

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA.

PMC-581
PROJETO MECÂNICO II.

PROJETO BÁSICO DE UMA CENTRAL HIDRELÉTRICA.



Autores:

Fábio Luiz Spessoto Persoli.
Paulo César Melo Galvão de Almeida

Orientador:

Prof. Orientador: Jayme P. Ortiz.

1996.

Aos nossos pais

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao Prof. Dr. Jayme P. Ortiz pela excelente orientação dada no decorrer de toda a confecção da obra. Também fazemos um agradecimento especial ao Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho do LHPCH da EFEI - Itajubá, cujas opiniões, esclarecimentos e experiência na área de PCH's elucidaram muitas de nossas dúvidas e enriqueceram o trabalho; ao Engenheiro Flávio Leite da Mecânica Pesada - Taubaté, que muito nos auxiliou, dando substância prática ao trabalho e fornecendo o catálogo sobre turbinas Tubular S, cuja cópia encontra-se anexa.

Finalmente, gostaríamos de agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a confecção da obra.

Índice.

<u>Tópico.</u>	<u>Página.</u>
1. Formulação do Projeto - Objetivos.	4
2. Introdução.	
2.1. O Suprimento da Demanda de Energia Elétrica.	6
2.2. Comparativo entre as Principais Formas de Geração de Energia.	10
3. Estudo de Mercado.	
3.1. Introdução Teórica.	20
3.2. Resultados.	22
4. Especificações Técnicas.	28
5. Geração de Soluções.	30
6. Exequibilidade Física.	38
7. Viabilidade Econômico-Financeira.	
7.1. Valor Econômico.	39
7.2. Viabilidade Financeira.	40
8. Conclusão.	41
9. Determinação da Motorização a ser Adotada na Central.	
9.1. Introdução.	42
9.2. Seleção da Turbina.	42
9.3. Cálculo do Nº de Grupos Geradores.	43
9.4. Determinação dos Parâmetros da Máquina e do	

Gerador.	43
9.5 Posicionamento do Eixo da Unidade.	46
9.6 Pré-Dimensionamento da Casa de Força	47
9.7 Triângulos de Velocidade na Pressão e Sucção do Rotor.	48
9.8 Determinação da Rotação de Disparo ou Embalamento.	52
9.9 Golpe de Aríete - Tempo de Fechamento e Transitório.	54
9.10 Regulador de Velocidades	58
9.11 Determinação das Características Principais do Gerador.	60
10. Seleção dos Componentes Hidromecânicos.	64
11. Estimativa Preliminar de Custos	
11.1 Introdução.	70
11.2 Custos Diretos e Indiretos.	72
11.3 Composições de Custo Unitário.	73
12. Conclusão Final.	81
13. Bibliografia.	83
14. Anexo 1 - Estudos Preliminares.	85
15. Anexo 2 - Tabelas, Catálogos e Ábacos.	130

1. Formulação do Projeto - Objetivos.

Nosso país passa hoje por um processo de mudança política, econômica e social, procurando afirmar-se como um país realmente em desenvolvimento. Isso traz um aumento significativo de produção (aumento do PIB) e acaba atraindo capital externo para novos investimentos. Esse cenário de crescimento eleva o consumo de produtos industrializados (principalmente do ramo alimentício) e volume de vendas do comércio, aumentando a demanda de um fator de produção muito importante: a energia elétrica.

Diante desse quadro, nos objetivamos a ajudar a suprir essa demanda crescente de energia, estudando o meio mais viável técnica e economicamente de produção desse fator, observando o potencial que o Brasil dispõe para tal e concluindo que esse meio é o aproveitamento hidrelétrico.

O país já possui grandes centrais hidrelétricas que abastecem grandes mercados, mas a necessidade de energia de certas localidades em expansão nos levou à região de Ribeirão Preto, interior de São Paulo, município de Guará (situado a 423 KM de São Paulo e com 17.064 habitantes) e especificamente ao rio Sapucaí, fonte primária da energia a ser gerada.

Serão realizadas 2 etapas básicas: O estudo de viabilidade e o projeto básico da casa de força de uma pequena central hidroelétrica que deverá ser construída aproveitando o potencial hidráulico da sub-bacia do Rio Grande (bacia do Rio Paraná), onde se localiza o rio Sapucaí.

Em uma primeira parte realizou-se o estudo de viabilidade, que está estruturado da seguinte forma:

- Introdução, com uma visão geral do mercado de energia elétrica no Brasil e um estudo comparativo entre as usinas hidro e termelétricas, levando-se em conta alguns aspectos importantes tais como: meio ambiente, tecnologia, custos, etc;
- Estudo de Mercado, especificamente o mercado que deverá ser atendido, fazendo uma projeção de demanda de energia até o ano de 2015;
- Especificações Técnicas, onde são dados todos os requisitos funcionais, operacionais e construtivos a serem atendidos pela casa de força;

- Síntese de Soluções, onde são apresentadas algumas soluções para o projeto, que foram especificadas separadamente na exequibilidade física, econômica e financeira;
- Conclusão, que apresenta as melhores soluções, que serão analisadas a fundo na etapa seguinte até a tomada de decisão.

Para chegar às especificações técnicas, criou-se um anexo, a fim de deixar o relatório do projeto com uma sequência linear, onde constam toda a introdução teórica sobre os parâmetros utilizados e seus respectivos cálculos preliminares, tais como, vazão de projeto, altura de queda de projeto, área inundada, perfis de vertedouro e bacia de dissipação, verificação dos esforços na barragem e seu perfil, etc.

Na segunda etapa, tomou-se a decisão sobre a melhor solução a ser desenvolvida por completo, formulando-se dessa forma o projeto básico, preocupando-se agora com os detalhes construtivos de ordem mais técnica (mecânico, elétrico, etc.), bem como em realizar uma estimativa de investimento, ou seja, realizar estimativas preliminares de custos de execução de parte das obras civis e montagem eletromecânica.

Com isso encerrou-se o projeto, esperando ter dado, uma contribuição para o desenvolvimento do país, com uma visão ainda inexperiente mas bastante empenhada e detalhista.

2. Introdução.

2.1. O Suprimento da Demanda de Energia Elétrica.

A demanda total de energia elétrica no Brasil tem mostrado uma taxa de crescimento crescente mesmo em períodos de recessão econômica. Este aumento da demanda pode ser explicado basicamente pelo processo de industrialização e urbanização ocorridos desde o início do século e intensificados a partir da década de 50. Conforme a tabela abaixo, verifica-se que o consumo industrial foi responsável por mais de 50% da demanda desde 1968. Os valores são dados em GWh.

Ano	Industr.	% Total	Total
70	19905	52.2	38152
71	22702	52.9	42887
72	25733	53.6	47979
73	30056	54.7	54928
74	34067	55.3	61630
75	37583	55.1	68180
76	43589	56.2	77572
77	49155	56.5	86985
78	55663	57.3	97186
79	62088	57.9	108928
80	70006	58	121748
81	68079	53.9	126248
82	70833	53.1	133485
83	73536	51.1	143390
84	87189	54.8	159144
85	986382	55.8	172613
86	105954	56.6	187333

Em razão deste aumento da demanda, a Eletrobrás, entidade responsável pelo planejamento do setor elétrico nacional, elaborou "planos de atendimento aos requisitos de energia elétrica". Nestes planos estão, além das previsões de demanda, o total de recursos a

serem investidos na geração de energia elétrica. Foram gerados os planos 90, 95, 2000 e 2015 com estimativas para a demanda até os anos referenciados.

A tabela abaixo que ilustra os valores das estimativas com o consumo atual até o ano de 2015, com valores em GWh:

Ano	Plano 95	Plano 00	Plano 15*
80	122265	121476	
85	200976	204952	
90	305096	283321	210300
95	440662	406563	278900
0		547518	397600
5			544900
15			950000

* Cenário mais otimista.

É sabido que em 1986 foi necessário fazer racionamento de energia, uma vez que a capacidade de oferta estava abaixo da demanda. Isto é, não foram realizadas as obras previstas para o atendimento da demanda, indicadas no plano 2000.

Essa ^{oferta} escassez na ~~demanda~~ precisa desaparecer para que haja a infra-estrutura necessária a fim de manter o crescimento econômico do país, em particular do estado de São Paulo. Levando-se em conta que a partir de meados dos anos 90, com o incentivo para a entrada de capitais estrangeiros e a inserção do Brasil na rota de investimentos dos grandes conglomerados multinacionais, graças à estabilização da economia, pode-se inferir que a demanda de energia elétrica irá crescer nos próximos anos.

Além da previsão do crescimento da demanda total de energia elétrica, a perspectiva de investimentos trouxe consigo a concorrência entre os estados a fim de atrair estes capitais para a sua área de tributação. Neste aspecto, além, é claro, dos incentivos fiscais, a condição de oferecer a infra estrutura necessária para a instalação de um parque fabril de grande porte torna-se uma vantagem competitiva considerável. Deste modo, se o estado de São Paulo quer continuar sendo atraente para os investidores, é importante que continue a gerar energia elétrica suficiente para suprir a demanda das empresas, a um custo razoável, quer em termos econômicos como ambientais.

Dentre as diversas formas de geração de energia elétrica em escala destacam-se, hoje no Brasil, as usinas hidrelétricas e termelétricas.

Usinas Hidrelétricas.

Nas usinas hidrelétricas a energia hidráulica é convertida em trabalho mecânico através de uma turbina hidráulica. Acoplado à turbina está o gerador, que converte o trabalho mecânico gerado pela turbina em energia elétrica.

Há diversos critérios para se classificar as centrais hidrelétricas, sendo mais usual classificá-las por faixa de potência:

a) Microcentrais	$P \leq 100 \text{ KW};$
b) Minicentrais	$100 \leq P \leq 1000 \text{ KW};$
c) Pequenas Centrais	$1.000 \leq P \leq 10.000 \text{ KW};$
d) Médias Centrais	$10.000 \leq P \leq 100.000 \text{ KW};$
e) Grandes Centrais	$P > 100.000 \text{ KW}.$

Usinas Termelétricas.

Nas usinas termelétricas, há a conversão da energia química ou nuclear dos combustíveis, em energia elétrica, sendo denominadas respectivamente de centrais termelétricas convencionais e centrais termelétricas nucleares.

Centrais Termelétricas Convencionais.

As centrais termelétricas convencionais utilizam como combustível o petróleo e seus derivados, tais como os óleos combustíveis, gasolina ou óleo diesel, gás natural, carvão e etc.

Centrais Termelétricas Nucleares.

Estas centrais utilizam como combustível elementos pesados tais como urânio, plutônio, tório e outros que por processo de fissão liberam energia. A tecnologia de construção e

operação dessas centrais é bastante específica e porque não dizer, perigosa. A poluição ambiental gerada por elas é grande, uma vez que não se sabe o que fazer com o resíduo radioativo proveniente da usina.

2.2. Comparativo Entre as Principais Formas de Geração. Hidrelétricas x Termelétricas.

2.2.1. Problema do Impacto Ambiental.

As usinas termelétricas convencionais, que usam como combustíveis os derivados de petróleo, produzem efeitos de poluição atmosférica muito graves e que devem ser discutidos.

A queima de combustíveis derivados de petróleo e carvão liberam na reação, substâncias tais como CO, CO₂, SO₂, hidrocarbonetos, NO_x, etc., que causam problemas ambientais como o efeito estufa, a chuva ácida, os *smogs* industriais e a destruição da camada de ozônio. Há de se considerar também que esta queima implica usualmente no consumo de uma fonte não renovável de energia, como derivados do petróleo (óleo combustível, diesel, etc.) e carvão mineral. É possível ainda utilizar fontes renováveis como o biogás ou o bagaço da cana de açúcar para serem consumidos como combustíveis na usina termelétrica. Entretanto estas fontes ainda não são usadas em escala para a geração de energia elétrica, por serem tecnologias relativamente novas, ainda não consolidadas pela prática, possuindo um custo inviável, limitando a rentabilidade do empreendimento.

A poluição térmica gerada também é um problema ambiental sério causado pelas usinas termelétricas. Neste ponto distinguem-se os dois tipos básicos de centrais termelétricas que são as de ciclo aberto e as de ciclo fechado. O primeiro tipo é mais utilizado na indústria, onde se aproveita o calor remanescente para o processo. Por sua vez o segundo tipo é mais utilizado na geração de energia elétrica em escala. Devido às características do ciclo fechado, há a necessidade de se fazer uma descarga térmica. Tal descarga é usualmente feita aproveitando-se reservatórios térmicos naturais tais como rios e mares. A elevação da temperatura nos pontos de descarga praticamente destrói o ecossistema local, causando danos muitas vezes irreparáveis ao meio ambiente.

Problemas ambientais, como os discutidos acima acabam por modificar certos parâmetros naturais, levando ao mal funcionamento do ecossistema e suas relações com o homem.

O impacto ambiental das usinas hidrelétricas pode ser resumido no desequilíbrio ecológico gerado principalmente pela área inundada que se forma devido à construção das barragens e desvio de curso dos rios, onde a flora e a fauna da região inundada são afetadas em seus ciclos de sucessão ecológica, cadeias alimentares, modificação dos ecossistemas aquáticos (do rio) e terrestre (região inundada).

Fazendo uma análise do impacto ambiental, de acordo com a política nacional de meio ambiente, lei nº6938 de 31/08/81 que estabelece padrões de qualidade ambiental, verifica-se que as duas formas de geração de energia não são perfeitamente viáveis sob o ponto de vista da melhoria das condições ambientais. Nas usinas termelétricas convencionais e nucleares, o custo adicional gerado nas resoluções dos problemas de poluição, e na maioria das vezes não resolvendo-os totalmente, por KWh gerado não compensa o investimento em equipamentos para amenizar tal impacto ambiental.

Já nas usinas hidrelétricas o problema ambiental pode ser combatido a um custo bem menor com a criação de reservas ecológicas próximas ao local da barragem, com a fauna e a flora da região sendo recolhidas antes da construção, como foi feito em Itaipú. Também considera-se o aproveitamento múltiplo do reservatório, que pode ser utilizado para fins de lazer, irrigação e transportes (navegação).

O problema da poluição visual também deve ser considerado. As termelétricas são estruturas desagradáveis visualmente. Nas hidrelétricas o problema é minimizado em função principalmente do reservatório e do vertedouro.

O problema ambiental é um parâmetro importante que deve ser considerado em qualquer estudo de algum novo projeto.

2.2.2 Problema Tecnológico.

No Brasil, a tecnologia de construção, operação e manutenção de centrais hidrelétricas de qualquer porte, está completamente dominada por empresas nacionais, projetistas e de execução das obras civis e montagem mecânica. O potencial hidrelétrico brasileiro, que é abundante, começou a ser explorado em 1889 com a construção da usina Bernardo Mascarenhas localizada em Juiz de Fora - M.G., com 250 KW de potência distribuídos em dois conjuntos geradores.

Em 1883, foi construída a primeira usina termelétrica convencional no Brasil, na cidade de Campos - R.J., com 52 KW de potência instalada, sendo esta tecnologia também já dominada pelas empresas nacionais.

Com relação às usinas termelétricas nucleares, a tecnologia de instalação, operação e geração de material radioativo enriquecido não está completamente dominada no Brasil. Para completar um projeto desse nível, as empresas têm que transferir tecnologia proveniente de outros países, elevando dessa forma o custo final do projeto. A tecnologia de armazenagem do resíduo radioativo ainda não é conveniente em nenhuma parte do mundo, restringindo, devido a esse problema, a instalação desse tipo de usina em alguns países devido a impedimentos na legislação.

Outro aspecto a ser considerado é a diferença nos rendimentos totais da instalação, envolvidos na geração de energia elétrica nas centrais hidrelétricas e termelétricas convencionais.

Nas usinas hidrelétricas, considerando as perdas desde o reservatório, passando pelos condutos livres e forçados, turbina até o conduto de adução, além das perdas nos equipamentos elétricos, obtém-se um rendimento total em torno de 85%.

Já nas termelétricas convencionais, as perdas decorrentes do ciclo térmico, sem levar em consideração as perdas dos equipamentos elétricos, abaixam o rendimento para apenas 30%.

2.2.3. Aspectos Econômico-Financeiro.

Um comparativo importante deve ser realizado, entre as usinas termo e hidrelétricas, em termos de investimentos iniciais e custos operacionais e de combustível no período de vida útil destas usinas.

Normalmente é usada uma unidade de medição desses custos, o KWh produzido.

Pode-se observar, na tabela 1, que os investimentos iniciais em uma usina hidrelétrica são maiores em termos de capital investido, representando 90 % na estrutura de custos do KWh produzido, não possuindo gastos com combustíveis. Já a usina termelétrica, possui um investimento inicial menor, mas em compensação possui uma despesa com combustíveis quase da mesma ordem do capital investido por KWh produzido, elevando seus custos operacionais quase o dobro quando comparados com os custos das usinas hidrelétricas.

No tocante ao combustível utilizado, de uma forma geral (nos transportes terrestres, por exemplo), se for incluída a eficiência de uso na comparação de custos desses combustíveis (substitutos entre si), conforme tabela 2, então a energia elétrica pode substituir a gasolina, álcool ou óleo diesel. De qualquer forma a energia elétrica em termos de preço não tem como competir, hoje, com o óleo combustível a não ser que o preço do petróleo tenha uma alta muito significativa no mercado mundial.

Diante desse quadro, o que aconteceria com o preço do KWh produzido, oferecido aos consumidores, se esses derivados de petróleo fossem utilizados na produção dessa energia elétrica?

Em uma usina termelétrica, para produzir um Kg de vapor são necessários 825 Kcal utilizando-se uma caldeira a combustível, e 2020 Kcal em uma caldeira elétrica. Tal diferença se explica pela baixa eficiência energética das usinas termelétricas, onde um KWh equivale a 860 Kcal e é produzido com 2500 Kcal de combustível.

ESTRUTURA DE CUSTOS DO KWh PARA DUAS USINAS ELÉTRICAS.

US\$ por 1000 KWh produzido.

TIPO DE USINA	TOTAL	CAPITAL	COMBUSTÍVEL	OPERAÇÃO
Termoelétrica (carvão)	103	47	45	11
Hidroelétrica	62	56	0	6

TABELA 1.

PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS E KWh CONSIDERANDO A EFICIÊNCIA TÉRMICA.

Energia	US\$ barril	US\$ GCal	Eficiência Térmica (%)	Relação Comb / KWh
Gasolina	125.88	95.09	28	6.5
Querosene	63.44	44.40	-	-
Óleo Diesel	66.14	45.06	32	2.7
Óleo Combust.	34.63	21.86	86	0.5
Álcool Etílico	63.12	78.53	27	5.6
Carvão	-	8.83	74	0.2
KWh	-	52.35	100	1.0

Preço do Barril de Petróleo: US\$ 18.67

Tabela 2.

Para melhor entendimento do estudo comparativo, utiliza-se uma curva de equivalência de custos entre o investimento necessário para ampliação da capacidade instalada de uma hidrelétrica e o preço do barril de petróleo, em uma aplicação eletrotérmica onde o índice indicativo é a quantidade de Kcal deslocada por KWh de energia elétrica.

O equilíbrio deve ser atingido quando o custo anual (A) do investimento (US\$ / ano) for igual ao custo total de um barril de petróleo (CB):

$$A = CB.$$

O custo total de um barril de petróleo é dado pela somatória do custo do barril de petróleo no mercado internacional (CM), pelos custos fixos no refino do petróleo (distribuição e despesas operacionais - CF) e pelos custos variáveis no refino do petróleo (consumo próprio de energia - CV):

$$CB = CM + CF + CV.$$

O custo anual referente aos investimentos necessários nas usinas hidrelétricas para promover a substituição é o produto da potência a ser ampliada (Pi) em KW, pelo custo de ampliação (C) de 1 KW no sistema elétrico (US\$ / KW) e pelo fator de remuneração do capital investido, incluindo amortização no período de vida útil da usina (FRC).

$$A = P_i \cdot C \cdot FRC.$$

Para o cálculo da potência a ser ampliada, necessita-se do cálculo da energia equivalente (E) contida em um barril de petróleo em KWh que é dada por:

$$E = 136 \text{ Kg} \cdot 10000 \text{ Kcal/Kg} \cdot 1 \text{ KWh} / 860 \text{ Kcal} = 1581,4 \text{ KWh}.$$

Dessa forma calcula-se a potência ampliada:

$$P_i = \frac{E}{8760 \text{ h} \times FC \times RT} \times \frac{RP}{RE}$$

Igualando os valores chega-se à equação:

$$\frac{1 \text{ kcal}}{\text{kWh}} = \frac{860 \times E \times C \times FRC}{8760 \times FC \times RT \times (CM + CF + CV)}$$

Para construção do gráfico, a fim de exemplificar a teoria, foram utilizados os valores reais:

C = 2500, 2800, 3300 US\$/KWh;

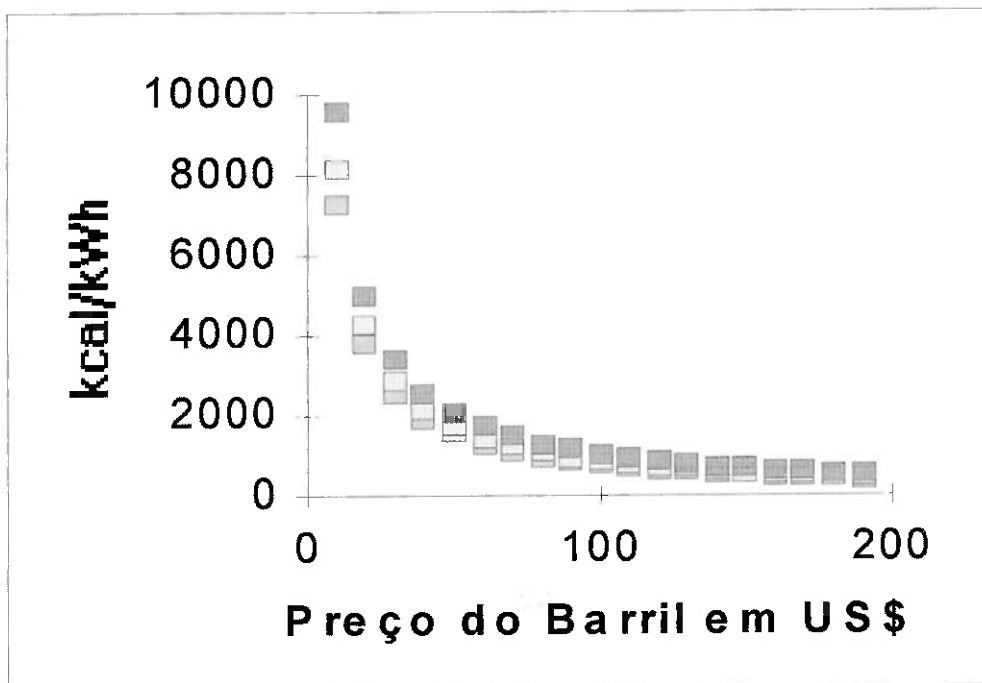
FRC = 0.15 com amortização de 10 anos;

FC = 0.55 valor médio que se verifica nas hidrelétricas brasileiras;

RT = 0.95 que considera perdas de 5 % no sistema de transmissão acima de 88 / 138 KV;

CF = 2 US\$ / barril;

CV = 5 % do custo do barril no mercado internacional.



Para o primeiro caso, se um determinado sistema hidrelétrico exija um investimento de 2500 US\$ / KW instalado e supondo-se que o barril de petróleo custe US\$ 60, então o ponto de equilíbrio entre esses dois custos ocorre quando um KWh de energia elétrica desloque 3800 Kcal / KWh equivalentes de combustíveis derivados de petróleo, ou seja, se uma usina termelétrica utilizar como combustível, derivados de petróleo, onde um KWh de eletricidade desloque mais de 3800 kcal / KWh equivalentes de petróleo, é economicamente interessante para o sistema hidrelétrico considerado.

Percebe-se dessa forma que a variação do preço do petróleo, devido a uma crise internacional como as de 1973 e 1979 ou até mesmo devido ao esgotamento dessa fonte de energia não renovável, pode causar prejuízos grandes quando utiliza-se usinas termelétricas para geração de energia.

Um outro custo envolvido que deve ser avaliado é o chamado custo ambiental. De difícil quantificação, todos os estudos mais recentes tentam levar em conta esses custos.

Para uma Pequena Central Hidrelétrica o impacto ambiental é bem menor do que o de uma termelétrica, visto a pequena área inundada que se forma para satisfazer a faixa de potência que deve ser gerada, levando a um custo ambiental conseqüentemente menor.

2.2.4. Outros Aspectos.

2.2.4.1. Tempo de Início de Operação.

A construção e montagem de uma usina hidrelétrica requer um tempo, esforço de mão de obra e de meios materiais muito maiores do que a construção e montagem de uma usina termelétrica, visto a complexidade da execução da obra, mobilização de pessoal e equipamento pesado e sua estrutura (desvio do curso do rio, barragem e outros componentes).

Para inicializar a operação de uma central hidrelétrica deve-se ter o enchimento total da área a ser inundada garantindo o seu perfeito funcionamento, evitando problemas de vazão e depressão nos condutos, e para a inicialização da operação de uma termelétrica, basta a conclusão das obras e instalações. Com isso, o tempo torna-se um fator importante para o início de operação de uma central de geração de energia.

2.2.4.2. Estudos Preliminares.

Os levantamentos de dados necessários ao projeto de uma central hidrelétrica são bastante difíceis e requerem um tempo e esforço de mão de obra relevante. Devem ser realizados estudos hidrológicos, hidroenergéticos, geológicos, geotécnicos e topográficos. Além disso, estudos da rede elétrica local, estudos sócio-econômicos e ecológicos são comuns aos projetos das usinas hidrelétricas e termelétricas.

Outro aspecto relevante é o levantamento da localização da instalação da usina.

A localização, no caso das hidrelétricas fica diretamente associada à localização da rede hidrológica que será utilizada no aproveitamento, dependendo do curso do rio; já no caso das termelétricas, a localização pode ser determinada levando-se em consideração a proximidade dos centros de consumo da energia, devido à sua flexibilidade de construção, possibilitando uma economia nas linhas de transmissão e redução das perdas de transmissão.

A necessidade de uma eventual desapropriação de terras é um problema muito mais grave nas hidrelétricas devido à grande área de que necessita para o seu pleno funcionamento.

2.2.5. Conclusão.

Diante do estudo comparativo realizado anteriormente, conclui-se, levando-se em conta os dois principais parâmetros de comparação, que em termos econômicos, as usinas hidrelétricas, no decorrer de sua vida útil produz um KWh de energia, mais barato que as termelétricas e o impacto ambiental das hidrelétricas, depende diretamente da área inundada já nas termelétricas produz-se um impacto ambiental que não pode ser evitado, apenas controlado, dependendo do combustível utilizado.

Com isso, nosso objeto de estudo serão as usinas hidrelétricas, que produzem energia mais barata para o consumidor final e produzem um impacto ambiental muito mais controlado que as termelétricas.

3. Estudo de Mercado.

3.1 Introdução Teórica.

3.1.1. Variáveis Básicas.

A energia elétrica não pode ser armazenada na sua forma final sendo fundamental a necessidade que sejam definidas algumas variáveis básicas às quais estarão associados os parâmetros básicos do projeto da central hidrelétrica. Tais variáveis são

- Demanda Máxima de Energia na região a ser abastecida (KW);
- Demanda Mínima de Energia na região a ser abastecida (KW);
- Energia (KWh) proveniente da curva de carga dentro de um dado período medido em horas.

Demanda Máxima.

É a maior demanda verificada durante um intervalo de tempo especificado. Esta variável estará associada a potência a ser instalada acrescida das perdas no sistema de transmissão e distribuição.

Demanda Mínima.

Menor demanda verificada durante o intervalo de tempo especificado. Esta variável será básica para a determinação da potência das unidades geradoras, visto os problemas de cavitação que podem ocorrer, devendo-se restringir a operacionalidade mínima das turbinas.

Consumo de Energia.

O consumo de energia é medido pela área da curva de carga ao longo de um período considerado. Este é o elemento básico para o dimensionamento do reservatório. A curva de carga é a curva na qual é representada a variação da demanda de energia em função do tempo para o período considerado.

As variáveis acima consideradas definem alguns fatores de natureza técnico-econômico a saber:

Fator de Demanda (FD): definido como a relação entre a demanda máxima e a carga instalada, dependente da natureza das atividades do consumidor:

$$F_D = \frac{P_{\max}}{P_{\text{Inst}}}$$

Este fator mede o grau de utilização da capacidade instalada da central, ou seja, a intensidade com que o sistema está sendo carregado durante o pico de carga em relação a sua capacidade.

Fator de Carga (FC): definido como a relação entre a carga média e a carga máxima em um determinado período de tempo.

$$F_C = \frac{P_{\text{Med}}}{P_{\text{Max}}}$$

Este fator mede o grau de variação da carga no período de tempo considerado não dando indicação precisa da forma da curva de carga.

Nota-se também que o fator de carga expressa a relação entre a produção real (efetiva) de energia e a produção que resultaria se a potência máxima fosse mantida durante todo o período considerado.

O objetivo primordial de quem projeta a implantação de uma central é a otimização do fator de carga das instalações, ou seja, a melhor utilização do capital aplicado, já que um baixo fator de carga pode acarretar a inviabilidade do investimento.

3.2 Resultados.

Com base na demanda do Estado de São Paulo, vê-se claramente, de acordo com os anuários estatísticos da CESP, que a região de Ribeirão Preto, tem uma demanda de energia elétrica muito grande, e que vem crescendo nos últimos anos, mais que em outras localidades do estado. Com base nessa pesquisa, decidiu-se por usar o potencial hidráulico de um rio da região, o rio Sapucaí, que, de acordo com os estudos preliminares que se encontram no anexo do presente texto, tem possibilidades de abastecer a cidade de Guará, que se encontra às margens do rio em questão. Para tal, vê-se que a usina que poderá ser usada para abastecer tal centro, se encaixa na faixa de potência de médias centrais hidrelétricas, minimizando dessa forma o impacto ambiental na região.

Para a realização deste estudo, será plotada a curva de carga do município de Guará, para o ano de 1994, com dados de número de consumidores e de consumo de energia elétrica em KWh, fornecidos pelo anuário de dados estatísticos da CESP e será calculado o fator de carga, o fator de demanda e plotada a curva de carga. Será realizada uma projeção da demanda de energia na região, com base no "Plano 2015" da Eletrobrás, para o ano de 2005 e vida útil da UHE de 10 anos, considerando-se as diferentes classes de consumo para diferentes cenários de crescimento econômico. Finalmente será plotada a curva de carga e calculado o fator de carga e fator de demanda para o ano de 2005.

3.2.1 Curva de Carga.

A curva de carga de 1994 foi levantada com base nos valores de consumo em MWh do município, para diferentes classes de consumo, levando-se em consideração a seguinte divisão do mercado e as seguintes hipóteses com relação a esse mercado:

Divisão: - Residencial;
 - Industrial;
 - Rural;
 - Comercial;

- Setor Público (Iluminação e Órgãos Públicos).

- Hipóteses:
- Consumo residencial elevado no período das 18:00 às 22:00 hs;
 - Consumo industrial ininterrupto e uniforme durante o dia (3 turnos);
 - Consumo rural apenas diurno das 7:00 às 18:00 hs;
 - Horário comercial das 8:00 às 17:00 hs (Comércio e órgãos públicos);
 - Iluminação pública das 18:00 às 6:00 hs.

Segue a plotagem da curva de carga para 1994 e da curva podemos calcular F_c e F_d :

$$F_d = \frac{7,45}{15,5} = 0,48$$

$$F_c = \frac{4,02}{7,45} = 0,54$$

3.2.2 Projeção da Demanda.

O "Plano 2015" da Eletrobrás dividiu o período de 1990 a 2015 de 5 em 5 anos, estabelecendo taxas de crescimento diferenciadas para as várias classes de consumo de energia elétrica, em cada intervalo. Ainda de acordo com o plano, estabeleceram-se 4 cenários econômicos diferentes para a determinação das taxas de crescimento de cada classe (% de crescimento do PIB), considerando os diferentes cenários de crescimento econômico.

Considerando-se o período de 1995 a 2005, tem-se na tabela 3, a seguir, um sumário da taxa de crescimento para os diferentes cenários e classes de consumo de energia.

Adotando-se a média dos valores obtidos na tabela 3, chega-se à tabela 4, que mostra a projeção de consumo por classe.

Considerando-se as mesmas características para a construção da curva de carga para a projeção, obtemos então os seguintes fatores:

CRESCIMENTO ACUMULADO NO PERÍODO DE 1995 A 2005.

CLASSE	INDUSTRIA (%)	COMÉRCIO (%)	RESIDENCIAL (%)	OUTROS (%)
CENÁRIO				
I	43.70	68.40	72.40	59.00
II	69.20	73.20	77.40	68.00
III	70.80	74.90	78.20	69.20
IV	77.40	84.20	87.70	80.70
MÉDIA	65.28	75.18	78.93	69.23

TABELA 3.

COSUMO PROJETADO EM KWh.

CLASSE	INDUSTRIA	COMÉRCIO	RESIDENCIAL	OUTROS
ANO				
1995	11.304.761	7.469.043	18.444.953	10.628.551
2005	18.684.508	13.084.269	33.001.709	17.986.697

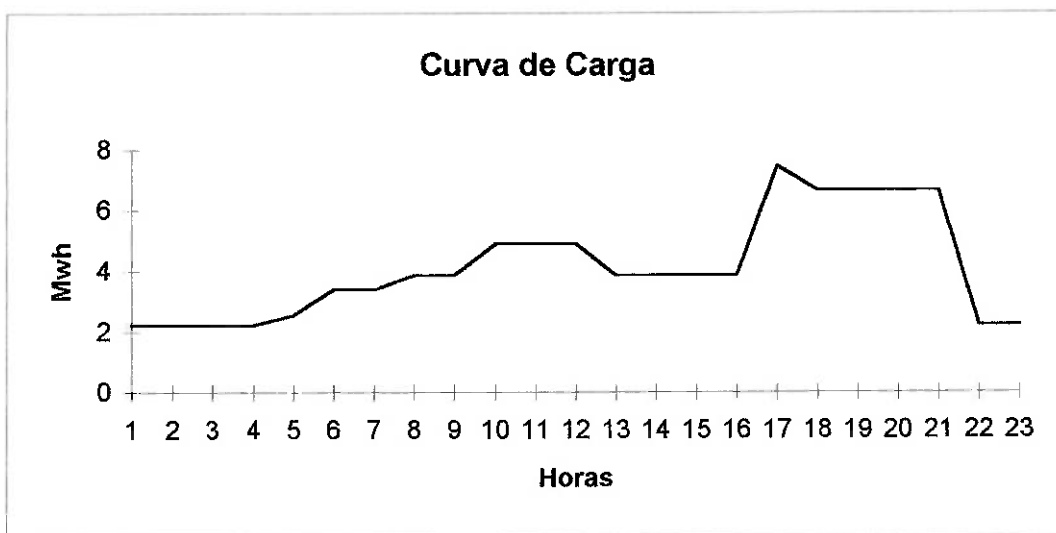
TABELA 4.

$$Fc = \frac{7,14}{13,8} = 0,52$$

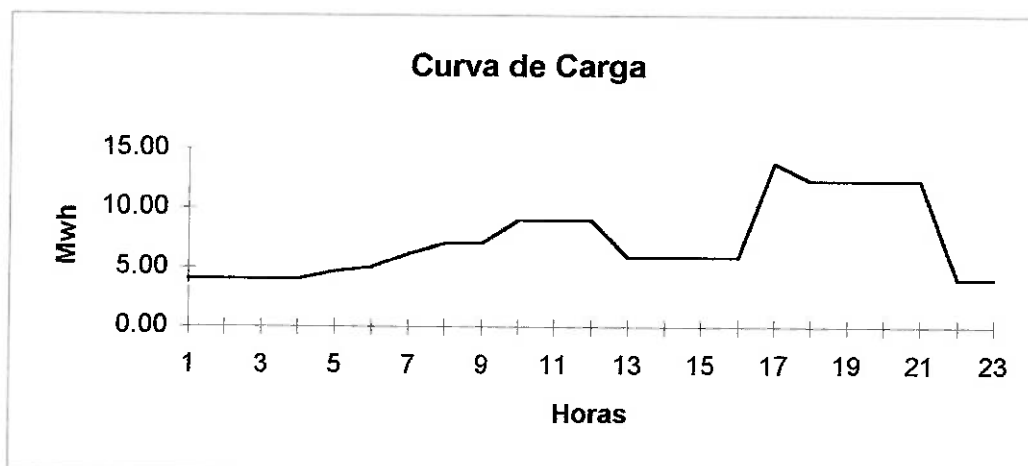
$$Fd = \frac{13,8}{15,5} = 0,89$$

Observa-se que o fator de demanda já está bastante elevado, indicando que o mercado em questão necessita de uma outra fonte de abastecimento de energia elétrica para um futuro próximo.

Horário	Consumo de Energia por Setor (MWh)					Total
	Residencial	Industrial	Rural	Comercial	Publico	
1	0.82	1.05			0.33	2.2
2	0.82	1.05			0.33	2.2
3	0.82	1.05			0.33	2.2
4	0.82	1.05			0.33	2.2
5	0.82	1.05			0.33	2.2
6	0.82	1.05	0.35		0.33	2.55
7	1.33	1.05	0.35		0.67	3.4
8	1.33	1.05	0.35		0.67	3.4
9	1.33	1.05	0.35	0.46	0.67	3.86
10	1.33	1.05	0.35	0.46	0.67	3.86
11	2.36	1.05	0.35	0.46	0.67	4.89
12	2.36	1.05	0.35	0.46	0.67	4.89
13	2.36	1.05	0.35	0.46	0.67	4.89
14	1.33	1.05	0.35	0.46	0.67	3.86
15	1.33	1.05	0.35	0.46	0.67	3.86
16	1.33	1.05	0.35	0.46	0.67	3.86
17	1.33	1.05	0.35	0.46	0.67	3.86
18	5.26	1.05	0.35	0.46	0.33	7.45
19	5.26	1.05			0.33	6.64
20	5.26	1.05			0.33	6.64
21	5.26	1.05			0.33	6.64
22	5.26	1.05			0.33	6.64
23	0.82	1.05			0.33	2.2
24	0.82	1.05			0.33	2.2
Tot. Diario						96.59



Horario	Consumo de Energia por Setor					Total
	Residencial	Industrial	Rural	Comercial	Publico	
1	1.54	1.86			0.6	4.00
2	1.54	1.86			0.6	4.00
3	1.54	1.86			0.6	4.00
4	1.54	1.86			0.6	4.00
5	1.54	1.86			0.6	4.00
6	1.54	1.86	0.63		0.6	4.63
7	1.33	1.86	0.63		1.21	5.03
8	2.49	1.86	0.63		1.21	6.19
9	2.49	1.86	0.63	0.85	1.21	7.04
10	2.49	1.86	0.63	0.85	1.21	7.04
11	4.43	1.86	0.63	0.85	1.21	8.98
12	4.43	1.86	0.63	0.85	1.21	8.98
13	4.43	1.86	0.63	0.85	1.21	8.98
14	1.33	1.86	0.63	0.85	1.21	5.88
15	1.33	1.86	0.63	0.85	1.21	5.88
16	1.33	1.86	0.63	0.85	1.21	5.88
17	1.33	1.86	0.63	0.85	1.21	5.88
18	9.87	1.86	0.63	0.85	0.6	13.81
19	9.87	1.86			0.6	12.33
20	9.87	1.86			0.6	12.33
21	9.87	1.86			0.6	12.33
22	9.87	1.86			0.6	12.33
23	1.54	1.86			0.6	4
24	1.54	1.86			0.6	4
Tot. Diario						171.5



4. Especificações Técnicas.

Para o projeto eletromecânico da usina, consideram-se como especificações para cada unidade geradora, com base nos estudos realizados que constam do anexo do presente estudo e em itens anteriores, os seguintes aspectos:

A-) Aspectos Funcionais:

- Desempenho: Produção de energia elétrica, que supra a demanda do mercado especificado, de Guará, durante a vida útil do projeto.

- Segurança: Estabilidade do equipamento eletro-mecânico, evitando travamentos nos mancais da turbina, cavitação nas pás da turbina e dutos de adução e sucção, danos à rede de distribuição elétrica devido à sobrecarga e locais de fácil acesso para realização das operações de manutenção, garantindo segurança aos operadores e mecânicos da usina.

B-) Aspectos Operacionais:

- Durabilidade: Vida útil de 10 anos com utilização contínua (24 hs por dia) com paradas programadas para manutenção de 4 em 4 meses, para verificação dos principais componentes.

- Confiabilidade: Nenhuma falha que interrompa o funcionamento da usina nos primeiros 5 anos de uso, levando-se em conta uma manutenção adequada e condições naturais propícias (vazão nominal e altura de queda dentro dos padrões).

C-) Aspectos Construtivos:

- Capacidade: Produzir 15.5 MW de potência com no máximo 4 unidades geradoras, desconsiderando as perdas hidráulicas, mecânicas e elétricas, garantindo uma casa de máquinas o mais compacta possível.

- Potência hidráulica total: 18.2 MW.

- Rendimento total: 0,85

- Vazão total: $113 \text{ m}^3 / \text{s}$.
- Altura de queda de projeto: 16.5 m.
- Vazão máxima por grupo gerador: $41,43 \text{ m}^3 / \text{s}$.
- Vazão mínima por grupo gerador: $18,00 \text{ m}^3 / \text{s}$.
- Vazão de cheia de Projeto (Tr = 500 anos): $515 \text{ m}^3 / \text{s}$.
- Área inundada (N.A. próximo do reservatório): $10,4 \text{ Km}^2$.
- Frequência elétrica gerada: 60 Hz.
- Potência máxima dos geradores: 5,5 MVA.

4.1 Esquema do Sistema Casa de Máquinas - Entradas e Saídas.

Sistema: Casa de Máquinas.

Entradas Desejáveis:

- vazão nominal de projeto;
- alto potencial hidráulico;
- comandos de controle dos atuadores da turbina;
- água.

Saídas Desejáveis:

- energia elétrica especificada;
- baixo potencial hidráulico;
- baixas perdas totais;
- água.

Entradas Indesejáveis:

- vazão fora da especificada
- sujeira (sedimentos, lama, etc) junto com a água.
- baixo potencial hidráulico.

Saídas Indesejáveis:

- energia elétrica fora da especific.
- vibração / ruído.
- superaquecimento do equipamento elétrico.

5. Geração de Soluções.

Os parâmetros utilizados para geração das soluções são representativos dos principais sistemas que compõem a casa de máquinas da usina hidrelétrica, a saber:

- sistema de adução;
- sistema motor (turbina);
- sistema gerador;
- sistema de sucção.

As soluções geradas já levam em conta esses parâmetros, tornando qualquer uma delas viáveis fisicamente, ou seja, a exequibilidade física, a principio, está garantida.

Um dos parâmetros mais importantes a ser analisado, diz respeito ao tipo de turbina que pode ser utilizada. Portanto, as formas construtivas Pelton e Michell-Banki, não são recomendadas para as nossas especificações de altura de projeto e vazão, uma vez que a primeira exige quedas de água maiores que 300 metros e pequenas vazões e a segunda estar restrita a pequenos aproveitamentos.

Solução 1.

Turbina: Hélice.

Eixo: Vertical

Comporta a montante: Presente.

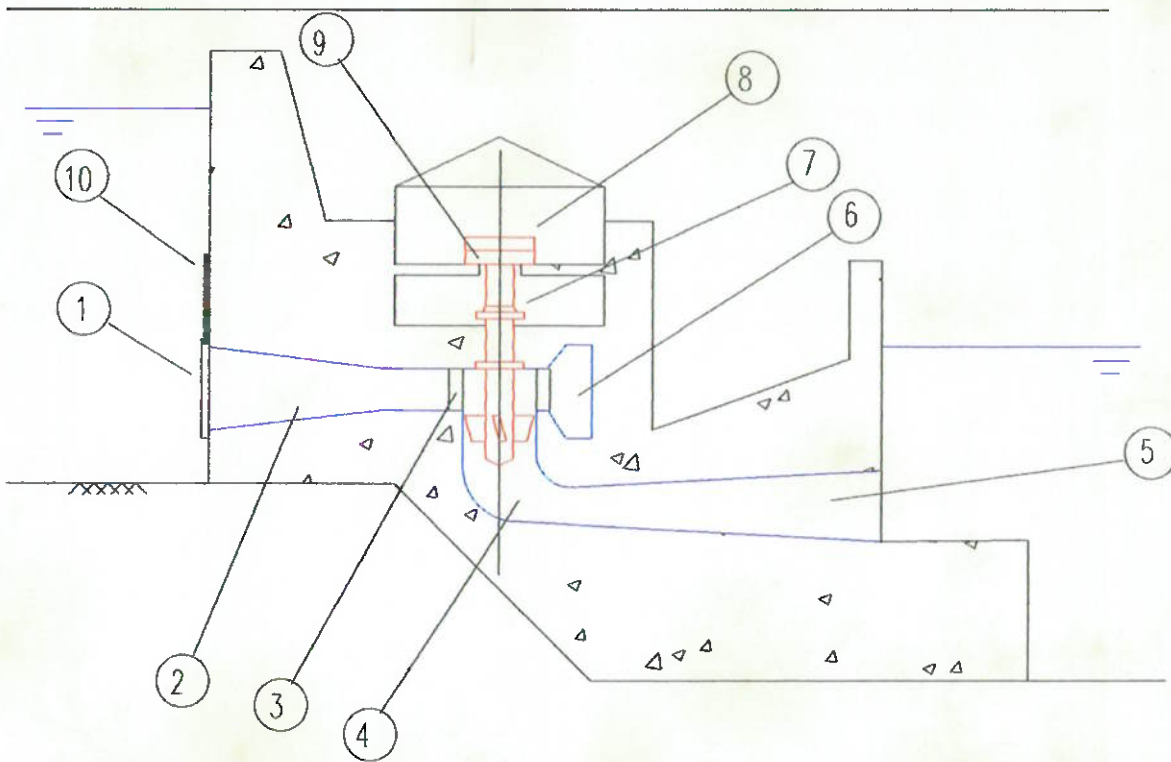
Tubulação de Adução: Interna à barragem.

Palhetas Diretrizes: Presentes, sem pás reguláveis.

Caixa Espiral: Presença de caixa semi-espiral, com tubo de sucção e canal de fuga.

Variador de Velocidade: Com variador de velocidade.

Gerador: Trifásico, síncrono.



- | | | |
|------------------------|-----------------------|--------------|
| 1. Grade | 5. Canal de Fuga. | 9. Variador |
| 2. Tubo de Adução | 6. Caixa Semi Espiral | 10. Comporta |
| 3. Palhetas Diretrizes | 7. Turbina Kaplan | |
| 4. Tubo de Sucção | 8. Gerador | |

Solução 2.

Turbina: Kaplan.

Eixo: Vertical

Comporta a montante: Presente.

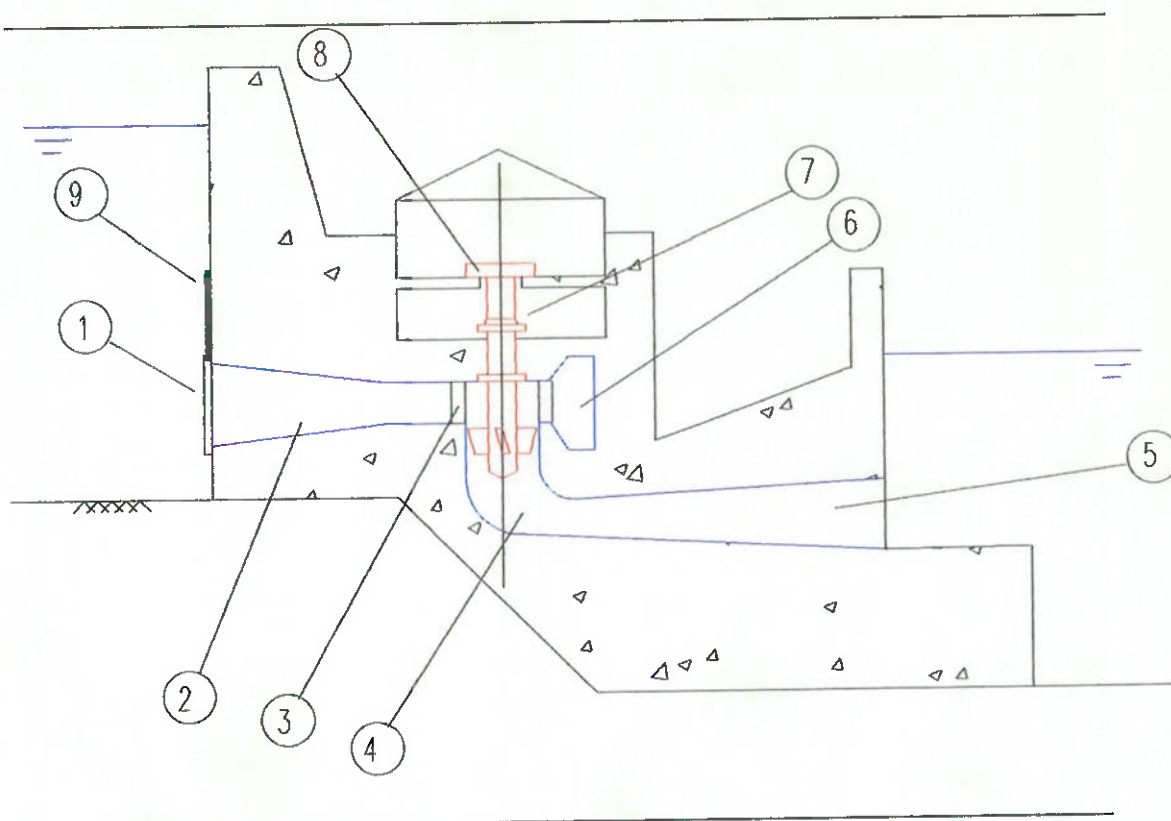
Tubulação de Adução: Interna à barragem.

Palhetas Diretrizes: Presentes, com ângulos reguláveis.

Caixa Espiral: Presença de caixa semi-espiral, com tubo de sucção e canal de fuga.

Variador de Velocidade: Sem variador de velocidade.

Gerador: Trifásico, síncrono de 12 a 36 pares de pólos.



1. Grade

2. Tubo de Adução

3. Palhetas Diretrizes

4. Tubo de Sucção

5. Canal de Fuga.

6. Caixa Semi Espiral

7. Turbina Kaplan

8. Gerador

9. Comporta

Solução 3.

Turbina: Kaplan.

Eixo: Vertical

Comporta a montante: Presente.

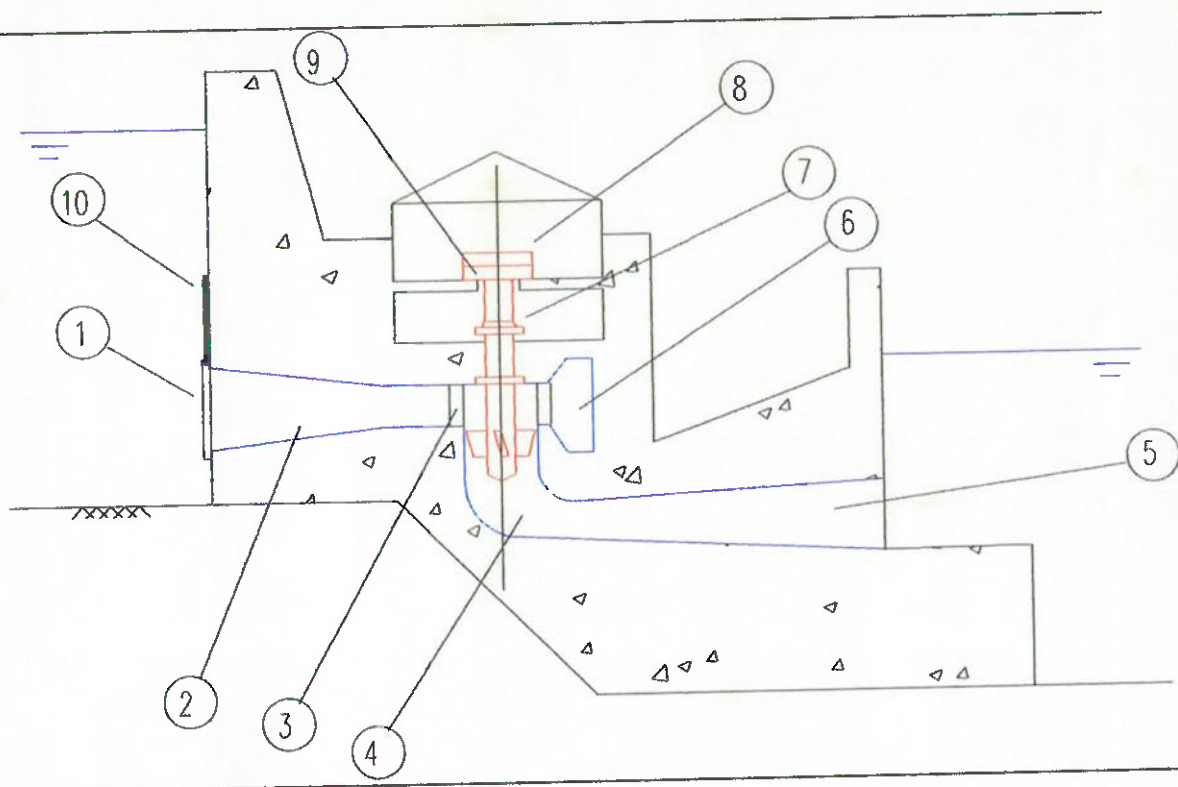
Tubulação de Adução: Interna à barragem.

Palhetas Diretrizes: Presentes, com ângulos reguláveis.

Caixa Espiral: Presença de caixa semi-espiral, com tubo de sucção e canal de fuga.

Variador de Velocidade: Com variador de velocidade.

Gerador: Trifásico, síncrono.



1. Grade

2. Tubo de Adução

3. Palhetas Diretrizes

4. Tubo de Sucção

5. Canal de Fuga.

6. Caixa Semi Espiral

7. Turbina Kaplan

8. Gerador

9. Variador

10. Comporta

Solução 4.

Turbina: Francis

Eixo: Vertical

Comporta a montante: Presente.

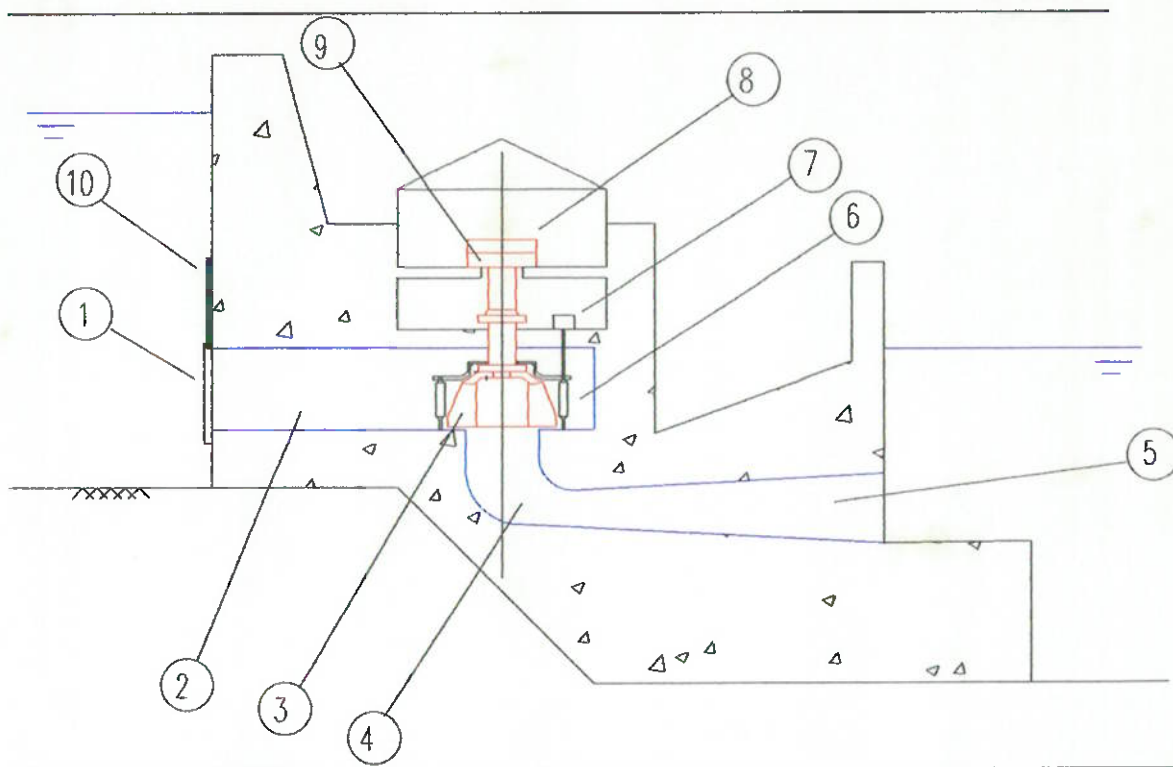
Tubulação de Adução: Interna à barragem.

Palhetas Diretrizes: Presentes, com pás reguláveis.

Caixa Espiral: Sem caixa espiral, com tubo de sucção e canal de fuga.

Variador de Velocidade: Com variador de velocidade.

Gerador: Trifásico, síncrono.



- | | | |
|--------------------|-----------------------------------|--------------|
| 1. Grade | 5. Canal de Fuga. | 9. Variador |
| 2. Tubo de Adução | 6. Palhetas Diretrizes Reguláveis | 10. Comporta |
| 3. Turbina Francis | 7. Atuador | |
| 4. Tubo de Sucção | 8. Gerador | |

Solução 5.

Turbina: Francis

Eixo: Horizontal

Comporta a montante: Presente.

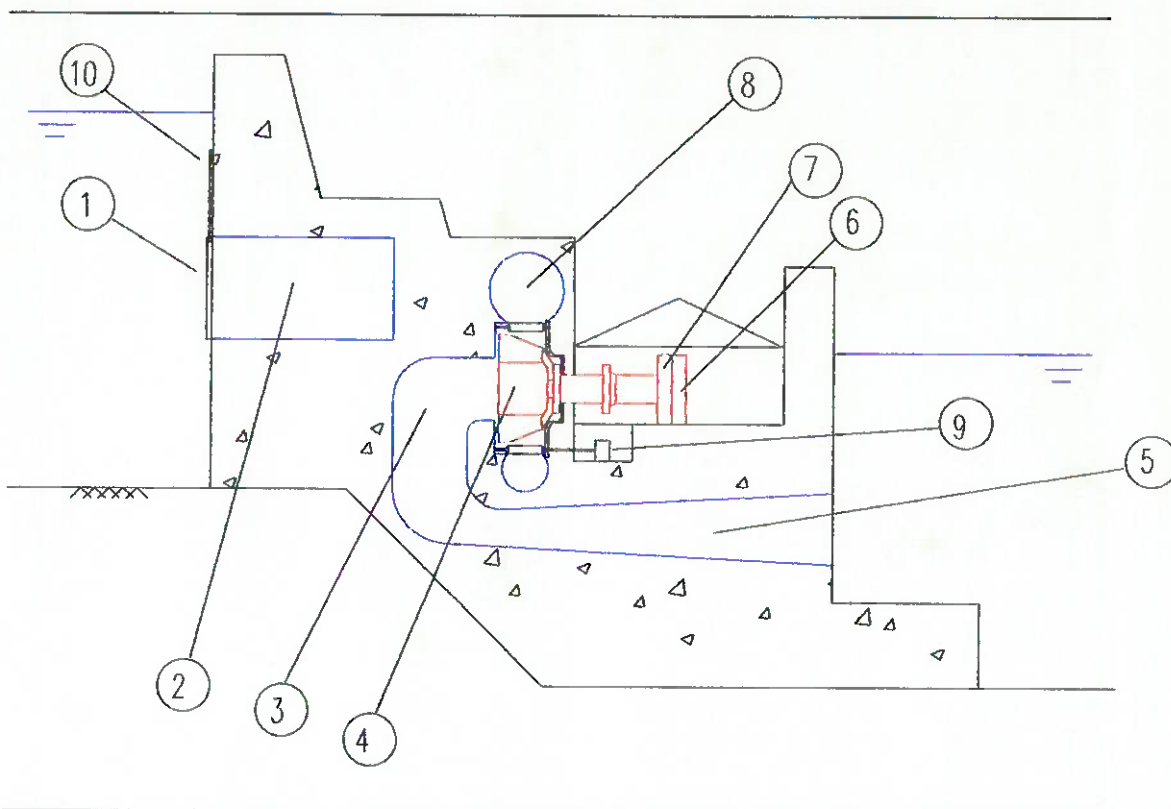
Tubulação de Adução: Interna à barragem.

Palhetas Diretrizes: Presentes, com pás reguláveis.

Caixa Espiral: Presença de caixa espiral, com tubo de sucção e canal de fuga.

Variador de Velocidade: Sem variador de velocidade.

Gerador: Trifásico, síncrono.



- | | | |
|--------------------|-------------------|--------------|
| 1. Grade | 5. Canal de Fuga. | 9. Atuador |
| 2. Tubo de Adução | 6. Gerador | 10. Comporta |
| 3. Tubo de Sucção | 7. Variador | |
| 4. Turbina Francis | 8. Caixa Espiral | |

Solução 6.

Turbina: Bulbo com pás reguláveis.

Eixo: Horizontal

Comporta a montante: Presente.

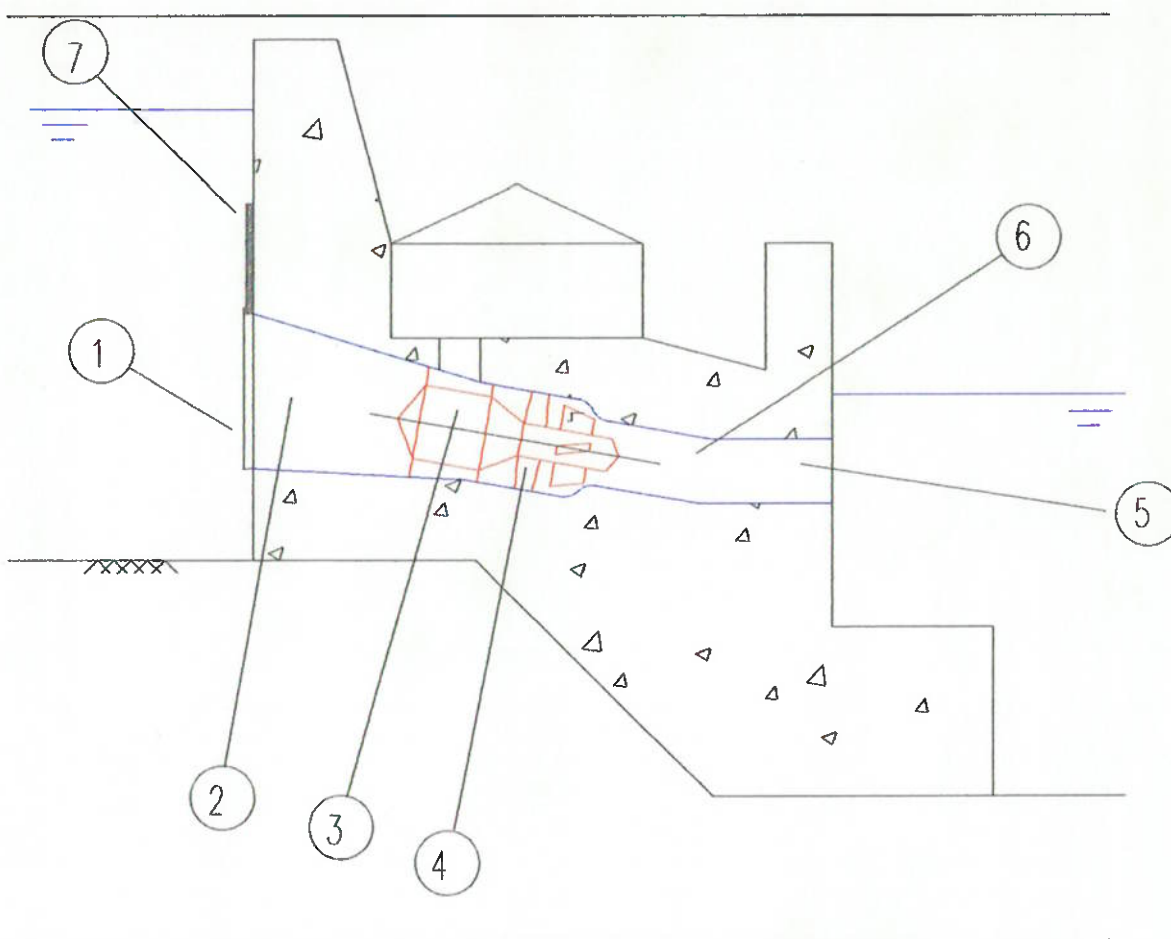
Tubulação de Adução: Interna à barragem.

Palhetas Diretrizes: Presentes, sem pás reguláveis.

Caixa Espiral: Ausente

Variador de Velocidade: Sem variador de velocidade.

Gerador: Trifásico, síncrono de 8 a 20 pares de pólos.



- | | | |
|---------------------------------------|------------------------|--------------|
| 1. Grade | 4. Palhetas Diretrizes | 7. Comporta. |
| 2. Tubo de Adução | 5. Canal de Fuga | |
| 3. Turb. Bulbo c/ gerador s/ variador | 6. Tubo de Sucção | |

Solução 7.

Turbina: Tubular S.

Eixo: Horizontal

Comporta a montante: Presente.

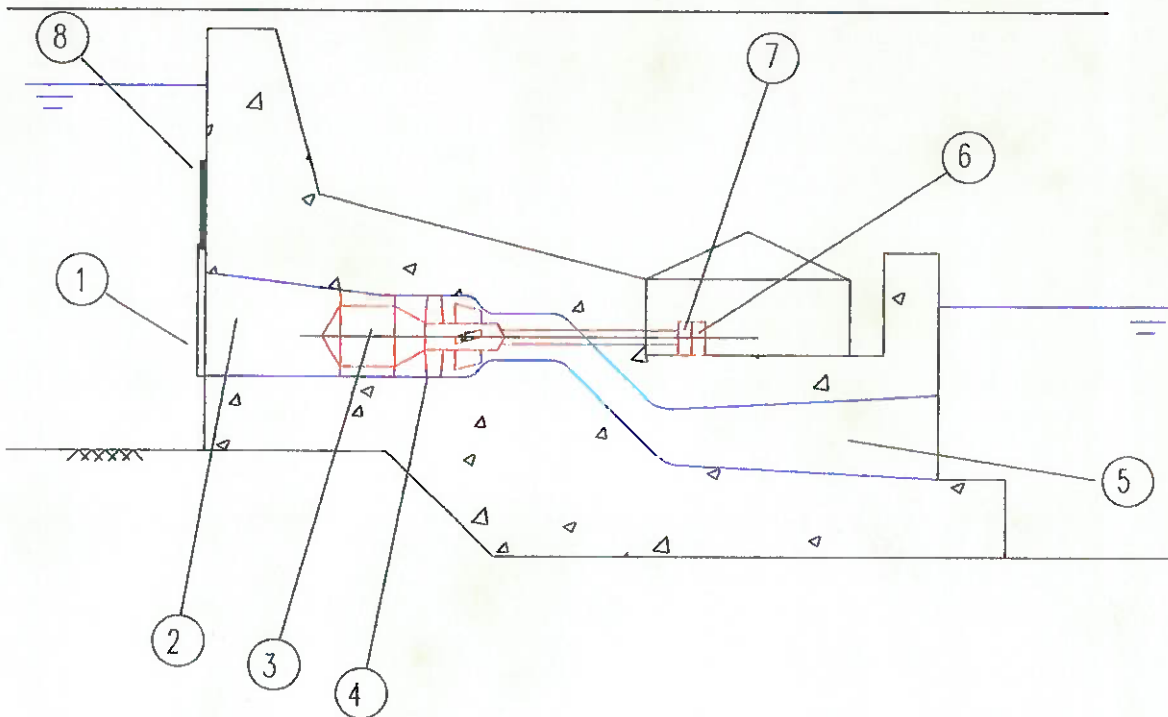
Tubulação de Adução: Interna à barragem.

Palhetas Diretrizes: Presentes, com pás reguláveis.

Caixa Espiral: Ausente

Variador de Velocidade: Sem variador de velocidade.

Gerador: Trifásico, síncrono.



- | | |
|------------------------|------------------------------------|
| 1. Grade | 5. Tubo de Sucção e Canal de Fuga. |
| 2. Tubo de Adução | 6. Gerador |
| 3. Turb. Tubular S | 7. Variador |
| 4. Palhetas Diretrizes | 8. Comporta. |

6. Exequibilidade Física.

A princípio, todas as soluções são exequíveis fisicamente, por se tratar de uma tecnologia já dominada pelo mercado, como as diversas formas construtivas de turbinas: Kaplan, Francis, Tubular S, Bulbo e etc; que devem ser projetadas e encomendadas junto ao fabricante.

Entretanto, as soluções 4 e 5 já são descartadas logo de início, devido a baixa altura de queda de projeto. Para 16,5 m de queda, a turbina do tipo Francis não se aplica.

Com relação ao equipamento elétrico, deve-se ter uma compatibilidade de rotação e potência com a turbina, e, passando-se estes parâmetros para o fabricante, este será responsável pelo projeto e construção de tais equipamentos.

O regulador de velocidade deve garantir a rotação adequada para o gerador dentro de uma faixa de vazão admissível que passa pela turbina, atuando nas palhetas diretrizes do distribuidor. Deverá ser selecionado junto ao fabricante, caso se faça necessária sua utilização.

O variador deverá ser utilizado caso o número de pólos do gerador se mostre excessivamente elevado. Caso contrário, deverá ser utilizado acoplamento direto entre o eixo da turbina e o eixo do rotor do gerador.

A tubulação de adução e sucção devem ser dimensionadas corretamente a fim de se evitar cavitação, perdas hidráulicas excessivas e rupturas.

Os acessórios tais como grades e comportas devem ser dimensionados ou selecionados de modo a resistir as solicitações de pressão devido à altura da coluna d'água do reservatório.

A construção civil do abrigo dos equipamentos eletromecânicos deve ser realizada de acordo com as dimensões básicas de montagem total de tais equipamentos.

7. Viabilidade Econômico - Financeira.

7.1 Valor Econômico.

Para a presente análise só serão consideradas as soluções 1, 2, 3, 6 e 7.

Para realizar a análise de valor econômico das soluções que restam, faz-se uma estimativa preliminar dos custos básicos para cada solução, e depois, compara-se o custo por KWh produzido.

Solução 1,2 e 3:

Turbina Kaplan:	\$1.000.000,00
Gerador:	\$ 915.750,00
Multiplicador:	\$ 113.730,00
	<hr/>
	\$2.029.480,00

Solução 6:

Turbina Bulbo:	\$ 900.000,00
Gerador:	\$ 915.750,00
Multiplicador:	\$ 113.730,00
	<hr/>
	\$1.929.480,00

Solução 7:

Turbina Tubular S:	\$ 790.000,00
Gerador:	\$ 915.750,00
Multiplicador:	\$ 113.730,00
	<hr/>
	\$1.819.480,00

Os preços dos equipamentos têm a mesma ordem de grandeza, principalmente quando comparados com o custo total da obra. Foram colocados como parâmetros comparativos apenas os equipamentos de maior valor, devido à igualdade do custo de materiais para a construção civil e mão de obra entre as 4 soluções analisadas.

Portanto, os custos diretos e indiretos totais devem se manter para as diferentes soluções devido à pouca diferença de método construtivo da casa de máquinas.

O fato da turbina Kaplan ser mais cara que as outras duas, se deve a sua dupla regulação (pás e palhetas diretrizes). Além disso, o seu custo de montagem se eleva devido ao maior volume de escavação requerido para tal montagem. Em contrapartida aos aumentos de custos, haverá uma melhoria técnica para o conjunto gerador.

7.2. Viabilidade Financeira.

A CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz, possui a concessão, proveniente do Ministério de Minas e Energia (MME) e do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), de exploração de recursos hidráulicos para a produção de energia elétrica na região onde se localiza a futura usina.

É realizada uma licitação para a execução das obras, de acordo com o projeto existente, tendo a participação de empresas conceituadas no mercado, que detém a tecnologia da construção, que possua um corpo técnico competente, baixos preços orçados e disponibilidade de equipamentos e instalações.

O financiamento é realizado diretamente pelo BNDES junto a concessionária, no caso a CPFL.

Os financiamentos seguem as regras ditadas pela política econômica do governo e normas do Banco Central.

8. Conclusão.

De acordo com o estudo de viabilidade realizado anteriormente, as soluções **4 e 5** foram eliminadas, por não serem exequíveis fisicamente, uma vez que para a altura de projeto adotada as turbinas do tipo Francis não se aplicam. Observa-se que as soluções **1, 2, 3, 6 e 7** geradas, possuem, praticamente, de acordo com as viabilidades econômico - financeira, o mesmo valor entre si quando comparadas com o valor total da obra.

Com isso o projeto básico começará com a análise da melhor solução a ser adotada, dentre aquelas viáveis econômica e financeiramente.

9. Determinação da Motorização a ser Adotada na Central

9.1. Introdução.

De acordo com as soluções geradas anteriormente, será realizada uma análise do ponto de vista técnico-econômico para a determinação da motorização a ser adotada na central. Para tanto, será relacionado o número de pólos do gerador, a altura de sucção e a rotação específica da turbina de modo a montar uma matriz com a qual será realizada a decisão da melhor solução.

Após esta etapa, será realizado o pré-dimensionamento dos principais componentes da unidade geradora, ou seja, o rotor, distribuidor e palhetas diretrizes, regulador de velocidades, multiplicador (se necessário), volante de inércia (se necessário) e gerador.

9.2. Seleção da Turbina

Para a seleção do tipo de máquina a ser utilizada no aproveitamento escolhido, fez-se inicialmente a determinação do número necessário de grupo geradores para que a potência por grupo não ultrapassasse 5000 kW, de modo a manter as máquinas dentro da faixa para PCH. Depois, procedeu-se com a escolha do tipo de máquina, através de um gráfico que relaciona altura de queda, vazão e tipo de máquina e de uma tabela que correlaciona o número de pólos do gerador, a rotação síncrona do grupo, a rotação específica da máquina, o coeficiente de cavitação de Thoma e a altura máxima de sucção do rotor.

9.3. Cálculo do Número de Grupos Geradores.

Para o cálculo do número de grupos geradores, limitou-se a potência por máquina em 5000 kW. Considerando-se um rendimento da turbina de 90%, tem-se que a potência no eixo será :

$$P_{\text{eixo}} = \eta_{\text{maq}} \cdot P_{\text{tot}} = 0,9 \cdot 18,3 = 16,47 \text{ MW}$$

O número de máquinas será dado por: $Z_T = \frac{16470}{5000} = 3,3 \Rightarrow Z_T = 4$

Para um rendimento de 0,9, a potência no eixo para cada grupo será de:

$$P_{\text{eixo}} = \frac{\eta \cdot \gamma \cdot Q \cdot H}{4} = 4,1175 \text{ MW}$$

Logo, a vazão por máquina será de:

$$Q_{\text{maq}} = \frac{113}{4} = 28,25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

9.4. Determinação dos Parâmetros da Máquina e do Gerador.

Para esta vazão e a altura de projeto, e utilizando-se o gráfico anexo, chega-se facilmente a conclusão que a máquina mais apropriada é a do tipo Kaplan. Com isto em mente, pode-se montar uma matriz de decisão que relaciona o número de pólos do gerador, a rotação síncrona do grupo, o coeficiente de cavitação de Thoma, a altura máxima de sucção e a rotação específica da máquina. O equacionamento relativo a esta matriz está abaixo, juntamente com a respectiva matriz.

A altura de sucção (H_s) é definida como a distância entre o nível de jusante e o eixo para turbinas de eixo horizontal, até a linha média do distribuidor para eixo vertical e até o centro do rotor para eixo inclinado. Esta altura é importante para que seja evitado o

fenômeno de cavitação nas pás do rotor devido a queda de pressão que ocorre quando do escoamento da água através do mesmo. Sua expressão é dada por:

$$H_s = 10 - 0,00122 \cdot H_L \cdot \sigma_{\text{MIN}} \cdot H$$

Onde:

H_s - Altura de sucção

H_L - Altitude mínima de jusante.

σ_{MIN} - Coeficiente de cavitação de Thoma.

H - Queda de projeto.

Já o coeficiente de cavitação de Thoma é dado, para turbinas do tipo Kaplan, pela seguinte equação:

$$\sigma_{\text{MIN}} = 3,28 \cdot 10^{-6} (n_{\text{qa}}^2) - 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot n_{\text{qa}} + 0,549$$

Onde n_{qa} é a rotação específica do rotor no SI. Sabe-se que $n_{\text{qa}} = 3 \cdot n_q$. Logo, considerando-se a vazão por máquina e altura de queda de projeto já estabelecidos, chega-se que a rotação específica em função da rotação da máquina é fornecida pela expressão:

$$n_{\text{qa}} = 3 \cdot n \cdot \frac{\sqrt{Q_{\text{maq}}}}{H^{\frac{3}{4}}} = 3 \cdot n \cdot \frac{\sqrt{28,25}}{16,5^{\frac{3}{4}}} = 1,9477 \cdot n$$

Logo, a expressão do coeficiente de Thoma fica:

$$\sigma_{\text{MIN}} = 3,28 \cdot 10^{-6} (1,9477n)^2 - 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot 1,9477 n + 0,549$$

A rotação síncrona do grupo é função da frequência que terá o sinal de tensão a ser gerado e do número de pólos do gerador. No Brasil, a frequência da rede é 60 Hz. Portanto a expressão será dada por:

$$n = \frac{2 \cdot f \cdot 60}{p} = \frac{7200}{p}$$

Agora, a partir de um determinado número de pólos, pode-se obter a rotação síncrona do grupo e com ela, definir a altura de sucção. A melhor escolha será aquela em

que se obtém uma combinação ótima de altura de sucção, número de pólos do gerador e rotação síncrona. A seguir está a tabela relacionando estes valores:

DADOS: H=16.5 m HI=520 m
 Q=28.25 m³/s CAMPO DE APLICAÇÃO: KAPLAN/ HÉLICE

Zp	N (RPM)	COEF. THOMA	Hs	Nqa	Nq
16	450.00	1.6242	-17.43	876.5	292.2
18	400.00	1.2559	-11.36	779.1	259.7
20	360.00	1.0060	-7.23	701.2	233.7
22	327.27	0.8312	-4.35	637.4	212.5
24	300.00	0.7059	-2.28	584.3	194.8
26	276.92	0.6143	-0.77	539.4	179.8
28	257.14	0.5463	0.35	500.8	166.9
30	240.00	0.4953	1.19	467.4	155.8
32	225.00	0.4567	1.83	438.2	146.1
34	211.76	0.4272	2.32	412.5	137.5
36	200.00	0.4047	2.69	389.5	129.8
38	189.47	0.3875	2.97	369.0	123.0
40	180.00	0.3744	3.19	350.6	116.9
42	171.43	0.3644	3.35	333.9	111.3
44	163.64	0.3569	3.48	318.7	106.2

Nota-se da tabela anterior, que a faixa destacada em verde corresponde aos valores ótimos. Selecionou-se a opção com 24 pólos, uma vez que apresenta a altura de sucção mais razoável para o menor número de pólos possível. Assim, as principais características do grupo gerador já estão definidas. Aqui cabe dizer que será adotado acoplamento direto entre turbina e gerador, uma vez que a rotação síncrona da máquina não implicou em uma rotação específica demasiadamente elevada de modo que inviabilizasse este tipo de construção. Também porque deste modo elimina-se o multiplicador de velocidades, tornando o sistema mais compacto.

Características Principais do Grupo Gerador

Acoplamento:	Direto
No. de pólos:	24
Altura Sucção	-2,28 M
Rot. Específica	194,8 RPM
Rot. Síncrona	300 RPM

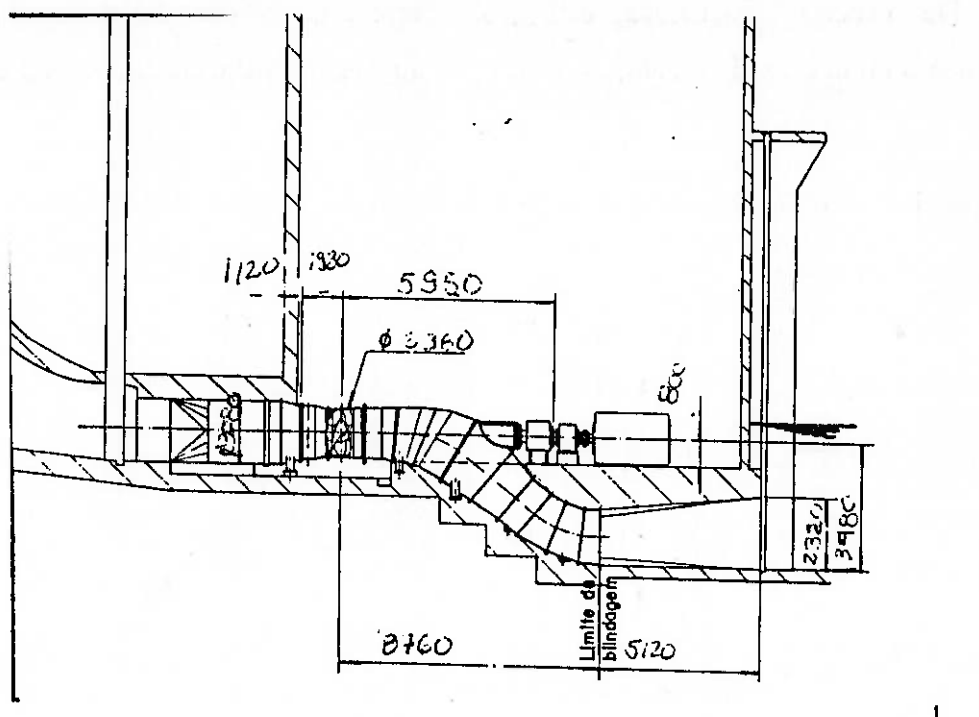
9.5. Posicionamento do Eixo da Unidade.

Existem três possibilidades para a montagem do grupo gerador: montagem com eixo vertical, horizontal ou inclinado, sendo que a última somente é utilizado para aproveitamentos de baixa potência, devido a problemas com os mancais que suportam a carga axial e radial provenientes do rotor.

Restam, portanto, as montagens vertical e horizontal. A montagem vertical é a mais utilizada em grandes aproveitamentos, uma vez que devido ao peso excessivo do rotor, já se torna inviável colocá-lo em balanço no eixo, o que caracteriza a montagem horizontal. Entretanto, na montagem vertical é necessário que a casa de força tenha uma profundidade maior, uma vez que a sucção da turbina localiza-se mais abaixo. Isto implica diretamente em maiores custos na fase de construção civil, no tocante ao volume de escavação e ao volume de concreto na casa de força. A montagem também torna-se mais complicada para eixo vertical, pela própria configuração geométrica do sistema. Deste modo, visando reduzir o investimento necessário para a instalação da central, será adotada a montagem horizontal. De acordo com as soluções geradas anteriormente, a única configuração que aceita este tipo de montagem é a turbina Tubular S, com rotor do tipo Kaplan de dupla regulação.

9.6. Pré-Dimensionamento da Casa de Força.

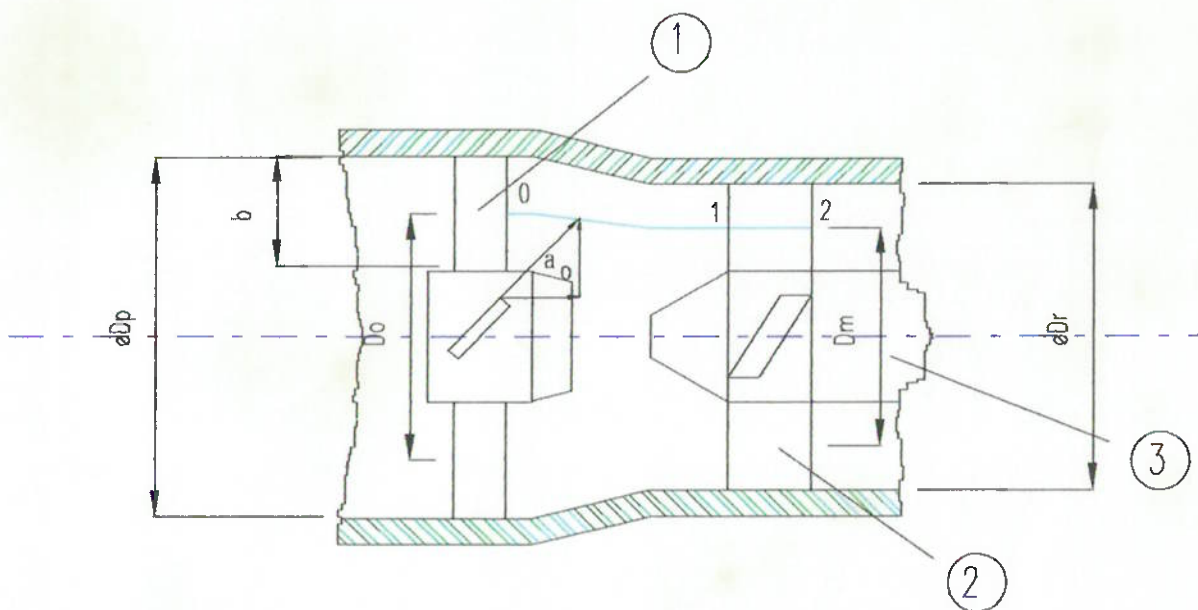
Considerando-se a utilização de uma turbina do tipo Tubular S, e, adotando-se como fornecedor da máquina a Mecânica Pesada (empresa localizada em Taubaté - S.P., especializada na fabricação deste tipo de equipamento), de acordo com o catálogo do fabricante, cuja cópia segue anexa a este trabalho, o diâmetro do rotor pode ser estimado em 2360 mm, com cubo de 1000 mm, e com as principais dimensões da casa de força dadas de acordo com o desenho abaixo.



A distância entre duas máquinas adjacentes pode ser estimada como sendo 2,5 vezes o diâmetro do rotor, sendo igual a 5900 mm. Portanto, a largura total da casa de força pode ser estimada em 23600 mm.

9.7. Triângulos de Velocidades na Pressão e Sucção do Rotor.

Como já foi mencionado, a máquina a ser adotada possuirá dupla regulação, ou seja, tanto o ângulo de abertura das palhetas diretrizes quanto o ângulo da pás do rotor serão variáveis. Para a determinação dos triângulos de velocidades nas faces de pressão e sucção do rotor, a condição de projeto foi o de abertura total das palhetas diretrizes e ângulo intermediário para as pás do rotor. Admitiu-se as hipóteses de que a circulação se mantém constante desde as palhetas diretrizes até a face de pressão do rotor e que são obedecidas as condições de entrada sem choque e saída irrotacional do fluido nas pás do rotor. De maneira esquemática, está abaixo representada uma linha de corrente do escoamento no interior da tubulação de adução, através das palhetas diretrizes e das pás do rotor:



Onde:

- 1 - Palhetas Diretrizes.
- 2 - Pás do Rotor.
- 3 - Eixo do Rotor.

Para turbinas Kaplan, o diâmetro D_p pode ser estimado como:

$$\frac{D_p}{D_r} = 1,1793 + 2,512 \cdot n_q^{-1}$$

Logo :

$$D_p = 2813 \text{ mm.}$$

A altura da palheta diretriz relaciona-se com o diâmetro do cubo e o diâmetro de pitch, uma vez que, sendo sua configuração radial, é necessário que seja compatível com eles. Logo, será dada por:

$$b = \frac{D_p - D_c}{2} = \frac{2813 - 1000}{2} = 906,5 \text{ mm}$$

A velocidade da partícula fluida na saída da palheta diretriz é representada por:

$$V_o = V_{or} + V_{ou}$$

Onde V_{or} corresponde a velocidade na direção axial e V_{ou} corresponde a velocidade na direção tangencial a ao diâmetro neste ponto. Desta definição, fica claro que :

$$V_{or} \approx \frac{Q}{\pi \cdot D_o \cdot b}$$

$$V_{ou} = V_o \cos(\alpha_o)$$

Onde α_o corresponde ao ângulo da figura, e é o ângulo formado entre V_o e V_{or} .

A condição de circulação constante entre as palhetas diretrizes e a face de pressão do rotor fornece a seguinte relação:

$$v_{1u} = v_{ou} \frac{D_o}{D_m}$$

Mas a equação de Euler pode ser escrita como:

$$H \cdot \eta_h = \frac{1}{g} (u_1 v_1 \cos(\alpha_1) - u_2 v_2 \cos(\alpha_2))$$

Mas a saída é irrotacional, e $\alpha_2=90^\circ$. Logo a equação fica:

$$H \cdot \eta_h = \frac{1}{g} (u_1 v_1 \cos(\alpha_1))$$

Mas a velocidade v_1 é dada pela relação: $v_1 \cos(\alpha_1) = v_{1u} = v_{ou} \frac{D_o}{D_m}$

$$\text{Logo: } H \cdot \eta_h = \frac{1}{g} (u_1 v_{ou} \frac{D_o}{D_m})$$

Utilizando as relações entre as velocidades na saída da palheta diretriz:

$$v_{or} = v_o \sin(\alpha_o) \Rightarrow v_o = \frac{v_{or}}{\sin \alpha_o} = \frac{Q}{\pi \cdot D_o \cdot b \cdot \sin \alpha_o}$$

$$v_{ou} = v_o \cos(\alpha_o)$$

Obtém-se que a velocidade v_{ou} será dada por:

$$v_{ou} = \frac{Q \cdot \cos \alpha_o}{\pi \cdot D_o \cdot b \cdot \sin \alpha_o} = \frac{Q}{\pi \cdot D_o \cdot b \cdot \operatorname{tg} \alpha_o}$$

A equação de Euler então se torna:

$$H \cdot \eta_h = \frac{1}{g} \left(u_1 \frac{Q}{\pi \cdot b \cdot \operatorname{tg} \alpha_o \cdot D_m} \right)$$

$$\text{Mas a velocidade } u_1 \text{ é igual a : } u_1 = \frac{\pi \cdot n \cdot D_m}{60}$$

Logo:

$$H \cdot \eta_h = \frac{n \cdot Q}{g \cdot 60 \cdot b \cdot \text{tg } \alpha_o}$$

Re-escrevendo e substituindo os valores:

$$\text{tg } \alpha_o = \frac{n \cdot Q}{g \cdot 60 \cdot b \cdot H \cdot \eta_h} = \frac{300 \cdot 28,25}{9,81 \cdot 60 \cdot 0,9065 \cdot 16,5 \cdot 0,9} = 1,0696$$

Logo, o ângulo de abertura de projeto das palhetas diretrizes será dado por:

$$\alpha_o = 47^\circ$$

Realizando os cálculos para a determinação dos triângulos de velocidades:

$$D_m = \sqrt{\frac{1}{2}(D_m^2 + D_c^2)} = \sqrt{\frac{1}{2}(2,360^2 + 1,0^2)} = 1,8124 \text{ m}$$

$$D_o = D_c + b = 1,0 + 0,9065 = 1,9065 \text{ m}$$

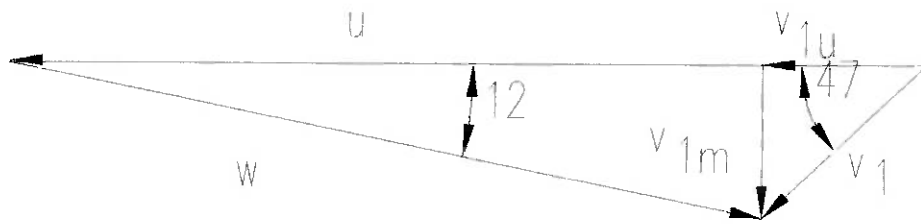
$$v_o = \frac{Q}{\pi \cdot D_o \cdot b \cdot \text{sen } \alpha_o} = \frac{28,25}{\pi \cdot 1,9065 \cdot 0,9065 \cdot \text{sen } 47^\circ} = 7,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{ou} = v_o \cdot \cos 47^\circ = 4,85 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{iu} = v_{ou} \cdot \frac{D_o}{D_m} = 4,85 \cdot \frac{1,9}{1,8124} = 5,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$u = \frac{\pi \cdot D_m \cdot n}{60} = 28,47 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Na face de pressão do rotor, admitindo entrada sem choque, o triângulo de velocidades será dado por:



Graficamente, obtém-se os seguintes valores:

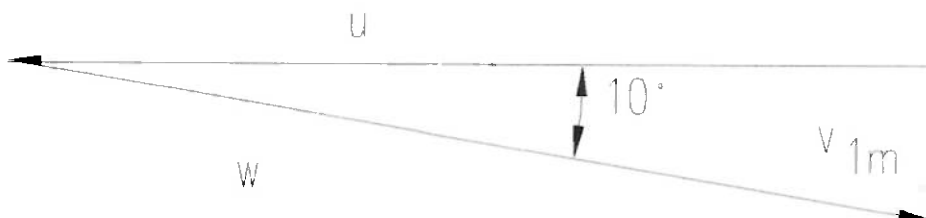
$$w=23,83 \text{ m/s}$$

$$\beta_1=12^\circ$$

$$v_1=6,97 \text{ m/s}$$

$$v_{1m}=4,756 \text{ m/s}$$

O triângulo de velocidades na saída, admitindo-a irrotacional ($v_1 = v_{1m}$), será:



Outra vez, obtém-se graficamente os valores:

$$w=28,86 \text{ m/s}$$

$$\beta_2=10^\circ$$

$$v_{1m}=4,756 \text{ m/s}$$

9.8. Determinação da Rotação de Disparo ou Embalamento.

A rotação de disparo ou embalamento (n_e) é a rotação máxima que alcança uma turbina hidráulica com seu distribuidor todo aberto, sem fornecer potência (trabalho em vazio) e sem a ação do seu sistema de regulação. O coeficiente de disparo é definido como a relação entre a velocidade de embalamento e a velocidade de rotação do rotor.

$$f_e = \frac{n_e}{n}$$

Para rotores do tipo Kaplan com dupla regulação, a velocidade de disparo é calculada para o distribuidor todo aberto e as pás do rotor posicionadas com ângulo máximo previsto. Entretanto, para efeito de pré-cálculo, considera-se as mesmas condições adotadas para a determinação do triângulo de velocidades.

A equação para a rotação de disparo teórica é dada por:

$$n_e = \frac{Q}{\pi \cdot D_m \cdot A} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \beta_2} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right)$$

$$n_e = \frac{28,25}{\pi \cdot 1,8124 \cdot \frac{\pi(2,36^2 - 1^2)}{4}} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} 10} + \frac{1}{\operatorname{tg} 47} \right) = 9,129 \text{ rps} = 547,74 \text{ RPM}$$

Zulcy nos oferece outra equação para o cálculo da rotação de disparo:

$$n_e = \frac{K Q}{\pi \cdot D_m \cdot b} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \beta_2} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right)$$

Onde $k=0,025$ para turbinas do tipo Kaplan. Logo, tem-se:

$$n_e = \frac{0,025 \cdot 28,25}{\pi \cdot 1,8124 \cdot 0,9065} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} 10} + \frac{1}{\operatorname{tg} 47} \right) = 9,036 \text{ rps} = 542 \text{ RPM}$$

Adotaremos este último resultado como a rotação de disparo de projeto, por acreditar que seja o resultado mais próximo da realidade. O coeficiente de disparo será então:

$$f_e = \frac{542}{300} = 1,81$$

Na realidade, a determinação correta da velocidade de embalamento deve ser feita com base em resultados com o modelo do grupo gerador. Isto significa que os valores obtidos acima são válidos apenas para o pré-projeto do grupo.

9.9. Golpe de Ariete - Tempo de Fechamento e Transitório.

9.9.1. Cálculo do Diâmetro da Tubulação de Adução.

O diâmetro da tubulação de adução foi calculado baseado no custo mínimo das perdas energéticas ocasionadas por ele, dada por:

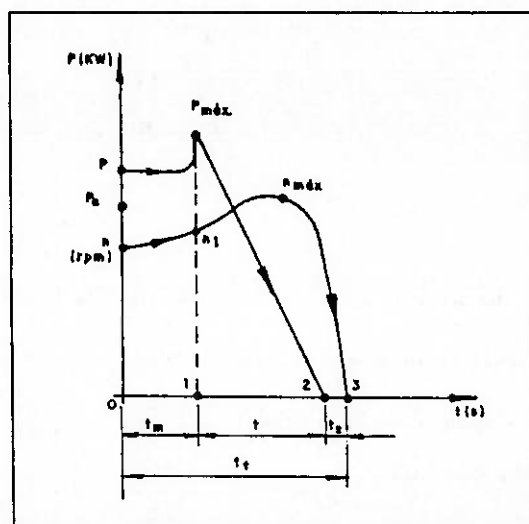
$$D = 0,71 \cdot \frac{P_1^{0,43}}{H_1^{0,65}} = 0,71 \cdot \frac{4120^{0,43}}{16,5^{0,65}} = 4,11 \text{ m}$$

Logo a velocidade média no conduto será de 2,13 m/s.

Resta salientar que o trecho inicial da adução será executado em concreto, não cabendo aí a definição de espessura de conduto. Por outro lado, na região próxima à turbina, existe uma tubulação de aço de diâmetro 3,08 metros e espessura de chapa de 6 mm.

9.9.2. Verificação do Golpe de Ariete.

Uma vez que há queda de carga no gerador, ocorre uma tendência do aumento da rotação do grupo como um todo. Supondo que, por algum motivo, a carga no gerador caia a zero, ocorre um aumento da rotação e, portanto, da potência do grupo, até um valor máximo, correspondente ao início da atuação do controlador. Este tempo é denominado t_m . Através da atuação do controlador, a rotação e a potência do grupo caem a zero segundo uma determinada lei, por nós admitida linear. O tempo entre o início da atuação até que a potência caia a zero é correspondente ao tempo de fechamento total do distribuidor, denominado de t . O tempo decorrido entre potência e zero e parada do grupo é denominado de t_s . O gráfico abaixo ilustra o fenômeno descrito:



Há o interesse que t_m seja o menor possível, de maneira a não permitir que a rotação do grupo gerador eleve-se demasiadamente. Entretanto, o tempo t deve ser o maior possível, visando-se diminuir ao máximo o efeito do golpe de aríete oriundo do fechamento das palhetas diretrizes do distribuidor.

O golpe de aríete origina-se da variação de energia cinética da massa fluida dentro da tubulação em virtude do fechamento do distribuidor. A esta variação de energia cinética corresponde uma variação na carga dentro da tubulação, com uma série de sobrepressões e depressões que em virtude do atrito, turbulência e variação de direção das linhas de corrente, vão se amortecendo.

Utilizou-se o *método de Allievi* para a determinação da máxima sobrepressão e do tempo de fechamento do distribuidor, que irá influenciar as especificações do controlador, como veremos mais adiante. Admitiu-se uma sobrepressão máxima de 30% da queda de projeto:

$$h_s^+ = 0,30 \cdot H = 0,30 \cdot 16,5 = 4,95 \text{ m}$$

A velocidade de propagação das ondas será dada pela equação:

$$a = \frac{C}{1 + \frac{\epsilon}{E} \cdot \frac{D}{e}}$$

Onde :

C - Velocidade do som na água, aproximadamente igual a 1420 m/seg.

ϵ/E - Relação entre o módulo de elasticidade da massa fluida e o módulo de elasticidade do material da tubulação.

D - Diâmetro da tubulação.

e - Espessura da tubulação.

A relação ϵ/E pode ser admitida igual a 0,01 para tubulação de aço. Portanto, a velocidade será igual a:

$$a = \frac{1420}{1 + 0,01 \cdot \frac{4,11}{0,006}} = 181 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

O tempo crítico será dado por:

$$\mu = \frac{2L}{a} = \frac{2 \cdot 17,25}{181} = 0,1755 \text{ seg}$$

Para centrais hidrelétricas é recomendada manobra lenta, com o tempo de fechamento total do distribuidor sendo maior que o tempo crítico.

O número característico será igual a :

$$\rho = \frac{a \cdot V}{2 \cdot g \cdot H} = \frac{181 \cdot 2,13}{2 \cdot 9,8 \cdot 16,5} = 1,294$$

Sendo V a velocidade média do fluido dentro da tubulação.

Uma vez que a sobrepressão máxima é de 30%, o coeficiente ζ será igual a 1,3. Do ábaco de Allievi, tem-se que, para máxima sobrepressão, que $\theta=5,4$. Logo, o tempo de fechamento t será igual a :

$$\theta = \frac{at}{2L} \Rightarrow t = \frac{2L\theta}{a} = \mu \cdot \theta = 0,1755 \cdot 5,4 = 0,9477 \text{ seg}$$

Este tempo é muito pequeno e pode apresentar problemas sérios para o projeto do regulador, visto que este deveria ter uma potência de acionamento muito elevada, além do que quanto menor o tempo necessário para o fechamento completo do distribuidor tanto mais complexo será o regulador. Assim, segundo Zulcy, o tempo padrão para o fechamento do controlador situa-se entre 4 e 12 seg. Adotaremos $t=6\text{seg}$. Portanto a sobrepressão máxima oriunda do golpe de ariete será:

$$\theta = \frac{t}{\mu} = \frac{6}{0,33} = 20 \quad \Rightarrow \quad \zeta = 1,04 \therefore h_s^+ = 0,66 \text{ m}$$

$$\rho = 1,294$$

Com estes dados já é possível estimar o momento de inércia do grupo gerador. Admitindo a condição teórica em que $t_m=0$ e $t_s=0$, com $P_{\text{máx}}=(1+h_s/H)^{3/2} \cdot P_e$, sabendo que a variação da energia cinética é igual ao trabalho realizado, que por sua vez corresponde a integral da potência no tempo, cuja queda é admitida linear, pode-se demonstrar que :

$$t = \frac{GD^2 \cdot (n_{\text{máx}}^2 - n^2)}{364756 \cdot P_{\text{máx}}}$$

Para uma rotação máxima 25% maior que a rotação nominal, obtemos:

$$GD^2 = \frac{6 \cdot 364756 \cdot 1,06 \cdot 3875}{0,5625 \cdot 300^2} = 177,218 \text{ t.m}^2$$

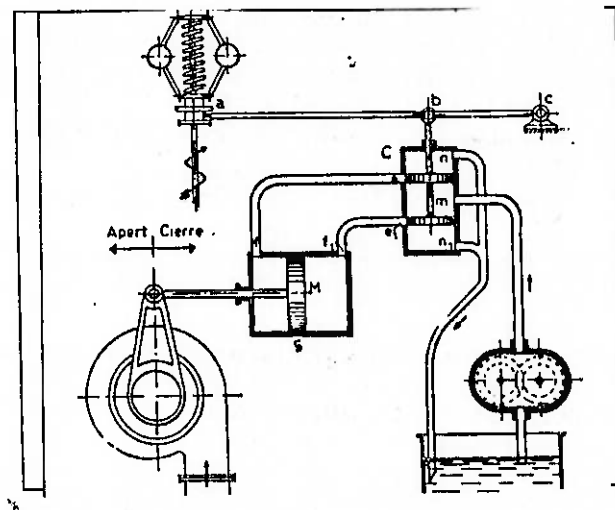
O tempo do transitório é definido como sendo o tempo necessário para acelerar o grupo gerador de zero até a rotação de regime. Este tempo é dado pela seguinte equação:

$$t_g = \frac{GD^2 \cdot n^2}{364756 \cdot P_e} = \frac{177218 \cdot 300^2}{364756 \cdot 3875} = 11,3 \text{ seg.}$$

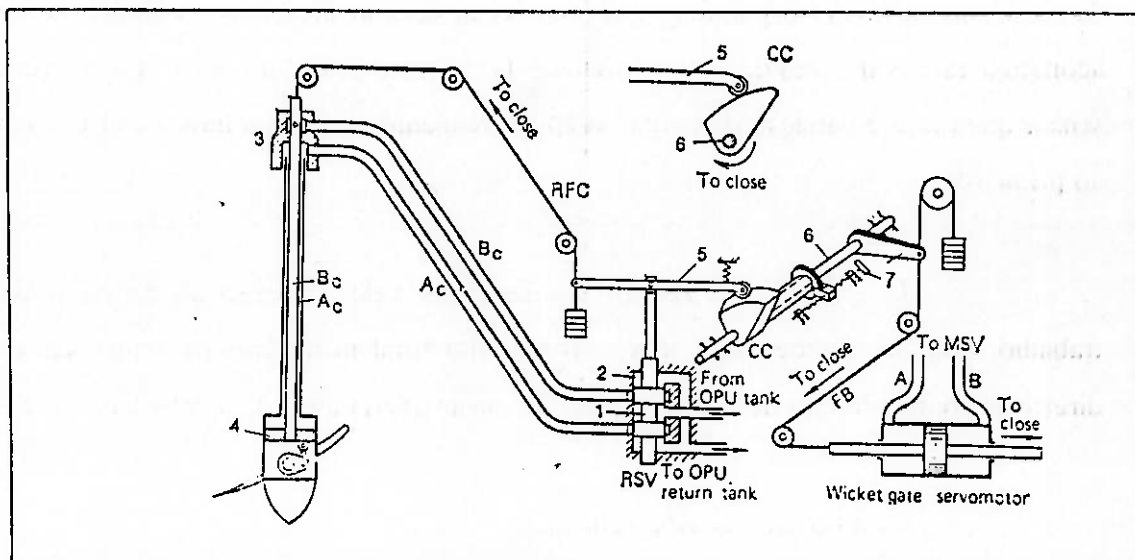
9.10. Regulador de Velocidades.

Quando ocorre uma variação na carga do gerador, ocorre também uma variação no momento resistente que atua na turbina. A esta variação corresponde uma alteração na rotação da mesma. Uma vez que optou-se pela utilização de um gerador síncrono, é necessário manter a rotação da turbina razoavelmente constante, ou seja, a alteração na rotação da turbina, devido a variação de carga na mesma deve ser controlada, de maneira que a frequência do sinal permaneça também constante. Segundo Zoppeti, “a missão do regulador automático consiste em conseguir o equilíbrio, em todo o momento, dos trabalhos motores e resistentes para manter sensivelmente igual para todas as cargas a rotação da turbina conveniente para seu funcionamento.”

Para levar a cabo esta missão, utiliza-se um servomotor que, sentindo a variação de rotação da turbina, atua em uma válvula, que permite o fluxo de óleo hidráulico sobre pressão para os atuadores das palhetas diretrizes do distribuidor, de modo a realizar sua abertura ou fechamento.



Entretanto, para o aproveitamento em questão, optou-se por utilizar uma turbina Kaplan com dupla regulação, ou seja, há o controle tanto da abertura ou fechamento das palhetas diretrizes como também das pás do rotor. O mecanismo de regulação a ser adotado está representado na figura abaixo e é descrito a seguir.



A válvula direcional 1 é conectada a uma barra 5 que possui uma das extremidades ligada com o cabo de realimentação do rotor RFC, enquanto a outra extremidade possui um seguidor pressionado por uma mola de modo a acompanhar a movimentação do came CC. O came move-se solidário ao eixo 6, que está conectado ao cabo de realimentação FB do servomotor que atua nas palhetas do distribuidor MSV.

Quando o sistema está balanceado como mostra a figura, RSV está próxima da sua posição neutra. Quando o servo motor do distribuidor é deslocado para efetuar um fechamento das palhetas diretrizes, o eixo 6 gira no sentido horário, fazendo com que o came CC também o faça, deslocando a extremidade da barra 5, com o seguidor acompanhando o perfil de CC. A válvula direcional 1 também é movimentada para baixo. Óleo hidráulico sob pressão é então direcionado através da tubulação Ac, enquanto que a tubulação Bc é conectada ao retorno. O pistão 4 atua sobre as pás do rotor, de modo a

fecha-las. Isto provoca o deslocamento do cabo RFC, que atua sobre a extremidade da barra 5, forçando a válvula direcional 1 para a nova posição de equilíbrio.

Entretanto, é necessário modificar a relação para cada condição de carga hidráulica que ocorre sobre o sistema. Por este motivo, a superfície do came CC é espacial, de modo que através do parafuso 7 é possível deslocá-lo ao longo do eixo 6 de modo a acomodar estas variações de carga hidráulica. O parafuso pode ser controlado através de um sensor que meça a variação de carga no aproveitamento e atue um motor elétrico acoplado ao primeiro.

O que caracteriza um regulador de velocidades é a sua capacidade de trabalho, denominada de $T_{c_{ap}}$, que é o trabalho total necessário para girar as palhetas diretrizes do distribuidor desde a posição totalmente aberta até a completamente fechada.

Pela fórmula de Allis-Chalmers:

$$T_{c_{ap}} = 3,85 \cdot \left(\frac{P_H}{\sqrt{H}} \right) = 3,85 \cdot \frac{980 \cdot 16,5 \cdot 28,25 \cdot 0,9}{75 \cdot \sqrt{16,5}} = 5195 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

A potência do sistema hidráulico será, admitindo rendimento igual a unidade:

$$P_o \cdot Q_o \cdot \eta_o = \frac{T_{c_{ap}}}{t} = \frac{5195}{75,6} = 11,5 \text{ C. V.}$$

9.11 Determinação das Características Principais do Gerador.

O gerador transforma a energia mecânica produzida na turbina em energia elétrica. No Brasil, a energia nas redes públicas de transmissão e distribuição é de corrente alternada, trifásica, de 60 Hz.

O gerador é composto da parte fixa, o estator, e da parte rotativa, o rotor. O estator geralmente possui sua carcaça em estrutura soldada, tendo em seu interior as bobinas nas quais será induzida a tensão.

O rotor compõe-se do cubo com o eixo, o qual estará acoplado diretamente no eixo da turbina. Ao cubo estão ligados os raios, em cuja extremidade exterior vai o aro. Este, por sua vez, possui ranhuras onde são inseridos os pólos com seus enrolamentos.

O estator deve estar fortemente ancorado ao concreto da casa de força de modo a resistir ao momento de torção originado pela indução que ocorre no seu interior.

Os pólos do rotor, magnetizados por corrente contínua, passam pelas bobinas do estator, induzindo nela corrente alternada. A corrente contínua nos pólos do rotor, responsável pela indução, provém da excitatriz, a qual deve possuir um bom sistema de regulação de maneira a proporcionar tensão constante nos bornes do gerador.

As características principais do gerador são sua potência aparente, coeficiente de potência ($\cos \varphi$), rendimento, número de pólos, momento de inércia do rotor e tensão induzida nas bobinas do estator.

O número de pólos já foi definido em item anterior. A potência aparente está associada diretamente ao coeficiente de potência. É usual adotar $\cos \varphi = 0,9$. Das especificações da casa de força, temos que o rendimento total deverá ser de 0,9. Considerando-se os rendimentos já adotados, a potência efetiva do gerador deverá ser igual a :

$$P_e = \eta_{\text{maq}} \cdot \eta_{\text{ger}} \cdot \eta_{\text{mec}} \cdot P_{\text{hid}}$$

$$\eta_{\text{ger}} = \frac{P_e}{\eta_{\text{maq}} \cdot \eta_{\text{mec}} \cdot P_{\text{hid}}} = \frac{3875}{0,9 \cdot 0,97 \cdot 4568} = 0,97$$

E sua potência aparente será então:

$$P_{ap} = P_c \cdot \frac{1}{\cos \varphi \cdot \eta_{ger}} = 3875 \cdot \frac{1}{0,9 \cdot 0,97} = 4438 \text{ KVA} \cong 4500 \text{ KVA}$$

O momento de inércia do rotor do gerador contribui grandemente para o momento de inércia total da unidade como um todo, que é um fator importante para a regulação de velocidade. Para o cálculo deste momento de inércia, inicialmente estimou-se o momento de inércia da turbina, e subtraiu-se do momento de inércia necessário ao sistema, calculado anteriormente. Depois foi feita a comparação com o momento de inércia natural do gerador, verificando-se a necessidade da inclusão de um volante de inércia ou de se adotar um gerador de momento de inércia acrescido.

Admitindo-se, para uma primeira aproximação, que a massa da turbina está igualmente distribuída em torno do seu diâmetro, sendo ela , de acordo com o manual de inventário, de 39,56 toneladas, tem-se que o seu momento de inércia em relação ao eixo de rotação é dado pela expressão:

$$I_{maq} = \frac{m \cdot R^2}{2} = \frac{39,2 \cdot \left(\frac{2,36}{2}\right)^2}{2} = 27,29 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$$

O momento de inércia geralmente é dado em função do GD^2 , cuja relação com o momento de inércia anteriormente calculado é :

$$GD_{maq}^2 = 4 \cdot I_{maq} = 109,16 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$$

Logo, o GD^2 requerido do rotor do gerador é de :

$$GD_{ger}^2 = GD^2 - GD_{maq}^2 = 177,218 - 109,16 = 68,058 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$$

O GD^2 natural do gerador pode ser estimado pela seguinte equação:

$$GD_n^2 = 310000 \left(\frac{P_e}{1000} \right)^{1,25} n^{-1,875} = 310000 \left(\frac{3875}{1000} \right)^{1,25} 300^{-1,875} = 38,2 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$$

A relação entre o GD^2 natural e o requerido ultrapassa 1,5, que é o valor máximo recomendado segundo Zulcy. Logo será necessário utilizar um volante de inércia. Este pode ter seu diâmetro externo calculado através da expressão:

$$r_c = 0,156 \cdot \sqrt[5]{GD_v^2} = 0,156 \cdot \sqrt[5]{29858} = 1,22 \text{ m}$$

O diâmetro interno do estator pode ser estimado através da equação obtida por Gordon e reproduzida na obra de Zulcy:

$$D_i = 14,37 \cdot P_{ap}^{0,23} \cdot n^{-0,575} = 14,37 \cdot 4500^{0,23} \cdot 300^{-0,575} = 3,744 \text{ m}$$

A tensão a ser gerada nas bobinas é dependente de diversos fatores, incluindo o econômico. Devido a complexidade de se determinar este parâmetro, seu valor permanecerá em aberto durante a etapa do projeto básico, devendo ser especificado posteriormente, durante o projeto executivo.

10. Seleção de Componentes Hidromecânicos.

Os componentes hidromecânicos de uma central hidrelétrica, compõem de uma maneira geral, todo o quadro de equipamentos que auxiliam o perfeito funcionamento, manutenção e montagem dos principais equipamentos da usina que são as turbinas e os geradores, tornando-se dessa forma essenciais no conjunto geral da usina.

No projeto podemos definir os componentes eletromecânicos, de acordo com a divisão da central hidrelétrica, em 3 partes:

a-) Componentes da Tomada D'Água.

Na tomada d'água da casa de força, que é interna à barragem e são independentes nas 4 unidades geradoras, deve-se prever 4 comportas, uma para cada unidade, 4 stop-logs, um para cada unidade, 4 guindastes, um para cada unidade, 4 grades de proteção, uma para cada unidade e 4 conjuntos de equipamento limpa grades, um para cada unidade.

As comportas têm a função de parar o escoamento do fluido para dentro da casa de força, através da tubulação de adução, a fim de realizar manutenção da mesma bem como do sistema gerador hidráulico (turbinas).

Os stop-logs permitem a manutenção das comportas quando fechados.

Os guindastes ou pontes rolantes servem como apoio na montagem dos componentes (comportas, stop-logs, grades e limpa-grades) bem como para o acionamento do stop-log.

As grades de proteção têm por função impedir a entrada de objetos maiores que sua malha, evitando algum provável dano que possa ocorrer nas palhetas diretrizes ou pás da turbina, devido ao contato destas com os objetos estranhos.

Os limpa-grades tem a função de retirar os objetos que por ventura fiquem presos nas grades, a fim de regularizar o escoamento.

b-) Componentes da Casa de Força.

Na casa de força deve ser prevista uma ponte rolante para cada 2 unidades, a fim de auxiliar a montagem e manutenção das turbinas e geradores.

Além disso é previsto a instalação de uma válvula borboleta automática em cada unidade para controle do fluxo quando do aumento excessivo de velocidade do escoamento, mas como a tubulação forçada no trecho inicial será em concreto armado, não há a necessidade efetiva da instalação dessa válvula, que serviria para manutenção de tubulação de aço em caso de ruptura da mesma devido ao aumento de pressão no interior da tubulação.

c-) Componentes da Sucção.

É previsto, no tubo de sucção, 1 stop-log para fechamento simultâneo de duas unidades, para auxílio de manutenção no rotor da turbina, bem como ponte rolante para montagem e acionamento dos mesmos.

10.1. Especificações dos Componentes para cada Unidade.

10.1.1. Tomada D'Água.

A tomada d'água deve ser equipada com uma comporta tipo vagão com rodas situada próxima à face de montante da estrutura, imediatamente a jusante da transição de entrada.

A seção da comporta deve ter uma submergência mínima, relativa ao NAMín. definida por:

$$s = 0,4.Vc.Hc \quad , \text{ no mínimo.}$$

onde: Hc - altura da comporta.

Vc - Velocidade do fluido na seção da comporta.

No caso do projeto:

$s = 2,15$ metros, onde V_c é calculado pela equação de Bernoulli que simplificada fica:

$$V_c = 0,12.2.g.H1$$

$$V_c = 2,16 \text{ m/s.}$$

e H_c vale 6,20 metros pela geometria da tomada d'água.

A largura da comporta é definida pela relação:

$$H_c/L_c = 1,5$$

$$L_c = 4,15 \text{ metros.}$$

O acionamento da comporta se dá por meio de um cilindro hidráulico acionado por uma bomba hidráulica que por sua vez é acionada eletricamente. A elevação se dá por meio de hastes articuladas fixas no eixo do cilindro.

Outro componente a ser utilizado é o stop-log tipo caixão sem rodas cuja largura é a mesma da comporta, ou seja, 4,15 metros e sua altura 20% maior que a altura da comporta, ou seja, 7,44 metros, montado a montante do plano da comporta onde existem ranhuras guia para o encaixe. O acionamento é feito por meio de uma ponte rolante, através de um cabo de aço.

A ponte rolante de acionamento do stop-log deve ter a capacidade de içamento do mesmo. Dessa forma a capacidade deve ser de:

$$P = L_s.H_s.(P_0 + P_1.L_s)$$

onde:

P - Peso do stop-log

L_s - Largura do stop-log

H_s - Altura do stop-log

P0 e P1 - Parâmetros gráficos.

$$P = 6.932 \text{ Kg ou } 6,94 \text{ toneladas.}$$

Vão da ponte rolante : $L = 6$ metros (Geometria da Tomada D'Água).

Com os valores de capacidade e vão da ponte rolante, esta pode ser selecionada e suas dimensões básicas facilmente determinadas.

As grades de proteção devem ser de aço de seção redonda, do tipo móvel, colocada entre duas guias construídas nas paredes laterais da tomada d'água, inclinadas e não devem ter espaçamento maior que a máxima abertura das palhetas diretrizes da turbina para efeito de segurança para a turbina.

As principais dimensões da grade pode ser determinada da seguinte forma:

$$B = b.1,10$$

onde:

B - Largura da grade.

b - Vão livre da boca da tomada d'água.

Dessa forma:

$$B = 5,0 \text{ metros - Geometria da tomada d'água.}$$

Com isso estão determinadas todas as dimensões principais da grade, bem como seu peso.

Altura da Chapa do Pannel - 205 mm.

Altura da Chapa de Reforço - 110 mm.

Peso estimado de um Metro de Altura da Grade - 486 Kg.

Inclinação da grade - 75° com relação ao piso de apoio da grade (Recomendável).

Perda de carga no escoamento ao passar pelas grades (Fórmula de Kirschmer):

$$h_r = \beta.(s/b)V/2.g$$

onde:

h_r - Perda de carga em metros de coluna de água;

β - Coeficiente dependente da forma da barra constituinte da grade;

s - Diâmetro da barra constituinte da grade;

b - Distância entre as barras;

V - Velocidade do fluido na seção da grade;

g - Aceleração da gravidade.

$$h_r = 0,0324 \text{ m.}$$

O equipamento necessário para limpeza das grades deve ser composto por um sistema elétrico que aciona um rastrelo que carrega a sujeira na direção de uma vagoneta sobre trilhos, que recolhe todos os objetos presos na grade.

10.1.2. Casa de Força.

A ponte rolante necessária na casa de força, deve ser dimensionada para o componente de maior peso a ser montado e mantido, que no caso é o rotor do gerador. As diferentes formas de montagem do gerador pode levar a uma diminuição do peso da maior peça, mas isso é uma questão a ser estudada mais detalhadamente e que não foi abordada no presente trabalho.

Com isso a estimativa do peso do rotor do gerador é dada por:

$$P = 136.0,8 = 110 \text{ toneladas.}$$

A capacidade da ponte rolante deve ser de 110 toneladas para um vão de 25,85 metros (geometria da casa de força) segundo a tabela sobre pontes rolantes que segue anexa, que fornece todas as dimensões básicas da ponte rolante.

10.1.3. Sucção.

Na sucção da casa de força deve ser instalado um stop-log em cada unidade, com as mesmas características daquele utilizado na tomada d'água, sendo a única diferença relacionada ao acionamento, que deve ser simultâneo para duas unidades, ou seja serão utilizadas duas pontes rolantes apenas, com o dobro da capacidade da anterior, mantendo-se o vão de 6 metros.

A capacidade da ponte rolante é de 15 toneladas e vão de 6 metros.

Os custos de todos os componentes aqui selecionados serão colocados diretamente na planilha geral de custos, mostrada na próxima seção.

11. Estimativa Preliminar de Custos.

11.1. Introdução.

Já com os parâmetros do projeto prontos, as estruturas definidas com as dimensões e quantidades correspondentes e os equipamentos já selecionados e verificados, podemos realizar uma análise preliminar de quantificação do investimento, que deverá ser levantado, para execução da obra. Isso é de extrema importância para o investidor começar a negociar as condições de financiamento para a execução da obra, bem como para a empresa que irá executar os serviços, pois assim será feita a análise da rentabilidade do contrato.

Todos os contatos para negociação entre investidor e executor, mesmo em licitações ou concorrências, são feitos com base em números provenientes desse tipo de estimativa de custos, logicamente de fontes diferentes.

A metodologia a ser utilizada nessa estimativa está baseada na maior proximidade da realidade da obra, muito embora isso seja de extrema dificuldade, apoiada nos seguintes conceitos básicos:

a-) Os serviços serão executados aproveitando o máximo possível da mão de obra e materiais existentes no local, bem como utilização de equipamentos da forma mais econômica possível dentre as alternativas possíveis como alugados na região, do proprietário, cedidos por órgão públicos, etc;

b-) Todas as quantidades dos serviços a serem executados devem ser baseadas em levantamentos diretos dos quantitativos do projeto;

c-) Os custos unitários devem retratar as condições específicas do local, da época de implantação do empreendimento e das características próprias do projeto. Portanto é interessante realizar pesquisas de mercado a fim de aproximar a estimativa o máximo possível da realidade do mercado.

Entretanto, pelas dificuldades de obtenção dessas informações, devido à disponibilidade principalmente, utilizaram-se os dados de composições simplificadas do

Manual de Inventário da Eletrobrás como alternativa para obtenção de um orçamento que represente uma **ESTIMATIVA PRELIMINAR**. Foram utilizados os valores de quantidades do dimensionamento detalhado realizado e apenas os valores de custo unitário do Manual de Inventário. Foi feita a estimativa somente dos serviços que dizem respeito ao escopo do projeto, ou seja, a casa de força e as estruturas de barramento e vertedouro.

O Manual de Inventário da Eletrobrás, é elaborado sem estudos detalhados de otimização das estruturas e equipamentos que constituem o aproveitamento hidrelétrico, porque o nível de conhecimento dos parâmetros locais, topográficos, hidrológicos e geológicos, geralmente é insuficiente para permitir a aplicação eficaz desses procedimentos. O processo de definição do arranjo das estruturas e dos equipamentos consiste em selecionar, entre soluções típicas ou padronizadas, representativas da média da experiência corrente, aquelas que melhor se adaptem às características físicas do local em estudo, segundo critérios e juízos conservadores, onde são plotados gráficos que relacionam os custos de cada elemento do projeto com os parâmetros calculados desses principais elementos.

A metodologia utilizada para a elaboração das composições de custo direto foi a seguinte:

- a-) Realiza-se os dimensionamentos de quantidades com base nos dados reais de projeto calculados anteriormente;
- b-) De acordo com os parâmetros de projeto, faz-se a leitura em gráficos existentes, do nível de custos unitários de alguns componentes;
- c-) Faz-se uma planilha resumo de todos os custos diretos de execução da casa de força, barragem e vertedouro chegando a um valor de investimento dado em R\$ / KWh.
- d-) Os outros custos envolvidos são estimados apenas com valores tirados dos gráficos do Manual de Inventário, a fim de completar os dados de custos do investimento como um todo.

11.2. Custos Diretos e Indiretos.

Todos os custos de execução de obras de uma maneira geral são divididos em dois principais custos: os custos diretos e os custos indiretos.

Os custos diretos são aqueles relacionados aos gastos com a execução dos serviços de construção, propriamente ditos ou seja os serviços faturáveis e já os indiretos são os custos relacionados ao apoio para levar adiante os serviços diretos.

Essa diferença é muito importante na elaboração do orçamento, uma vez que as despesas diretas são facilmente orçadas quando a equipe tem o conhecimento e experiência sobre o tipo de serviço que deve ser executado, e as despesas indiretas são geralmente calculadas como uma porcentagem sobre o custo direto de cada serviço, porcentagem essa que varia basicamente de acordo com a localização geográfica da obra. Isso pode causar distorções no orçamento pois a empresa que irá executar o serviço deve realizar esse cálculo de despesas indiretas analiticamente. É exatamente aí que uma empresa difere da outra quando elabora propostas para licitação pública ou concorrência privada, no que diz respeito a custos. As diferenças tecnológicas de uma empresa para outra hoje pode ser considerada desprezível para a execução de uma obra desse tipo e porte. Os recursos para executar a obra, de uma e outra é que fazem a diferença.

Outro ponto importante a ser considerado nos orçamentos são os juros durante a construção, que devem ser calculados e analisados com bastante cuidado na elaboração dos orçamentos, visto que é o custo financeiro do capital investido (capital próprio e capital de terceiros), conforme previsão do esquema de desembolso, calculado com uma taxa de juros convencionada e capitalizado anualmente durante o período da construção.

11.3. Composições de Custo Unitário.

11.3.1. Casa de Força.

11.3.1.1 Escavação - O Volume de escavação é determinado em função da área a ser ocupada pela casa de força, informações geológicas e da geometria das escavações correspondentes aos blocos das unidades e à área de montagem. É dado por:

$$\text{Volume de Escavação em rocha a céu aberto} = 9 \cdot 23,6 \cdot 20 = 4.300 \text{ m}^3.$$

onde : 9 m - referente à escavação da cota 507m até cota 498m (profundidade - 2 metros abaixo da rocha sã);

23,6 m - referente à largura da casa de força (com 4 unidades geradoras);

20 m - referente ao comprimento da casa de força.

$$\text{Custo Unitário de Escavação (R\$ / m}^3 \text{)} = \text{R\$ } 9,11.$$

O custo unitário inclui desmonte, carga, transporte, descarga, pré-fissuramento e acerto da escavação, além da porcentagem de mobilização e desmobilização do empreiteiro.

11.3.1.2. Limpeza e Tratamento de Fundação - Corresponde ao custo de todos os serviços executados na área de contato entre estrutura e fundação.

O tratamento de fundação previsto são injeções de cimento de 13,71 m espaçadas a cada 3 m.

Nº de Colunas de injeção : 15.

Total de Perfuração : 205.65 m.

Custo Unitário para Limpeza e Tratamento de Fundação (Estruturas de Concreto sobre rocha - R\$ / m) = R\$ 18,21.

Esses valores dependem muito do tipo de fundação e tipo de estrutura da casa de força. Como esse serviço possui um peso importante nos custos totais, faz-se uma estimativa com tratamento a base de injeção de cimento como forma de entrar o serviço na composição.

O custo da limpeza está incluso no custo unitário dado por metro de perfuração.

11.3.1.3. Concreto - Segundo o Orçamento Padrão ELETROBRÁS, o concreto é dividido em três parcelas a saber: concreto sem cimento, cimento e armação.

O custo unitário do concreto envolvido, por metro cúbico, correspondente ao volume final das estruturas, inclui todos os serviços e materiais necessários à fabricação, colocação e tratamento do concreto, a menos do cimento que corresponde ao custo, por tonelada, medido a partir das taxas de projeto para o concreto (Kg/m³), incluindo o fornecimento, transporte, armazenagem, fabricação e utilização do cimento. O custo da armação corresponde ao custo, por tonelada, medido a partir das taxas de projeto para o concreto (Kg/m³) incluindo o fornecimento, transporte, armazenagem, fabricação e utilização do aço.

Os custos são determinados separadamente.

Volume de Concreto por bloco = 4.000 m³.

Volume Total de Concreto da Casa de Força = 20.480 m³.

Taxa de Cimento do Projeto = 280 Kg/m³.

Taxa de Aço do Projeto = 70 Kg/m³.

Custo Unitário do Concreto (R\$ / m³) = R\$ 83,67.

Custo Unitário do Cimento (R\$ / Kg) = R\$ 0,08.

Custo Unitário do Aço (R\$ / Kg) = R\$ 0,70.

11.3.1.4. Instalações e Acabamentos da Casa de Força - O custo relativo a instalações e acabamentos é estimado como equivalente a 10% da soma dos custos de escavação, limpeza e tratamento de fundação e concreto e corresponde a serviços como portas, janelas, coberturas, instalações elétricas, hidráulicas e outros.

11.3.1.5. Equipamentos - O custo de equipamentos mecânicos e elétricos permanentes de um aproveitamento hidrelétrico é formado pela soma de três componentes básicos:

- custo de aquisição, correspondente ao valor FOB (free on board), que inclui os custos de fabricação e entrega do equipamento no veículo transportador;

- custo de transporte e seguro, correspondente ao valor do frete até o canteiro de serviço e do seguro correspondente e que depende do valor do equipamento, da distância de transporte e de outros fatores como o número de transbordos requeridos durante a viagem;

- custo de montagem e teste, correspondente aos serviços de recebimento no canteiro, armazenamento no almoxarifado da obra, montagem no local definitivo e testes de pré-operação.

Esses componentes básicos dos custos com equipamentos, dizem respeito a todas as categorias de maquinário utilizado na casa de força tais como:

- equipamentos hidromecânicos (comportas, válvulas, grades, etc.);
- equipamentos de içamento (pontes rolantes, guindastes, etc);
- condutos forçados e blindagens;
- turbinas e geradores.

Os custos são dados em função do peso dos equipamentos utilizados, e constam na planilha geral de custos diretos.

11.3.2. Barragem.

11.3.2.1. Escavação - Os volumes de escavação da região do barramento, atingindo 2,0 metros abaixo do nível de rocha sã, são os seguintes:

$Ve1 = 50.000 \text{ m}^3$ (ombreiras direita e esquerda);

$Ve2 = 35.000 \text{ m}^3$ (fundação).

11.3.2.2. Limpeza e Tratamento de Fundação - Para estimar a limpeza de fundação é necessário calcular a área de contato concreto/rocha e para o tratamento a quantidade de metros de perfuração das cortinas de injeção e drenagem. Os parâmetros de injeção são os mesmos da casa de força.

Área a ser limpa = 15m (largura). 220m (comprimento) = 3300 m².

Nº colunas a serem injetadas = 370.

Comprimento total de injeção = 5.550 m.

11.3.2.3. Concreto - A barragem a ser construída é de concreto, onde o volume a ser utilizado é estimado pelo método das áreas médias, em função da altura e comprimento do barragem.

O volume por metro de comprimento da barragem é dado por :

$$V_c = 8.H_b + 3/8.(H_b - 10,7)^2$$

onde : H_b - Altura da barragem.

Dessa forma o volume de concreto da barragem é:

V_c = 145 m³/m de comprimento da barragem.

Comprimento da Barragem = 220 m.

Volume Total de Concreto = 32.000 m³.

Utilizou-se uma taxa de cimento de 200 Kg/m³ e uma taxa de armação de 10 Kg/m³.

11.3.2.4. Outros Custos - Os custos das obras de acabamento da cista da barragem são baseados, para efeito de estimativa, no comprimento da crista da barragem.

Estimado em 15% do valor dos custos diretos totais do serviço relacionado à construção da barragem.

11.3.3. Vertedouro:

11.3.3.1. Escavação - Os volumes de escavação do vertedouro de superfície, são calculados de acordo com a área da base da estrutura de gravidade somada à área da bacia de dissipação devendo atingir 2,0 metros abaixo do nível de rocha sã. Os quantitativos são os seguintes:

$$Ve1 = 6.000 \text{ m}^3 \text{ (fundação e estrutura de gravidade)};$$

$$Ve2 = 3.000 \text{ m}^3 \text{ (bacia de dissipação)}.$$

11.3.3.2. Limpeza e Tratamento de Fundação - Para estimar a limpeza de fundação é necessário calcular a área de contato concreto/rocha e para o tratamento a quantidade de metros de perfuração das cortinas de injeção e drenagem, sendo que os furos e ancoragens devem possuir 4 metros de profundidade, espaçados de 2 em 2 metros em toda a área a ser tratada.

Área a ser limpa = 23,02 m (largura) . 66,76 m (comprimento - inclui bacia de dissipação) = 1540 m².

Nº colunas a serem injetadas = 385.

Comprimento total de injeção = 1540 m.

11.3.3.3. Concreto - O vertedouro incorporado à barragem de concreto, pode ser dividido em termos de cálculo de volumes de concreto, em ogiva maciça do vertedouro, pilares, bacia de dissipação e ponte, onde o volume a ser utilizado é estimado pelo método das áreas médias, em função da altura do paramento de montante e da largura do vertedouro.

Vão do Vertedor = 23,02 m.

Diâmetro dos pilares (ep) = 4,5 m.

Número de pilares (Np) = 4.

Volume de concreto dos pilares = 1145 m³.

Taxa de Cimento = 250 Kg/m³.

Taxa de Armação = 80 Kg/m³.

Volume de concreto da bacia de dissipação = $1,5 \cdot 39,6 \cdot 23,02 = 1368 \text{ m}^3$
considerando a espessura da laje igual a 1,5 m.

Taxa de Cimento = 250 Kg/m^3 .

Taxa de Armação = 50 Kg/m^3 .

Volume de concreto da ponte = $6 \text{ m}^3/\text{m} \cdot 23,02\text{m} = 138,5 \text{ m}^3$.

Taxa de Cimento = 300 Kg/m^3 .

Taxa de Armação = 100 Kg/m^3 .

Volume de concreto da ogiva maciça = 2300 m^3 .

Taxa de Cimento = 200 Kg/m^3 .

Taxa de Armação = 20 Kg/m^3 .

11.3.3.4. Outros Custos - Deve-se incluir as obras de acabamento da estrutura como escadas, pavimentação da estrada da crista, iluminação, etc.

Estimado em 15% do valor dos custos diretos totais do serviço relacionado à construção do vertedor.

Com base nesses dados foi elaborada uma planilha geral dos custos envolvidos na construção da casa de força, barragem e vertedouro incluindo equipamentos e componentes hidromecânicos.

Conclui-se, de posse desse número representativo dos custos diretos dos principais serviços de uma obra desse tipo e porte, que a ordem de grandeza do investimento está definida, restando assegurar somente os valores das despesas indiretas (apoio à execução da obra) e definir alguns detalhes construtivos e métodos executivos (obra civil), que fogem do escopo do atual trabalho, mas que foram levados em conta de forma superficial na elaboração da planilha geral de custos diretos e indiretos.

Observa-se ainda que todas as correções monetárias foram executadas, pois os valores de custos do manual de inventário são de 1985. Fez-se uma transformação dos custos para dólar segundo o câmbio da época ($1\text{US\$} = \text{CR\$ } 5.980,00$) e corrigiu-se o dólar pela inflação americana anual durante esses 11 anos e depois converteu-se o valor corrigido para real pelo câmbio de venda do mercado paralelo. Essa correção é aproximada e

simplificada. O correto seria para cada insumo utilizado na obra (materiais, mão de obra, equipamentos, etc) corrigi-los pela variação do INCC do período para cada insumo bem como fazer a correção monetária para os diversos planos econômicos pelos quais o Brasil passou nesse período.

Um outro ponto importante para discussão é a forma como deve-se encarar um contrato desse porte a nível de faturamento e execução dos serviços. É de grande importância três aspectos a serem citados: redução de despesas (controle de custos bem feito), adiantamento de faturamento (eficiência de medição) e ganho financeiro decorrente desse adiantamento. Logicamente essa discussão depende muito da forma contratual entre investidor e construtor, mas que deve ser sempre mantida na cabeça, inclusive para servir como objetivo na negociação.

Todos os valores de custos utilizados nas composições foram retirados dos gráficos do Manual de Inventário da Eletrobrás, que seguem anexos.

Planilha de Demonstrativo de Custos - UHE POLI.

Local	Serviço	Unidade	Quantidade	Custo Unitário R\$ / Unidade	Custo Total (R\$)	Situação
Terrenos e Servidões	Aquisição de terras	GL	1	2018650,96	2018651	Estimada
	Benfeitorias na área da usina	GL	1	89315,33	89315	Estimada
	Ensecadeiras	GL	1	662923,15	662923	Estimada
Barragem	Escavação em Rocha	M³	85000	9,11	774350	Calculada
	Tratamento de Fundação	M²	5550	18,21	101066	
	Concreto sem Cimento	M³	32000	83,67	2677440	
	Cimento	Ton	6400	80,00	512000	
	Aço	Ton	320	400,00	128000	
	Outros Custos	GL	1	628928,33	628928	
	Sub-Total				4821784	
Vertedouro	Escavação em Rocha	M³	9000	9,11	81990	Calculada
	Tratamento de Fundação	M²	1540	18,21	28043	
	Concreto sem Cimento	M³	4952	83,67	414292	
	Cimento	Ton	1130	80,00	90384	
	Aço	Ton	220	400,00	87940	
	Outros Custos	GL	1	105397,41	105397	
	Sub-Total				808047	
Casa de Força	Escavação em Rocha	M³	4300	9,11	39173	Calculada
	Tratamento de Fundação	M²	206	18,21	3745	
	Concreto sem Cimento	M³	20480	83,67	1713562	
	Cimento	Ton	5734	80,00	458752	
	Aço	Ton	1434	400,00	573440	
	Instalações e Acabamentos	GL	1	278867,15	278867	
	Turbinas	Un.	4	949085,95	3796344	
	Geradores	Un.	4	1109160,71	4436643	
	Comportas	Un.	4	45990,68	183962	
	Stop-logs	Un.	8	14676,33	117411	
	Grades	Un.	4	21532,32	86129	
	Ponte Rolante	Un.	8	37211,73	297694	
	Sub-Total				11985721	
Equipamentos	Equip. elétricos acessórios	GL	1	139491,97	139492	Estimada
	Custo Direto Total (R\$)				20525933	
Canteiro / Acampamento Engenharia Administração	Construção e Manutenção	GL	1	1210542,92	1210543	Estimada
	Engenharia Básica	GL	1	534004,50	534005	Estimada
	Administração da Obra	GL	1	120581,66	120582	Estimada
	Custo Indireto Total (R\$)				1865129	
Custo Total (R\$)					22391062	
Juros Durante a Construção					30% ao ano	
Custo Total com Juros (R\$)					36004828	
Energia Gerada (KWh)					157680000	
Custo Total por KWh Gerado (R\$/KWh) - Sem Juros					0,14	
Custo Total por KWh Gerado (R\$/KWh) - Com Juros					0,23	

12. Conclusão Final.

De acordo com os estudos realizados, a central hidrelétrica UHE - Poli, terá lay-out geral conforme desenho 1, que consta de barragem de gravidade construída em concreto armado com perfil conforme desenho 2, vertedouro de superfície sem comporta e bacia de dissipação cujos perfis estão descritos no desenho 3, e casa de força cujas especificações são as seguintes:

Nº de Unidades Geradoras : 4

Tipo de Turbina : Tubular S com rotor Kaplan de dupla regulação.

Gerador síncrono de 24 pólos, potência aparente de 4.500 KVA, $\cos\phi = 0.9$, rendimento de 97% e momento de inércia natural (Gd_n^2) de 38,2 Ton.m² com acoplamento direto ao eixo da turbina.

Presença de volante de inércia com raio externo de 1,22 metros e inércia de 29,86 Ton.m².

A capacidade de trabalho do regulador de velocidades deverá ser superior a 11,5 C.V.

A capacidade de cada ponte rolante deve ser de 110 Ton. para um vão de 25,85 metros.

Na tomada d'água serão utilizadas 4 comportas (uma para cada unidade), bem como 4 stop-logs e respectivas grades de proteção e pontes rolantes para acionamento.

Na sucção serão montados 4 stop-logs com acionamento dependente 2 a 2 e respectivas pontes rolantes para acionamento.

O custo total preliminar estimado é de R\$ 22.391.062,00 , sem considerar os juros.

O custo por Kwh da usina com vida útil de 10 anos, trabalhando 24 horas por dia é de R\$ 0,14 sem considerar os juros na construção.

De posse destes dados já é possível prosseguir com o projeto executivo do aproveitamento, elaborando estudos mais profundos sobre os sistemas envolvidos, desenvolvendo-os por completo. Nesta etapa, deverá ser elaborado o orçamento final da obra pois os dados em mãos já são definitivos.

Após o projeto executivo realizado, segue a etapa de construção das obras civis e fabricação dos componentes eletromecânicos da central.

Por fim seguem as fases de montagem dos equipamentos, testes dos mesmos e entrada em operação dos conjuntos geradores.

13. Bibliografia.

1. SCHIOZER, Dayr. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo, Ed. Araguaia, 1990.
2. SOUZA, Zulcy de. **Centrais Hidro e Termelétricas**. São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1983.
3. PINTO, Nelson L. de Souza. **Hidrologia Básica**. São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1976.
4. SAMUELSON, Paul A. **Economia**. São Carlos, Portugal, Ed. McGraw-Hill, 1993.
5. **Design of Small Dams**. Bureau of Reclamation, USA, 1965.
6. **Manual de Minicentrais Hidrelétricas**, Eletrobrás - DNAEE, 1985.
7. **Balanço Energético do Estado de São Paulo 1995**. CESP - 1996.
8. **Plano 2015**. Eletrobrás.
9. LAURIA, Douglas. **Máquinas e Instalações Hidráulicas**. Notas de aula. 1994.
10. VARGAS, Miltom. **Manual do Engenheiro Globo**. Vol 4, Tomo II. Porto Alegre, Ed. Globo, 1977.
11. MADUREIRA, Omar Moore. **Notas de aula - Metodologia de Projeto**, 1995.
12. KRIVCHENKO, G.I. **Hydraulic Machines - Turbines and Pumps**. Moscou, Mir Publishers, 1986.
13. ZOPPETI, Gaudencio. **Centrales Hidroeléctricas**. Barcelona, Editora Gustavo Gili, 1965.

14. SOUZA, Zulcy de. **Centrais Hidrelétricas - Dimensionamento de Componentes**. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1992.

15. **Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Eletrobrás, DNAEE, 1985.

16. **Manual de Inventário**. Eletrobrás, DNAEE, 1985.

14. Anexo 1 - Estudos Preliminares

ESTUDOS PRELIMINARES.

Inicialmente são apresentados os principais conceitos envolvidos na realização deste estudo para depois apresentar os resultados numéricos obtidos.

1. Estudo Geológico e Geotécnico.

1. 1. Introdução.

A geologia e geotecnia tratam basicamente de dois aspectos, no que diz respeito à construção de uma usina hidrelétrica:

- O local da barragem e obras anexas, de modo a garantir uma escolha adequada e segura, sobretudo quanto às fundações, ombreiras e encostas naturais nas vizinhanças das obras;

- Dos materiais naturais de construção que podem ser aproveitados na execução das obras que constituem o aproveitamento.

O estudo do solo onde será construída a usina, principalmente o local da barragem, deve ser cuidadosamente realizado, pois as fundações de uma barragem devem estar localizadas em uma região de solo firme, e quando possível deve ocorrer um aproveitamento de material natural escavado na região, barateando os custos de aquisição e facilitando o acesso aos materiais de construção. Muitas vezes muda-se o projeto civil da usina a fim de atender essa disponibilidade de material.

1.2. Prospecções Geológicas.

Locais sujeitos a potenciais desmoronamentos ou que tenham tido quedas de barreiras recentes não oferecem condições de suporte de obras. O material envolvido nesses escorregamentos é pouco consolidado, conferindo normalmente ao terreno baixa resistência e alta permeabilidade.

Locais que vêm sofrendo um processo de desmatamento intenso ou onde a vegetação seja muito rala ou inexistente, associados a encostas íngremes, podem sofrer na época de chuvas intensas ou prolongadas, processo erosivo do terreno natural. Dessa forma

o reservatório formado pela barragem pode sofrer contínua deposição de material de erosão, fato que não é conveniente para a instalação mecânica e para os aspectos de manutenção de vazão e área inundada, pois isso pode criar o que chamamos de volume morto.

Locais onde existem bancos de areia e cascalhos devem ser cuidadosamente analisados, pois podem ocasionar fugas excessivas de água pela fundação, assim como locais de existência de rochas fraturadas.

1.3. Materiais Naturais de Construção.

As investigações dos materiais naturais de construção abrangem a pesquisa de solo para construção das obras de terra, areias para filtros e agregados e rocha para enrocamentos, transições e agregados de concreto.

A pesquisa do solo (sondagem) deve procurar definir os materiais em qualidade e em quantidade. Com relação à qualidade, os solos deverão ser identificados e classificados de acordo com a tabela, anexa.

A avaliação de quantidade é obtida através do processo de cubagem (cálculo de volumes), que consiste na demarcação da área e na estimativa média das profundidades exploráveis de solo. As profundidades são estimadas realizando-se perfurações no solo (a trado, poços de inspeção ou trincheiras). Cria-se uma malha de furos com espaçamento de preferência constante, arbitrado em função das dimensões do terreno a ser estudado e topografia da área, variando de 25 a 50 m.

Estes furos deverão atravessar individualmente as camadas de solo existentes, sendo definidas para cada horizonte e espessura as características dos materiais encontrados.

Determinadas as áreas de exploração e a espessura média das camadas, calcula-se os volumes disponíveis para utilização, prevendo-se sempre que os volumes de exploração devem ser superiores aos volumes calculados para serem aplicados nas obras em um percentual aproximado de 50%.

Obtendo-se a certeza de disponibilidade de solo em quantidade e qualidade adequadas para utilização, procede-se à definição da forma mais conveniente da exploração, por métodos manuais ou através de equipamentos mecânicos (retroescavadeiras, tratores com lâmina, pás carregadeiras, clam-shell, etc.) e até mesmo explosivos.

A pesquisa de areia deve ser feita principalmente nos depósitos localizados nas margens e no leito dos cursos de água.

Caso o volume de material não seja suficiente para suprir a obra, devem-se realizar novas sondagens em locais próximos à obra (procura de novas jazidas), ou até mesmo tentar utilizar materiais alternativos que existam no local, como por exemplo, areia artificial (proveniente de refugo da britagem) no lugar da areia natural.

2. Estudo Hidrológico e Hidroenergético.

2.1. Estudo Hidrológico.

Os estudos hidrológicos que são realizados nos projetos de centrais hidrelétricas compreendem basicamente a definição, de:

- regime fluviométrico do rio, com determinação de vazões para utilização no cálculo da potência a ser instalada;
- vazão de projeto das estruturas extravasoras, ou cheia de projeto;
- relação cota- descarga à jusante da central.

Os projetos de obras hidráulicas, exigem a manipulação e apresentação gráfica dos dados de vazão do rio, relativos a períodos em geral longos, com a finalidade de proporcionar uma melhor visualização do regime do rio, de destacar algumas de suas características ou estudar os efeitos de regulação propiciados pelos reservatórios. Nesse sentido, os valores das vazões médias diárias, mensais ou anuais podem ser apresentados sob forma de fluviogramas, fluviogramas médios, curvas de permanência e curvas de massa, colocando em evidência, em cada caso, aspectos distintos do regime do curso de água e facilitando a compreensão das características de escoamento da bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica (ou imbrífera) de um curso de água (rio) é a área da superfície do solo capaz de captar água das precipitações e conduzi-las a esse rio diretamente ou por meio de seus afluentes. Sua determinação é feita em geral através de levantamentos topográficos com curvas de nível. As bacias imbríferas são sempre consideradas a montante da seção transversal ao leito do rio no local onde se pretende utilizar sua vazão.

As características físicas de uma bacia hidrográfica são a área de drenagem (é a superfície da bacia, e se mede a montante do ponto de referência) e a declividade média do rio.

2.1.1. Estudos Fluviométricos.

A fluviometria trata da determinação da vazão de um curso de água em várias de suas seções durante um longo tempo.

Para o levantamento dos dados de vazão de um determinado rio, pode-se utilizar vários métodos, tais como (NB 288 - ABNT):

- Métodos próprios para grandes vazões;
- Métodos próprios para pequenas vazões;
- Outros métodos não normalizados.

Tem-se dois caminhos para cálculo das vazões:

a-) Medir diretamente o valor da vazão através do método gravimétrico que consiste em desviar o curso de um rio para um reservatório de dimensões conhecidas e depois de um tempo medido, verificar o acréscimo de volume pela variação de massa ou não, através de três métodos básicos:

a.1-) Método do vertedor, onde através das dimensões de um vertedor e da carga determina-se a vazão diretamente através da fórmula experimental:

$$Q = 1,84 \cdot b \cdot h_v^{1,5} \cdot \left[1 + 0,26 \cdot \left(\frac{b_c \cdot h_v}{L \cdot (h_v + x)} \right)^2 \right] \quad (1)$$

onde:

h_v - Altura de lâmina de água vertente;

x - Altura da válvula em relação ao fundo do canal;

L - Largura do canal;

b - Largura do vertedor;

b_c - Largura da veia contraída.

a.2-) Método da diluição (método químico), que consiste em lançar no rio uma vazão constante e conhecida de uma solução que não seja encontrada em grandes

quantidades nas águas do rio e à jusante medir a concentração dessa solução, comparando-a com a concentração natural do curso, devendo ser utilizado em águas turbulentas para garantir a total dissolução da substância e evitar mascaramentos dos resultados. As fórmulas para cálculo da vazão são:

$$Q = q_s \cdot \left(\frac{N_1 - N_2}{N_2 - N_0} \right) \quad (2)$$

$$Q = q_s \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} - 1 \right) \quad (3)$$

onde:

q_s - vazão constante da solução;

N_0 - concentração inicial da substância no curso de água;

N_1 - concentração da solução lançada no curso;

N_2 - concentração final da substância no curso de água.

OBS: A equação 2 deve ser usada quando a substância química existe de forma considerável no curso de água e a equação 3 deve ser usada caso contrário.

a.3-) Método da calha venturimétrica do tipo de ressalto hidráulico ou do tipo Parshall. Neste caso a vazão é dada pela fórmula:

$$Q = K \cdot \lambda_a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_1} \cdot b \cdot H_1 \quad (4)$$

onde:

b - Largura do canal de entrada;

H_1 - nível de água na entrada;

g - aceleração da gravidade;

K - coeficiente adimensional de vazão (0,55 a 0,65);

λ_a - coeficiente de atrito na parede do canal (0,95).

b-) Determinar a velocidade instântanea de um filete através de molinetes que dão um sinal a cada intervalo de rotação (conhecida) da hélice e depois determinar a área da

seção molhada do rio, através de levantamentos com réguas linimétricas ou linímetros (levantamentos de nível do rio) a fim de realizar a integração de acordo com a fórmula, para determinar a vazão:

$$Q = \int A \int c \cdot dA = \int_0^y \int_0^x c \cdot dx \cdot dy \quad (5)$$

onde:

c - velocidade do filete;

x e y - duas dimensões da seção.

Nesse sentido, os valores das vazões médias diárias ou mensais podem ser apresentados sob forma de diagramas tais como as curvas-chave, os fluviogramas, os fluviogramas médios, as curvas de permanência, as curvas de massa e outras que colocam em evidência as características do curso de água em questão.

Na prática são instalados postos de medição e observação (estações hidrométricas) ao longo do curso de água de onde se quer obter alguma informação de vazão ou outras características tais como marcas de níveis de cheias, valores extremos de descarga, frequência e época de inundações, etc. Estes postos possuem sua área de drenagem específica. Para validar os dados de vazão deste posto para o local onde irá ser construída a barragem deve ser corrigido o valor dessa vazão através da relação entre as áreas de drenagem à montante da barragem e à montante do posto de medição. Assim podem ser obtidos os valores de vazão máxima, média e mínima relativas ao local da central hidrelétrica.

2.1.2. Regularização das vazões medidas.

As vazões naturais dos cursos de água possuem uma natureza extremamente variável. Elas variam praticamente a cada instante. As grandes variações, no entanto, ocorrem em intervalos de tempo maiores, sendo que em um ano podem-se registrar tanto vazões muito pequenas como muito grandes e se observarmos períodos de um número razoável de anos, veremos uma variação ainda maior com registros de vazões mínimas e também de vazões enormes, que podem apresentar características catastróficas. Com isso, torna-se muito difícil projetar um aproveitamento hidráulico pois, se escolhermos turbinas

para vazões iguais às mínimas, grandes quantidades de energia não seriam aproveitadas. Por outro lado, turbinas dimensionadas para vazões maiores ficariam sem produzir sua capacidade durante longos períodos.

A fim de efetuar a regularização de vazões de um rio é necessário que se disponha de um reservatório para acumular a água nos períodos das chuvas e restituí-la, juntamente com as vazões naturais que chegam ao reservatório, na época das secas. Dependendo do volume de água armazenável no reservatório, pode-se conseguir uma regulação total, anual ou plurianual, pela qual podemos substituir a sucessão de vazões naturais anuais ou plurianuais por uma única vazão, constante durante todo o período abrangido. Para atingir a regulação para uma única vazão, haveria a necessidade de reservatórios de água muito extensos que poderia causar danos ecológicos na região, além de tornar o empreendimento antieconômico. Dessa forma, empregam-se na prática reservatórios menores, conseguindo ainda regulações totais, mas agora não com uma vazão regularizada mas sim com uma série de vazões regularizadas, de duração variável. Um aproveitamento integral da energia hidráulica disponível exige o dimensionamento das máquinas de geração de energia para a maior das vazões regularizadas e um fracionamento maior das unidades geradoras pois durante certas épocas as vazões disponíveis serão bem menores. Com isso requer-se um planejamento plurianual previamente estabelecido, visando a obtenção do menor custo por KWh produzido.

2.1.3. Fluviograma.

É um gráfico de representação das vazões ao longo de um período de observação, na sequência cronológica de ocorrência. Retratando o regime do rio, permite visualizar com facilidade a extensão e distribuição dos períodos extremos de vazão, estiagens e enchentes, em ordem cronológica ao longo do período de observação.

Com a finalidade de caracterizar o regime anual, costuma-se estabelecer um fluviograma de vazões mensais, em que cada mês é definido pela média das vazões observadas naquele mês, ao longo do período considerado. Com isso deve-se tomar a devida precaução na análise desses valores médios, devido à sua natureza estatística. Para melhor caracterização do regime, acrescenta-se sobre os fluviogramas os coeficientes de variação de cada valor médio definido como a relação entre o desvio padrão da amostra de vazões e sua média.

Os coeficientes de variação levam à compreensão do regime de um rio. Um coeficiente relativamente baixo, indica a existência de um regime do rio razoavelmente bem definido ao contrário de um coeficiente relativamente alto que indica a natureza errática do regime do rio, de acordo com a época do ano.

2.1.4. Curva de Permanência.

A sucessão de valores de vazões médias de certo intervalo de tempo (dia, mês) constitui uma série de dados que pode ser organizada segundo uma distribuição de frequências. Para isso, basta definir os intervalos de classe em função da ordem de grandeza das descargas e contar e registrar o número de dados que se situam em cada intervalo. Esse método estatístico leva à obtenção da curva acumulativa de frequência da série temporal contínua dos valores das vazões, obtendo-se dessa forma os valores de vazões regularizadas em um certo período de tempo.

Em estudos energéticos costuma-se definir como energia primária da usina a correspondente a uma potência disponível entre 90 e 100% do tempo disponível. As curvas de permanência apresentam geralmente um abaixamento abrupto nos valores de vazão quando próximo de 97% do tempo disponível devido à ocorrência de alguns raros períodos de seca excepcional. Dessa forma, a frequência correspondente a essa queda brusca pode ser utilizada para a definição da energia primária da usina, determinando-se a vazão de projeto da turbina e o volume do reservatório para garantir essa vazão para um determinado tempo.

Dessas curvas de permanência pode-se extrair dados importantes sobre o comportamento dos cursos de água tais como riqueza hídrica da bacia em questão (de acordo com a superfície drenada), refletindo as maiores precipitações pluviais verificadas nos trechos médio e inferior do rio além de dar características geográficas aproximadas das zonas à montante e à jusante da bacia (declividade dos vales, etc.) além dos efeitos de regularização propiciada pelas áreas de drenagem.

2.1.5. Curva de Massa de Vazões.

Outra forma de determinar uma série de vazões regularizadas pelo reservatório é pelo método de Rippl ou método de massa das vazões, que consiste na representação gráfica dos valores acumulados de volume em função do tempo. Matematicamente é definida pela expressão:

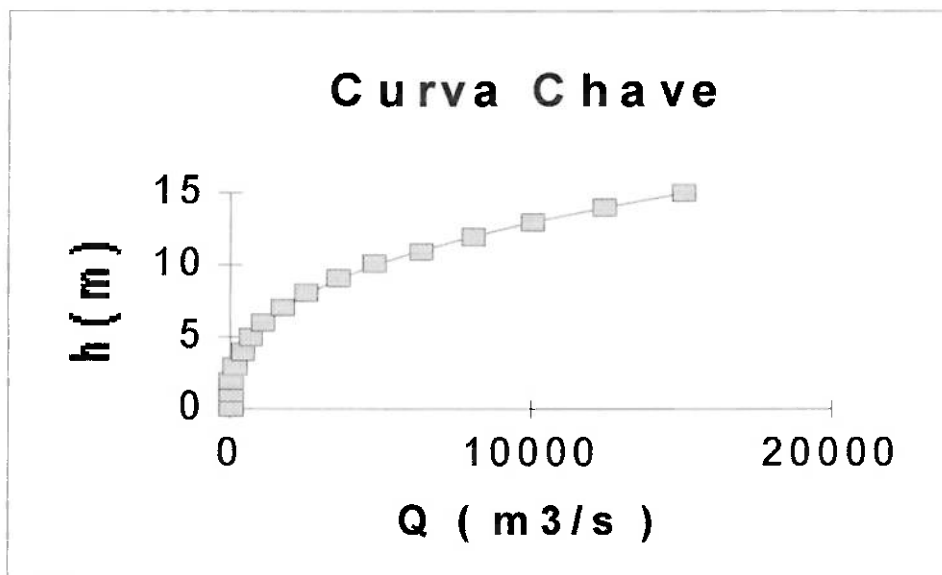
$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q \cdot dt = \sum_{t_1}^{t_2} \bar{Q} \cdot \Delta t \quad (6)$$

Representa a curva integral do fluviograma, em que as ordenadas representam a área sob o fluviograma e a inclinação indica a vazão.

2.1.6. Curva Chave.

Também denominada curva de descarga de um rio em uma determinada seção, contém como ordenadas as alturas do nível de água e como abscissas as respectivas vazões.

Sua obtenção parte da medida das alturas da água para uma determinada seção do rio, a partir de uma referência pré-fixada. Para cada uma dessas alturas é medida a vazão por um dos processos normalizados. Essas medições devem ser feitas em épocas oportunas de modo a permitir o traçado da curva com auxílio de um grande número de pontos, devendo equacioná-la por algum método numérico posteriormente.



OBS: Todas as curvas descritas anteriormente modificam-se de acordo com o período de observação que se realizam as medições nos postos de observação.

2.1.7. Estrutura Extravasora.

De forma geral, podem ser definidos dois tipos básicos para o extravasamento de água afluente ao local do aproveitamento:

a-) extravasamento por um canal lateral, com o fundo situado em cota mais elevada em relação ao leito natural do rio;

b-) extravasamento através de vertedouros localizados na própria barragem, que através de um determinado perfil, possibilita o escoamento do excesso de água no reservatório, controlando ou não a vazão através de comportas.

A opção por uma ou outra solução de projeto depende diretamente das chamadas vazões de enchentes ou vazão de cheias dos cursos de água, que na verdade são os valores estimados de máximas vazões de um rio.

A adoção da configuração b implica em se utilizar um perfil já pré estabelecido para a estrutura extravasora (vertedouro). O perfil de Creager ainda é muito utilizado, dada a sua eficácia.

Detalhes relativos ao dimensionamento, ver "Dimensionamento do Vertedouro"

2.1.8. Bacia de Dissipação.

A bacia de dissipação tem o seu dimensionamento baseado no princípio do ressalto hidráulico, tendo, portanto, como principal parâmetro o número de Froude (F). Outro parâmetro importante é a altura do nível do rio ou canal natural à jusante da barragem, porque esta altura influencia a formação do ressalto. Detalhes relativos ao equacionamento e metodologia de cálculo utilizadas, vide "Dimensionamento da Bacia de Dissipação ".

2.1.9. Vazão de Cheia de Projeto.

Existem alguns métodos para a estimativa de cheias de cursos de água que são através de fórmulas empíricas, métodos estatísticos, método racional e métodos hidrometeorológicos. Deve-se tomar bastante cuidado na aplicação desses resultados pois os valores podem possuir certo desvio, dependendo dos vários parâmetros a serem analisados no projeto.

2.1.9.1. Fórmulas empíricas.

Muitas fórmulas empíricas têm sido estabelecidas, sendo a vazão apresentada como função de características físicas da bacia (área), fatores climáticos (índices pluviométricos), etc.

Algumas fórmulas empíricas:

$$Q = 1,30. K. \left(\frac{A}{2,59} \right)^{0,936.A^{-0,048}} \quad (7)$$

onde:

K - coeficiente que depende das características fisiográficas da bacia;

A - área drenada em Km².

$$Q = \left(\frac{600}{A+10} + 1 \right). A \quad (8)$$

para área drenada inferior a 1000 Km².

$$Q = \frac{K.m.h.A}{1000} \quad (9)$$

que leva em conta a precipitação do local, onde:

K - coeficiente que depende da morfologia da bacia;

m - coeficiente que depende da área da bacia;

h - precipitação média anual em mm;

A - área da bacia em Km².

A validade das fórmulas empíricas é limitada a rigor aos locais para os quais foram obtidas, não sendo válidas para outras regiões, sendo necessários vários estudos comparativos, sobre fatores climáticos, índices fluvio-morfológicos, referentes à bacia em estudo e à bacia utilizada no estabelecimento da fórmula.

Todas as fórmulas empíricas não levam em conta o período de recorrência da cheia em estudo, obtendo-se a máxima vazão possível, de significado bastante duvidoso, para um problema bastante complexo.

2.1.9.2. Método Racional.

A máxima vazão, provocada por uma chuva de intensidade uniforme, ocorre quando todas as partes da bacia passam a contribuir para a seção de drenagem, em um determinado tempo chamado tempo de concentração da bacia.

Fórmula Racional:

$$Q = \frac{C \cdot i_m \cdot A}{3,6} \quad (10)$$

onde:

i_m - intensidade média de precipitação sobre toda a área drenada, de duração igual ao tempo de concentração, em mm/h;

A - área drenada em Km².

C - coeficiente de deflúvio, definido como a relação entre o pico de vazão por unidade de área e a intensidade média de chuva i_m .

Recomendado para uso em pequenas áreas de drenagem.

2.1.9.3. Método Hidrometeorológico.

Os métodos hidrometeorológicos procuram definir um valor limite para máxima vazão que pode ocorrer em determinado rio, limite esse, físico, imposto pelas próprias dimensões da área drenada, a partir das avaliações da máxima precipitação, fisicamente possível sobre a bacia, calcado nas informações climáticas disponíveis e nos princípios da meteorologia, principalmente na avaliação da máxima precipitação provável.

Os métodos hidrometeorológicos exigem um número considerável de dados hidrológicos e meteorológicos, que devem ser recolhidos sistematicamente no decorrer dos anos, fato que começou a ser praticado recentemente no Brasil.

2.1.9.4. Método Estatístico.

Deve-se ter em mente os riscos oriundos de um colapso da estrutura de uma barragem por exemplo, ou de um bueiro de drenagem de uma rua, devido a enchentes maiores que a especificada em projeto.

Dessa forma torna-se importante conhecer o montante desses danos causados por enchentes maiores que a de projeto, uma vez que se deve aceitar a probabilidade de sua ocorrência durante a vida útil da obra. Esse prejuízo deve ser comparado às despesas adicionais advindas da construção de uma estrutura de drenagem de maiores dimensões que permita reduzir a probabilidade de ocorrência dos danos.

Cumpra estabelecer em seguida a correspondência entre a magnitude da cheia e a sua frequência, de modo a relacioná-la com as consequências de ordem econômica.

O período de recorrência, ou tempo de recorrência, ou período de retorno (T_r) é definido como sendo o intervalo médio de anos dentro do qual ocorre ou é superada uma dada cheia de magnitude Q . Se P é a probabilidade desse evento ocorrer ou ser superado em um ano qualquer, tem-se a relação:

$$T_r = \frac{1}{P} \quad (11)$$

Como em geral não se pode conhecer a probabilidade teórica P , faz-se uma estimativa a partir da frequência (F) de vazões de enchente observadas.

Para N anos de observação do rio toma-se a maior vazão ocorrida em cada ano e obtém-se o que se chama de série anual de vazões, ordena-se em ordem decrescente de valores de vazão com um número de ordem M que varia de 1 a N e calcula-se a frequência com que o valor da vazão de ordem M é igualado ou superado nos N anos como sendo (Critério de Kimball):

$$F = \frac{M}{N+1} \quad (12)$$

Quando aumentamos o valor de anos observados a frequência F se aproxima muito do valor de P , mas para poucas observações pode-se ter grandes diferenças entre esses valores.

Estabeleceu-se algumas leis estatísticas para ajustar melhor as amostras de N elementos, de modo a poderem estimar para cada vazão de cheia a sua probabilidade teórica de ocorrer ou ser ultrapassada.

O método mais utilizado atualmente para este tipo de cálculo é o de Gumbel, que de acordo com a lei dos extremos (lei de probabilidades), onde as vazões são estudadas com base nos dados anteriores, existe uma distribuição estatística da série dos N termos constituídos pelos maiores valores de cada amostra que tende assintoticamente para uma lei simples de probabilidade, que é independente da que rege a variável aleatória nas diferentes amostras e no próprio universo da população infinita.

Essa é a base teórica para o cálculo de P :

$$P = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (13)$$

onde:

$$y = \frac{1}{0,7797 \cdot \sigma} \cdot (Q - \bar{Q} + 0,45 \cdot \sigma) \quad (14)$$

onde:

\bar{Q} - média das N vazões máximas;

P - probabilidade de a máxima vazão média diária de um ano qualquer ser maior ou igual a Q;

σ - desvio padrão das N vazões máximas.

A expressão de y mostra que existe uma relação linear entre ele e o valor de Q. Pode-se plotar essa reta conhecendo-se:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N} \quad (15)$$

e

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2}{N-1}} \quad (16)$$

Essas fórmulas relacionam os valores de y com o período de recorrência das cheias, que variam. A cada enchente corresponde um período de retorno. Esse é o chamado gráfico de Gumbel.

Essa relação supõe que existam infinitas amostras, por isso faz-se uma correção que leva em conta o número real de anos observados.

Van Te Chow provou a fórmula:

$$Q = \bar{Q} + K \cdot \sigma \quad (17)$$

onde:

Q - vazão de enchente com certo período de recorrência.

K - constante tabelada que depende do número de amostras tomadas e do período de recorrência.

Período de Recorrência (Tr - anos).							
N /Tr	5,000	10,000	15,000	20,000	25,000	50,000	100,000
10	1,058	1,848	2,289	2,606	2,847	3,588	4,323
11	1,034	1,809	2,242	2,553	2,789	3,516	4,238
12	1,013	1,777	2,202	2,509	2,741	3,456	4,166
13	0,996	1,748	2,168	2,470	2,699	3,405	4,105
14	0,981	1,724	2,138	2,437	2,663	3,360	4,052
15	0,967	1,703	2,112	2,410	2,632	3,321	4,005
16	0,955	1,682	2,087	2,379	2,601	3,283	3,959
17	0,943	1,664	2,066	2,355	2,575	3,250	3,921
18	0,934	1,649	2,047	2,335	2,552	3,223	3,888
19	0,926	1,636	2,032	2,317	2,533	3,199	3,860
20	0,919	1,625	2,018	2,302	2,517	3,179	3,836
21	0,911	1,613	2,004	2,286	2,500	3,157	3,810
22	0,905	1,603	1,992	2,272	2,484	3,138	3,787
23	0,899	1,593	1,980	2,259	2,470	3,121	3,766
24	0,893	1,584	1,969	2,247	2,457	3,104	3,747
25	0,888	1,575	1,958	2,235	2,444	3,088	3,729
26	0,883	1,568	1,949	2,224	2,432	3,074	3,711
27	0,879	1,560	1,941	2,215	2,422	3,061	3,696
28	0,874	1,553	1,932	2,205	2,412	3,048	3,681
29	0,870	1,547	1,924	2,196	2,402	3,037	3,667
30	0,866	1,541	1,917	2,188	2,393	3,026	3,653
31	0,863	1,535	1,910	2,180	2,385	3,015	3,641
32	0,860	1,530	1,904	2,173	2,377	3,005	3,629
33	0,856	1,525	1,897	2,166	2,369	2,996	3,618
34	0,853	1,520	1,892	2,160	2,362	2,987	3,608
35	0,851	1,516	1,886	2,152	2,354	2,979	3,598
36	0,848	1,511	1,881	2,147	2,349	2,971	3,588
37	0,845	1,507	1,876	2,142	2,344	2,963	3,579
38	0,843	1,503	1,871	2,137	2,338	2,957	3,571
39	0,840	1,499	1,867	2,131	2,331	2,950	3,563
40	0,838	1,495	1,862	2,126	2,326	2,943	3,554
41	0,836	1,492	1,858	2,121	2,321	2,936	3,547
42	0,834	1,489	1,854	2,117	2,316	2,930	3,539
43	0,832	1,485	1,850	2,112	2,311	2,924	3,532
44	0,830	1,482	1,846	2,108	2,307	2,919	3,526
45	0,828	1,478	1,842	2,104	2,303	2,913	3,519
46	0,826	1,476	1,839	2,100	2,298	2,908	3,513
47	0,824	1,474	1,836	2,096	2,294	2,903	3,507
48	0,823	1,471	1,832	2,093	2,290	2,898	3,501
49	0,821	1,469	1,830	2,090	2,287	2,894	3,496
50	0,820	1,466	1,827	2,086	2,283	2,889	3,490
51	0,818	1,464	1,824	2,083	2,280	2,885	3,486
52	0,817	1,462	1,821	2,080	2,276	2,881	3,481
53	0,815	1,459	1,818	2,079	2,273	2,875	3,474
54	0,814	1,457	1,816	2,074	2,270	2,873	3,471
55	0,813	1,455	1,813	2,071	2,267	2,869	3,467
56	0,812	1,453	1,811	2,069	2,264	2,865	3,462
57	0,810	1,451	1,809	2,066	2,261	2,862	3,458
58	0,809	1,449	1,806	2,064	2,258	2,858	3,454
59	0,808	1,448	1,804	2,061	2,256	2,855	3,450
60	0,807	1,446	1,802	2,059	2,253	2,852	3,446

Como essa tabela somente considera períodos de recorrência de até 100 anos, pode-se calcular o valor da descarga para mais de 100 anos a partir de :

$$Q_{1000} = Q_{100} + (Q_{100} - Q_{10}) \quad (18)$$

$$Q_{100} = \bar{Q} + K_{100} \cdot \sigma$$

$$Q_{10} = \bar{Q} + K_{10} \cdot \sigma$$

Existem outros métodos de cálculo estatístico que levam em consideração coeficientes de assimetria, outro conceito da teoria das probabilidades e da estatística, desenvolvidos por Hazen e por Gibrat, que não são amplamente utilizados na prática.

2.1.10. Escolha da Frequência da Cheia de Projeto.

A probabilidade de ocorrer pelo menos uma cheia que se iguale ou exceda aquela do período de recorrência T_r , num intervalo de n anos qualquer é:

$$J = 1 - p^n \quad (19)$$

Pode-se, dessa maneira, escolher qual o período de recorrência da cheia a ser utilizado no projeto de uma obra hidráulica, sabendo-se a vida provável da estrutura e escolhendo-se o risco que se pode correr de que ela venha a falhar.

Risco a ser Assumido	Vida provável da estrutura em anos.				
	1	10	25	50	100
0,01	100	910	2440	5260	9100
0,1	10	95	238	460	940
0,25	4	35	87	175	345
0,5	2	15	37	72	145
0,75	1,3	8	18	37	72
0,99	1,01	2,7	6	11	22

O risco pode ser calculado de acordo com a fórmula abaixo:

$$r = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{n_d} \quad (20)$$

onde:

r - risco de ocorrência, pelo menos uma vez, da cheia adotada;

T - tempo de recorrência, em anos;

n_d - vida útil da usina.

A grande dificuldade de aplicação dos métodos estatísticos está relacionado à falta de postos de medição de dados fluviométricos em pequenas bacias, pois estas necessitam de aparelhagem de medição mais dispendiosos.

Com isso, usa-se a alternativa de recolher dados pluviométricos da região.

Estabelecida a precipitação com dado período de recorrência, o problema passa a ser o cálculo da vazão decorrente dessa precipitação. Deve-se observar que o período de recorrência da vazão resultante não é, na realidade, o mesmo da chuva que o provocou, pois aquela depende ainda da capacidade de infiltração do solo, que pode variar e sua probabilidade é independente. Na impossibilidade de estabelecer a ordem de grandeza dessa probabilidade, a vazão obtida de uma certa precipitação é simplesmente considerada de mesma frequência.

3. Barragem.

A barragem é a estrutura componente do aproveitamento, localizada transversalmente ao álveos dos rios, destinada a:

- Elevar o nível das águas a fim de criar um desnível hidráulico localizado (deixando a tomada de água afogada), melhorando também a navegabilidade do rio, garantindo profundidade adequada;

- Represar as águas do rio para permitir captação e desvio;

- Proporcionar represamento do rio para a formação de reservatórios regularizadores de vazão para os diversos tipos de aproveitamento ou para o amortecimento de ondas de enchente.

Geralmente uma barragem é construída em trechos encachoeirados do rio (quando existem tais trechos) onde já existe uma variação de cotas de fundo entre o início e final do trecho, que permite o aproveitamento da queda natural para produzir a energia desejada.

Existem duas classificações gerais de barragens:

a-) Quanto aos esforços:

Barragens a gravidade, onde o equilíbrio estático da construção, sob a ação das forças externas (empuxo hidrostático), realiza-se pelo próprio peso da estrutura, com o auxílio eventual da componente de empuxo que atua sobre seus parâmetros.

Barragens em arco, onde atua a propriedade de as estruturas em arco resistirem com facilidade a cargas uniformemente distribuídas sobre seu dorso, transmitindo-as para suas ombreiras. Dessa forma as forças decorrentes do empuxo hidrostático são transferidas para as margens e o fundo do rio, que por essa razão devem ser constituídos de material natural especial, ou seja, margens altas constituídas de rocha resistente e o fundo do rio igualmente em rocha resistente e sã. Dadas as suas pequenas seções transversais, o peso desempenha papel secundário no equilíbrio estático.

Barragens em arco - gravidade, que se caracteriza pela sua planimetria em forma de arco mas que funcionam parcialmente como barragem a arco e parcialmente como barragem a gravidade. Suas seções transversais são intermediárias entre as barragens a arco e as barragens a gravidade.

b-) Quanto ao material de construção:

Barragens de terra;
Barragens de enrocamento;
Barragens de concreto ciclópico;
Barragens de concreto armado e
Barragens de alvenaria de pedra.

As barragens a arco podem ser construídas em concreto e concreto armado, as barragens em arco - gravidade podem ser construídas em concreto ciclópico ou armado e as barragens a gravidade podem ser construídas com qualquer material especificado na classificação.

Os projetos de barragens dependem diretamente da magnitude dos esforços que nelas agem, que por sua vez dependem diretamente da potência a ser gerada pela usina, decorrendo daí especificações de altura de queda de projeto e área inundada determinando dessa forma os esforços de empuxo hidrostático, que podem ser muito altos ou não, determinando assim a material e a forma de construção de tais barragens.

Além disso, o tipo de solo encontrado no local da construção é de suma importância para a estabilidade da barragem visto que pode existir percolação de água (escoamento de água através do solo pelos planos de separação entre materiais diferentes) sob a mesma, podendo afetar a estabilidade da estrutura. A ruptura da fundação da barragem devido à percolação de água é conhecida como *pipping*.

Outro efeito da percolação é a criação de esforços internos à barragem (força de percolação e pressão hidrostática) que acaba afetando de alguma forma sua estabilidade.

3.1. Barragens de Terra / Enrocamento a Gravidade.

Para as pequenas centrais hidrelétricas, de acordo com os parâmetros já discutidos anteriormente, o método construtivo mais adequado, para efeito de custos principalmente, são as barragens a gravidade de terra / enrocamento.

Esse tipo de barragem é apropriada para locais onde existe grande disponibilidade de solo argiloso ou arenoso-siltoso/argiloso e blocos de rocha para enrocamento.

3.2. Barragens de Concreto.

São barragens que devem ser construídas para resistir a grandes esforços, ou seja, grandes quedas de água e grande bacia regularizadora. Com isso o custo alto em material deve ser bem controlado (perdas) para que compense o faturamento.

OBS: Todo o memorial de cálculo da barragem será introduzido e explicado na aplicação do projeto que está sendo desenvolvido, na próxima seção.

4. Resultados dos Estudos Preliminares.

4.1. Estudos Geológicos e Geotécnicos.

Após realizadas as investigações geológicas necessárias, que consistiram em mapeamentos geológicos e geotécnicos, sondagens a percussão e sondagens mistas, concluiu-se que 90% da área considerada é da série São Bento, que se caracteriza por uma sucessão de camadas rochosas subhorizontais que se alternam estratigraficamente, a saber:

- Arenito Botucatu: de origem eólica de granulação fina, uniforme, muito permeável, que possui baixo teor argiloso.

- Eruptivas Básicas (Efusivas): representadas pelos derrames basálticos da formação serra geral, de idade mesozóica, além de segmentos aluvionares recentes (quaternários), que ocupam as margens do rio Sapucaí e seus afluentes.

O colúvio da margem direita apresenta-se com SPT de 1 a 3 em espessura de 2 a 3 m enquanto que na margem esquerda a espessura atinge valores da ordem de 5 m com SPT de 1 a 3. Na margem esquerda, ocorre uma camada de aluvião entre o colúvio e o basalto denso, desde a margem até cerca de 140 m em direção a ombreira. Os ensaios realizados sobre amostras deste aluvião, mostraram que ele é argiloso, não sendo problema para as fundações da barragem.

No leito do rio foram confirmadas a existência de dois níveis de juntas falhas (elevações nominais 499 e 505).

4.1.2. Materiais Naturais de Construção.

4.1.2.1. Áreas de Empréstimo.

As ligações das áreas a serem exploradas foram ajustadas em função dos novos volumes requeridos e buscando as vantagens decorrentes de:

- Diminuir a distância de transporte, locando as áreas o mais próximo possível do eixo;
- Diminuir as áreas a serem escavadas, reduzindo a área de desmatamento, por meio da não exploração de locais que tenham a espessura de colúvio inferior a 2 m, a qual é anti-econômica.

Foi prevista a utilização na barragem apenas dos solos coluvionares que se encontra na superfície e apresenta condições bastante satisfatórias de resistência, permeabilidade, deformabilidade e trabalhabilidade no campo.

4.1.2.2. Jazidas de Areia.

Foi verificado que no trecho do rio Sapucaí, que engloba o local das obras, não há depósitos de areia propícios.

Os ensaios realizados sobre amostras da areia revelaram principalmente que:

- Raramente as areias apresentaram quantidade de matéria orgânica superior a 330 p.p.m.;
- Nos testes de reatividade potencial, pelo método químico, as amostras ensaiadas se apresentaram inócuas.

4.1.2.3. Pedreiras.

O balanceamento de materiais da obra indica que o volume das escavações obrigatórias em rocha é superior ao necessário às obras do barramento, isto significa que a priori não há necessidade da exploração de pedreiras adicionais.

4.3. Dimensionamento da Barragem.

A seleção do eixo e do tipo da barragem foi baseada no arranjo e nas dimensões das estruturas que compõem o barramento. No caso, o aproveitamento se dá com a casa de força ao pé da barragem, em um vale estreito, onde o vertedouro e a tomada d'água ocupam uma parcela importante da seção do barramento, conduzindo dessa forma ao fechamento da seção com barragem de concreto.

A barragem deve ser de concreto armado, tipo gravidade maciça, com fundação em rocha sã. A fundação deve ser muito bem estudada devido à necessidade de se tê-la em rocha bem firme, necessitando de escavação no local até 4 metros abaixo do nível do rio.

Esse tipo de barragem resiste à pressão da água do reservatório e à subpressão das águas infiltradas pela fundação, através de seu peso próprio.

No local existem jazidas para produção de brita e areia para fabricação do concreto. O cimento é de fácil compra na região (Ribeirão Preto), não havendo problemas com materiais para o concreto.

4.3.1 Dimensões.

4.3.1.1. Inclinação dos taludes.

Caracterizada pelos coeficientes de inclinação m e j dados abaixo:

$$m = 4/3 = 1,33$$

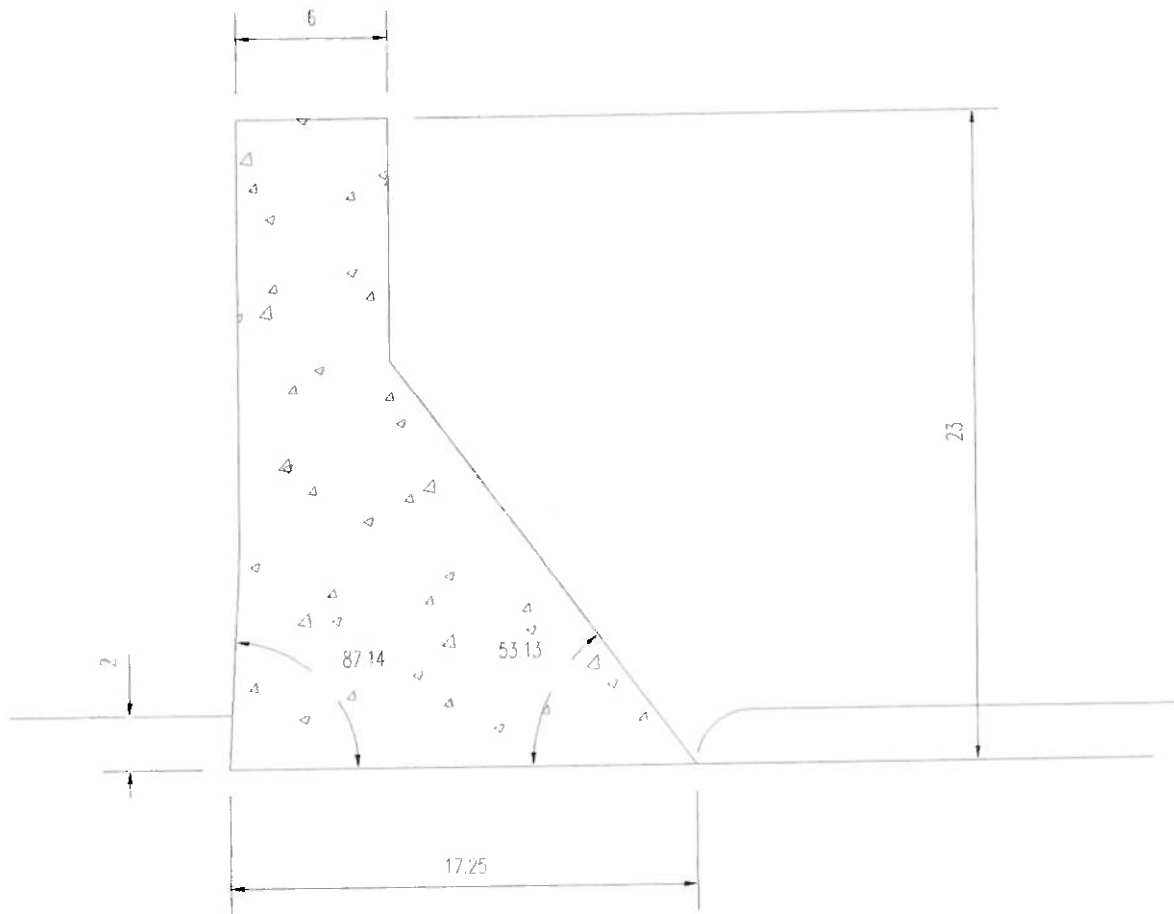
$$j = 20/1 = 20,00$$

No caso,

$$\theta_j = \arctan\left(\frac{1,33}{1}\right) = 53,13^\circ$$

$$\theta_n = \arctan\left(\frac{20}{1}\right) = 87,14^\circ$$

Observa-se no desenho abaixo, as dimensões gerais da barragem:



A altura de queda de projeto é de 16,5 m (nível da água).

Cálculo da Base:

Largura da Base = 0,75.Hb

onde: Hb - Altura da barragem.

$Lb = 0,75.23 = 17,25.$

4.3.2. Esforços .

4.3.2.1. Esforços Atuantes.

Cálculo do módulo das forças:

$$F_H = \frac{1}{2} \gamma_a \cdot H^2 \cdot L = \frac{1}{2} 116,5^2 \cdot 1 = 136 \text{ tf / m comprimento da barragem}$$

onde:

γ_a - peso específico da água;

H - Altura da coluna de água;

L - comprimento da barragem (barragem);

Ponto de Aplicação: a 5,50 m do ponto A.

$$F_s = \frac{1}{2} \gamma_a \cdot m \cdot H \cdot B = \frac{1}{2} 1 \cdot 0,5 \cdot 16,5 \cdot 17,25 = 71,16 \text{ tf / m}$$

onde:

m - Coeficiente de subpressão.

Ponto de Aplicação: a 15,46 m do ponto B.

4.3.2.2. Esforços Resistentes

$$E = \int_s p \cdot n \cdot ds$$

$$E = \int_s \gamma_a \cdot z \cdot b \cdot ds = \int_s \gamma_a \cdot z \cdot b \cdot \frac{dz}{\sin(87,14^\circ)} = \frac{\gamma_a \cdot b \cdot z^2}{1,998} \Big|_0^H = \frac{\gamma_a \cdot 1,6 \cdot 5^2}{1,998} = 136,26 \text{ tf/m}$$

$$F_v \Rightarrow \cos(87,14^\circ) = \frac{F_v}{E} \Rightarrow F_v = 6,8 \text{ tf.}$$

$$F_H \Rightarrow \sin(87,14^\circ) = \frac{F_H}{E} \Rightarrow F_H = 136,09 \text{ tf.}$$

F_v aplicada a 5,46 m do ponto B.

F_H aplicada a 5,50 m de AB.

Peso Específico do Concreto a ser utilizada na execução:

$$\gamma_{\text{max}} = 2,4 \frac{\text{tf}}{\text{m}^3}$$

$$G1 = \frac{1}{2} \gamma_{\text{conc}} \cdot \left(\frac{\Pi}{2} - \theta_j \right) \cdot H_1^2 \cdot L = \frac{1}{2} 2,4 \cdot 0,64 \cdot 23^2 = 406,27 \text{ tf/m}$$

$$G2 = \frac{1}{2} \gamma_{\text{arg}} \cdot \left(\frac{\Pi}{2} - \theta_{nj} \right) \cdot H_1^2 \cdot L = \frac{1}{2} 0,0499 \cdot 2,4 \cdot (23)^2 = 31,67 \text{ tf/m}$$

$$G3 = \frac{1}{2} \gamma_{\text{arg}} \cdot S \cdot L = 2,4 \cdot 6,23 = 331 \text{ tf/m}$$

G1 aplicado a 9,74 m do ponto B.
G2 aplicado a 15,76 m do ponto B.
G3 aplicado a 11,67 m do ponto B.

onde:

H1 - altura total da barragem.

4.3.3. Verificação da Estabilidade.

4.3.3.1. Ao Tombamento.

$$\sum M_{RB} = G1.9,71 + G2.15,76 + G3.11,67 + F_v.15,46 = 8307 \text{ tf.m}$$

$$\sum M_{AB} = F_H.5,5 + F_s.15,46 = 1870 \text{ tf.m.}$$

$$s = \frac{\sum M_{RB}}{\sum M_{AB}} = 4,4 \Rightarrow \text{Coeficiente de Segurança ao Tombamento.}$$

4.3.3.2. Ao Escorregamento.

$$f_e = \frac{F_H}{G1 + G2 + G3 + F_v - F_s} = 0,19$$

Como o coeficiente de escorregamento calculado é menor que o esperado, entre o concreto e o solo da fundação, que é de 0,76, não haverá escorregamento.

4.3.4. Percolação de Água.

Como a barragem será de concreto armado, o efeito de percolação de água só poderá se dar através das fundações da mesma. Serão feitas injeções de cimento na fundação da barragem para efeito de tratamento e isto ajudará a inibir uma possível percolação.

4.3. Dimensionamento do Vertedouro.

- Vazão de cheia de projeto (decamilenar): $515 \text{ m}^3/\text{s} = 18184 \text{ ft}^3/\text{s}$

- Lei do perfil do vertedouro: $Q = CLH^2$

Admito $C=3,55$, com $H_e=5,0 \text{ m}$ ($16,41 \text{ ft}$).

Logo:

$$L = \frac{18184}{3,55 \times (16,41)^2} = 77,05 \text{ ft} \text{ (} 23,5 \text{ m)}$$

Para $C=3,55$ (pág. 276 do “Small Dams...”)

$$\frac{P}{H_o} = 0,2 \rightarrow P \cong 3,3 \text{ ft. Admito } P = 4 \text{ ft, logo} \left\{ \begin{array}{l} \frac{P}{H_o} = 0,244 \\ C_o = 3,63 \\ L = 75,35 \text{ ft} \end{array} \right.$$

- Descarga por metro: $q = \frac{18184}{75,5} = 240,85$

- Velocidade de aprox: $V_a = \frac{q}{H_e + P} = \frac{240}{16,41 + 4} = 11,80 \text{ ft / seg}$

- Carga no vértice: $h_a = \frac{V_a^2}{2g} = \frac{11,80^2}{64,4} = 2,16 \text{ ft}$

- Cálculo da perda no canal de entrada do vertedouro:

- Fórmula de Manning: $V_a = \frac{1,486}{n} * (r_h^{\frac{2}{3}}) * s^{\frac{1}{2}}$

n recomendado: 0,15006

$r_h = P + H_e = 20,41 \text{ ft}$ (aproximação).

$$s = \left(\frac{V_a * n}{1,486 * r_h^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = \left(\frac{11,80 * 0,15006}{1,486 * 20,41^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = 0,000167$$

- Mas temos que: $\frac{h_f}{l} = 0,000167$

- Fazendo $l=40$ ft (comprimento do canal do vertedouro).

Logo:

$$h_f = 40 * 0,000167 = 0,0067 \text{ ft}$$

- Perda de carga devido a entrada no canal:

$$h_{in} \approx 0,1 * V_a = 1,180 \text{ ft}$$

- Cálculo da carga efetiva no vértice:

$$H_{ef} = H_e - (h_f + h_{in}) = 16,41 - (0,0067 + 1,180) \cong 15,113 \text{ ft}$$

Corrigindo:

$$\frac{P}{H_{ef}} = \frac{4}{15,113} = 0,265 \therefore C_{Oef} = 3,65.$$

$$P + H_{ef} = h_d + d$$

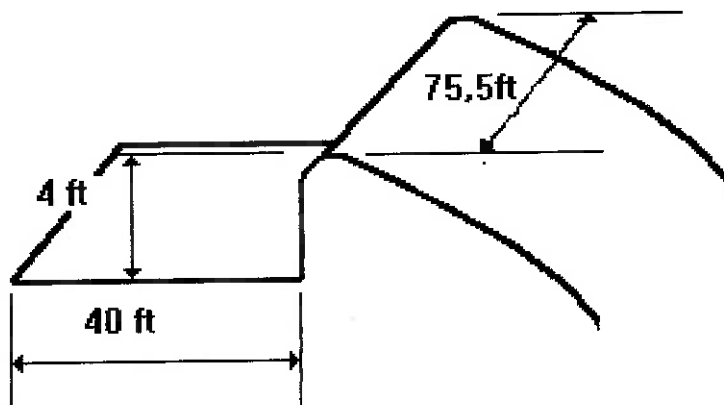
$$4 + 15,113 = h_d + d = 19,1113$$

$$\frac{h_d + d}{H_{ef}} = \frac{19,1113}{15,1113} \cong 1,26$$

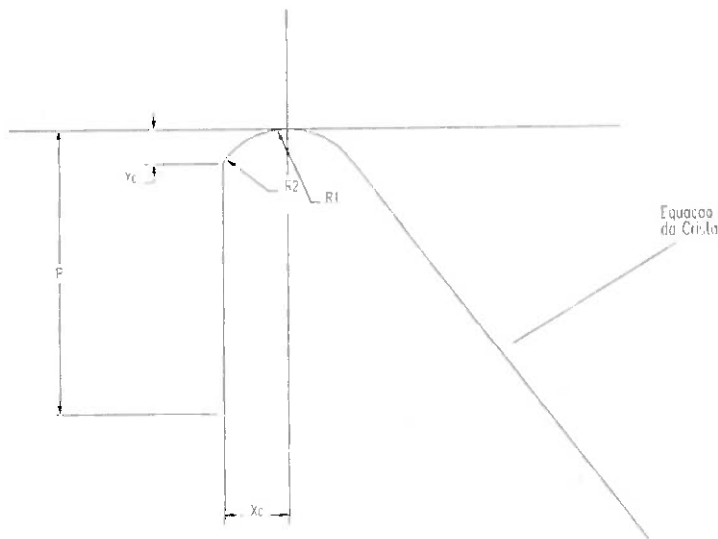
Para escoamento supercrítico: $\frac{h_d}{H_{ef}} = 0,7$

Logo: $h_d = 0,7 * 15,1113 = 10,58$
 $d = 19,1113 - 10,58 \cong 8,5 \text{ ft}$

Perfil do vertedouro:



4.4. Dimensionamento da Crista do Vertedouro.



$$\text{Equação da Crista: } \frac{y}{H_0} = -K \left(\frac{x}{H_0} \right)^n$$

Do dimensionamento do vertedouro: $h_a = 2,16$ ft

$$h_o = 16,41 \text{ ft}$$

$$H_o = 18,57 \text{ ft}$$

$$\frac{h_a}{H_o} = \frac{2,16}{18,57} = 0,116$$

Pelos gráficos do "Small Dams" pág 272 $\Rightarrow K=0,51$ (incl. vertical a montante).

$$n = 1,832$$

Portanto:

$$\frac{x_c}{H_o} = 0,225 \Rightarrow x_c = 4,18 \text{ ft} ; \quad \frac{R_1}{H_o} = 0,485 \Rightarrow R_1 = 9,0 \text{ ft}$$

$$: \quad \frac{y_c}{H_o} = 0,077 \Rightarrow y_c = 1,43 \text{ ft} ; \quad \frac{R_2}{H_o} = 0,200 \Rightarrow R_2 = 3,7 \text{ ft}$$

4.5. Pré Dimensionamento da Bacia de Dissipação.

No pré dimensionamento da bacia de dissipação, desconsidera-se os efeitos de dissipação de energia.

Assim, considerando-se que a altura da crista do vertedouro é de 55,81 ft e que a profundidade de projeto neste ponto é de 5 m (16,41 ft), conclui-se que a carga total a ser considerada é $H=72,22$ ft.

Por Bernoulli, chega-se que, no início da bacia de dissipação, a velocidade do escoamento é dada pela seguinte equação (desconsiderando-se as perdas):

$$V_1 = \sqrt{2 * g * H}$$

Logo, temos que: $V_1 = \sqrt{2 * 32,2 * 72,22} = 68,2$ ft / seg

Mas, sabe-se que: $Q = V * A$, onde $A = b * y$, com - b : largura do canal
 y : prof. do canal.

Fazendo $b = 75,5$ ft (largura do vertedouro), tem-se:

$$18184 = 68,2 * 75,5 * y_1 \Rightarrow y_1 \cong 3,46 \text{ ft}$$

Para o dimensionamento da bacia de dissipação é necessário calcular o número de

Froude: $F = \frac{V}{\sqrt{g * y}} = \frac{68,2}{\sqrt{32,2 * 3,46}} = 6,46 \Rightarrow$ segundo o "Small Dams" - bacia tipo 3.

É necessário também determinar a altura do leito do rio em relação a bacia de dissipação (T.W.). Pelo "Small Dams", tem-se a relação:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F^2} - 1 \right) = 8,661$$

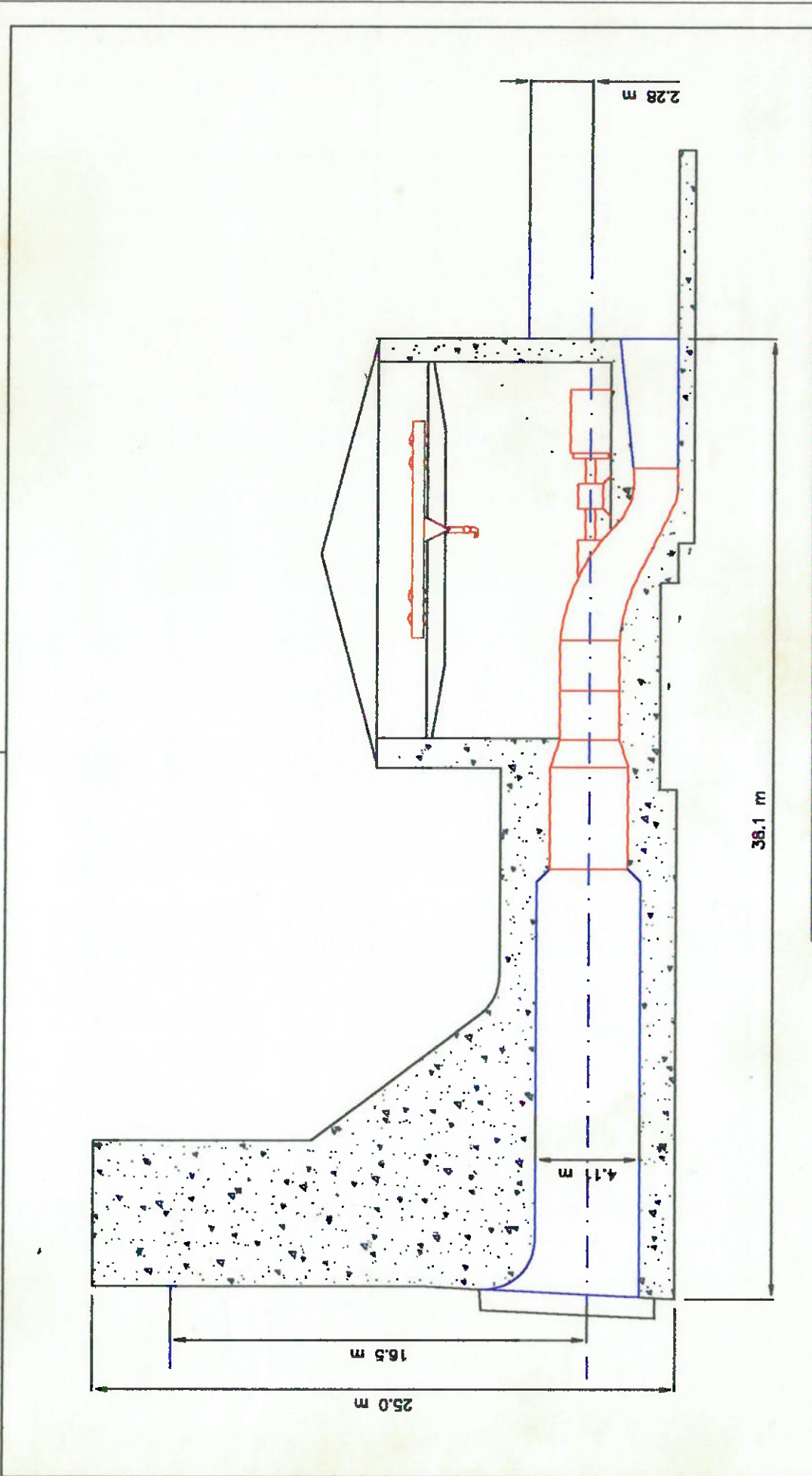
Logo, $y_2 = 29,97$ ft $\cong 30$ ft.

Para $F=6,48$, segundo o "Small Dams" pg. 298 :

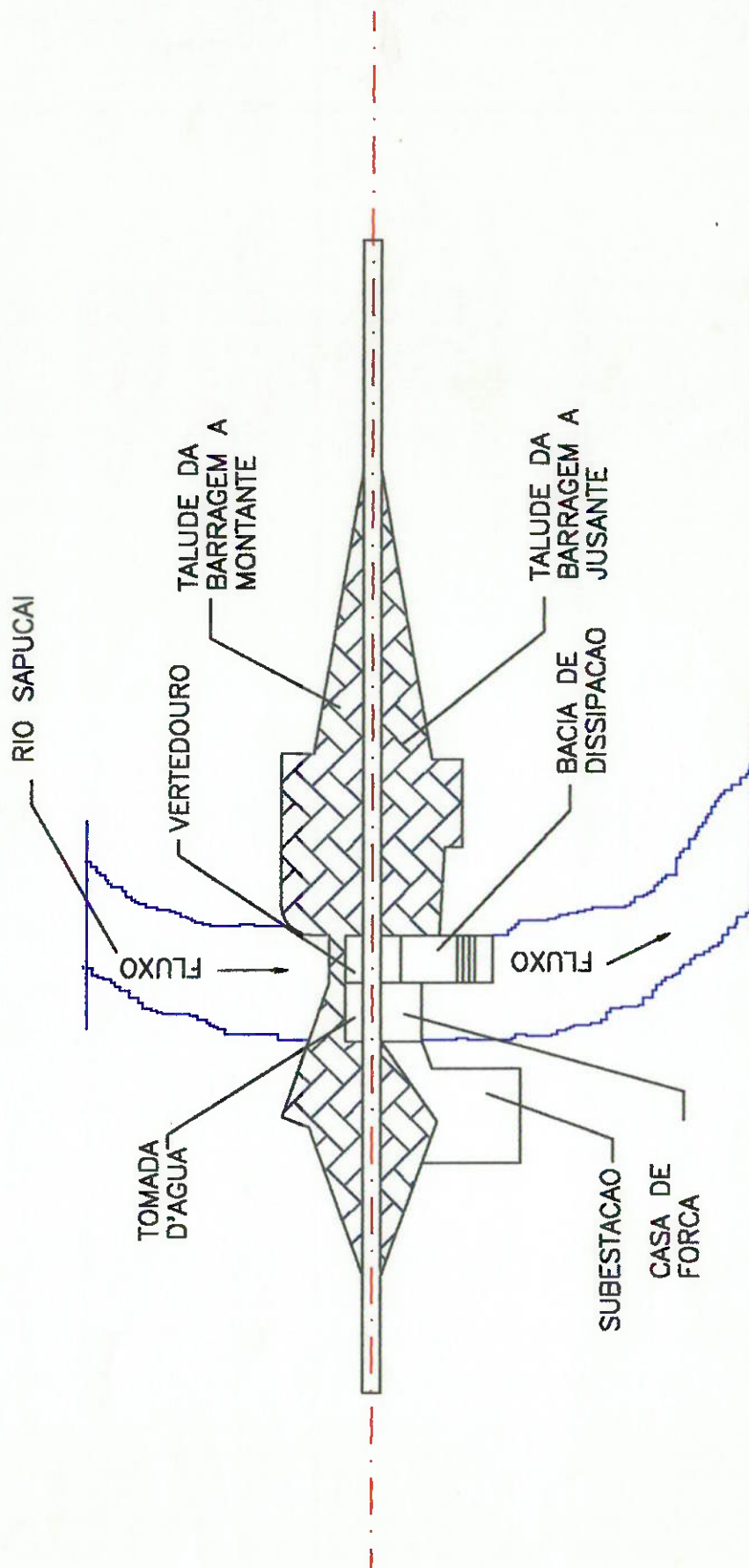
$$\frac{T.W.}{y_1} = 9,2 \Rightarrow T.W. = 31,832 \text{ ft}$$

O comprimento da bacia será dado, para $F=6,48$, por:

$$\frac{L}{y_2} = 4,1 \therefore L = 4,1 * 30 = 130,5 \text{ ft.}$$



EPUSP	DATA: 11/12/96	TITULO: REPRESENTAÇÃO DO CORTE TOTAL DA USINA - UHE POLI
	ESCALA: S / E	

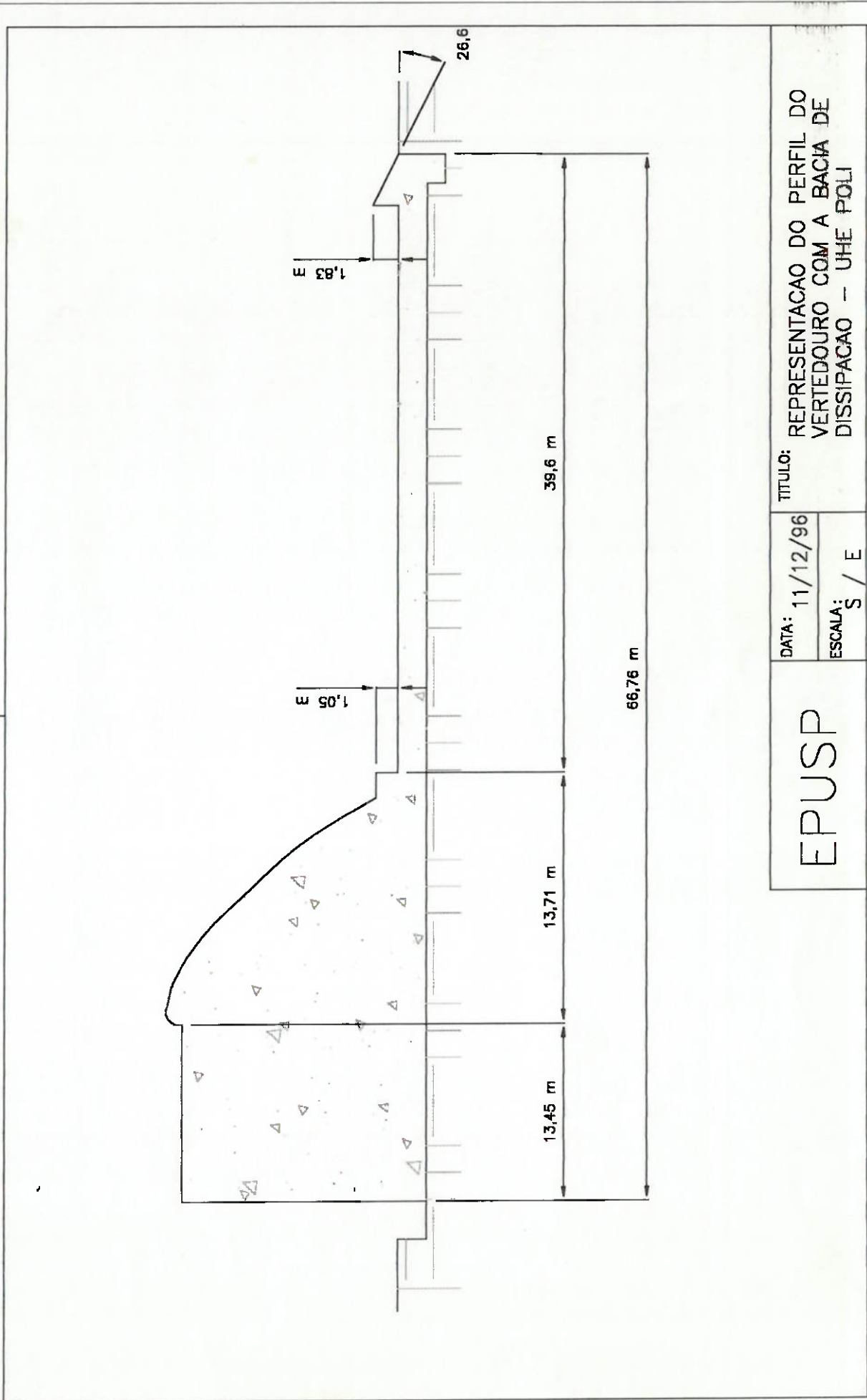


TITULO: LAY - OUT DA INSTALACAO
COM SEUS COMPONENTES
PRINCIPAIS - UHE POLI

DATA: 11/12/96

ESCALA: S / E

EPUSP



EPUSP

DATA: 11/12/96

ESCALA: S / E

TITULO: REPRESENTACAO DO PERFIL DO
VERTEDOURO COM A BACIA DE
DISSIPACAO - UHE POLI

SERIE DISPONIVEL DE DESCARGAS MEDIAS MENSAIS (m3 / s).

Rio : Sapucaí

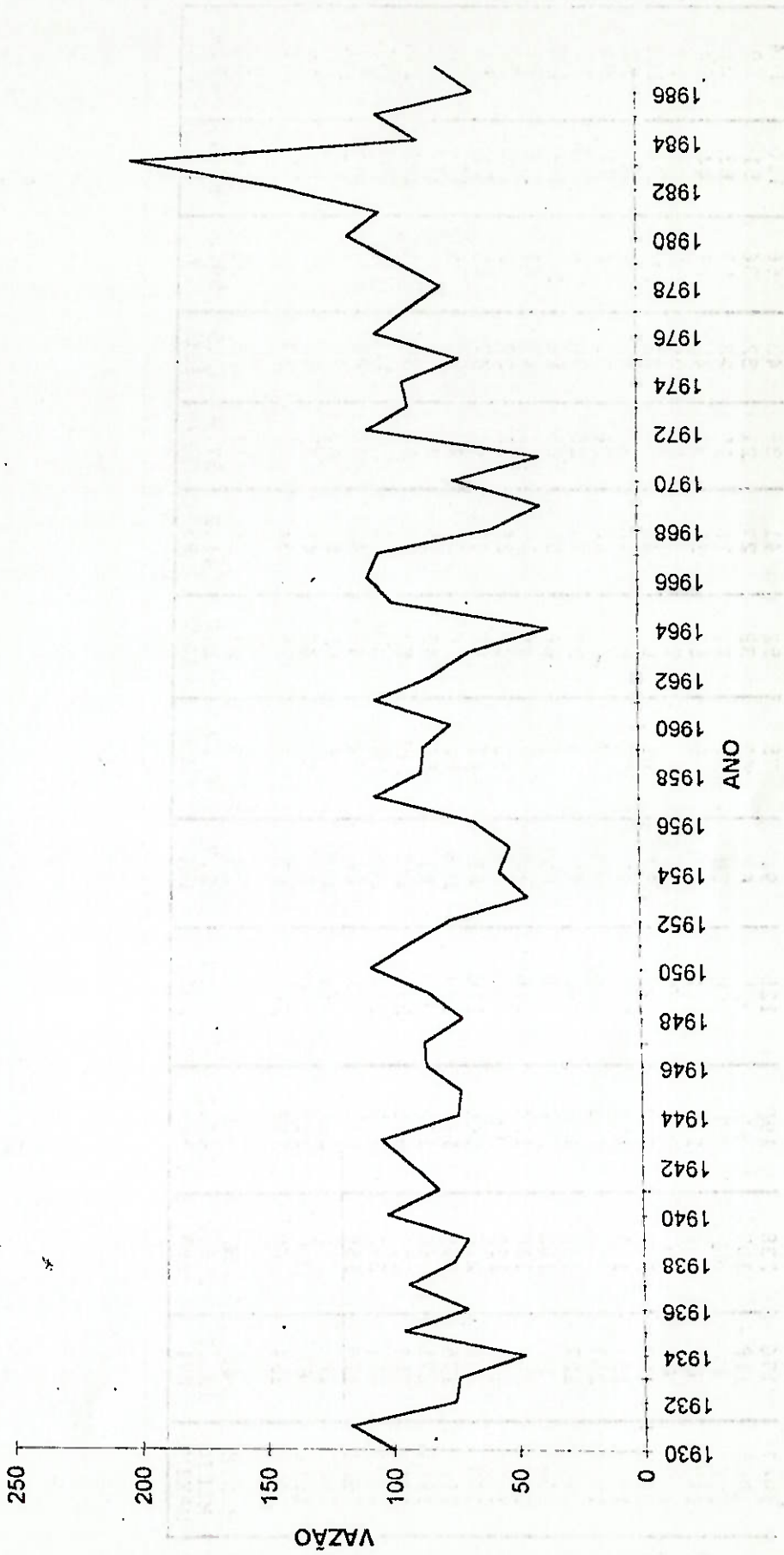
ANO	JAN.	FEV.	MAR.	ABR.	MAI.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OUT.	NOV.	DEZ.	Média
1930	139	230	194	131	87	66	53	41	39	43	53	131	101
1931	164	312	230	168	112	88	65	50	49	49	52	68	117
1932	95	140	122	84	63	55	43	36	34	46	52	138	76
1933	204	147	116	83	63	49	43	36	33	35	32	50	74
1934	75	71	63	55	43	37	33	31	33	33	28	72	48
1935	120	202	160	133	92	69	53	43	42	78	58	101	96
1936	87	77	119	93	61	50	40	36	35	32	53	162	70
1937	268	160	126	92	72	58	43	37	31	49	72	120	94
1938	146	130	112	86	78	57	43	35	32	42	48	101	76
1939	133	130	92	83	69	54	45	35	30	28	43	99	70
1940	162	211	188	140	102	75	58	42	34	37	85	88	102
1941	183	138	110	99	62	53	44	32	49	43	72	94	82
1942	100	149	186	152	111	84	67	51	41	39	53	76	92
1943	168	203	194	145	104	80	60	44	37	56	73	87	104
1944	96	118	164	122	84	61	47	37	28	33	47	43	73
1945	56	148	116	96	70	57	46	38	30	32	68	110	72
1946	181	136	152	122	89	69	60	43	34	44	48	55	86
1947	117	113	183	124	89	68	54	41	45	52	57	94	86
1948	113	137	143	102	70	54	40	26	22	25	53	73	72
1949	116	165	145	124	92	70	54	41	34	34	42	97	85
1950	162	243	189	140	96	71	57	46	41	43	66	139	108
1951	154	205	165	140	94	74	57	49	36	39	46	52	93
1952	63	102	191	116	79	67	56	51	41	44	64	41	76
1953	45	54	64	63	41	36	35	27	26	31	46	75	45
1954	66	132	86	72	69	52	35	31	26	24	31	50	56
1955	76	63	89	73	53	43	32	28	20	27	40	81	52
1956	84	85	105	75	73	65	48	49	38	35	42	93	66
1957	165	199	166	156	115	85	72	57	56	44	69	86	106
1958	91	122	133	105	113	94	73	57	62	61	61	77	87
1959	148	173	158	128	88	70	54	44	40	32	52	52	87
1960	104	153	140	98	76	61	50	31	26	27	52	85	75
1961	159	232	248	154	117	81	61	46	33	34	50	49	105
1962	85	130	165	113	77	73	46	36	43	54	55	121	83
1963	173	159	113	75	58	49	43	36	29	23	33	19	68
1964	40	62	51	35	41	29	28	18	15	29	30	54	36
1965	138	193	198	127	95	69	60	47	38	60	55	102	99
1966	166	171	236	166	114	79	61	47	37	44	74	102	108

1967	176	238	190	125	91	75	52	41	39	43	66	110	104
1968	118	107	95	67	63	48	38	27	21	32	36	51	59
1969	47	51	57	43	38	30	21	18	15	28	57	63	39
1970	85	150	148	112	78	59	50	35	38	42	45	44	74
1971	41	36	41	37	25	30	21	19	20	36	35	129	39
1972	159	207	204	135	82	65	68	49	39	62	110	113	108
1973	133	123	111	158	97	72	61	46	38	44	76	141	92
1974	207	125	181	149	101	77	60	44	36	35	36	77	94
1975	127	120	108	96	61	43	38	31	25	30	74	103	71
1976	73	162	146	158	95	81	66	56	85	86	109	140	105
1977	203	180	124	116	73	57	48	37	41	47	61	116	92
1978	186	135	95	62	57	52	45	47	28	38	72	135	79
1979	176	216	166	116	85	67	56	47	47	47	60	71	96
1980	175	198	188	167	108	88	76	53	43	36	76	180	116
1981	271	160	112	98	61	56	43	38	30	71	103	195	103
1982	253	227	305	213	142	111	83	65	59	74	69	132	144
1983	251	393	317	238	168	193	126	93	117	150	177	201	202
1984	186	138	113	90	84	54	49	41	44	45	92	119	88
1985	182	185	228	161	110	86	65	53	43	32	52	57	105
1986	87	97	117	81	81	50	46	49	37	39	25	82	66
1987	124	160	136	102	87	64	59	34	35	39	49	77	81
MINIMO	40	36	41	35	25	29	21	18	15	23	25	19	36
MEDIO	136.2	155.2	148.2	113.7	82.7	65.7	52.2	41.2	37.9	43.7	59.2	94.4	85.9
MAXIMO	271	393	317	238	168	193	126	93	117	150	177	201	202

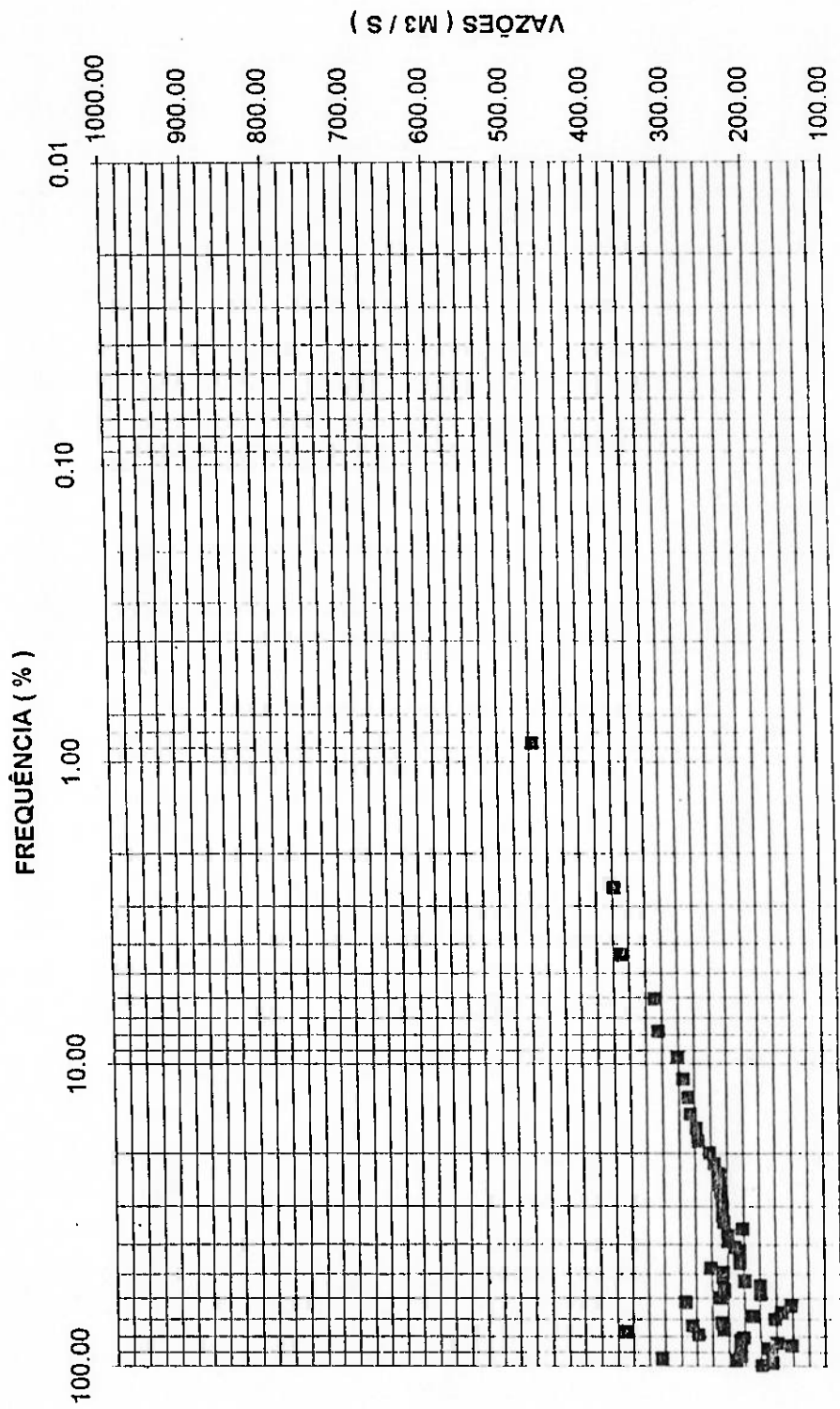
Vazão Máxima no Posto Pioneiros m ³ / s.	Vazão Corrigida para o Local da Barragem. m ³ / s.	Ordem	Vazão em Ordem Crescente m ³ / s.	Frequência
230.00	278.39	1	475.09	0.86
312.00	377.65	2	377.65	2.59
140.00	169.46	3	369.17	4.31
204.00	246.92	4	328.02	6.03
75.00	90.78	5	324.49	7.76
202.00	244.50	6	300.18	9.43
162.00	196.09	7	294.13	11.51
268.00	324.39	8	288.08	12.97
146.00	176.72	9	268.66	14.66
133.00	160.98	10	274.39	16.39
211.00	255.40	11	275.97	18.16
183.00	221.50	12	261.45	19.44
186.00	225.14	13	255.43	21.53
203.00	245.71	14	250.55	23.28
164.00	198.51	15	250.55	25.03
148.00	179.14	16	248.13	26.72
181.00	219.08	17	246.92	28.15
183.00	221.50	18	245.71	29.77
143.00	173.09	19	245.71	31.40
165.00	199.72	20	244.50	32.93
243.00	294.13	21	240.87	34.41
205.00	248.13	22	239.66	35.84
191.00	231.19	23	239.66	37.27
75.00	90.78	24	231.19	38.65
132.00	159.77	25	225.14	40.03
89.00	107.73	26	225.14	41.40
105.00	127.09	27	225.14	42.78
199.00	240.87	28	221.50	44.11
133.00	160.98	29	221.50	45.44
173.00	209.40	30	219.08	46.76
153.00	185.19	31	209.40	48.03
248.00	300.18	32	209.40	49.31
165.00	199.72	33	199.72	50.58
173.00	209.40	34	199.72	51.76
62.00	75.05	35	198.51	52.93
198.00	239.66	36	198.09	54.11
236.00	285.00	37	198.09	55.28
238.00	288.08	38	193.67	56.46
118.00	142.83	39	191.24	57.63
63.00	76.26	40	185.19	58.81
150.00	181.56	41	181.56	59.93
129.00	156.14	42	179.14	61.05
207.00	250.55	43	176.72	62.18
158.00	191.24	44	173.09	63.30
207.00	250.55	45	169.46	64.42
127.00	153.72	46	160.98	65.45
162.00	196.09	47	160.98	66.17
203.00	245.71	48	159.77	67.09
186.00	225.14	49	156.14	68.02
216.00	261.45	50	153.72	68.34
198.00	239.66	51	142.83	67.07

271.00	328.02	52	141.00	87.75
305.00	369.17	53	127.00	90.75
393.00	475.69	54	107.75	93.81
186.00	225.14	55	90.78	95.87
228.00	275.97	56	90.76	95.89
117.00	141.62	57	76.26	97.41
160.00	193.67	58	75.05	98.11
Média = 180,02				
Desvio Padrão = 61,37				

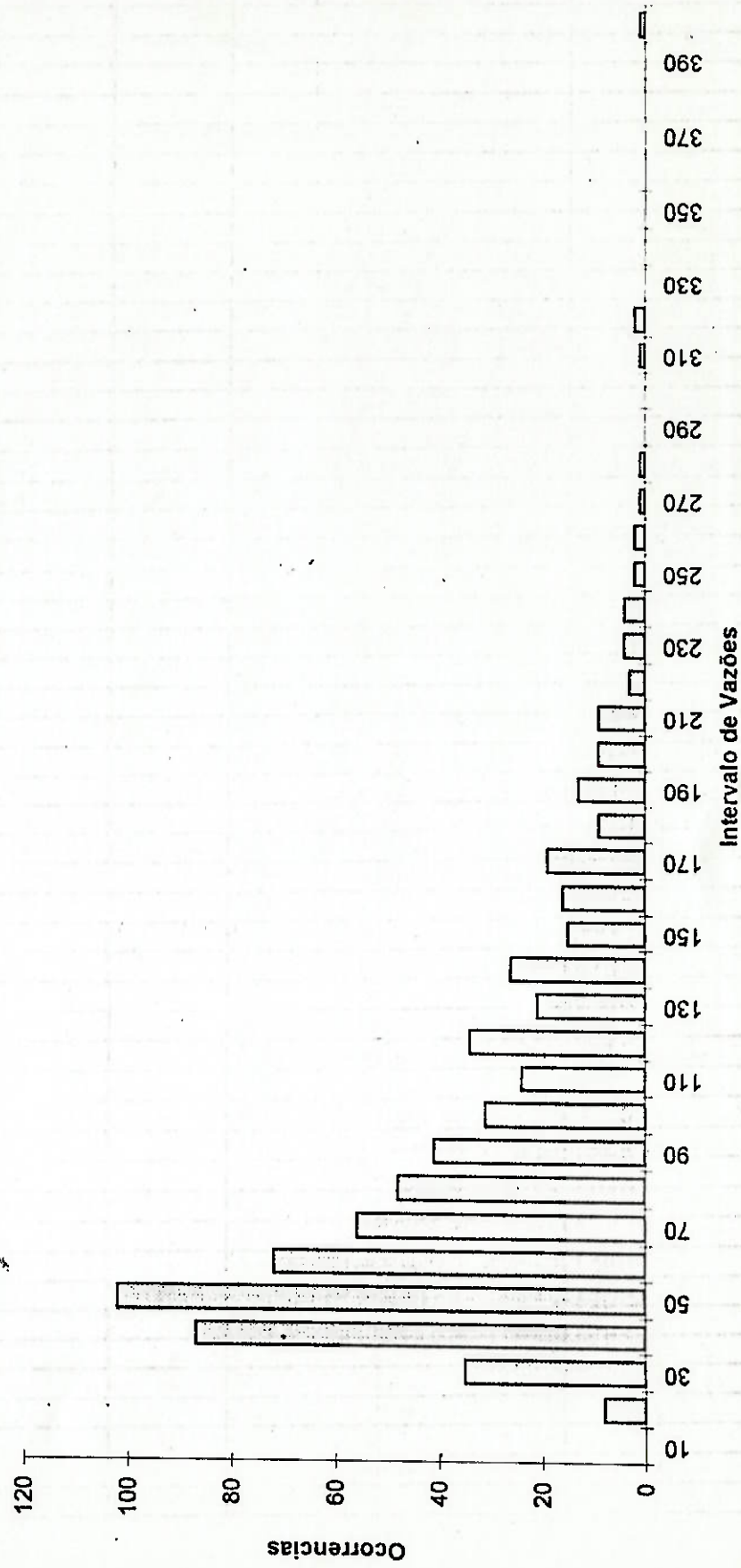
FLUVIOGRAMA



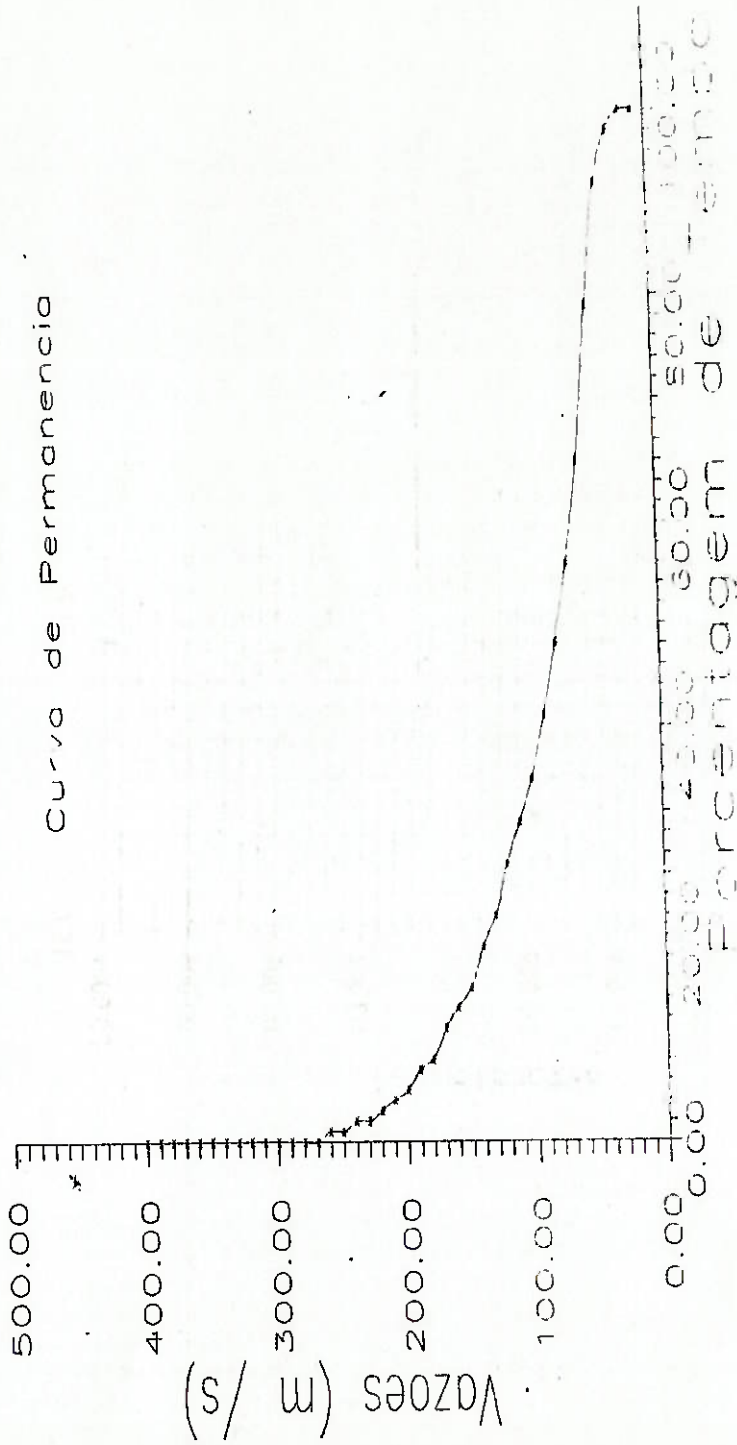
FREQUÊNCIA DE CHEIAS



Histograma das Vazões

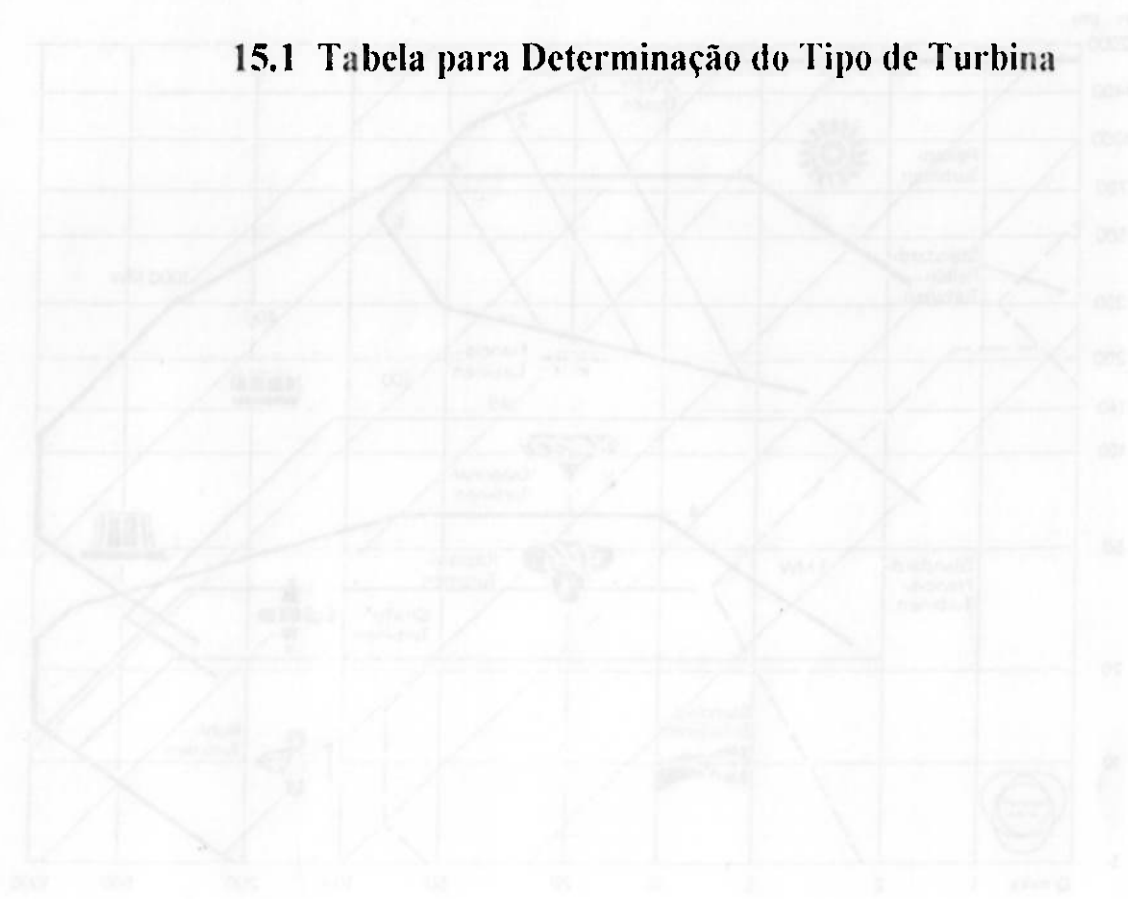


Curva de Permanencia



15. Anexo 2 - Tabelas, Catálogos e Ábacos.

15.1 Tabela para Determinação do Tipo de Turbina



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

15.2 Catálogo do Fabricante - Tubular S (Mecânica Pesada).

As tubulações fabricadas em aço carbono, tipo "A", são utilizadas para a transmissão de fluidos em altas pressões e temperaturas. São fabricadas em conformidade com as normas técnicas vigentes e possuem características técnicas superiores às exigidas pelo projeto. As tubulações são fabricadas em aço carbono, tipo "A", e são utilizadas para a transmissão de fluidos em altas pressões e temperaturas. São fabricadas em conformidade com as normas técnicas vigentes e possuem características técnicas superiores às exigidas pelo projeto.

- Distribuidor tipo "A" com 100 mm de diâmetro;
- Distribuidor tipo "B" com 150 mm de diâmetro;
- Distribuidor tipo "C" com 200 mm de diâmetro;
- Distribuidor tipo "D" com 250 mm de diâmetro;

A escolha de materiais para tubulações deve considerar as condições de operação, a natureza dos fluidos transportados, a temperatura, a pressão, a corrosão, etc. Os materiais devem ser selecionados de acordo com as normas técnicas vigentes e devem ser submetidos a ensaios mecânicos e químicos para garantir a qualidade e a segurança. As tubulações devem ser fabricadas em conformidade com as normas técnicas vigentes e devem ser submetidos a ensaios mecânicos e químicos para garantir a qualidade e a segurança.

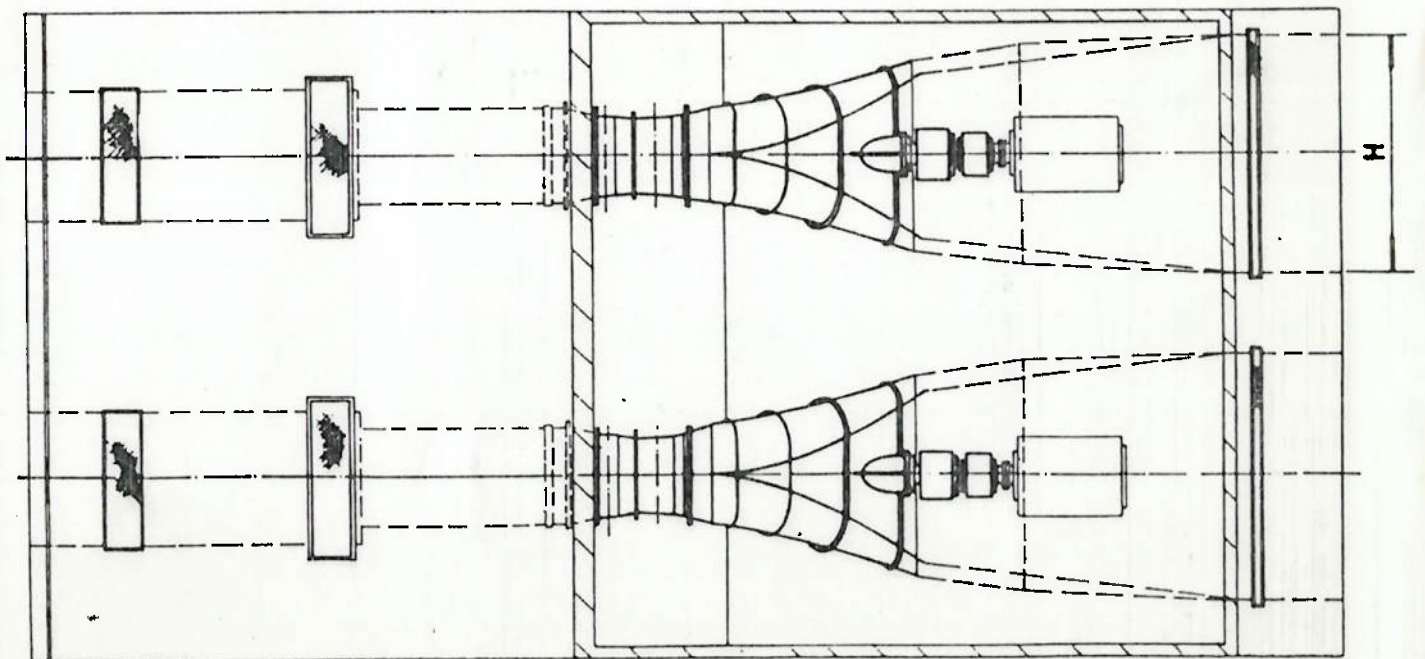
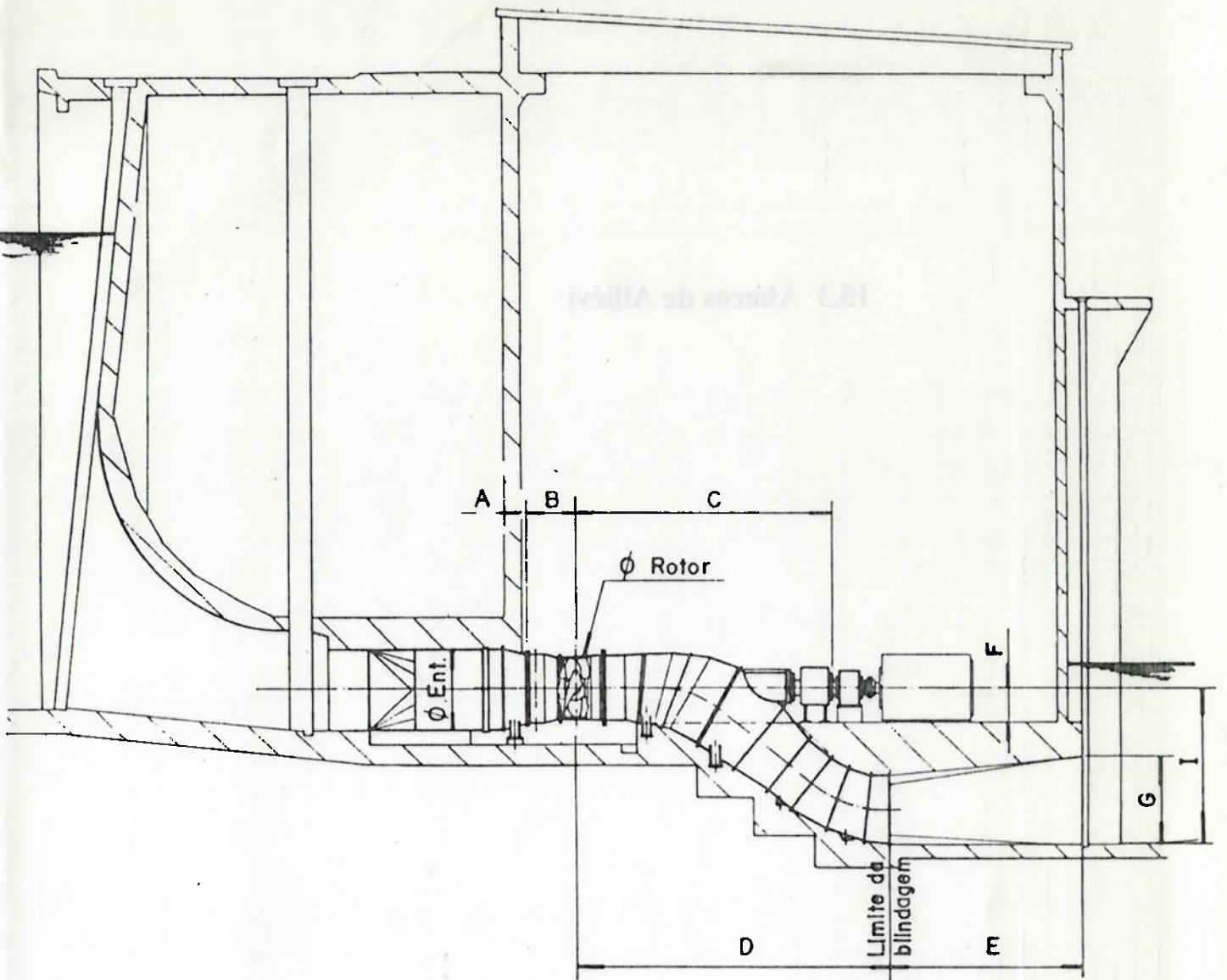
DIMENSÕES PADRONIZADAS DO CONDUITO HIDRÁULICO

Tipo de cubo do rotor	640		810		1000	
Diâmetro do rotor	1500	1700	1900	2120	2360	2650
∅ Ent.	1960	2220	2480	2760	3080	3450
A	700	800	900	1000	1120	1250
B	1260	1430	1600	1780	1980	2220
C	3780	4280	4790	5340	5950	6680
D	5570	6310	7050	7870	8760	9840
E	3260	3690	4130	4600	5120	5750
F*	510	580	650	720	800	900
G	1470	1670	1860	2080	2320	2600
H	3860	4370	4890	5450	6070	6810
I	2210	2510	2800	3130	3480	3910

As dimensões estão em mm e são aproximadas

* Dimensão a ser confirmada com o gerador / multiplicador





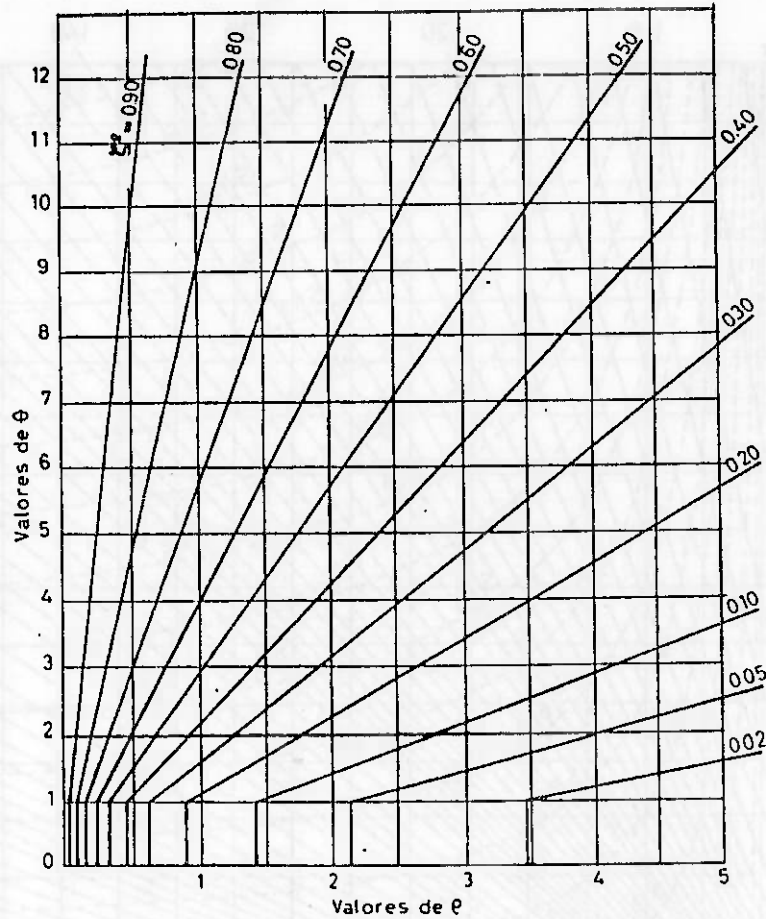


FIG. 54. Ábaco de Allievi para obtener la máxima depresión al abrir el distribuidor de la turbina.

producen las sobrepresiones más peligrosas, y por ello es posible la aplicación del método de sustitución indicado.

Ejemplo de cálculo por la teoría de Allievi. Se supone una tubería compuesta de distintos trozos de diversas secciones y que calculada la celeridad de las ondas por la fórmula (1) se obtiene $a = 840$; asimismo la velocidad correspondiente es de 3,2 m/seg, el caudal $15 \text{ m}^3/\text{seg}$, la longitud de la tubería 270 m y la presión estática H , en el final de la tubería, alcanza el valor de 100 metros. En estas condiciones:

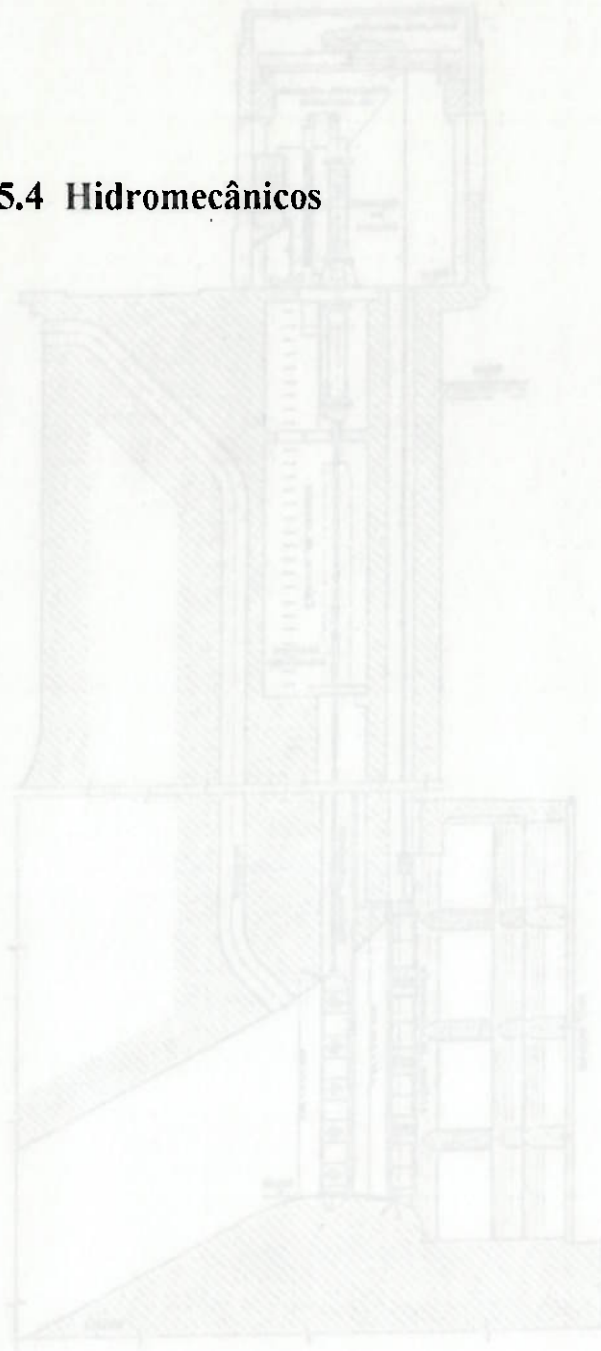
$$\mu = \frac{2 \cdot L}{a} = \frac{2 \cdot 270}{840} = 0,645,$$

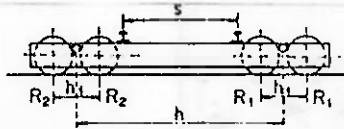
que es el *tiempo crítico*. Se considerarán los tres casos siguientes:

a) Determinación del tiempo de cierre mínimo para que la sobrepresión al final de la tubería no exceda, por ejemplo, del 51%, esto es: $h = 0,51 \cdot 100 = 51 \text{ m}$ de columna de agua.

b) Determinación de la máxima presión que se producirá en el final de la tubería (junto a la turbina), si el tiempo de cierre es por ejemplo de 2,75 segundos.

15.4 Hidromecânicos





C	L	d	h	h	x	b	y	s	P(t)				l
									máx.		mín.		
									R ₁	R ₂	R ₁	R ₂	
100	8 350	630	6 000	830	880	400	2 000	4 200	55	53	20	18	75
	10 850								59	56	19	16	
	13 350								62	59	18	15	
	15 850								65	62	18	15	
	18 350								68	65	18	15	
	20 850								70	66	19	15	
	23 350	72	68	20	16								
	25 850	74	70	21	17								
28 350	76	72	22	18									
125	8 350	710	6 300	910	960	400	2 200	4 400	68	65	26	23	75
	10 850					73			70	24	21		
	13 350					77			74	22	19	100	
	15 850					80			76	23	19		
	18 350					83			79	23	19		
	20 850					85			81	23	19		
	23 350					88			83	24	19		
	25 850					90			85	25	20		
28 350	93	88	28	23									
160	8 350	710	6 700	910	960	430	2 400	4 800	84	81	34	31	100
	10 850					90			87	31	28		
	13 350					96			93	28	25		
	15 850					100			96	28	24		
	18 350	103	99	28	24								
	20 850	107	102	29	24								
	23 350	110	104	30	24								
	25 850	113	106	32	25								
28 350	117	110	34	27									
200	8 350	900	7 600	1 100	1 150	450	2 400	5 300	106	102	44	40	100
	10 850					114			110	39	35		
	13 350					120			115	37	32		
	15 850					125			120	35	30		
	18 350	129	124	35	30								
	20 850	133	127	37	31								
	23 350	137	131	37	31								
	25 850	141	134	39	32								
28 350	145	138	42	35									
250	8 350	1 000	8 000	1 200	1 250	450	2 600	5 500	128	123	56	51	100
	10 850					139			134	50	45		
	13 350					147			142	46	41		
	15 850					152			146	44	38		
	18 350					157			151	43	37	129	
	20 850					162			155	44	37		
	23 350					166			159	44	37		
	25 850					170			162	47	39		
28 350	175	167	48	40									

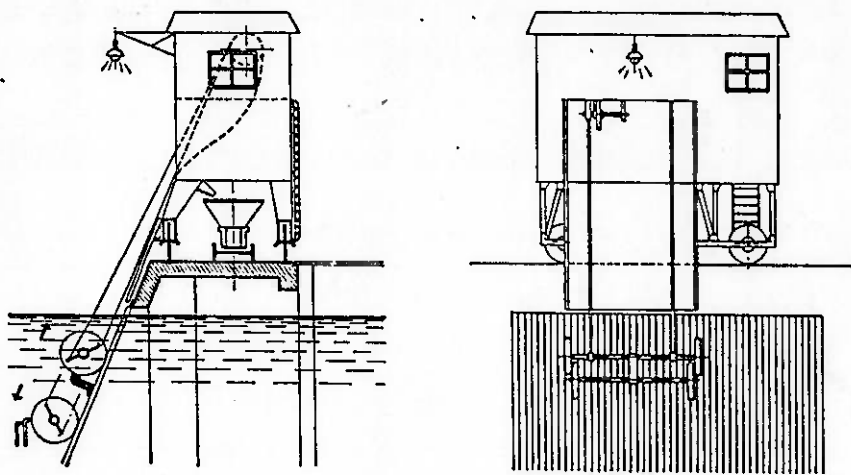
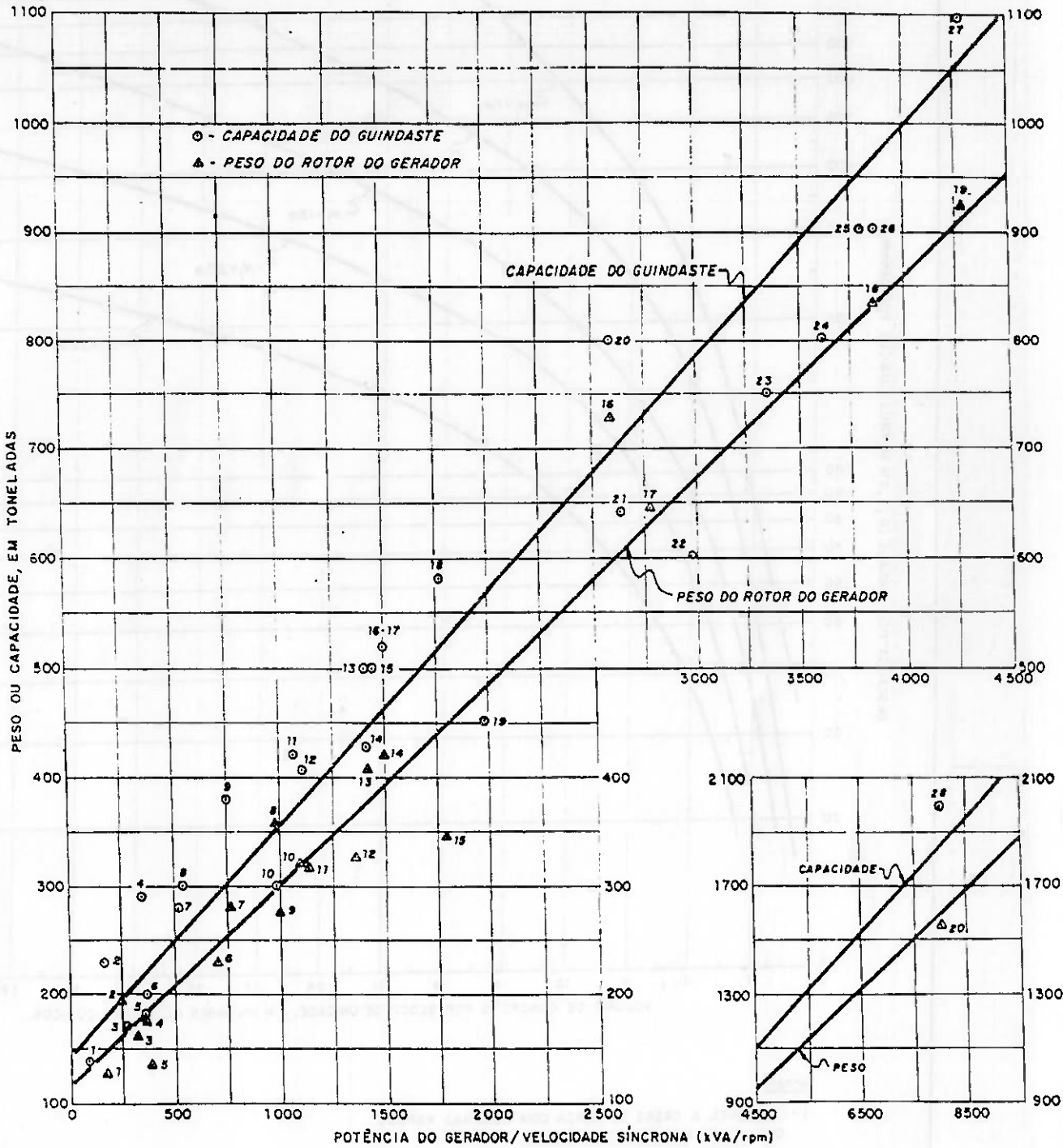


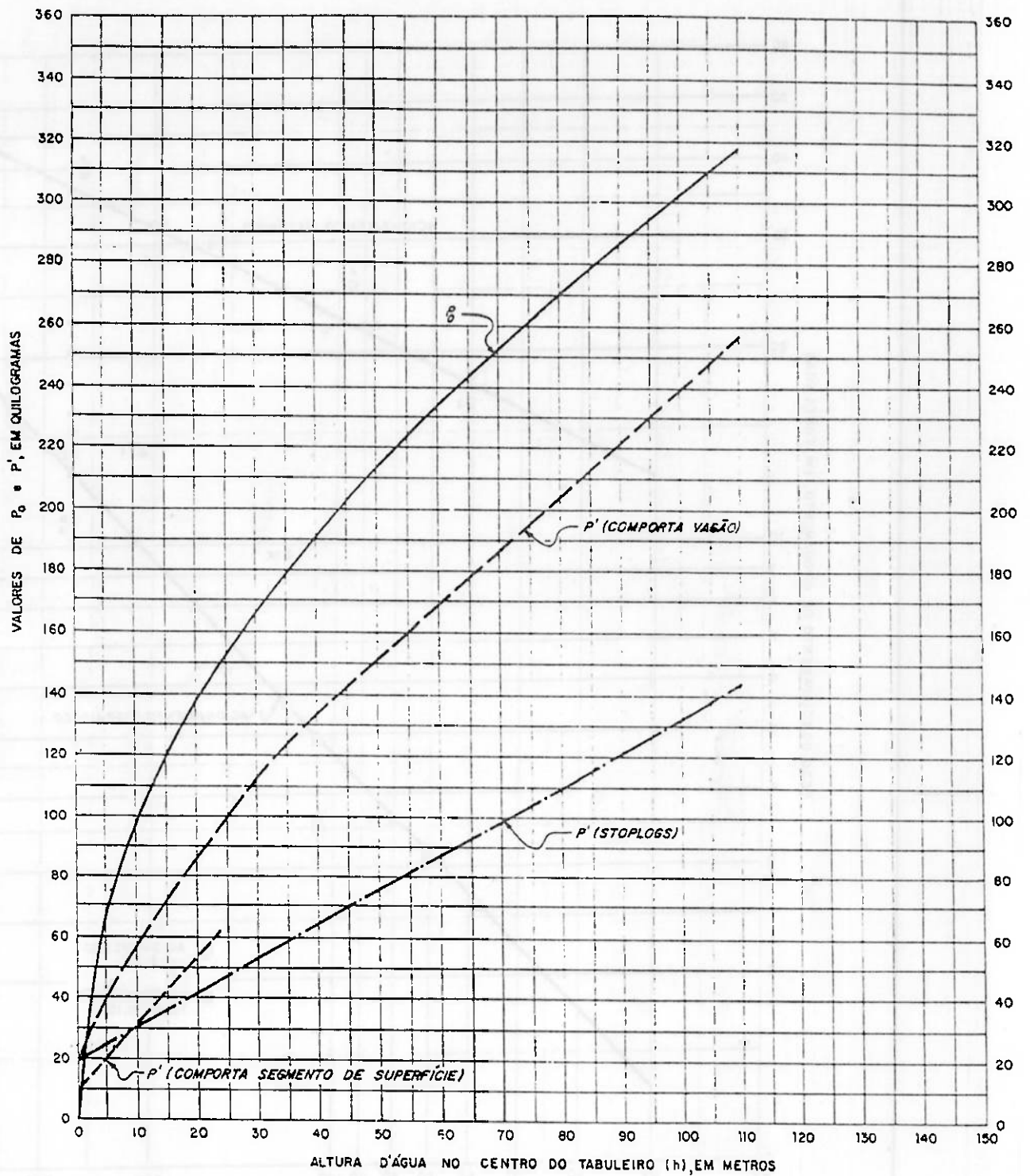
Fig. 37. Esquema de una máquina provista de raedores para la limpieza de las rejillas.



NOTAS:

- 1 - NO PESO DOS ROTORES NÃO ESTÁ INCLuíDA A INÉRCIA ADICIONAL.
- 2 - PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS VER ANEXO 8.01.

CASA DE FORÇA
 PÓRTICO OU PONTE ROLANTE
 CAPACIDADE DE IÇAMENTO

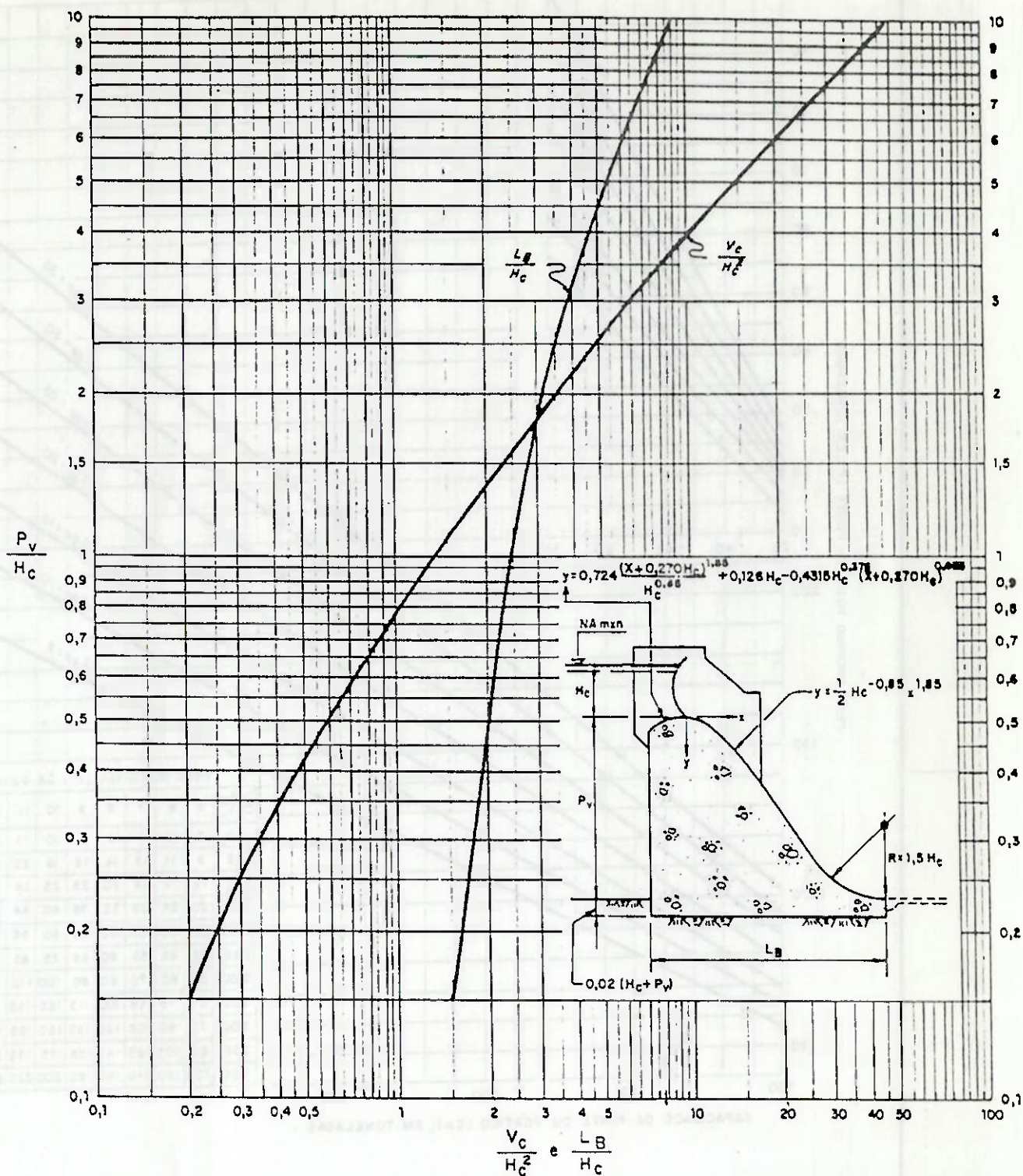


NOTAS:

- 1- OS VALORES DOS PESOS EXLUEM PEÇAS FIXAS E ACIONAMENTO.
 - 2- $P = L_s \cdot H_s (P_0 + P^1 L_s)$ ou $P = L_c \cdot H_c (P_0 + P^1 L_c)$, DEPENDENDO DO TIPO DE EQUIPAMENTO
- P** = PESO DO EQUIPAMENTO, EM QUILOGRAMAS
L_s = LARGURA DO STOPLOG, EM METROS
L_c = LARGURA DE UMA COMPORTA, EM METROS
H_s = ALTURA DOS STOPLOGS, EM METROS
H_c = ALTURA DE UMA COMPORTA, EM METROS
P₀ = PESO BÁSICO, EM QUILOGRAMAS
P¹ = FATOR DEPENDENTE DO TIPO DE EQUIPAMENTO, EM QUILOGRAMAS

COMPORTAS E STOPLOGS

PESOS DO TABULEIRO, RODAS E ARTICULAÇÕES

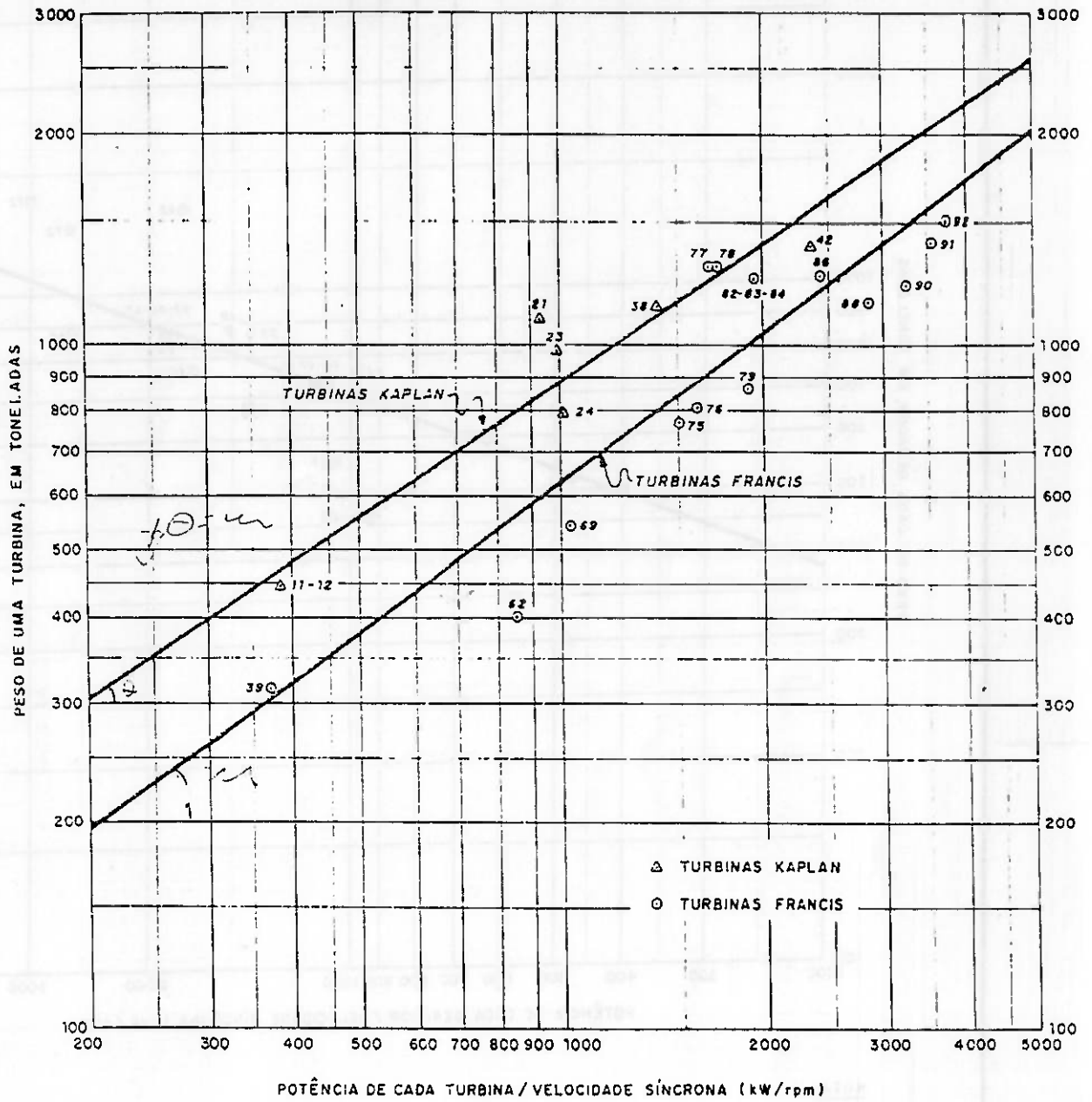


NOTAS:

- 1- H_c = ALTURA DA COMPORTA, EM METROS, CONSIDERADA EQUIVALENTE À CARGA HIDRÁULICA SOBRE O VERTEDOURO
- 2- V_c = VOLUME DE CONCRETO DA OGIVA, POR UNIDADE DE COMPRIMENTO DE CRISTA, EM METROS CÚBICOS POR METRO
- 3- L_B = LARGURA DA BASE, EM METROS
- 4- P_v = ALTURA DA SOLEIRA SOBRE O PISO DO CANAL, EM METROS

VERTEDOURO EM BARRAGEM DE CONCRETO

VOLUME UNITÁRIO DA OGIVA E LARGURA DA BASE

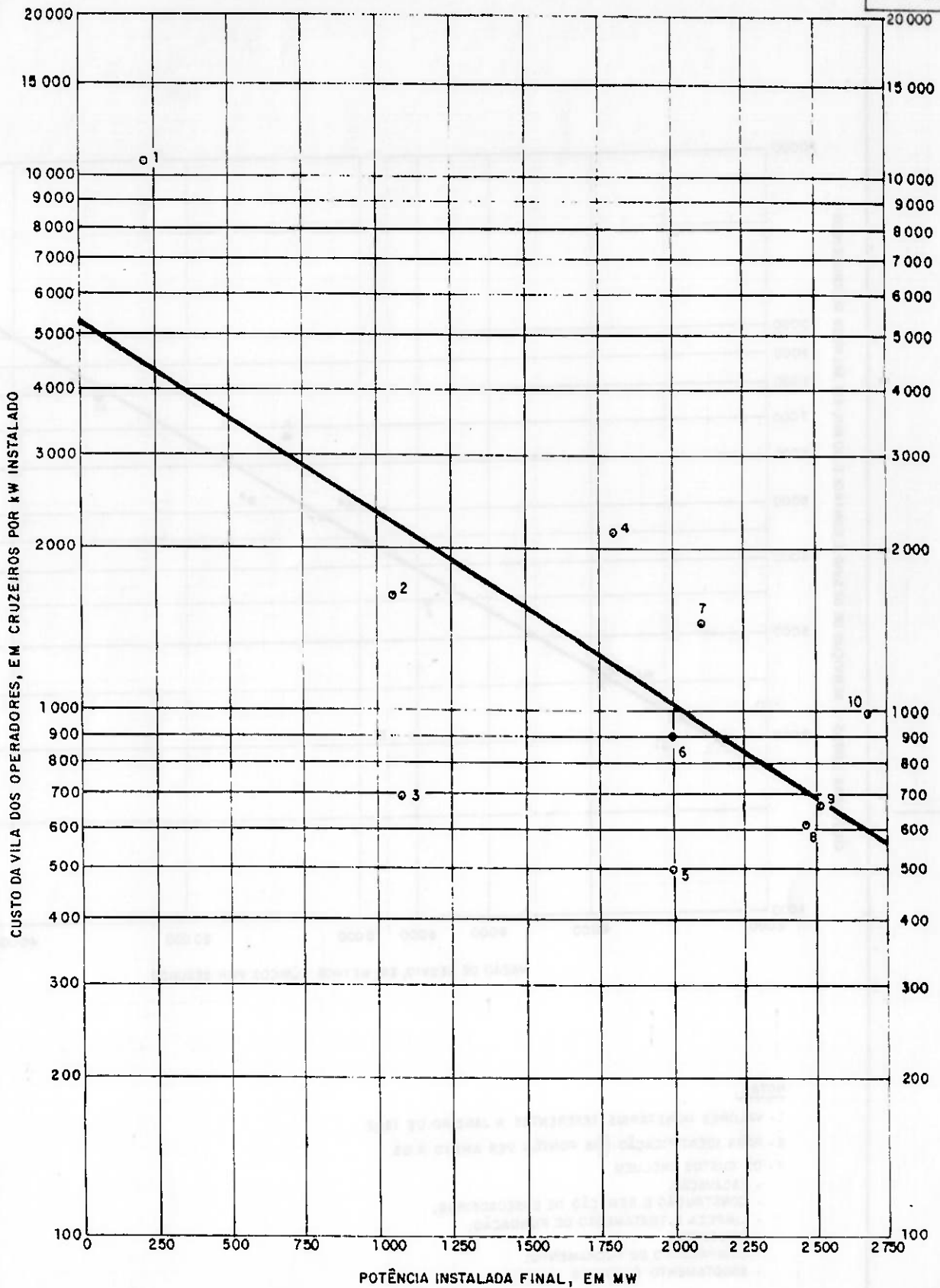


NOTA:

1 - PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS VER ANEXOS 9.22 E 9.23.

$y = \log 300 = \log 100$

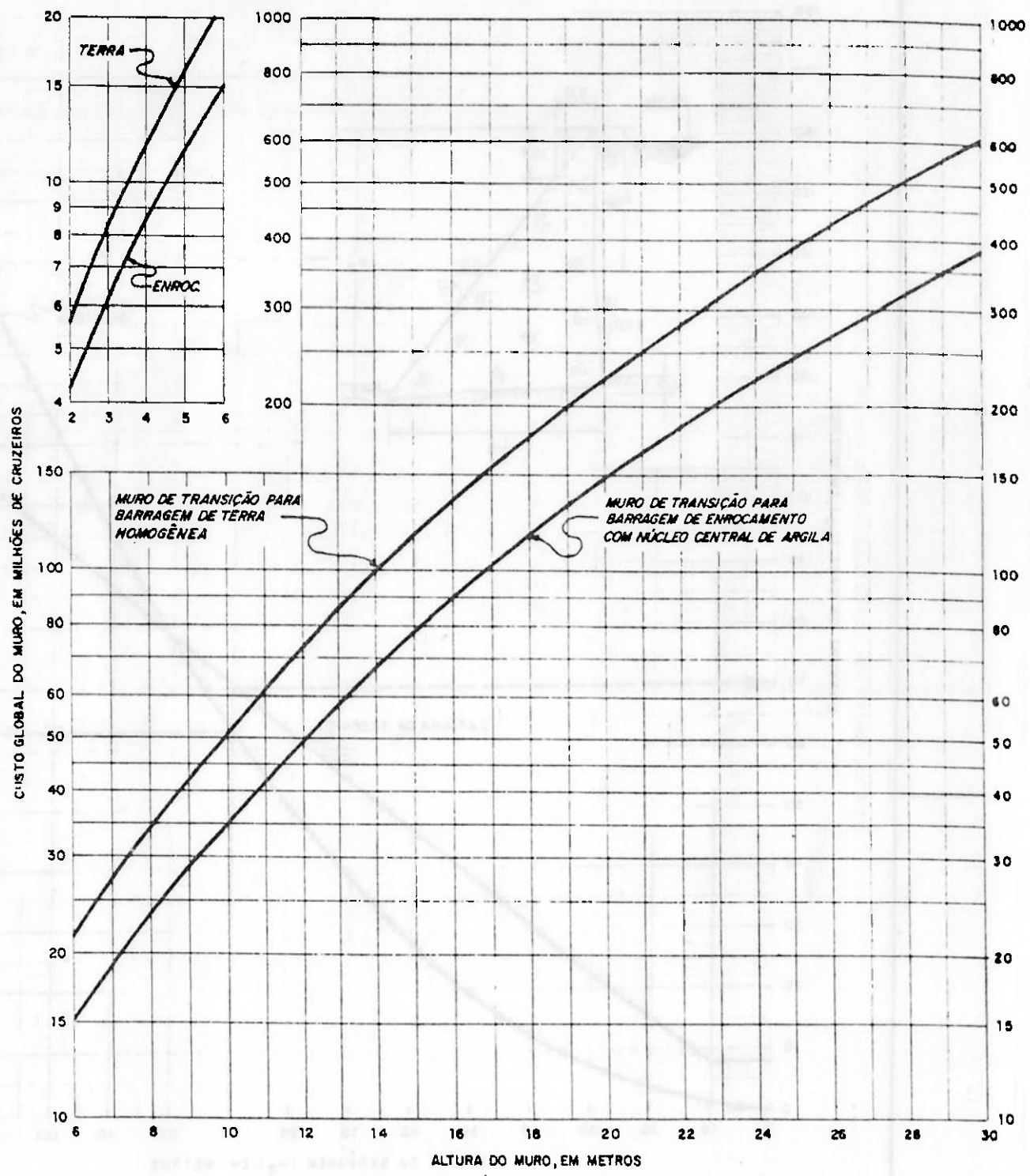
TURBINAS
PESO PRÓPRIO TOTAL



NOTAS:

- 1 - VALORES MONETÁRIOS REFERENTES A JANEIRO DE 1982.
- 2 - PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS VER ANEXO 4.02.

ESTUDOS PRELIMINARES DE INVENTÁRIO
VILA DOS OPERADORES
 CUSTOS UNITÁRIOS



NOTAS:

- 1 - VALORES MONETÁRIOS REFERENTES A JANEIRO DE 1962.
- 2 - OS CUSTOS INCLUEM:
 - ESCAVAÇÃO;
 - LIMPEZA E TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO;
 - CONCRETO;
 - OUTROS CUSTOS.

ESTUDOS PRELIMINARES DE INVENTÁRIO
MUROS DE CONCRETO
 CUSTOS GLOBAIS



CUSTO MÉDIO DE AQUISIÇÃO DE TERRENOS E PROPRIEDADES URBANAS (Cr \$/hab.)		CARACTERÍSTICAS DA INFRA - ESTRUTURA URBANA		
		BOA	MÉDIA	DEFICIENTE
PADRÃO MÉDIO DAS EDIFICAÇÕES	ALTO	1.300.000	900.000	600.000
	MÉDIO	1.000.000	700.000	500.000
	BAIXO	800.000	600.000	300.000

NOTAS:

- 1 - VALORES MONETÁRIOS REFERENTES A JANEIRO DE 1982.
- 2 - PARA CARACTERIZAÇÃO DA INFRA-ESTRUTURA URBANA E DO PADRÃO MÉDIO DE EDIFICAÇÕES, VER SEÇÃO 8.17.1
- 3 - CUSTOS APROXIMADOS, VÁLIDOS UNICAMENTE ONDE NÃO FOR POSSÍVEL DETERMINAÇÃO MAIS PRECISA.

TERRENOS E PROPRIEDADES URBANAS
CUSTOS UNITÁRIOS DE AQUISIÇÃO

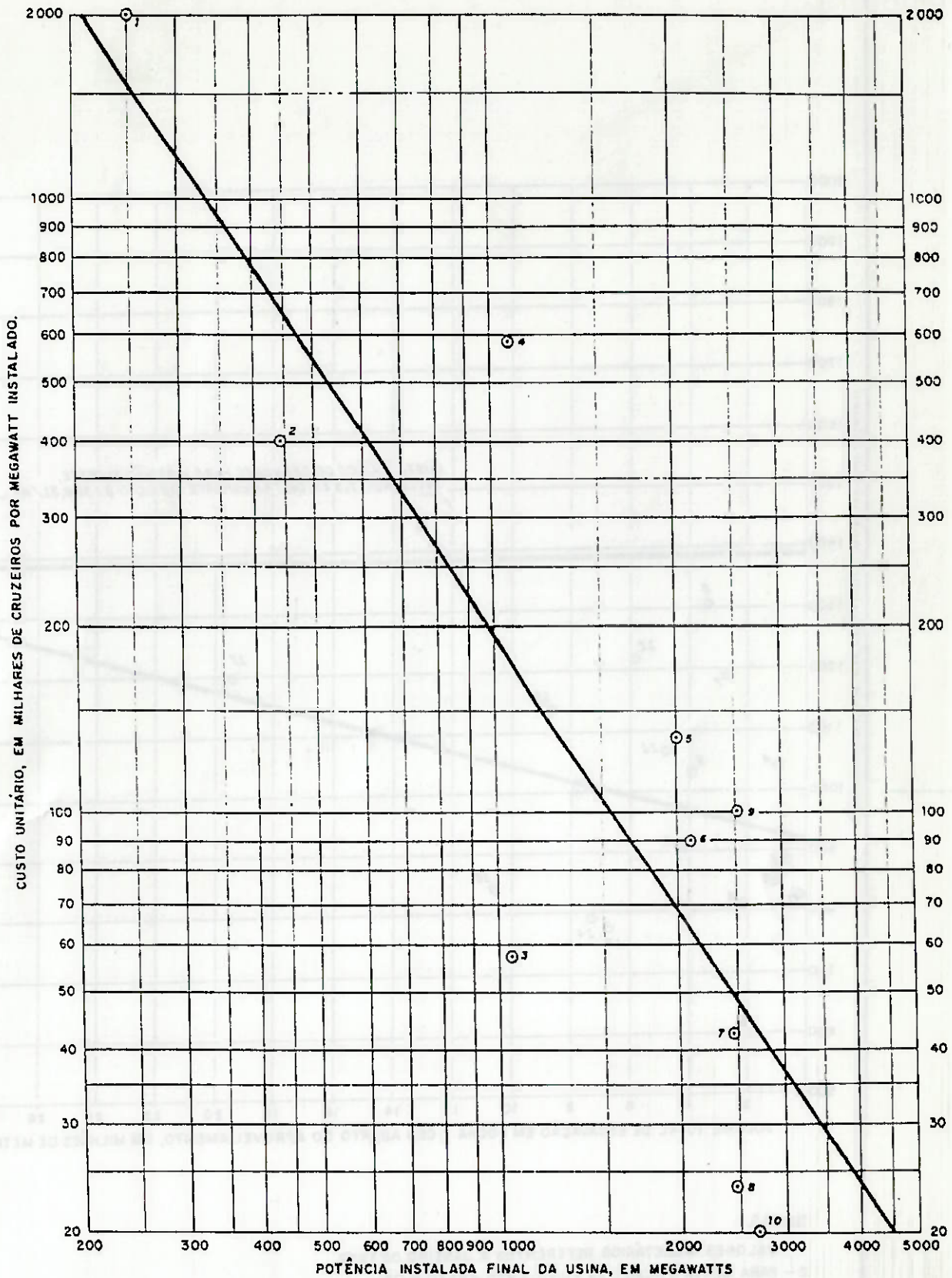
CLASSIFICAÇÃO DNER	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		CUSTO POR QUILOMETRO (1000 Cr \$/k.m)											
	PISTA (m)	PLATAFORMA (m)	SUL-SUDESTE		NORDESTE		CENTRO-OESTE		NORTE, AO SUL DO RIO AMAZONAS		NORTE, AO NORTE DO RIO AMAZONAS			
			PAVIMENTADA	NÃO PAVIMENTADA	PAVIMENTADA	NÃO PAVIMENTADA	PAVIMENTADA	NÃO PAVIMENTADA	PAVIMENTADA	NÃO PAVIMENTADA	PAVIMENTADA	NÃO PAVIMENTADA		
ARTERIAIS PRINCIPAIS	14,00	24,00	59.400	21.600	62.400	24.000	65.350	25.200	68.300	27.600	71.700	29.000		
ARTERIAIS PRIMÁRIAS	7,00	13,00	22.050	10.300	26.220	11.960	27.150	13.650	29.600	13.750	31.100	14.500		
ARTERIAIS SECUNDÁRIAS	7,00	11,00	20.850	9.500	25.150	11.050	27.600	12.600	28.000	12.700	29.400	13.400		
COLETORAS PRIMÁRIAS	6,00	8,00	16.900	6.350	18.250	8.000	18.650	8.400	20.350	8.500	21.400	9.000		
COLETORAS SECUNDÁRIAS	6,00	7,00	16.100	5.550	16.800	7.000	17.150	7.350	18.700	7.400	19.700	7.800		
LOCAIS	6,00	6,00	13.800	4.750	15.350	6.000	15.700	6.300	17.100	6.350	18.000	6.700		

ESTRADAS DE RODAGEM

CUSTOS UNITÁRIOS

NOTAS:

- 1 - VALORES MONETÁRIOS REFERENTES A JANEIRO DE 1982.
- 2 - OS CUSTOS SUPÕEM TERRENO PLANO, NO CASO DE:
 - TERRENO ONDULADO - AUMENTAR O CUSTO EM 30%.
 - TERRENO MONTANHOSO - AUMENTAR O CUSTO EM 50%.



NOTAS:

- 1 - VALORES MONETÁRIOS REFERENTES A JANEIRO DE 1982.
- 2 - PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS VER ANEXO 9.01.
- 3 - ATUALIZAÇÃO DOS PREÇOS BASEADA EM ÍNDICES DA COLUNA 2 DA REVISTA CONJUNTURA ECONÔMICA.
- 4 - OS VALORES REPRESENTAM ESTIMATIVAS DA PARCELA DA CONTA 11.12 QUE NÃO INCLUI ESTRADAS E ACESSOS INTERNOS.
- 5 - PARA A DETERMINAÇÃO DO VALOR TOTAL DA CONTA 11.12 SOMAR AOS CUSTOS DETERMINADOS COM BASE NO GRÁFICO OS CUSTOS DE ESTRADAS E ACESSOS INTERNOS.

BENFEITORIAS NA ÁREA DA USINA
CUSTOS UNITÁRIOS

LIMPEZA DE FUNDAÇÃO	CUSTOS UNITÁRIOS
-ESTRUTURAS DE CONCRETO SOBRE ROCHA	1.000,00 Cr\$/m ²
-ATERRO DE SOLO SOBRE TERRA	500,00 Cr\$/m ²
- ATERRO DE SOLO OU ENROCAMENTO SOBRE ROCHA	500,00 Cr\$/m ²

TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO	CUSTOS UNITÁRIOS
-PERFURAÇÃO COM EQUIPAMENTO ROTATIVO	14.000,00 Cr\$/m
-PERFURAÇÃO COM EQUIPAMENTO A PERCUSSÃO	3.500,00 Cr\$/m
-INJEÇÃO DE CIMENTO, POR METRO LINEAR DE PERFURAÇÃO	2.800,00 Cr\$/m
-PARAFUSOS DE ROCHA INJETADOS	5.000,00 Cr\$/m

NOTAS:

- 1- VALORES MONETÁRIOS REFERENTES A JANEIRO DE 1982.
- 2- CUSTOS MUITO APROXIMADOS, VÁLIDOS UNICAMENTE ONDE NÃO FOR POSSÍVEL DETERMINAÇÃO MAIS PRECISA.

**LIMPEZA E TRATAMENTO
DE FUNDAÇÃO
CUSTOS UNITÁRIOS**

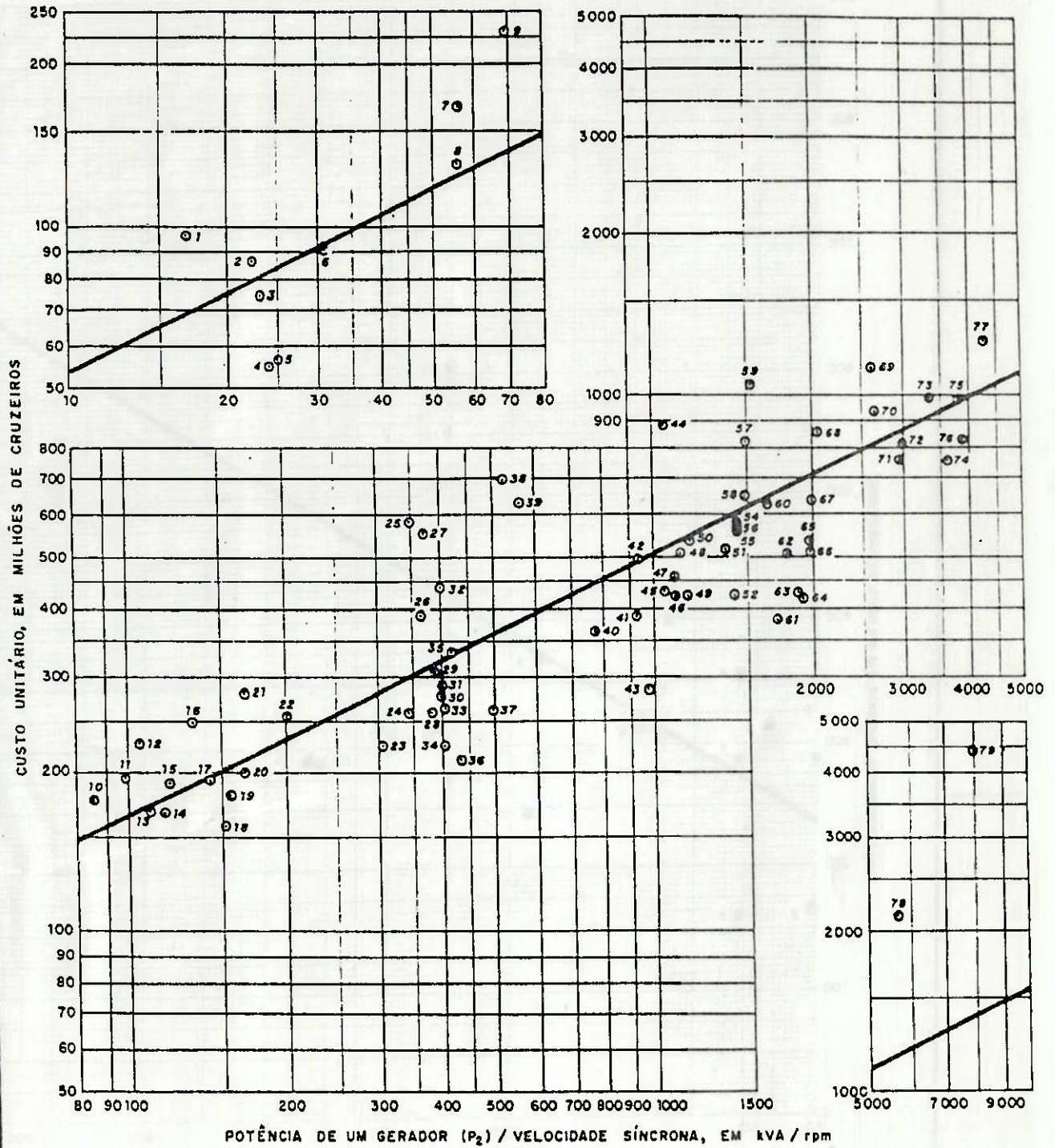
EQUIPAMENTO	CUSTO FOB EM Cr\$ / kg	
	EQUIPAMENTO PRINCIPAL	PEÇAS FIXAS E EMBUTIDOS
COMPORTA DE SEGMENTO DE SUPERFÍCIE	550,00	400,00
COMPORTA VAGÃO DE FUNDO COM RODAS	570,00	480,00
STOPLOG CAIXÃO SEM RODAS	310,00	390,00
VÁLVULA BORBOLETA	500,00	—
VÁLVULA ESFÉRICA	500,00	—
ACIONAMENTO HIDRÁULICO DE COMPORTAS	340,00	—
ACIONAMENTO MECÂNICO DE COMPORTAS	720,00	—
PONTE ROLANTE	790,00	—
GUINDASTE PÓRTICO	750,00	—
CONDUTO FORÇADO E BLINDAGEM	200,00	—
GRADES	250,00	—

NOTA:

1 - VALORES MONETÁRIOS REFERENTES A JANEIRO DE 1982.

EQUIPAMENTOS HIDROMECAÑICOS
E DE IÇAMENTO

CUSTOS UNITÁRIOS DE AQUISIÇÃO

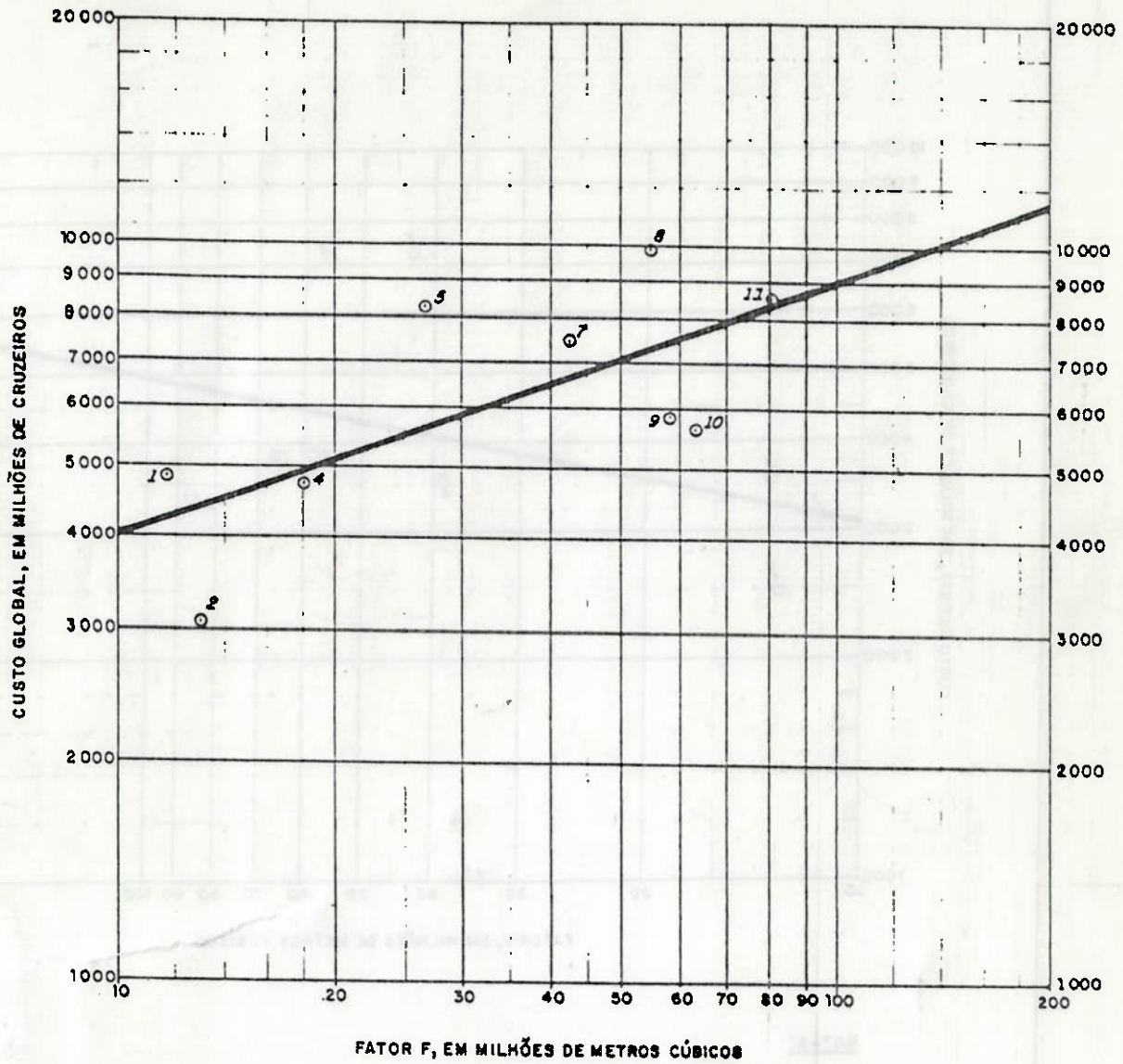


NOTAS:

- 1 - VALORES MONETÁRIOS REFERENTES A JANEIRO DE 1982.
- 2 - PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS VER ANEXO 9.24.
- 3 - ATUALIZAÇÃO DE PREÇOS BASEADA EM ÍNDICES DA COLUNA 2 DA REVISTA CONJUNTURA ECONÔMICA, PARA BENS E SERVIÇOS NACIONAIS, E NOS ÍNDICES DE "TURBINAS E GERADORES" DO U. S. BUREAU OF RECLAMATION, PARA BENS E SERVIÇOS IMPORTADOS.

GERADORES
CUSTOS UNITÁRIOS DE AQUISIÇÃO



**NOTAS:**

1 - VALORES MONETÁRIOS REFERENTES A JANEIRO DE 1982.

2 - FATOR $F = \begin{cases} 30V_{ct} + V_{et} + 5V_{es} + 0,25V_0, & \text{QUANDO } V_0 \leq 30\,000\,000 \text{ m}^3 \\ 30V_{ct} + V_{et} + 5V_{es} + 0,15V_0, & \text{QUANDO } V_0 > 30\,000\,000 \text{ m}^3 \end{cases}$

ONDE: V_{ct} = VOLUME DE CONCRETO

V_{et} = VOLUME DE ESCAVAÇÃO COMUM + VOLUME DE ESCAVAÇÃO EM ROCHA A CÉU ABERTO.

V_{es} = VOLUME DE ESCAVAÇÃO SUBTERRÂNEA

V_0 = VOLUME DE ATERRO DE SOLO E/OU ENROCAMENTO.

3 - PARA IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS VER ANEXO 9.27.

**CONSTRUÇÕES DO CANTEIRO
E ACAMPAMENTO
CUSTOS GLOBAIS**

ENGENHARIA BÁSICA	CUSTO UNITÁRIO
- EQUIPE DE PROJETO	4.500,00 Cr\$/Hh

SERVIÇOS ESPECIAIS DE ENGENHARIA	CUSTOS UNITÁRIOS
- LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAMÉTRICO	10.000,00 Cr\$/km ²
- LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO PLANI-ALTIMÉTRICO ⁽²⁾	30.000,00 Cr\$/km ²
- SONDAgens ROTATIVAS EM ROCHA ⁽²⁾	15.000,00 Cr\$/m
- SONDAgens A PERCUSSÃO EM SOLO ⁽²⁾	3.000,00 Cr\$/m
- ESTUDOS ESPECIAIS	1% DO CUSTO DA CONTA .12

NOTAS:

1 - VALORES MONETÁRIOS REFERENTES A JANEIRO DE 1982.

2 - OS CUSTOS CORRESPONDENTES A SERVIÇOS DE CAMPO REFEREM-SE ÀS REGIÕES SUL E SUDESTE ; PARA AS OUTRAS REGIÕES CONSIDERAR OS SEGUINTEs ACRÉSCIMOS:

- REGIÃO NORDESTE 5%
- REGIÃO CENTRO-OESTE 10%
- REGIÃO NORTE, AO SUL DO RIO AMAZONAS..... 15%
- REGIÃO NORTE, AO NORTE DO RIO AMAZONAS..... 25%

SERVIÇOS DE ENGENHARIA
CUSTOS UNITÁRIOS