

ANÁLISE DE RESSONÂNCIAS NO CIRCUITO HIDRÁULICO DE CORUMBÁ I

Luiz Fernando Bonilauri (1)  
Luiz Antonio Joia (1), (2)  
Luiz Antonio Palmeira Monteiro (1)

(1) Promon Engenharia S/A  
Praia do Flamengo 154, 6º  
Rio de Janeiro - RJ -22210

(2) UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

O presente trabalho apresenta os resultados dos prognósticos de riscos de eventuais ressonâncias provocadas por pulsações de vazão e de carga piezométrica no circuito hidráulico da usina hidrelétrica de Corumbá I.

As análises foram conduzidas com o objetivo de identificar quais as frequências das perturbações que, se ocorrerem em pontos específicos, poderão provocar significativas variações de vazão e de carga piezométrica no circuito hidráulico.

ABSTRACT

This paper presents the results of the anticipated risks of possible resonances caused by flow rate and head fluctuations in the hydraulic circuit of the Corumbá I hydro power plant.

The analyses were conducted to identify the perturbation frequencies that could occur at certain locations which may generate significant variations of the flow rate and head in the hydraulic circuit.

## 1. INTRODUÇÃO

A construção de usinas hidrelétricas dotadas de turbinas Francis, com circuitos hidráulicos cada vez mais longos, tem trazido novos desafios aos engenheiros projetistas. Isso porque o aparecimento de pulsações nos circuitos hidráulicos e as vibrações nas turbinas durante a fase de operação do complexo têm, em certas ocasiões, contribuído para causar danos às instalações ou para mau funcionamento da hidrelétrica.

De alguns anos para cá, a literatura técnica especializada tem reportado casos de usinas hidrelétricas que necessitaram de modificações no projeto original para que fenômenos de natureza dinâmica deixassem de ocorrer. Estão citados, entre outros, os casos da hidrelétrica de Bersimis II (Quebec, Canadá) [9]; de usina hidrelétrica na Áustria, com 4 turbinas Francis, potência nominal unitária de 81,6 MW, queda de 74,5 m e 166,7 rpm, 50 Hz [10]; da usina hidrelétrica Belizario Dominguez (La Angostura), sobre o rio Grijalva, no México [6]; e mais recentemente de usina hidrelétrica com 3 turbinas Francis de 4,8 MW, na Índia [5].

Muito embora as leis básicas que regem o fenômeno físico das ressonâncias sejam bem conhecidas, pesquisadores de renome têm enfrentado grandes dificuldades na previsão de tais fenômenos em circuitos hidráulicos complexos como os de centrais hidrelétricas. Isto porque a quantidade de excitações que podem ocorrer nos mais variados pontos da usina, com as mais variadas frequências, é enorme.

Desta forma, os projetistas de circuitos hidráulicos de hidrelétricas têm se conscientizado da necessidade de, complementarmente às análises de tensões, analisarem as deformações e o comportamento dinâmico do sistema, mesmo que de uma forma ainda simplificada.

## 2. RECURSOS COMPUTACIONAIS EMPREGADOS NAS ANÁLISES

Para a análise dinâmica do circuito hidráulico de Corumbá I foram empregados dois sistemas computacionais distintos: o sistema DAHYSY, capaz de efetuar análises no domínio da frequência [2], [4] e o sistema PATH1, capaz de efetuar análises no domínio do tempo [3].

Ambos os sistemas estão baseados nas equações do movimento e da continuidade, que traduzem o comportamento em condições transitórias de líquidos confinados em condutos elásticos, cilíndricos ou cônicos que não apresentem grandes deformações, em escoamento unidimensional.

As citadas equações, com suas formulações gerais, apresentadas adiante, se constituem em um sistema hiperbólico, quase linear, de equações diferenciais a derivadas parciais, cuja solução algébrica tem desafiado os mais eminentes matemáticos.

$$\left\{ \begin{array}{l} g \cdot \frac{\partial H(x,t)}{\partial x} + V(x,t) \cdot \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} + \frac{f \cdot V(x,t) \cdot |V(x,t)|}{2 \cdot D(x)} = 0 \\ V(x,t) \cdot \frac{\partial H(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial H(x,t)}{\partial t} + V(x,t) \cdot \text{sen } \alpha + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = 0 \end{array} \right.$$

onde:

x = distância ao longo do eixo do conduto (variável independente);

t = tempo (variável independente);

H = carga piezométrica (variável dependente);

V = velocidade (variável dependente);

f = coeficiente de perda de carga;

D = diâmetro;

$\alpha$  = inclinação do eixo do conduto;

a = celeridade.

Os sistemas DAHYSY e PATH1 empregam abordagens diferentes para a resolução numérica dos problemas baseados nas equações apresentadas. O sistema DAHYSY emprega uma linearização e resolve os problemas com auxílio do método das matrizes de transferência [4]. A implementação computacional do mesmo permite seu emprego nas modalidades de cálculo das freqüências e dos modos próprios, ou de cálculo de respostas a perturbações forçadas postuladas. Por sua vez, o sistema PATH1 emprega o método das características para a transformação do sistema de equações diferenciais a derivadas parciais em um sistema de equações diferenciais ordinárias, que por sua vez é resolvido pelo método das diferenças finitas, sem recorrer a linearizações das equações básicas.

Em adição aos sistemas DAHYSY e PATH1, empregados nas análises dinâmicas, recorreu-se ao programa de análise estrutural STRESS, para cálculos auxiliares relacionados com a estimativa das celeridades em trechos com geometria mais complexa.

3.

### METODOLOGIA DE ANÁLISE DE RISCOS DE RESSONÂNCIAS

A metodologia básica de análise de riscos se constitui em uma conjugação entre as respostas a perturbações periódicas forçadas, postuladas a priori, e a avaliação de riscos de tais perturbações virem realmente a ocorrer, seguidas da análise dos seus possíveis efeitos.

As perturbações periódicas forçadas foram postuladas em suas localizações e em suas intensidades, com varredura de freqüências (domínio da freqüência). A localização das perturbações deu origem a um primeiro desdobramento de casos a analisar e a seleção de cada um dos casos foi orientada por uma análise prévia das possíveis causas que poderiam provocar as referidas perturbações. As intensidades foram unificadas para todos os casos de perturbações forçadas (amplitudes de pico a pico de 1,00 m para as variações iniciais das cargas), de tal forma que as respostas para as condições de escoamento oscilatório permanente ("steady oscillatory flow") são comparáveis entre si e podem ser convertidas em termos de amplificação ou de amortecimento. A localização das respostas em freqüência, para uma localização da perturbação, deu origem a um segundo desdobramento de casos a analisar.

A seleção da faixa de freqüências a terem suas respostas analisadas foi balizada na obra de Vladislavlev [8] que, apoiado em grande quantidade de medições, concluiu que as forças de perturbação que ocorrem em unidades hidráulicas possuem suas freqüências fundamentais situadas em uma larga faixa, compreendida entre 0,5 e 300 Hz.

A análise das possíveis causas que poderiam dar origem a perturbações indicou que as mais significativas situam-se junto à turbina ou se propagam ao circuito hidráulico através da turbina.

Estimativas das freqüências dos primeiros harmônicos das perturbações localizadas junto à turbina foram efetuadas para Corumbá I e estão apresentadas na figura 1, classificadas pelas suas origens. Tais estimativas, juntamente com a consideração de haver ou não maiores riscos de persistência das causas que dão origem às perturbações, permanecendo a unidade geradora em operação, mostram que poucas são as causas já conhecidas e identificadas que provocam perturbações com freqüências dos primeiros harmônicos superiores a 50 Hz. Para a faixa de 50 a 300 Hz, as perturbações basicamente são constituídas pelos harmônicos de ordem superior das perturbações cujos primeiros harmônicos se concentram em faixas estreitas de freqüência dadas pela expressão  $n \cdot (54 \text{ a } 60) \text{ Hz}$ , onde  $n$  é um inteiro.

Desta forma, as análises tiveram um tratamento diferenciado para as faixas de 0 a 50 Hz e de 50 a 300 Hz.

Perturbações Localizadas Junto à Turbina			
Origem	Forças/Causas	Frequência dos primeiros harmônicos (Estimada para Corrente 1)	Ordem de Grandeza
Mecânica	Forças Centrífugas devidas ao desbalanceamento do Rotor	2,5 Hz	1 a 12,5 Hz
	Forças Elásticas do Rizo	5 Hz	1 a 25 Hz
	Forças de Fricção	5 a 12,5 Hz	5 a 40 Hz
Hidráulica	Distribuição não uniforme de velocidade e formação de Vórtex	12,5 Hz ( $p/11$ pole)	10 a 80 Hz
	Desequilíbrio Hidráulico do Rotor	2,5 Hz	1 a 12,5 Hz
	Cavitação na Turbina	0,5 a 100 Hz	0,5 a 100 Hz
	Formação de Vórtex no Tubo de Sucção	0,6 a 0,7 Hz	0,1 a 4 Hz
Elétrica	Componentes Periódicos do Arrasto Magnético	120 Hz	100 Hz ( $P/f = 5000$ )
	Variações no Entreferro	2,5; 5 Hz	1 a 25 Hz
	Curto-Circuito no Enrolamento dos Polos do Rotor	2,5 Hz	1 a 12,5 Hz
	Carga Assimétrica do Gerador	120 Hz (240/160Hz)	100 Hz (700 - 3000) ( $p/f = 50$ Hz)
	Operação Assíncrona Sem Excitação	$\approx 100$ Hz	90 Hz ( $p/f = 50$ Hz)
	Operação Assíncrona Com Excitação	$\approx 54; 100$ Hz	45; 90 Hz $P/f = 50$ Hz)
	Curto-Circuito Contínuo numa Fase do gerador	120 Hz	100 Hz ( $p/f = 50$ Hz)
Curto-Circuito Contínuo em 2 Fases do Gerador	120 Hz	100 Hz ( $p/f = 50$ Hz)	

Quanto aos efeitos de eventuais ressonâncias, tomou-se para referência o artigo de Glattfelder, A.H.; Grein, H. e Dörfler, P.K. [7].

O fato das análises de ressonâncias no circuito hidráulico de Corumbá I terem sido feitas durante a sua etapa de projeto básico, implica em estarem sujeitos a pequenas alterações, tanto os dados relativos ao circuito hidráulico, quanto os parâmetros dos equipamentos associados ao mesmo. Tal fato implica ainda em se ter que estimar alguns valores ainda não fixados. Tendo em vista tais circunstâncias, optou-se por proceder a análises de sensibilidade dos resultados a variações de diversos dados e parâmetros, no entorno dos seus valores nominais ou estimados. As análises de sensibilidade deram origem a um terceiro desdobramento de casos a analisar.

Paralelamente, foram julgados de interesse os conhecimentos, tanto das frequências e dos modos próprios de pulsação (associados aos fenômenos de ressonância), quanto da evolução temporal das principais variáveis que sofrem alterações provocadas por perturbações com frequências críticas. Para tanto, foram aplicados os recursos do sistema DAHYSY, para cálculo das frequências e dos modos próprios e, de posse das frequências críticas, aplicou-se os recursos do sistema PATH1, para análise de evolução temporal.

#### 4. MODELOS NUMÉRICOS

Para análise dinâmica do circuito hidráulico, tanto no domínio da frequência como no do tempo, dividiu-se o conjunto em trechos que pudessem ser representados, numericamente, o mais fielmente possível.

Para os trechos com geometria ou propriedades hidráulicas complexas, não diretamente representáveis nos programas computacionais utilizados, foram adotados condutos equivalentes, respeitados os seguintes princípios:

- a) Adoção de comprimento equivalente de conduto circular que conserve as propriedades inerciais do fluido contido no trecho em análise;
- b) Adoção de coeficientes de perda de carga que aplicados aos comprimentos equivalentes determinem perdas de carga iguais às esperadas;
- c) Adoção de celeridades equivalentes que mantenham inalterados os tempos de percurso previstos para as frentes de onda que percorrem o trecho em análise;
- d) Uso de condutos equivalentes, diferentes dos projetados, evitado sempre que possível, para não mascarar os efeitos de reflexões secundárias.

Para se manter o controle e a possibilidade de comparação entre os diversos casos analisados, dividiu-se o circuito hidráulico completo em blocos e em trechos, para representação numérica. A figura 2 apresenta o diagrama do circuito hidráulico equivalente que norteou a elaboração dos diversos modelos numéricos empregados.

5.

#### CASOS ANALISADOS

No domínio da frequência foram processados e analisados casos de:

- a) Identificação das frequências próprias do sistema;
- b) Identificação de modos próprios de pulsação (3 casos);
- c) Respostas a perturbações forçadas (62 casos).

No domínio do tempo foram processadas e analisadas 81 seqüências temporais.

Os casos analisados diferem entre si, em aspectos tais como:

- a) Domínio da análise;
- b) Local e natureza das perturbações (ondas no reservatório de montante, turbilhonamento pela passagem nas grades da tomada d'água, turbilhonamento originado em locais próximos às juntas de dilatação, perturbações de origem mecânica, hidráulica ou elétrica, próximas à entrada ou à saída do rotor e ondas no reservatório de jusante);
- c) Local de resposta;
- d) Valores das celeridades (análise de sensibilidade);
- e) Valores dos comprimentos (análise de sensibilidade);
- f) Valores dos coeficientes de perda de carga (análise de sensibilidade);
- g) Percentuais de carga na turbina;
- h) Modo de operação da turbina (abertura do distribuidor constante ou potência constante);
- i) Modelo numérico adotado para a espiral da turbina;
- j) Frequência da excitação forçada (para análises no domínio do tempo);
- l) Faixas do intervalo de tempo de análise a partir do instante de início da perturbação (para seqüências temporais).

## 6. RESULTADOS

A figura 3 ilustra os resultados obtidos para um dos casos processados com o sistema DAHYSY. Tal figura apresenta os gráficos dos módulos das variações da vazão e da carga piezométrica, respectivamente, em função da frequência da perturbação.

A figura 4 ilustra um dos resultados obtidos com o sistema PATH1. Os gráficos digitalizados da figura 4 representam a carga máxima, a carga mínima, a vazão máxima e a vazão mínima (valores extremos), descontados de seus respectivos valores de regime permanente e divididos pela intensidade da perturbação, para diversas seções ao longo do conduto hidráulico. Os valores extremos, para a ilustração em foco, foram os observados no intervalo de tempo correspondente a 8 e 12 percursos do comprimento completo do conduto hidráulico, por parte das frentes de onda.

A figura 5 ilustra os diagramas de análise de riscos. Os diagramas são compostos dos seguintes blocos de representação:

- a) das causas possíveis das perturbações;
- b) das respostas às perturbações postuladas;
- c) dos efeitos das eventuais ressonâncias.

O bloco da representação das respostas, ilustrado na figura 5, foi obtido com o sistema DAHYSY e sobre o mesmo marcou-se linha auxiliar que identifica as frequências para as quais há respostas amplificadas ou amortecidas. Os limites das faixas de frequências, com fator de amplificação maior ou igual a 2, foram transpostos para o bloco de representação das causas possíveis de perturbações nesta faixa de frequências. Com auxílio de tais diagramas, identificou-se a eventual conjugação de ocorrência de perturbações com respostas amplificadas isto é: a eventual "sintonia" e o conseqüente risco de ressonâncias.

## 7. CONCLUSÕES

Os sistemas computacionais empregados, juntamente com a metodologia desenvolvida para análise de riscos de ocorrência de ressonâncias em circuitos hidráulicos de hidrelétricas, permitem efetuar prognósticos sobre tais fenômenos.

A aplicação dos recursos descritos anteriormente permitiu concluir que, de uma forma geral, a concepção do projeto hidráulico de Corumbá I não apresenta evidência de riscos exagerados de ressonâncias que possam ser identificadas no estágio do projeto básico.



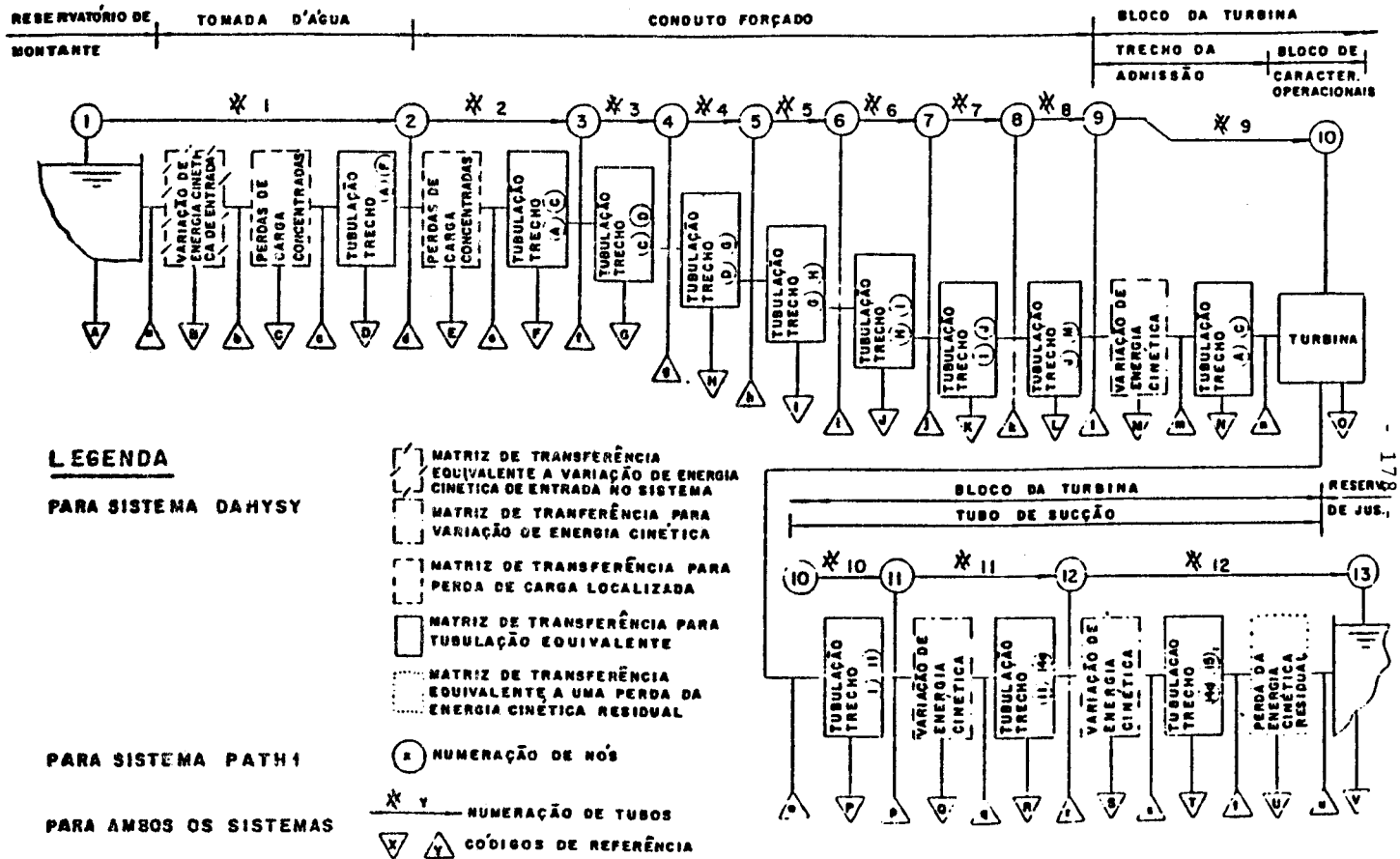
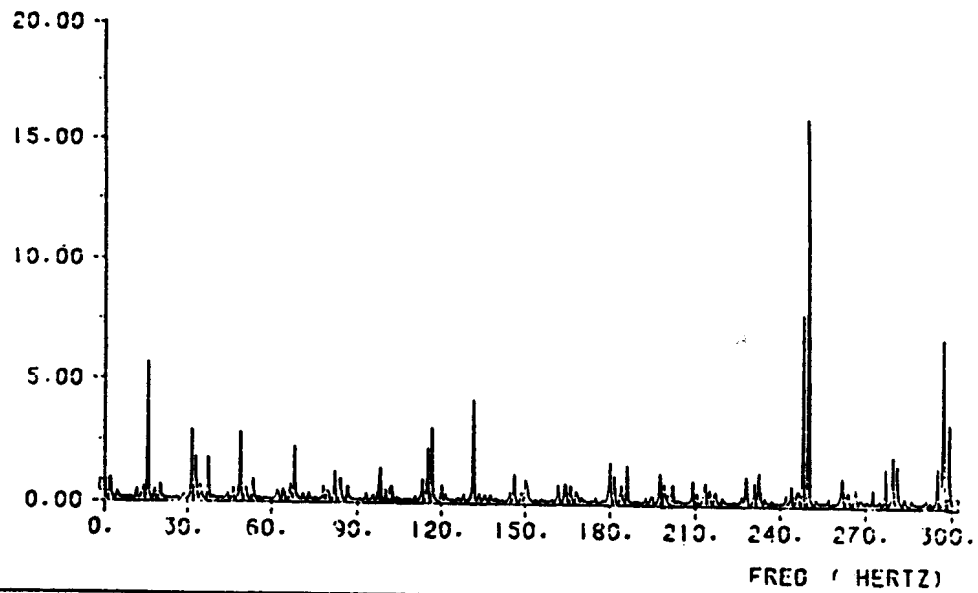


Figura - 2

## Corumbá I - Projeto Básico - Caso C120/NS/11/REG/CO/120/120.1

MOD. OF (M3/S)



MOD. HF (M)

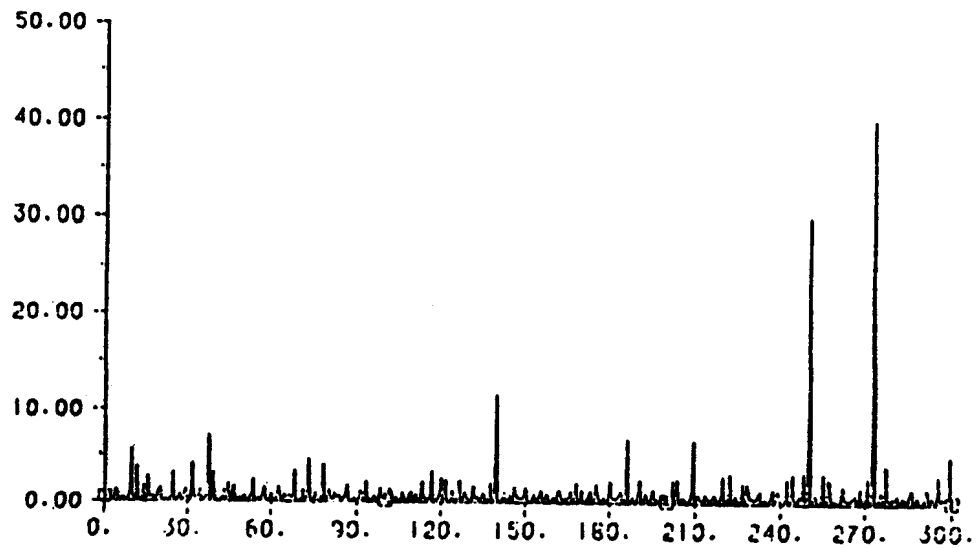
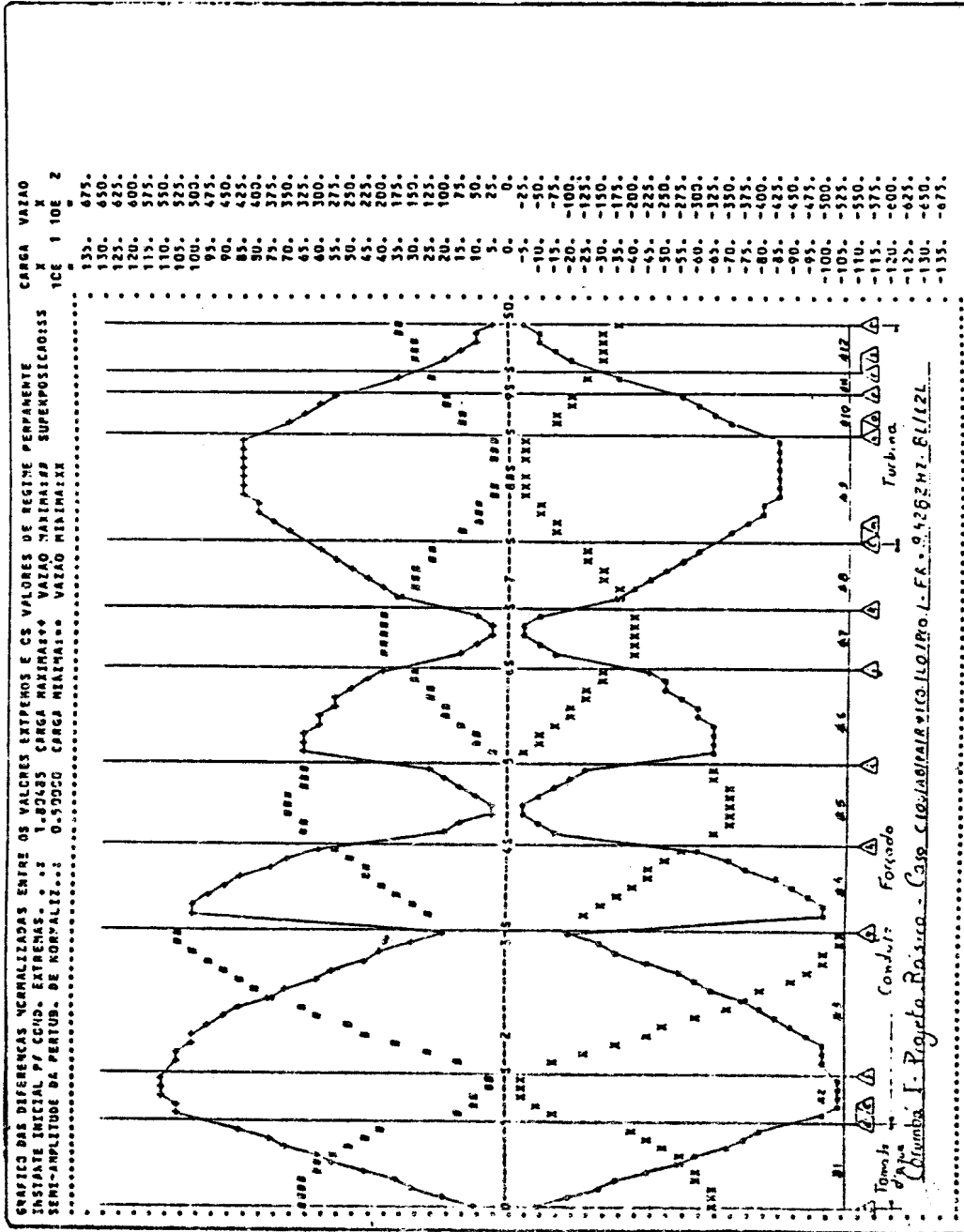
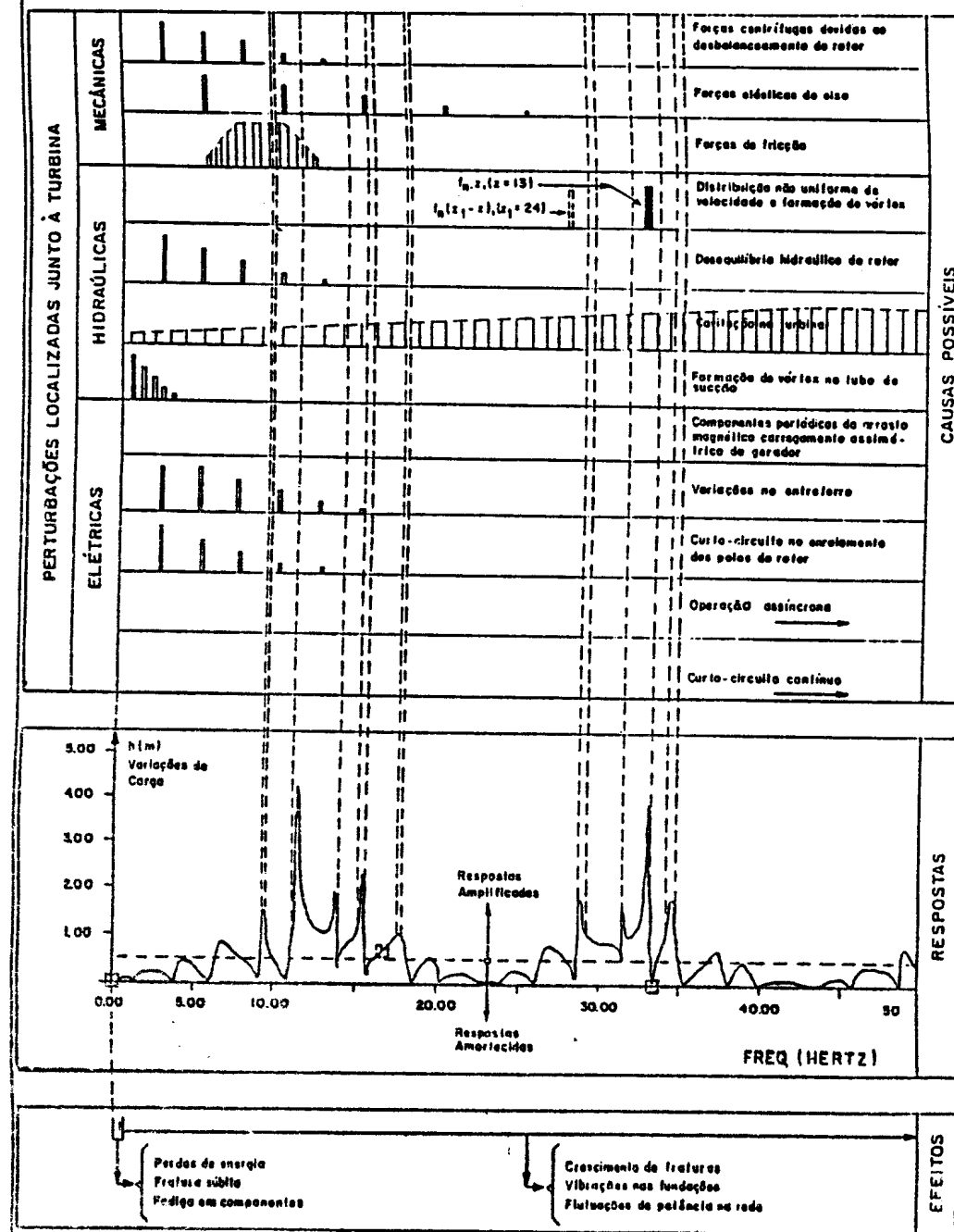


Figura - 4



USINA HIDRELÉTRICA DE CORUMBÁ I  
 PROJETO BÁSICO  
 ANÁLISE DE RESSONÂNCIAS NO CIRCUITO HIDRÁULICO  
 DIAGRAMAS DE ANÁLISE DE RISCOS



As análises efetuadas para Corumbá I permitiram a formulação de recomendações práticas para se prevenir quanto a riscos de ocorrências de perturbações mais intensas e de ampliações das mesmas e, na eventualidade de tais riscos potenciais virem a ocorrer, se dispor de facilidades para medidas corretivas.

8.

REFERÊNCIAS

- [1] Furnas Centrais Elétricas S.A. (Proprietária)  
"Aproveitamento Hidrelétrico de Corumbá I - Análise de Ressonâncias no Circuito Hidráulico, volumes 1 e 2 - 1987.
- [2] Promon Engenharia S.A.; "Manual do Usuário do Programa DAHYSY"; 1987.
- [3] Promon Engenharia S.A.; "Manual do Usuário do Programa PATH1"; 1987.
- [4] Bonilauri, L.F.; Monteiro, L.A.P.; Cruz, M.C.O.L.; Joia, L.A.; "DAHYSY - um software para Análise Dinâmica de Sistema Hidráulico" - Anais do VIII Congresso Latino Americano e Ibérico sobre Métodos Computacionais para Engenharia, pg.111-126, volume I, Rio de Janeiro, novembro de 1987.
- [5] Bhave, S.K.; Acharekar, C.L.; Murthy, Ch. B.N. e Goyal, S.K.; "Vibrations in Penstocks" - Water Power & Dam Construction, novembro de 1987.
- [6] Guarga, R.; Hiriart, G. e Torres, J.J.; "Oscillatory Problems at Mexico's La Angostura Plant" - Water Power & Dam Construction, outubro de 1983.
- [7] Glattfelder, A.H., Grein, H. e Döfler, P.K.; "Intense System Vibrations in Hydro Plants" - Water Power & Dam Construction, março de 1981.
- [8] Vladislavlev, L.A.; "Vibration of Hydro Units in Hydroelectric Power Plants [Vibratsiya Gidroagregatov Gidroelektrichenskikh Stantsii]" - Translated from Russian - Second Edition - Amerind Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, 1979.
- [9] Wylie, E.B. e Streeter, V.L.; "Fluid Transients" - McGraw-Hill Inc., 1978.
- [10] Klein, J.; Strohmer, F. e Enzenhofer, D.; "Investigation on Vibrations of a Large Penstock, on the Sources of their Excitation and on Getting them Under Control", IAHR - 8th Symposium, Leningrad, USSR, 1976.

- [11] Chaudhry, M.H.; "Ressonance in Pressurized Piping Systems" - Proceedings of the American Society of Civil Engineers - Journal of the Hydraulics Division, setembro de 1970.
- [12] Oftebro, I. e Lonning, A.; "Pressure Oscillations in Francis Turbines", Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, 1966/1967.

#### Agradecimento

Os autores agradecem a  
autorização dada por  
Furnas Centrais  
Elétricas S.A para a  
publicação das  
informações referentes a  
Corumbá I, contidas no  
presente trabalho.