(y)$

Função $\bar{Q}/\bar{h}(y)$:

A função que representa a variação da vazão em relação a variação de queda no golpe de ariete, para cada abertura do sistema é representada pela tabela 4.3:

Abertura Y (pu)	ΔQ_y (pu)	Δh (pu)	$\Delta Q / \Delta h$ (pu)
0.952	0.18789	0.3424	0.5480
0.873	0.17510	0.3424	0.5110
0.793	0.16450	0.3424	0.4800
0.714	0.15780	0.3424	0.4610
0.673	0.15730	0.3424	0.4590
0.635	0.15540	0.3424	0.4530
0.555	0.14330	0.3424	0.4180
0.476	0.12430	0.3424	0.3630
0.397	0.1016	0.3424	0.3110

Tabela 4.3 - Função $\bar{Q}/\bar{h}(y)$

PULSOS:

Pulso 1 = 0,5.2,-0.15380

Pulso 2 = 5.2,12.2,-0.02857

CURVA DE FECHAMENTO (Figura 4.28):

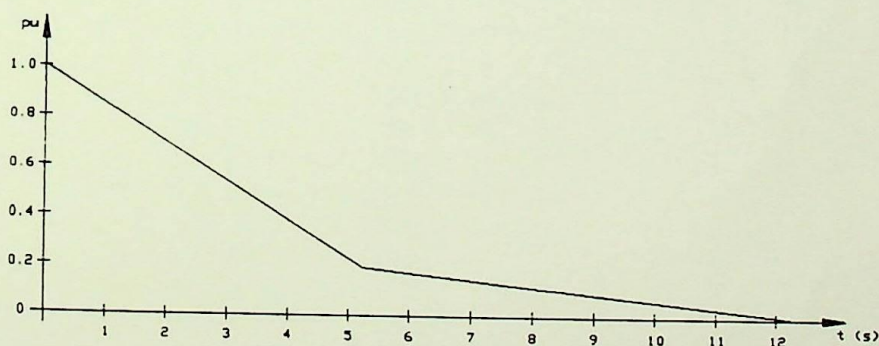


Figura 4.28 - Curva de fechamento para a UHE-Tucuruí

LISTAGEM DO ARQUIVO (Quadro 4.5):

RESULTADO DA SIMULAÇÃO (Figura 4.29):

RESULTADO DE UMA REJEIÇÃO DE CARGA DE 355 MW DA TURBINA (Fig.4.30):

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES:

Os resultados da simulação da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, se comparado com o resultado de rejeição real de 355MW apresentado na figura 4.30., a menos de escala e também o fato do oscilograma apresentar resultados dimensionais, são bem semelhantes não somente com relação aos valores de sobrepressão, mas também com relação ao comportamento da curva durante o fechamento lento do sistema de distribuição.

	Bloco no.	Escala min.	Escala max.	Comentários
Horz:	0 ,	0.0000 ,	12.0000 ;	tempo
Y1:	85 ,	-0.5000000 ,	0.5000000 ;	sobrepressao
Y2:	70 ,	-1.0000 ,	1.0000 ;	vazao
Y3:	77 ,	-1.0000 ,	1.0000 ;	fechamento
Y4:	65 ,	-0.1000000 ,	0.1000000 ;	vazao de capacidade
	0.0000	1 PLS		
	20.0000			
	0.0000			
		2 SUM	1 -7	
	0.0000	3 INT	2 -88	
	0.0138110	4 ATT	3	
		5 SUM	4 -10	
	0.0000	6 INT	5	
	833.050E-06	7 ATT	6	
		8 SUM	7 -13	
	0.0000	9 INT	8 -91	
	0.0250260	10 ATT	9	
		11 SUM	10 -16	
	0.0000	12 INT	11	
	2.1021	13 ATT	12	
		14 SUM	13 -19	
	0.0000	15 INT	14 -94	
	0.0274480	16 ATT	15	
		17 SUM	16 -22	
	0.0000	18 INT	17	
	222.830E-06	19 ATT	18	
		20 SUM	19 -25	
	0.0000	21 INT	20 -97	
	0.0431770	22 ATT	21	
		23 SUM	22 -28	
	0.0000	24 INT	23	
	0.4206800	25 ATT	24	
		26 SUM	25 -31	
	0.0000	27 INT	26 -100	
	0.0470470	28 ATT	27	
		29 SUM	28 -34	
	0.0000	30 INT	29	
	179.940E-06	31 ATT	30	
		32 SUM	31 -37	
	0.0000	33 INT	32 -103	
	0.0486490	34 ATT	33	
		35 SUM	34 -40	
	0.0000	36 INT	35	
	198.000E-06	37 ATT	36	
		38 SUM	37 -43	
	0.0000	39 INT	38 -106	
	0.1998210	40 ATT	39	
		41 SUM	40 -46	
	0.0000	42 INT	41	
	0.0014423	43 ATT	42	
		44 SUM	43 -49	
	0.0000	45 INT	44 -109	

0.3425500	46 ATT	45	
	47 SUM	46	-52
0.0000	48 INT	47	
0.0014423	49 ATT	48	
	50 SUM	49	-55
0.0000	51 INT	50	-112
0.2094600	52 ATT	51	
	53 SUM	52	-58
0.0000	54 INT	53	
258.750E-06	55 ATT	54	
	56 SUM	55	-61
0.0000	57 INT	56	-115
0.1147600	58 ATT	57	
	59 SUM	58	-64
0.0000	60 INT	59	
394.590E-06	61 ATT	60	
	62 SUM	61	-67
0.0000	63 INT	62	-118
0.0906390	64 ATT	63	
	65 SUM	64	-70
0.0000	66 INT	65	
0.0041238	67 ATT	66	
	68 SUM	67	-85
0.0000	69 INT	68	-121
0.0140640	70 ATT	69	
	71 SUM	70	72
1.1100	72 CON		
	73 SUM	71	-74
	74 FNC	75	
1	1.0000	1.1100	
2	0.9520000	1.0600	
3	0.8730000	1.0000	
4	0.7930000	0.9370000	
5	0.7140000	0.8640000	
6	0.6730000	0.8230000	
7	0.6350000	0.7890000	
8	0.5550000	0.6980000	
9	0.4760000	0.5910000	
10	0.3970000	0.4820000	
11	0.0000	0.0000	
	75 SUM	76	77
1.0000	76 CON		
	77 SUM	78	79
0.0000	78 INT	80	
0.0000	79 INT	81	
0.0000	80 PLS		
3.8500			
-0.1800000			
3.8500	81 PLS		
9.4000			
-0.0540000			

		82 FNC	75	
1	1.0000		0.5800000	
2	0.9520000		0.5480000	
3	0.8730000		0.5110000	
4	0.7930000		0.4800000	
5	0.7140000		0.4610000	
6	0.6730000		0.4590000	
7	0.6350000		0.4530000	
8	0.5550000		0.4180000	
9	0.4760000		0.3630000	
10	0.3970000		0.3110000	
11	0.0000		0.0000	
		83 SUM	82	84
0.1000000		84 CON		
		85 DIV	73	83
		86 ABS	4	
		87 MUL	86	4
499.250E-06		88 GAI	87	
		89 ABS	10	
		90 MUL	89	10
784.530E-06		91 GAI	90	
		92 ABS	16	
		93 MUL	92	16
570.570E-06		94 GAI	93	
		95 ABS	22	
		96 MUL	95	22
713.000E-06		97 GAI	96	
		98 ABS	28	
		99 MUL	98	28
713.000E-06		100 GAI	99	
		101 ABS	34	
		102 MUL	101	34
641.890E-06		103 GAI	102	
		104 ABS	40	
		105 MUL	104	40
0.0024966		106 GAI	105	
		107 ABS	46	
		108 MUL	107	46
0.0042800		109 GAI	108	
		110 ABS	52	
		111 MUL	110	52
0.0025679		112 GAI	111	
		113 ABS	58	
		114 MUL	113	58
0.0011767		115 GAI	114	
		116 ABS	64	
		117 MUL	116	64
763.113E-06		118 GAI	117	
		119 ABS	70	
		120 MUL	119	70
14.263E-06		121 GAI	120	

Quadro 4.5- Listagem do arquivo de simulação da UHE-TUC

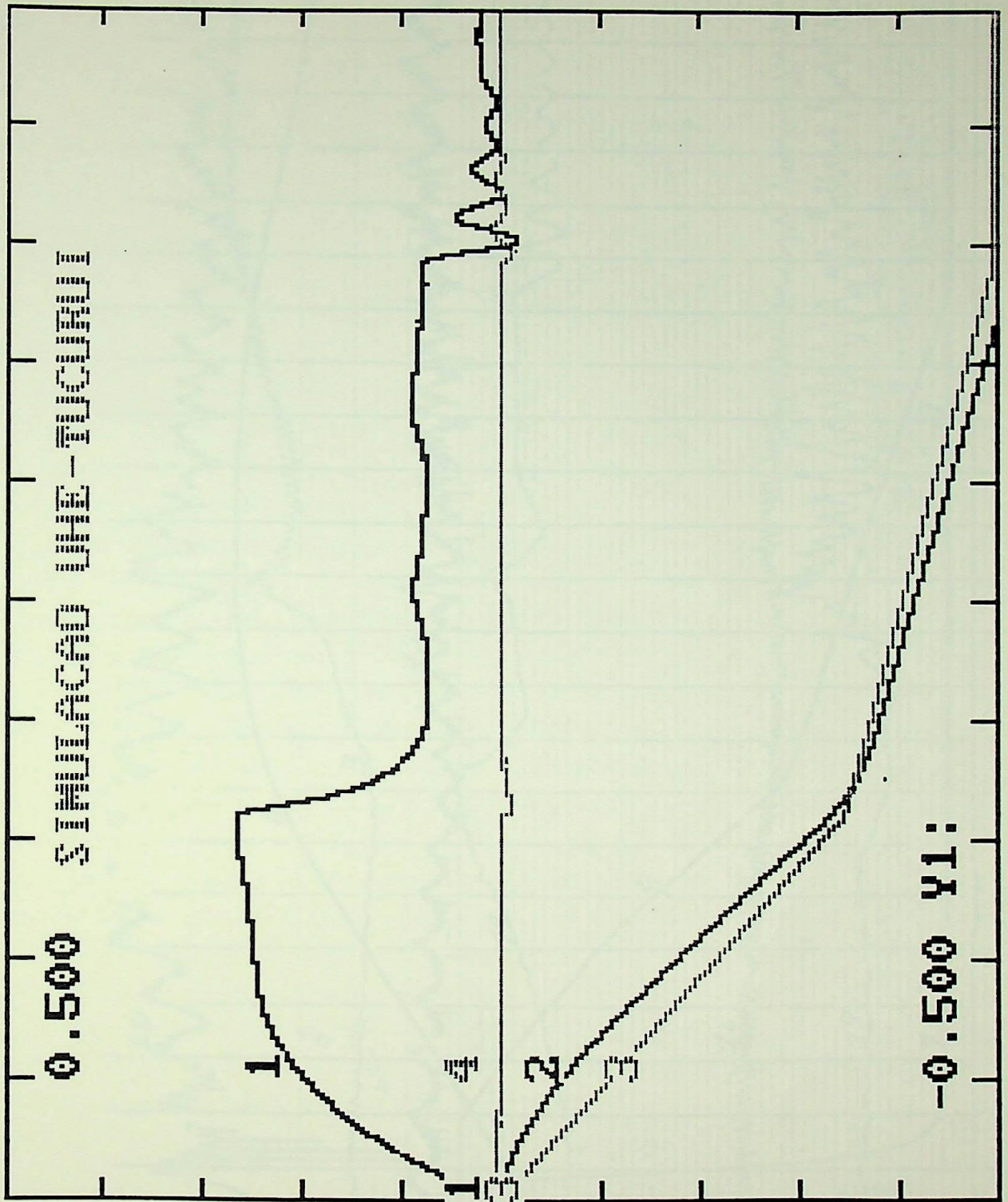


Figura 4.29 - Resultado da simulação da UHE - Tucuruí

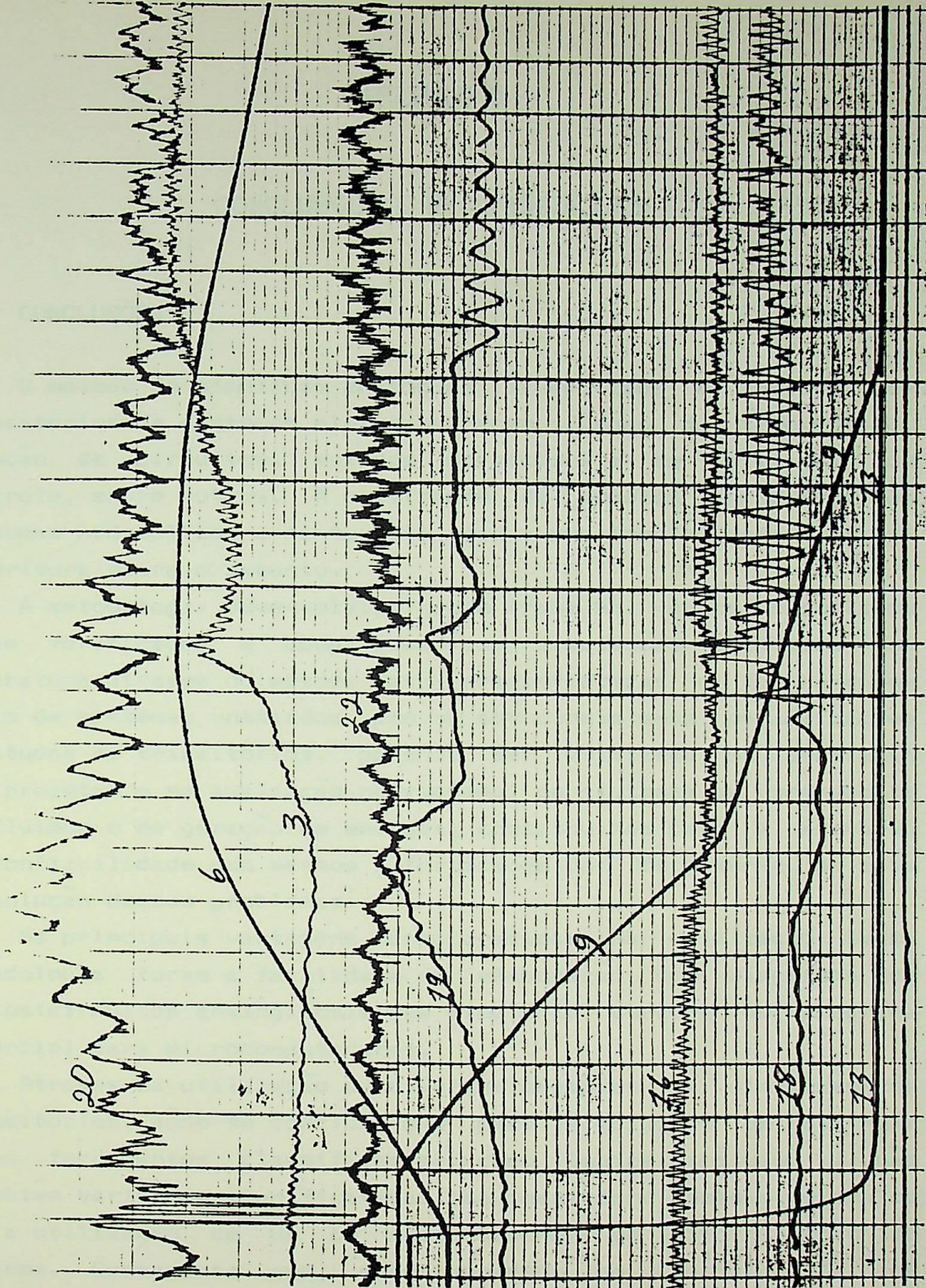


Figura 4.30- Resultado de uma rejeição de carga de 355MW

Sobrepessão curva 19 e fechamento curva 9

Canal 19 - Sobrepessão: Escala 1 kgf/cm²/cm

Canal 9 - Fechamento do distribuidor: Escala 10%/cm

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1- CONCLUSÕES:

O método de simulação analógica é aplicado em estudos de transitórios de sistemas elétricos, como linhas de transmissão, solução de circuitos, estudos operacionais de sistemas de controle, entre outros. A utilização de modelos analógicos em sistemas hidráulicos e de turbina não é usualmente verificada na literatura sobre o assunto.

A metodologia desenvolvida neste trabalho, cujos resultados foram verificados e comparados com simulações efetuadas na literatura através do método das características e de exemplos reais de sistemas ensaiados, provou ser consistente em aplicações e estudos de transitórios, podendo ser utilizada na avaliação de projetos e na avaliação operacional de sistemas de transporte de fluídos e de geração de energia, contribuindo para a melhoria da confiabilidade dos mesmos e fornecendo uma ferramenta a mais na solução desses problemas.

As principais vantagens caracterizadas na utilização dessa metodologia foram a facilidade de elaboração dos diagramas de blocos (circuitos analógicos) e sua simulação através de programa comercial para microcomputadores.

Através da utilização de diversos exemplos na simulação de transitórios, pôde-se concluir que para simulações de sistemas cujos fechamentos classificam-se como lentos (Capítulo 1), não se obtêm variações significativas nos resultados desses exemplos com a utilização de um ou mais trechos na discretização do sistema. Certamente que, como abordado no Capítulo 3, os resultados serão tão mais precisos, quanto maior a discretização do sistema, principalmente aqueles em que as frequências apresentam-se mais elevadas e cujos retardos estariam contribuindo de maneira mais significativa na composição da onda

de sobrepressão.

Existe um pequeno erro quando se considera na determinação do coeficiente de perda de carga R (resistência) o fator de atrito constante, pois na realidade este varia em função do tipo do escoamento (laminar, turbulento hidraulicamente liso, rugoso ou misto) que depende do número de Reynolds (VD/ν) e da rugosidade relativa (k/D). Isto resulta em pequenas variações na região de amortecimento da onda, ou seja, o amortecimento na realidade deverá ser um pouco menor do que ocorre na simulação.

5.2- RECOMENDAÇÕES:

Torna-se interessante a continuidade do desenvolvimento deste trabalho no sentido de ampliar a utilização do modelo de simulação através da complementação do mesmo, incluindo outros parâmetros de controle (variação de momento, frequência e potência) para o estudo de transitórios em turbinas hidráulicas, principalmente as turbinas de baixa queda com rotores de alta rotação específica (Kaplan, hélice) que apresentam problemas significativos de subpressões e pulsações no tubo de sucção. A caixa espiral poderá ser também melhor explorada, através do estudo de modelos analógicos que possibilitem um estudo de distribuição de pressão ao longo da mesma.

Poderão ser também avaliados posteriormente os aspectos mencionados com relação ao fator de atrito, elaborando estudo para consideração de funções variáveis com o número de Reynolds e rugosidade relativa da tubulação.

Uma avaliação mais pormenorizada quanto ao problema de discretização de sistemas hidráulicos, para efeito de analogia e simulação de modelos analógicos, poderá ser desenvolvida no sentido de obterem critérios que possam melhor caracterizar o assunto, de modo a propiciar a adequada discretização do sistema em função não somente do tamanho desses sistemas, mas também em função da excitação à qual são submetidos.

Espera-se com isso, que o trabalho possa contribuir para a utilização de uma ferramenta a mais de controle bem como a continuidade dos estudos de transitórios hidráulicos.

APENDICE A

MODELOS MATEMÁTICOS DE SISTEMA FÍSICOS E SIMULAÇÃO DIGITAL DE MODELOS ANALÓGICOS

Os sistemas dinâmicos mecânicos, elétricos, térmicos, hidráulicos, econômicos, biológicos, segundo OGATA[10], podem ser caracterizados por equações diferenciais. A resposta de um sistema dinâmico a uma excitação pode ser obtida se essas equações diferenciais forem resolvidas.

MODELOS MATEMÁTICOS:

Um modelo matemático descreve matematicamente as características de um sistema. O primeiro passo na análise de um sistema dinâmico é estabelecer seu modelo. Para análise de resposta transitória ou resposta em frequência de sistemas de entrada simples, a representação através de modelos analógicos a ser discutida apresenta-se como uma forma adequada para a solução de problemas.

SISTEMAS LINEARES:

Sistemas lineares são aqueles nos quais as equações do modelo são lineares. Uma equação diferencial é linear se os coeficientes são constantes ou apenas funções das variáveis independentes. A propriedade mais importante de sistemas lineares é o princípio da superposição, ou seja, que a resposta produzida pela aplicação simultânea de duas forças de excitação diferentes é igual à soma das respostas individuais a cada uma das duas forças. É este o princípio que permite a construção de soluções complicadas para equações diferenciais lineares a partir de soluções relativamente simples.

SISTEMA NÃO LINEARES:

Sistemas não lineares são aqueles representados por equações

não lineares ($y = \text{sen } x$, $y = x^2$, etc...)

As equações diferenciais são ditas não lineares, quando são representadas por funções ou coeficientes não lineares. Por exemplo:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + (x^2 - 1) \frac{dx}{dt} + x = 0 \quad (\text{A.1})$$

A característica mais importante de sistemas não lineares é o fato de que não é aplicável o princípio da superposição. Os procedimentos para determinar as soluções de problemas que possuam sistemas não lineares, em geral, são mais complicados, sendo que normalmente utiliza-se de sistemas lineares equivalentes no lugar dos sistemas não lineares, cuja validade limita-se normalmente a uma faixa de operação.

O estudo de sistemas lineares, linearizados ou não lineares através de simulação digital torna-se possível, em função da evolução computacional dos últimos anos, e da utilização de ferramentas de análise já desenvolvidas na área de controle, para a elaboração de modelos análogos às equações diferenciais.

ELEMENTOS PASSIVOS E ELEMENTOS ATIVOS:

Alguns dos elementos de um sistema (capacitâncias e indutâncias) armazenam energia. Esta energia pode ser posteriormente reintroduzida no sistema. A quantidade de energia que pode ser introduzida não pode exceder a quantidade que o elemento armazenou, e, a menos que um elemento tenha armazenado energia anteriormente, ele não pode fornecer qualquer energia para um sistema. Por esta razão, tais elementos são denominados elementos passivos.

Um elemento físico que pode fornecer energia externa para um sistema é denominado um elemento ativo, Fontes de força externa, torque ou velocidade: fontes de tensão ou corrente também são elementos ativos.

ANALOGIA FORÇA-TENSÃO:

Considere o sistema mecânico indicado na figura A.1a, e o sistema elétrico mostrado na figura A.1b. A equação diferencial para este sistema mecânico é:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + f \frac{dx}{dt} + K x = p \quad (A.2)$$

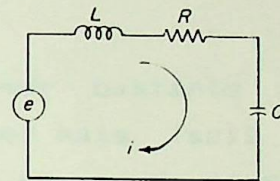
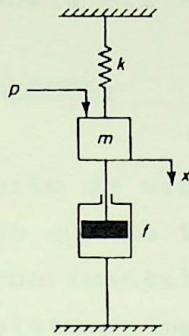


Figura A.1a - Sistema mecânico Fig.A.1b - Sistema elétrico

enquanto a equação diferencial para o sistema elétrico é:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + 1/C \int i \cdot dt = e \quad (A.3)$$

Em termos de carga elétrica q, esta última equação torna-se

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = e \quad (A.4)$$

Comparando as equações A.3 e A.4, verificamos que as equações diferenciais para os dois sistemas são idênticas. Estes sistemas são denominados sistemas análogos, e os termos que ocupam posições correspondentes nas equações diferenciais são chamados de grandezas análogas. Neste caso a analogia é denominada analogia força-tensão elétrica cujas grandezas análogas são mostradas na

tabela A.1:

Sistema Mecânico	Sistema Elétrico
Força p (torque T)	Tensão elétrica e
Massa m (inércia J)	Indutância L
Coefficiente de fricção f	Resistência R
Deslocamento x (angular θ)	Carga q
Velocidade dx/dt (vel. ang. $\dot{\theta}$)	Corrente i

Tabela A.1 - Analogia sistema mecânico/elétrico

SISTEMAS ANÁLOGOS:

O conceito de sistema análogo pode ser bastante útil na prática desde que um tipo de sistema pode ser mais fácil de ser manuseado experimentalmente do que o outro. Em vez de construir e estudar um sistema mecânico, podemos construir e estudar seu análogo elétrico porque, em geral, sistemas elétricos são mais fáceis de serem analisados experimentalmente. Em particular, computadores digitais, com programas de simulação analógica, são bastante úteis para simulação de sistemas mecânicos ou de outros sistemas físicos.

CIRCUITO L-R-C:

Considere o circuito elétrico indicado na figura A.2. O circuito consiste em uma indutância L , uma resistência R e uma capacitância C .

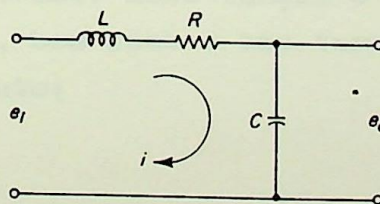


Figura A.2 - Circuito elétrico L-R-C

Aplicando-se as leis de Kirchhoff para o sistema, obtemos as seguintes equações:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + 1/C \int i \cdot dt = e_1 \quad (A.5)$$

$$1/C \int i \cdot dt = e_0 \quad (A.6)$$

Estas equações que serão utilizadas para analogia com as equações diferenciais que regem os transitórios hidráulicos (ver capítulo 3, item 3.3 e 3.4).

PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE MODELOS ANALÓGICOS[20]:

O programa utilizado neste trabalho para efetuar as simulações de modelos analógicos, é um programa denominado TUTSIM, para utilização em microcomputadores. O programa ocupa pouco espaço de disco ou pode ser também utilizado em disquete comum, porém apresenta uma gama muito grande de funções, como funções gerais, de fontes matemáticas, especiais, vetores, blocos lógicos, condicionais e Bondgraph. Serão descritas a seguir algumas das principais funções utilizadas nos exemplos que foram colocados no Capítulo 4, de modo a possibilitar um melhor entendimento das listagens dos arquivos dos diversos exemplos.

FUNÇÕES:

- CON - Função constante;
- PLS - Pulso de entrada. Esta função é utilizada informando-se o valor deste pulso, bem como o seu tempo de início e finalização;
- ABS - Valor absoluto;
- ATT - Atenuação;
- DIV - Divisor;
- EXP - Expoente;
- FNC - Gerador de funções;
- GAI - Ganho fixo;

- LIM - Limitador;
- MUL - Multiplicador;
- SUM - Somador;
- DIF - Diferencial;
- INT - Integrador;
- INV - Inversor; e outras.

A utilização de programas de simulação digital-analógica encontra-se bastante difundida na solução de modelos analógicos, com uma gama de programas comerciais para microcomputadores e computadores de grande porte. Entre outros destacam-se o Programa Transdir e CSMP (Continuous System Modeling Program).

Modelo	Ordem	Tempo de Simulação (seg)	Tempo de Execução (seg)	Tempo de Preparação (seg)
1	1	100	100	100
2	2	200	200	200
3	3	300	300	300
4	4	400	400	400
5	5	500	500	500
6	6	600	600	600
7	7	700	700	700
8	8	800	800	800
9	9	900	900	900
10	10	1000	1000	1000
11	11	1100	1100	1100
12	12	1200	1200	1200
13	13	1300	1300	1300
14	14	1400	1400	1400

Tabela 2.1 - Características de desempenho de alguns modelos de simulação.

CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO: O modelo é simulado em um computador de grande porte com o programa Transdir. O tempo de preparação é o tempo necessário para a configuração do modelo e a execução do programa. O tempo de execução é o tempo necessário para a execução do modelo. O tempo de simulação é o tempo necessário para a simulação do modelo.

APENDICE B

CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA USINA HIDRELÉTRICA DE TUCURUÍ

Um desenho de corte da tomada de água e casa de força da Usina é apresentado na figura B.1, e os parâmetros de projeto relativos a adução da usina são apresentados a seguir (Tabela B.1):

SEÇÃO	L (m)	A (m ²)	$\sum L/A (1/m)$	$\sum L.A (m.m^2)$	LOCALIZAÇÃO
1	1	395	1/395	395	Entrada da adução
1	3	243	3/243	729	Pilar
1	3	221	3/221	663	Linha de base
1	7	859	0.02845	1787	Total 1
2	4	148	0.027	592	Stop Log
3	4	119.5	0.033472	478	Comporta
4	6	108	0.05555	648	Aeração
5	4	96.5	0.04145	386	Transição
6	5	84.95	0.058858	424.75	Fim Transição
7/8	30	84.95	0.35314	2548	Conduto 2 trechos
9	6	76.2	0.07874	457.2	Conduto/Caixa
10	10.5	66.5	0.15789	698.25	Entrada Caixa
11.1	15	52.8	0.28409	792	Caixa/1a.parte
11.2	15	44.2	0.33936	663	Caixa/2a.parte
11.3	15	19.6	0.76530	294	Caixa/3a.parte
11.4	10	8.55	1.16959	85.5	Caixa/4a.parte

Tabela B.1 - Parâmetros de projeto da adução da UHE-TUC

ESPESSURAS E DIMENSÕES DO CONDUTO E CAIXA ESPIRAL:

Trecho 7/8 - 27mm	Diâmetro = 10.4m
Trecho 9 - 27mm	Diâmetro = 9.85m
Trecho 10 - 30mm	Diâmetro = 9.20m
Trecho 11.1- 30mm	Diâmetro = 8.2m

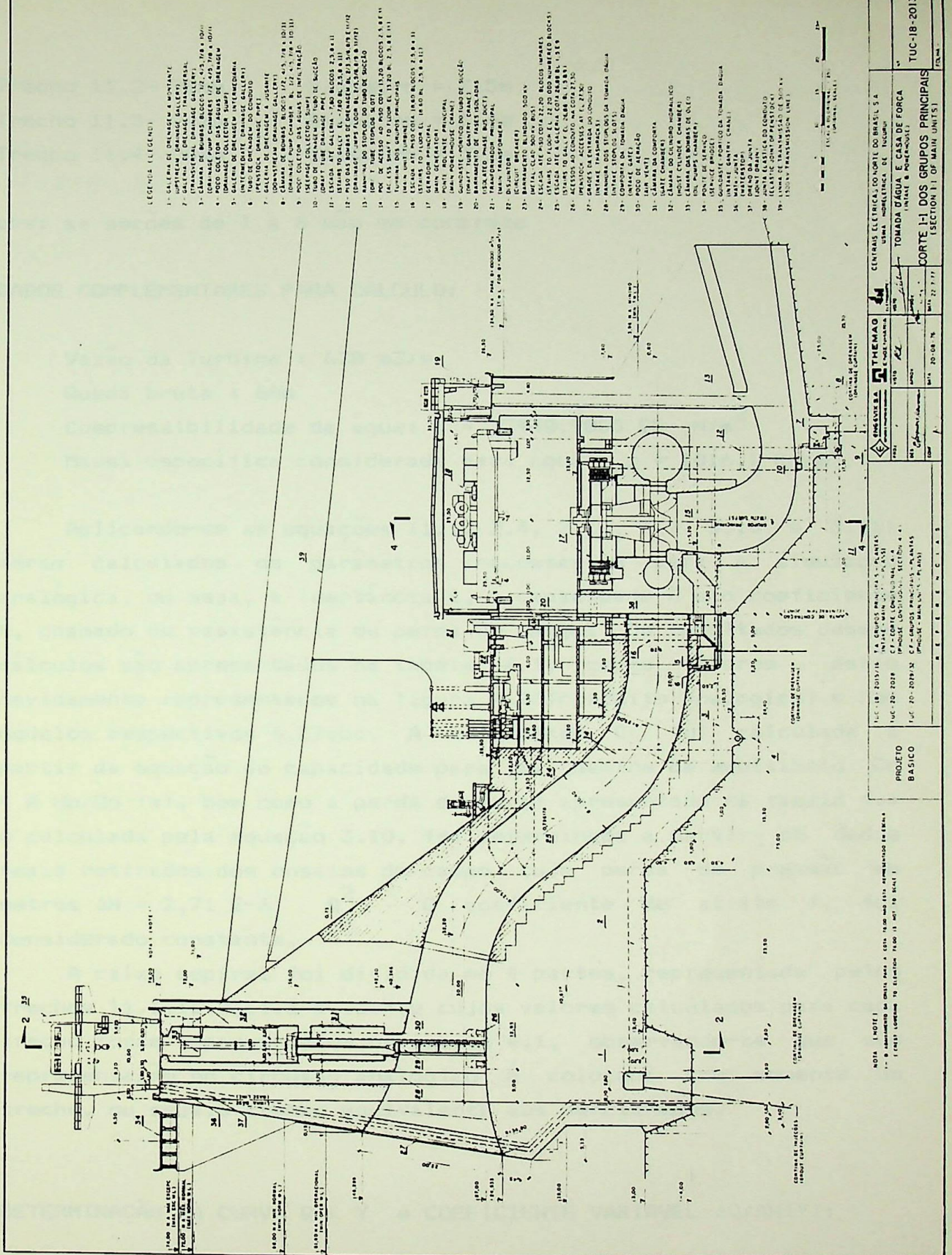


Figura B.1 - Corte da tomada de água e casa de força da UHE-Tucuruí

NOTA: (NOTE)
 1 - O PROJETO DESTE PROJETO A ESCALA DE 1:500 NÃO DEVE SER UTILIZADO PARA OBRAS.
 2 - NÃO SE DEVE UTILIZAR O PROJETO PARA OBRAS DE RECONSTRUÇÃO DE OBRAS.

PROJETO BÁSICO

TUC-18-2018/18
 TUC-20-2018
 TUC-20-2019/19

EMBRATEC
 THEMAG
 SBC

CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A.
 TOMADA D'ÁGUA E CASA DE FORÇA
 UHE-TUCURUÍ

TUC-18-2013
 CORTE I-I DOS GRUPOS PRINCIPAIS
 (SECTION I-I OF MAIN UNITS)

Trecho 11.2- 28mm	Diâmetro = 7.5m
Trecho 11.3- 20mm	Diâmetro = 5.0m
Trecho 11.4- 20mm	Diâmetro = 3.3m

obs: as seções de 1 a 6 são em concreto

DADOS COMPLEMENTARES PARA CÁLCULO:

Vazão da Turbina : 628 m³/s

Queda bruta : 66m

Compressibilidade da água: $k = 22448,9800 \text{ E5 } \text{ N/m}^2$

Massa específica considerada para água : $\rho = 1016,1 \text{ Kg/m}^3$

Aplicando-se as equações (1.1, 2.4, 2.12, 3.9, 3.10 e 3.11) foram calculados os parâmetros necessários para a simulação analógica, ou seja, a inércia L , a capacidade C e o coeficiente R , chamado de resistência ou perda de carga. Os resultados desses cálculos são apresentados na tabela 4.1, cujos valores estão devidamente representados na figura 4.26 (circuito analógico) e nos modelos respectivos 4.27abc. A capacidade C_c foi calculada a partir da equação de capacidade para uma chaminé de equilíbrio $C_c = A H_0/Q_0$ (s), bem como a perda de carga apresentada na tabela 4.1 e calculada pela equação 3.10, foi determinada a partir de dados reais retirados dos ensaios de campo cuja perda de pressão em metros $\Delta H = 2,71 \text{ E-6 } Q^2$. O coeficiente de atrito f , foi considerado constante.

A caixa espiral foi dividida em 4 partes, representada pelos trechos 11.1, 11.2, 11.3 e 11.4, e cujos valores calculados para cada trecho foram representados na tabela 4.1, observando-se que sua representação no circuito analógico é colocada com somente um trecho, ou seja, o trecho equivalente aos mencionados.

DETERMINAÇÃO DA CURVA $Q \times Y$ e COEFICIENTE VARIÁVEL $\Delta Q/\Delta H(Y)$:

A curva de vazão em função da abertura do distribuidor bem como o coeficiente variável que representa a variação de vazão em

relação à variação de altura para uma determinada abertura, foram calculados a partir de dados retirados do modelo reduzido, cujos resultados foram apresentados nas tabelas 4.2 e 4.3 respectivamente (Capítulo 4).

(1) ...
(2) ...
(3) ...
(4) ...
(5) ...
(6) ...
(7) ...
(8) ...
(9) ...
(10) ...
(11) ...
(12) ...
(13) ...
(14) ...
(15) ...
(16) ...
(17) ...
(18) ...
(19) ...
(20) ...
(21) ...
(22) ...
(23) ...
(24) ...
(25) ...
(26) ...
(27) ...
(28) ...
(29) ...
(30) ...
(31) ...
(32) ...
(33) ...
(34) ...
(35) ...
(36) ...
(37) ...
(38) ...
(39) ...
(40) ...
(41) ...
(42) ...
(43) ...
(44) ...
(45) ...
(46) ...
(47) ...
(48) ...
(49) ...
(50) ...
(51) ...
(52) ...
(53) ...
(54) ...
(55) ...
(56) ...
(57) ...
(58) ...
(59) ...
(60) ...
(61) ...
(62) ...
(63) ...
(64) ...
(65) ...
(66) ...
(67) ...
(68) ...
(69) ...
(70) ...
(71) ...
(72) ...
(73) ...
(74) ...
(75) ...
(76) ...
(77) ...
(78) ...
(79) ...
(80) ...
(81) ...
(82) ...
(83) ...
(84) ...
(85) ...
(86) ...
(87) ...
(88) ...
(89) ...
(90) ...
(91) ...
(92) ...
(93) ...
(94) ...
(95) ...
(96) ...
(97) ...
(98) ...
(99) ...
(100) ...

BIBLIOGRAFIA

- [1] BLAIR, P. and WOZNIAK, L. - "Non-linear simulation of hydraulic turbine governor systems". Water Power & Dam Construction, September, 1976.
- [2] BORDÓN, C. A. S. - "Análise de Transitórios Hidráulicos em pequenas centrais hidrelétricas através do método das características". EFEI, Itajubá, 1992.
- [3] BELTRAME, E. - "Análise de Oscilatórios Hidráulicos em Usinas Hidrelétricas utilizando-se da técnica de Matrizes de Transferência". EFEI, Itajubá, 1991.
- [4] CHAUDHRY, M.H. - "Applied Hydraulic Transients". Van Nostrand, New York, 1979.
- [5] DIXON, S. L. - "Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery". Pergamon Press, Oxford, N. Y., 1975.
- [6] JAEGER, C. - "Fluid Transients" in Hydro-Electric Engineering Practice. Blackie & Son Limited, Glasgow and London, 1977.
- [7] KARNEY, B. W. and McInnis, D. - "Efficient Calculation of Transient Flow in Simple Pipe Networks". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 118, No. 7, July, 1992.
- [8] KOVALEV, N.N. - "Hydroturbines, Design and Construction (Translated from Russian)". Israel Programme for Scientific Translations Jerusalem, 1965.
- [9] MACINTYRE, A. J. - "Máquinas Motrizes Hidráulicas". Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, 1983.
- [10] OGATA, K. - "Engenharia de Controle Moderno". Prentice Hall do Brasil Ltda., Rio de Janeiro, 1982.

- [11]PFLEIDERER, C. e PETERMANN, H. - "Máquinas de Fluxo". Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1979.
- [12]QIXHONG, G. and SONG, C. S. - "Dropshaft Hydrodynamics under Transient Conditions". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No.8, August, 1991.
- [13]RAABE, J. "Hydro Power: The design, use and function of Hydromechanic. VDI - Verlag GmbH, Dusseldorf, 1985.
- [14]STREETER, V. L. e WYLIE, E. B. - "Mecânica dos Fluidos". McGraw-Hill, São Paulo, 1980.
- [15]STREETER, V. L. e WYLIE, E. B. - "Fluid Transients. McGraw-Hill, New York, 1978.
- [16]SOUZA, Z. - "Centrais Hidrelétricas". Apostila EFEI, 1992.
- [17]SCHREIBER, G. P. - "Usinas Hidrelétricas". Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1978.
- [18]SIBETHEROS, I. A. e HOLLEY, E. R. - "Spline Interpolations for Water Hammer Analysis". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No. 10, October, 1991.
- [19]INTERCÂMBIO INTERNACIONAL SOBRE TRANSIENTES HIDRÁULICOS & CAVITAÇÃO - SÃO PAULO, 1982.
- [20] TUTSIM MANUAL - "SIMULATION FOR DESIGN AND ANALYSIS".
- [21]THORLEY, A. R. D. e WOOD, D. J. - "Fluid transients in pipelines and networks - use of microcomputers for design and analysis in developing countries". Hydrosoft, Vol.2, No.2, 1989.
- [22]VIVIER, L. - "Turbines Hydrauliques et leur regulations". Editions Albin Michel, Paris, 1966.

[23]WYLIE, E. BENJAMIN , SIMPSON, A. R. - "Large Water-Hammer Pressures for Column Separation in Pipelines". Journal of Hydraylic Engineering, Vol. 117, No.10, October, 1991.

[24]WORKING GROUP ON PRIME MOVER AND ENERGY SUPPLY MODELS FOR SYSTEM DYNAMIC PERFORMANCE STUDIES - "Hydraulic Turbine and Turbine control models for System Dynamic Studies", by MELLO, F. P.and KOESSIER, R. J.,with contributions from J.Agee, P. M.Anderson, J. H. Doudna, J.H. Fish III, P.A.L. Hamm, P. Kundur, D.C. Lee, G. J. Rogers and C. Taylor. Transactions on Power Systems, Vol. 7, No.1, February 1992.

DATA 04.08.1994
 PROC
 PED. PPG
 LIV.
 Cz\$ DOCAJ

FICHA 01 T. 760
 532.522:621.311.21(043.2)
EFEI / Biblioteca Mauá
 S719s
 SOUZA JÚNIOR, O. H. de.
 Estudo de transitórios hidráulicos através de simulação analógico-digital...

N.o Registro	Devolver e
10 Greder	08/02

EFEI
BIBLIOTECA MAUÁ

Esta publicação deverá ser devolvida dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação em seu poder.

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
 8200760



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA