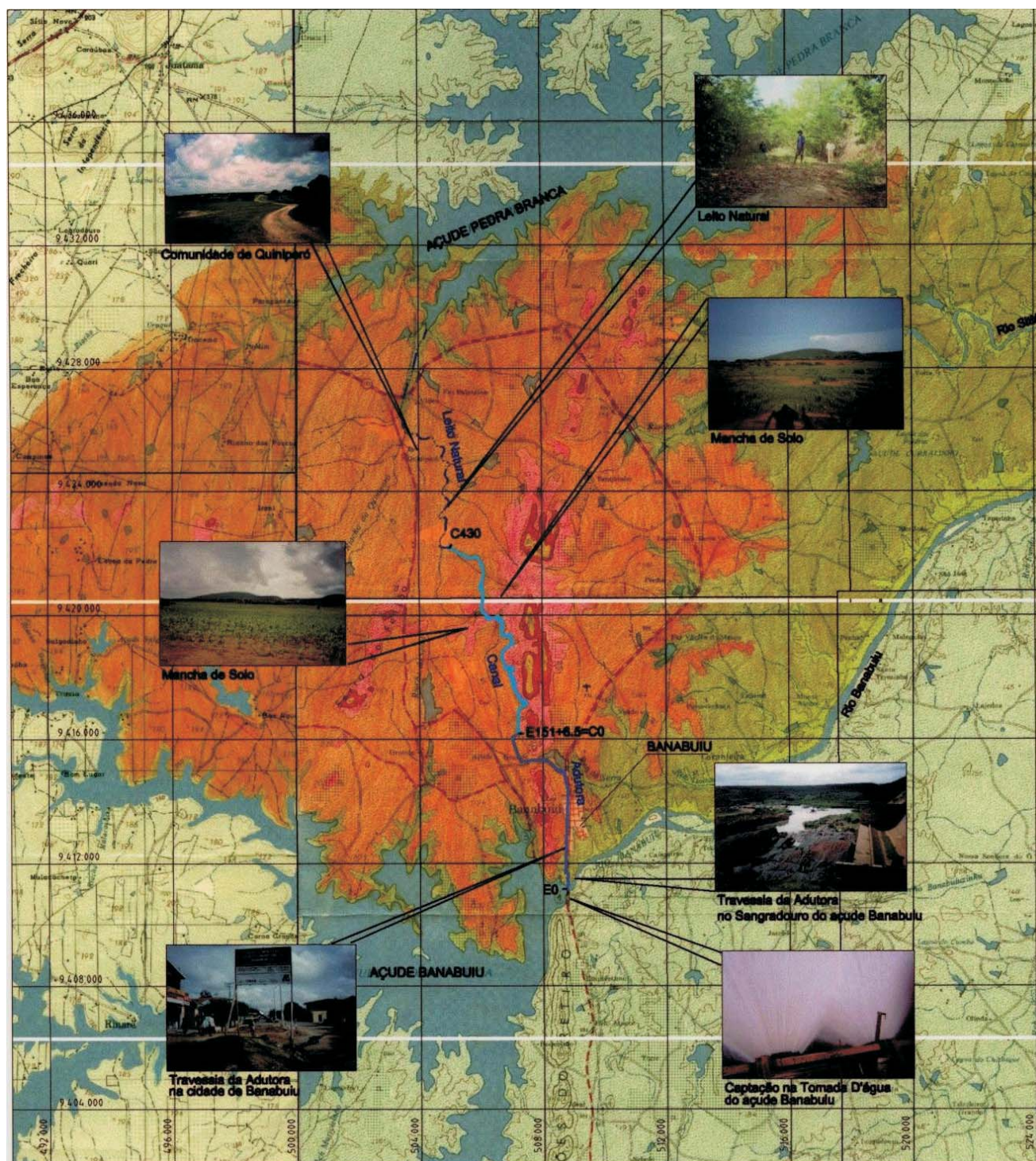


# GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ

## SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS - SRH



### PROJETO EXECUTIVO DE ADUTORAS E INSTALAÇÃO DE TURBO-BOMBAS NO AÇUDE BANABUIU PARA TRANSPOSIÇÃO DE ÁGUAS PARA O AÇUDE PEDRA BRANCA

#### TOMO I - RELATÓRIO GERAL VOLUME 2 - MEMORIAL DE CÁLCULO (ADUTORAS E TURBO-BOMBAS)

## ÍNDICE

<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>4</b>
<b>2 - ESTAÇÃO ELEVATÓRIA.....</b>	<b>5</b>
2.1 - NÚMERO DE CONJUNTOS TURBO-BOMBA E VAZÕES BOMBEADAS.....	5
2.2 - ESPECIFICAÇÃO DA TURBINA .....	20
2.3 - ESPECIFICAÇÃO DA BOMBA E PONTO DE OPERAÇÃO .....	22
2.4 - ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA HIDRÁULICO AÇUDE-BARRILETE.....	29
2.5 - ESPECIFICAÇÃO DOS BARRILETES DE ADUÇÃO E RECALQUE .....	34
<b>2.5.1 - Barriletes de Adução das Turbinas.....</b>	<b>34</b>
<b>2.5.2 - Barriletes de Sucção das Bombas .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.3 - Barrilete de Recalque .....</b>	<b>37</b>
<b>2.5.4 - Espessura da Parede das Tubulações .....</b>	<b>38</b>
<b>3 - ADUTORA.....</b>	<b>46</b>
3.1 - ESCOLHA DO TRAÇADO DO SISTEMA ADUTOR.....	46
3.2 - CÁLCULO DAS PERDAS DE CARGA.....	46
3.3 - ESCOLHA DO DIÂMETRO E NÚMERO DE ADUTORAS .....	47
3.4 - ESPESSURA DA CHAPA DA ADUTORA .....	48
3.5 - TRANSIENTE HIDRÁULICO.....	52
<b>4 - PROJETO ESTRUTURAL .....</b>	<b>52</b>
4.1 - PROJETO ESTRUTURAL DA ESTAÇÃO DE RECALQUE .....	52
4.2 - PROJETO ESTRUTURAL DOS BLOCOS DE ANCORAGEM E APOIOS .....	53
<b>ANEXOS .....</b>	<b>64</b>
<b>Anexo I - Fotografia de Turbina e Transmissão Similar à Especificada .....</b>	<b>65</b>
<b>Anexo II - Estudo de possibilidades .....</b>	<b>66</b>
<b>Anexo III - Alternativas de Traçado.....</b>	<b>81</b>
<b>Anexo IV - Simulação de Operação, Taxa de Ociosidade e Justificativa Econômica     Dados Registrados de Descarga pela COGERH: .....</b>	<b>82</b>

## 1- INTRODUÇÃO

Este volume constitui-se no Volume 2 – Memorial de Cálculo (Adutoras e Turbo-Bombas), Tomo I, cujo objetivo é apresentar o detalhamento dos cálculos realizados para o dimensionamento da estação de recalque e adutora ora intitulados “Banabuiú-Pedra Branca”.

As características técnicas do sistema adutor projetado são as seguintes.

- **Trecho de Recalque (conduto forçado)**

- Número de adutoras: 2 (duas).
- Número de conjuntos Turbo-Bomba: 4 (quatro), dois conjuntos por adutora.
- Extensão da tubulação: 6.612 m.
- Diâmetro da tubulação: DN 600mm.
- Material da tubulação: aço carbono A570 grau 45 (LE=310Mpa) soldado helicoidalmente com costura produzidos e inspecionados de acordo com a norma AWWA.C.200, Ponta e Bolsa e Junta Elástica conforme NBR 9915/87, espessura de 6,35mm, fornecidos em peças de 6,0m de comprimento com tolerância de +0,3m e -0,2m.
- Revestimento da tubulação: revestimento interno em Coal Tar Epoxi conforme norma AWWA.C.210 e externo em polietileno tripla camada conforme norma AWWA.C.215/94.
- Vazão máxima de projeto (duas adutoras): 1,20 m<sup>3</sup>/s.
- Vazão máxima de projeto obtida por adutora: 0,60 m<sup>3</sup>/s.
- Vazão mínima de projeto obtida por adutora: 0,31 m<sup>3</sup>/s.
- Manancial: Açude Banabuiú.
- Captação: Será a mesma tubulação utilizada para adução das turbinas, sendo apoiada sobre blocos de ancoragem entre a casa de máquinas e a extremidade de jusante da tubulação da tomada d'água do açude, onde atualmente se encontra instalada uma válvula dispersora cônica. A válvula deverá ser removida e instalada na extremidade da tubulação de adução das turbinas, denominado neste projeto de Sistema Hidráulico Açude-Barrilete.

## 2 - ESTAÇÃO ELEVATÓRIA

### 2.1 - NÚMERO DE CONJUNTOS TURBO-BOMBA E VAZÕES BOMBEADAS

A estação elevatória foi dimensionada para operar com 4 conjuntos Turbo-Bomba (turbina e bomba acopladas). Os principais motivos para essa escolha são:

- Possibilidade de implantação dos conjuntos de forma gradual, reduzindo assim o custo inicial do projeto.
- Capacidade de operação em função da vazão disponível para acionamento da turbina, resultando em uma maior flexibilidade nas operações de recalque. No caso de um único conjunto, este poderia ficar inutilizado para vazões turbináveis parciais, o que não ocorre quando se trabalha com dois ou mais conjuntos, permitindo assim a parada de um ou mais conjuntos de acordo com a necessidade ou disponibilidade de vazão para acionamento da turbina.

O número de conjuntos está fortemente relacionado com a vazão a ser recalçada, sendo assim, com a altura manométrica escolhe-se as possíveis bombas que diferem na vazão no ponto de maior rendimento, variando inclusive este último. Escolhe-se aquela que exigirá uma potência que esteja dentro dos limites possíveis de fabricação das turbinas; a potência da turbina também está limitada pela vazão disponível para seu acionamento, que é a vazão regularizada.

Os dados a seguir apresentam as características do sistema hidráulico de recalque para a especificação do número de conjuntos.

- Altura geométrica de recalque: 113,1 metros
- Vazão de Recalque: 1,20 m<sup>3</sup>/s
- Diâmetro da Tubulação: 600 mm
- Altura Manométrica Total: 154 m.c.a.

Como ponto de partida toma-se uma vazão de recalque tida como suficiente para o aproveitamento do sistema de aproximadamente 1,2 m<sup>3</sup>/s. Em seguida escolhe-se uma bomba, cuja associação em paralelo resulte em uma vazão aproximada a esperada.

Uma vez traçada a curva da bomba (para mais que uma bomba, a curva traçada deverá ser destas bombas associadas em paralelo), traça-se a curva do sistema com diferentes valores para o diâmetro. O ponto de cruzamento das duas curvas (curvas da bomba associadas e do sistema) deve-



se dar próximo ao ponto de maior rendimento da bomba. Este ponto no cruzamento das curvas é o ponto de operação.

Com o ponto de operação determina-se a potência necessária a ser fornecida à bomba pela turbina. Deve-se considerar as perdas de transmissão, que são da ordem de 5%. A opção de recalque adotada e considerada suficiente para a viabilidade do projeto após o estudo de diversas possibilidades é dada por:

- Vazão de recalque por adutora: 0,60 m<sup>3</sup>/s (dois conjuntos por adutora)
- Vazão de recalque por bomba: 0,31 m<sup>3</sup>/s
- Carga manométrica total: 154 m.c.a.

A seguir são apresentados os cálculos dos quais foram obtidos os valores acima:

- Potência consumida pela bomba:

$$P_B = \frac{\gamma \times Q_B \times H_B}{\eta_B \times 75}$$

Onde:

$Q_B$  = vazão de recalque (m<sup>3</sup>/s)

$H_B$  = carga manométrica (m.c.a.).

$\gamma$  = peso específico do líquido (1000 kg/m<sup>3</sup>)

$P_B$  = potência fornecida ao eixo da bomba (CV)

$\eta_B$  = rendimento da bomba

$$P_B = \frac{1000 \times 0,34 \times 154}{0,75 \times 75}$$

$$P_B = 930,85 CV$$

O rendimento da turbina é de 69%, e o do sistema de transmissão é de 95%. Uma vez que a carga líquida na turbina é de 31 m.c.a., pode-se calcular a vazão necessária a ser fornecida à turbina de forma que esta produza a potência de eixo exigida pela bomba. Calculando a potência necessária no eixo da turbina:

$$P_{eixo} = \frac{P_B}{\eta_{Tran}} = \frac{930,85}{0,95}$$

$$P_{eixo} = 979,8CV$$

Onde:

$P_B$  = potência no eixo da bomba (CV)

$\eta_{Tran}$  = rendimento da transmissão

$P_{eixo}$  = potência no eixo da turbina (CV)

A partir da potência no eixo da turbina chega-se à potência hidráulica necessária:

$$P_H = \frac{P_{eixo}}{\eta_{Turb}} = \frac{979,8}{0,69}$$

$$P_H = 1420,06CV$$

Onde:

$\eta_{Turb}$  = rendimento da turbina

$P_H$  = potência hidráulica (CV)

Com a potência hidráulica e carga no eixo da turbina, determina-se a vazão turbinada:

$$Q_{Turb} = \frac{75 \times P_H}{1000 \times H_T} = \frac{75 \times 1420}{1000 \times 31}$$

Onde:

$H_T$  = carga líquida na turbina (m.c.a.)

$Q_{Turb}$  = vazão turbinada ( $m^3/s$ )

$$Q_{Turb} = 3,43 m^3/s$$

A vazão total turbinada é a vazão das quatro turbinas, dada por:

$$Q_{TTurb} = 4 \times 3,43 = 13,72 m^3/s$$

A vazão total consumida pelo sistema é a soma da vazão turbinada e a recalçada:

$$Q_{TS} = 13,72 + 1,20 = 15 m^3/s$$

A curva característica da bomba adotada é apresentada na figura 1. Bombas de outros fabricantes podem ser utilizadas desde que as características da curva sejam similares. Foram estudadas curvas da KSB, Sulzer e ABS, sendo que a que melhor se apropriou para este caso foi bomba centrífuga bi-partida Z22-350/300-61, curva número 6662-3 fabricada pela ABS.

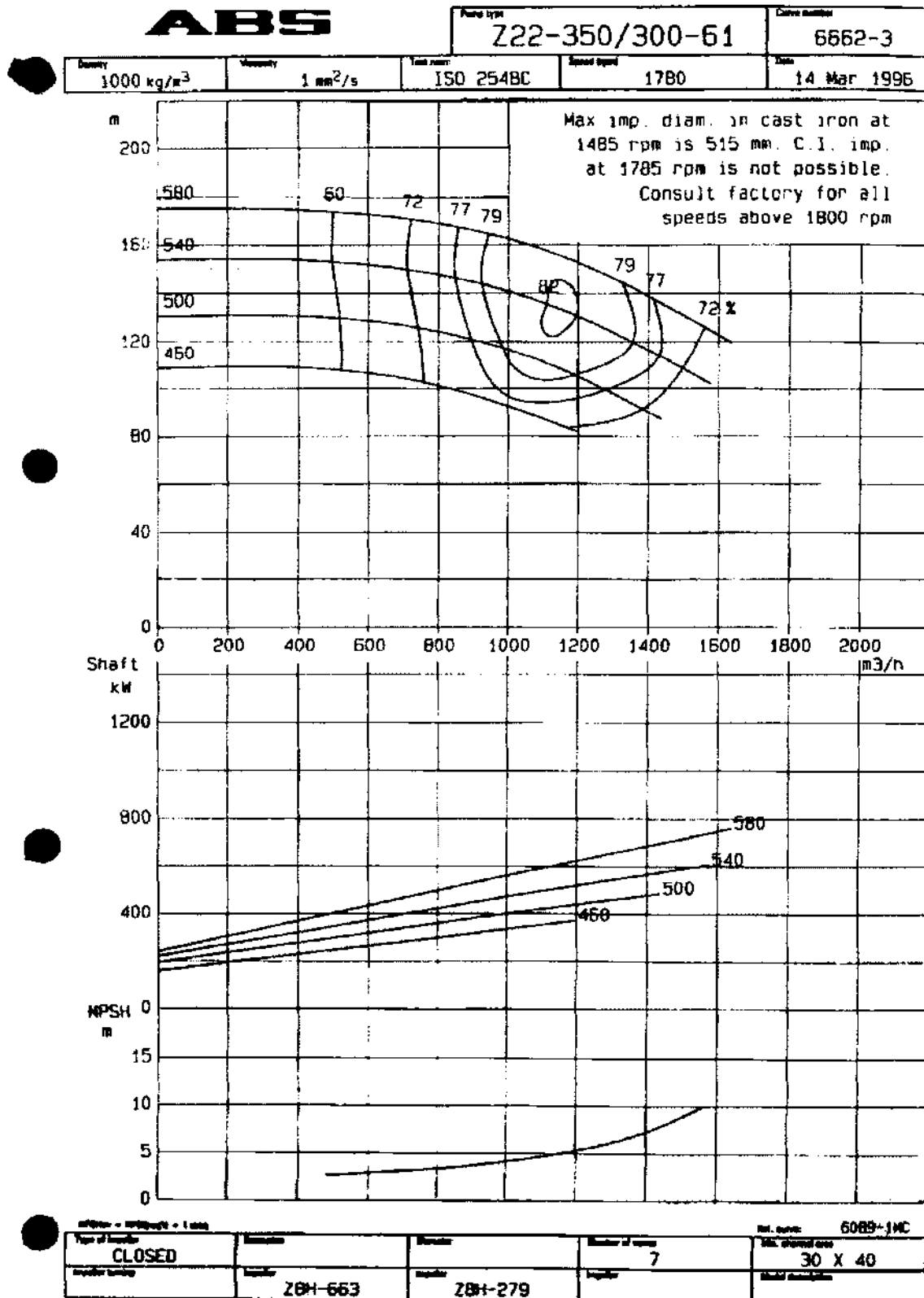


Figura 1 – Curva da bomba mais apropriada



Cabe aqui ressaltar que outras marcas podem ser utilizadas sem detrimento de grande significância ao aproveitamento hidráulico.

As vazões bombeadas foram determinadas a partir da potência hidráulica disponível (vazão regularizada e carga média), sendo o sistema dimensionado para operar com vazões muito próximas à regularizada.

Embora a vazão regularizada de projeto seja de  $12,93 \text{ m}^3/\text{s}$ , o sistema de recalque foi dimensionado para operar com até  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , incluído neste valor a vazão recalçada. A vazão turbinada é da ordem de  $13,72 \text{ m}^3/\text{s}$ , como foi demonstrado anteriormente.

A carga média foi determinada através dos registros do nível do reservatório obtidos junto à COGERH, registrados no período de 223 meses entre os anos de 1968 e 2000(aqui denominado método determinístico) e através de simulação com o auxílio do software ModSimP32, desenvolvido pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e de livre domínio (método de simulação).

#### A - Método determinístico:

A análise estatística (tabela 1) dos registros de nível indicou que no período analisado a cota média foi de 128,7 m. Utilizando-se do desvio padrão, cujo valor é de 6,39, tomou-se a cota de projeto como sendo aquela que estivesse abaixo da média(a título de segurança) em meio desvio padrão, o que resultou em fixar em 125,5 m a cota de projeto. Este valor foi adotado porque aproximadamente 73,5% das cotas no período histórico ficaram acima de 125,5 m, o que é uma boa garantia operacional.

De acordo com otimizações e ajustes nas manobras de operação do sistema, pode-se otimizar esta garantia de fornecimento, desde que se aproveite o excedente de vazão nas quadras chuvosas e se intensifique a operação do sistema quando o nível da água passar da cota 125,5 m no açude.

Os equipamentos normalmente são dimensionados mecanicamente com folga, podendo suportar uma sobrecarga em potência no eixo da turbina em até 25%.

**Tabela 1 - Análise estatística sobre as cotas registradas no açude Banabuiú**

Média	128,43
Mediana	130,61
Moda	135,64
Desvio Padrão	6,3979
Variância	40,933
Assimetria	-1,0351
Mínimo	109,56
Máximo	137,45
Soma	28640
Contagem	223

A variação da cota do nível do reservatório, a cota média e a cota adotada para o projeto podem ser vistas no gráfico Cota x Tempo apresentado na figura 2.

## Curva Cota em Função do Tempo - Açude Banabuiú

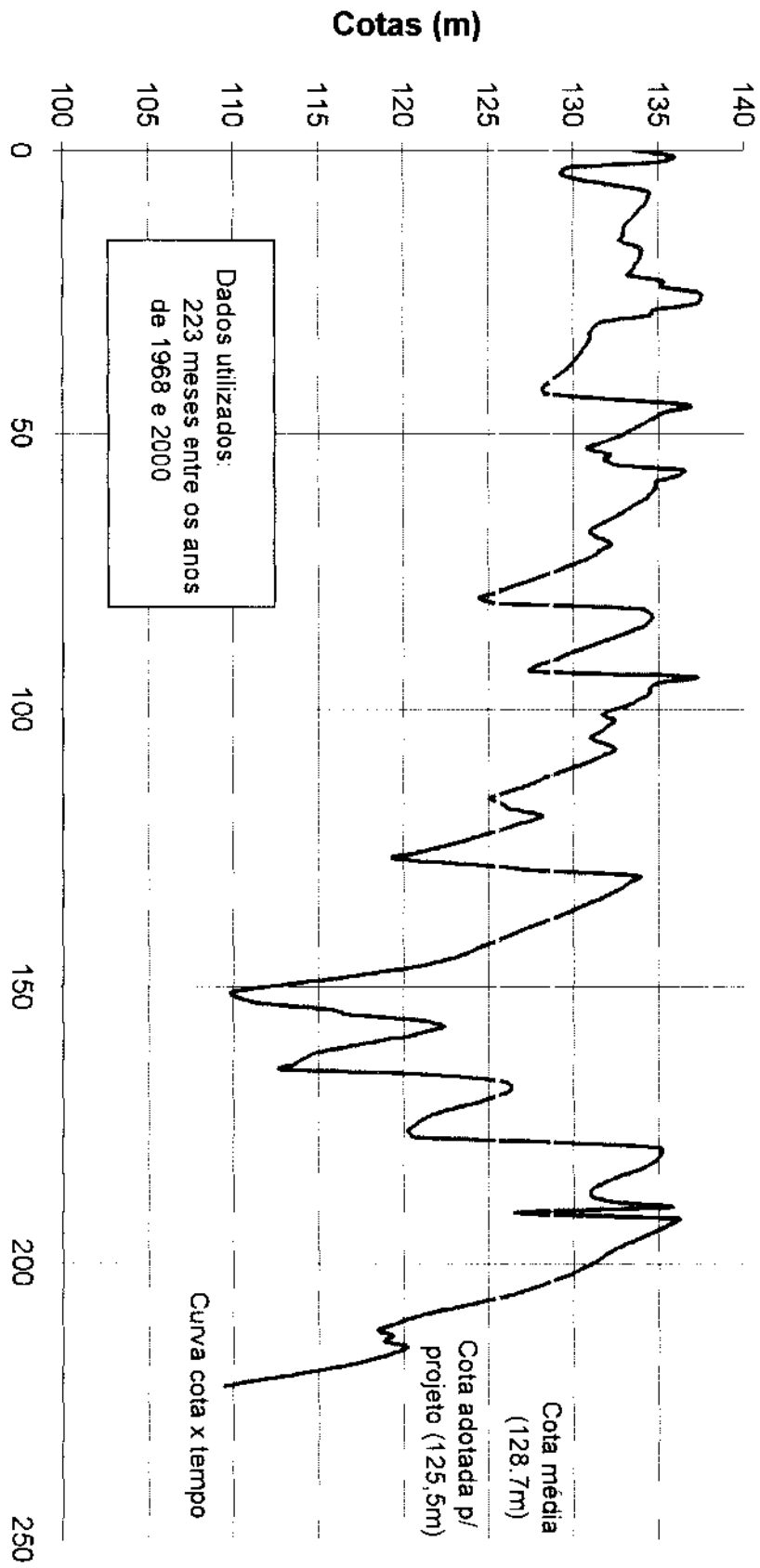


Figura 2 - Gráfico Cota x Tempo

## B – Método de Simulação

Neste método foi utilizado para a simulação de dados de volume acumulado o software ModSimP32 de Rubem La Laina Porto – Poli / USP e Alexandre Nunes Roberto – Poli / USP – Interface para o modelo de simulação de bacias hidrográficas – MODSIM de John W. Labadie – Colorado State University, que a partir de dados e séries históricas reais consegue gerar dados simulados para o reservatório.

Os principais dados de entrada são:

- Vazões Afluentes - Grande parte dos dados reais de vazões afluentes foram obtidos a partir de dados históricos pluviométricos registrados pelas estações de controle pluviométrico da região, e pelas vazões regularizadas dos açudes de montante. A outra parte foi gerada baseada nos dados existentes. A outra parte, em número bem menor foi uma projeção calculada a partir dos dados reais.
- Vazões Defluentes – Calculados a partir da média mensal de vazões liberadas pela COGERH a partir da data em que começaram a ser registrados.
- Coeficientes de evaporação – Calculados com base em dados registrados pelas estações da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME.
- Demanda a jusante – Calculada levando em conta a criação do Perímetro de Irrigação de Morada Nova.
- Coeficientes de infiltração – não foram adotados neste caso devido à dificuldade de obtenção e ao fato dos solos da região terem baixíssima permeabilidade. Tal coeficiente toma-se assim praticamente irrelevante frente a fatores como evaporação, por exemplo.
- Volume máximo do reservatório -  $1675 \text{ Hm}^3$
- Volume mínimo do reservatório (vol. Morto) –  $350 \text{ Hm}^3$
- Número de anos calculados: 100, a partir de janeiro de 1900.
- Curva Cota x Área x Volume – Ver Tabela 2. O gráfico da figura 3 mostra os dados Cota x Volume e a equação do tipo potência que mais se adapta como linha de tendência. A partir desta equação serão transformados os dados de volume em respectivas cotas dos níveis de água do açude.

**Tabela 2 – Curva Cota x Área x Volume**

Área (Km <sup>2</sup> )	Volume (Mm <sup>3</sup> )	Cota (m)
0	0	87.5
2.5	12	92.5
5.9	32	97.5
9.89	70	102.5
13.8	140	107.5
17.79	210	112.5
22.69	300	117.5
31.6	420	122.5
47.39	620	127.5
66.08	850	132.5
98.7	1240	137.5
141.09	1675	142.5

Dos dados de saída(ou gerados), foram utilizados principalmente os volumes gerados do reservatório, obtidos mês a mês, em um total de 1200 meses. Os dados gerados são apresentados na figura 4. Os respectivos níveis, calculados pela equação da figura 3, são apresentados na figura 5.

A figura 6 apresenta a curva de permanência em relação aos níveis gerados e a tabela 3 apresenta alguns pontos da curva.

Com base nos dados da tabela 3, tem-se de adotar um nível para cálculo que satisfaça tanto o lado econômico quanto o lado técnico.

À primeira vista, seria interessante adotar um nível para cálculo próximo à garantia de 90%, (118,7 m), mas o conjunto mecânico trabalharia relativamente fora do seu ponto ótimo de trabalho quando o açude estivesse cheio, próximo à cota 142,5 m. Apesar de continuar bombeando, a vazão nestas situações seria muito prejudicada.

Por outro lado, vendo pelo lado estritamente mecânico e visando conceder o máximo de rendimento ao sistema, a opção correta seria adotar um nível médio tal que a variação para uma cota máxima e uma cota mínima sejam iguais.

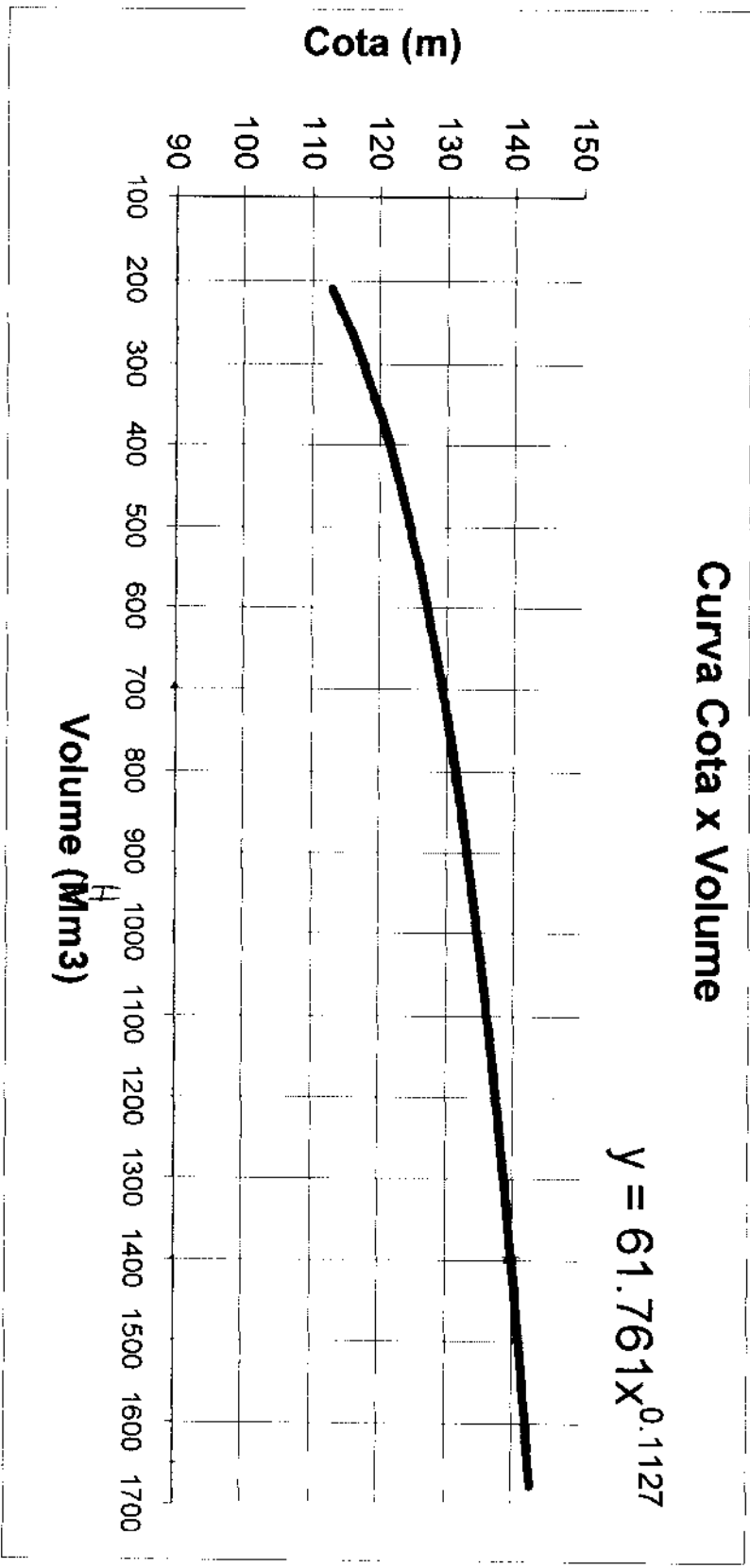


Figura 3 – Curva Cota x Volume

## Simulação ModSimP32 - Volume Acumulado

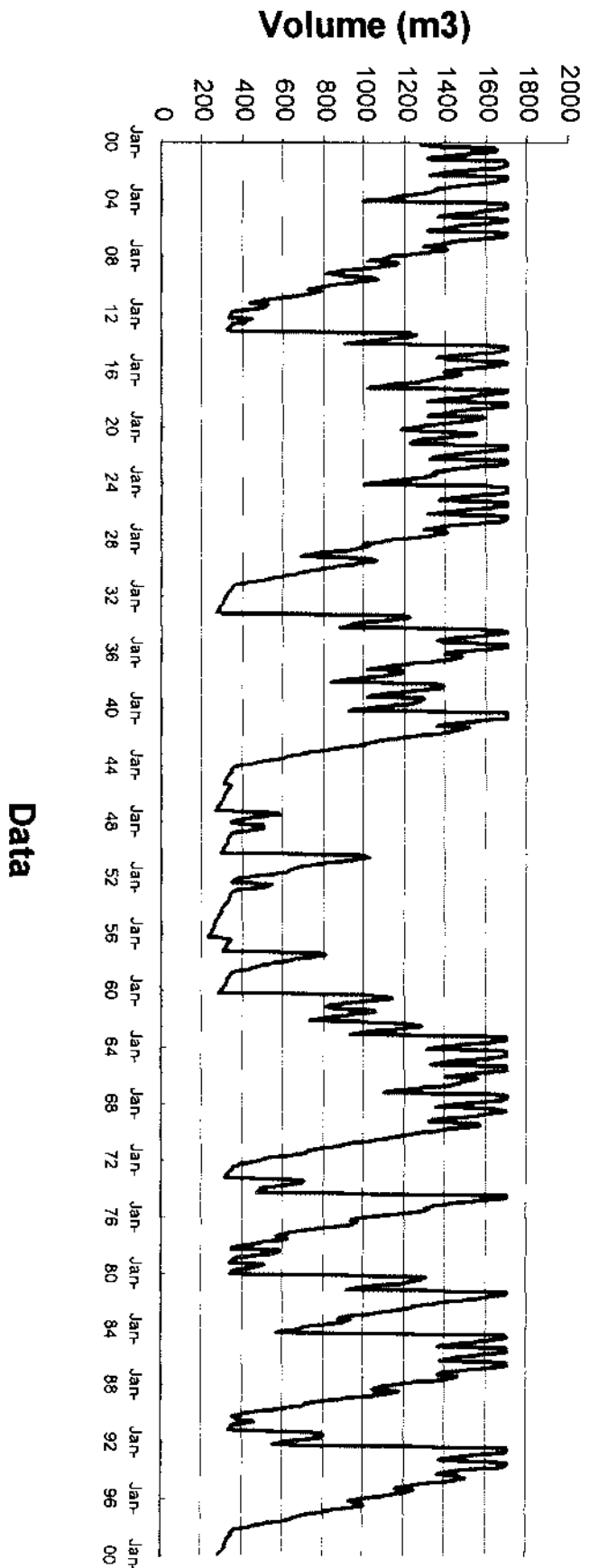


Figura 4 – Simulação de Volume Acumulado



## Simulação ModSimP32 - Nível

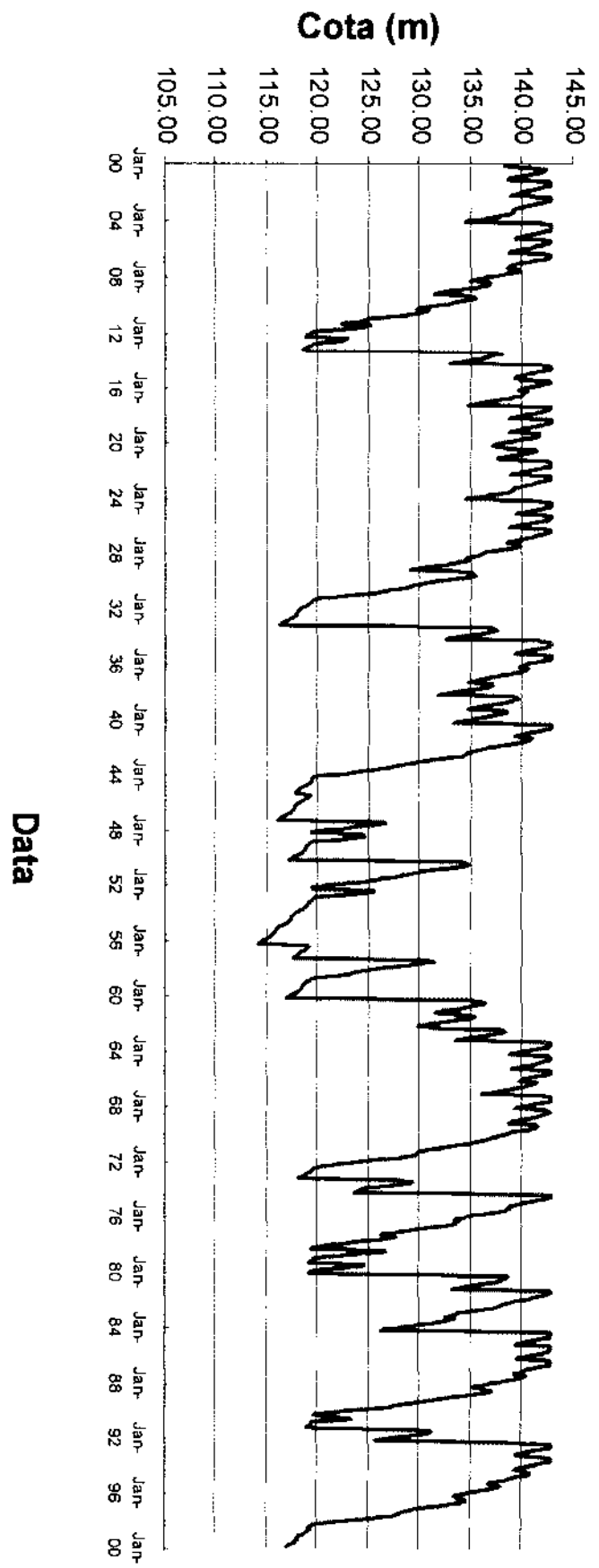


Figura 5 – Simulação de Níveis do Açude

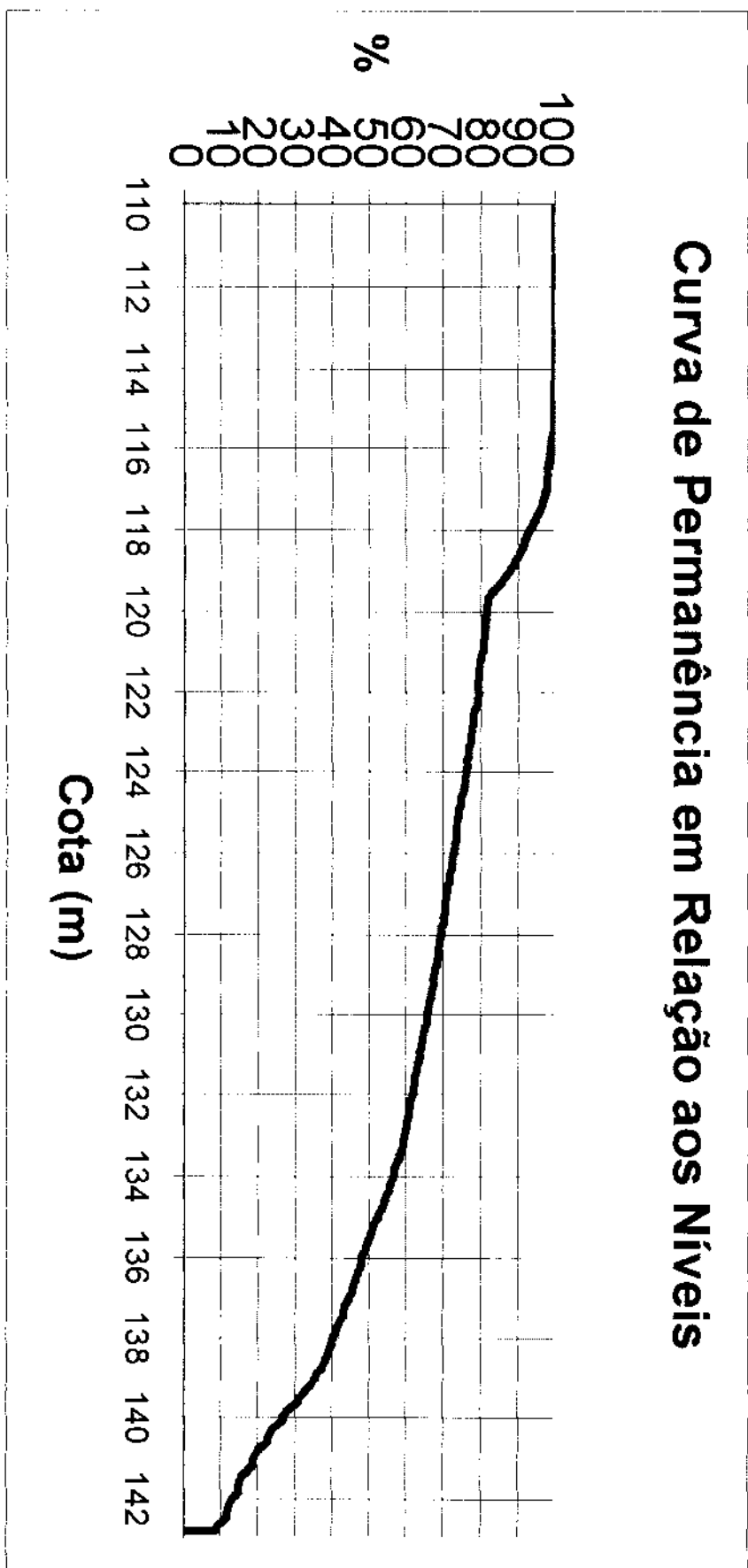


Figura 6 – Curva de Permanência

Assim, tomando –se como mínimo a cota do volume de alerta:

Volume de alerta = 243,5 ~~m~~<sup>3</sup> Hm<sup>3</sup>

Cota do nível de alerta correspondente = 114,7 m

Cota do nível de sangria = 142,5 m

Nível Ideal do ponto de vista mecânico = 128.6 m

Respectivo valor na curva de permanência: 68,42%

Levando em conta todos os dados conseguidos até então, optou-se por adotar um nível de projeto que esteja entre os obtidos, a saber:

**Tabela 3 – Garantias obtidas da curva de permanência**

Cota (m)	Garantia (%)
119.35	85
121.23	80
124.54	75
125.50	73,50*
127.56	70
130.33	65
132.80	60
134.41	55
135.53	50

\*Dado obtido pelo método determinístico

Adotou-se para projeto o nível de 125,5 m, com garantia de 73,5% do método determinístico. Desta forma o sistema trabalhará com um rendimento próximo ao ideal e é levado em conta um nível de garantia inicial (lembrando que o sistema pode vir a ser otimizado de acordo com a operação) satisfatório.



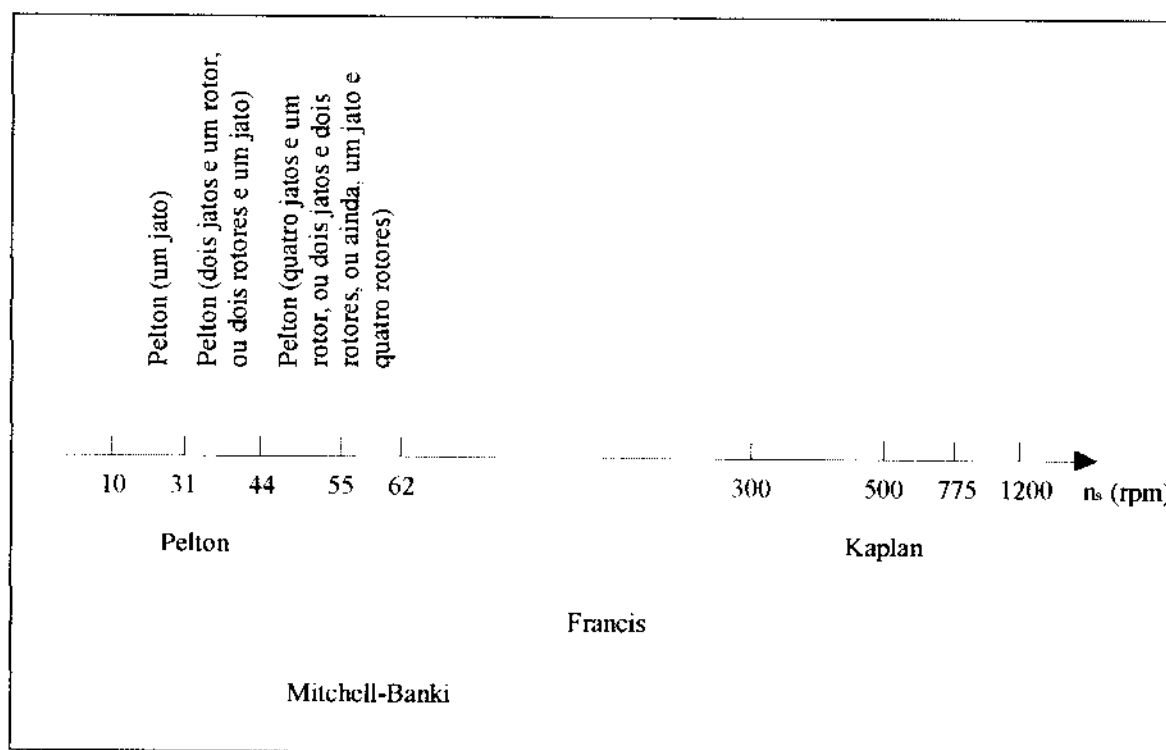
O aproveitamento hidráulico pode ser caracterizado em função da rotação específica. Com os dados de carga na turbina (carga líquida de 31 m.c.a), vazão na turbina ( $Q = 3,43 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e rotação na turbina (variando entre 600 e 1000 RPM) chega-se à rotação específica do sistema hidráulico da turbina, dada por  $n_s$  em RPM.

$$n_s = n \times \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Para  $H = 31 \text{ m.c.a.}$ ,  $Q = 3,43 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n$  variando de 600 a 1000 RPM resulta na rotação específica (em RPM) variando no intervalo:

$$84 \leq n_s \leq 141$$

O gráfico da figura 8 apresenta diferentes tipos de turbinas para intervalos de rotação específica.



**Figura 8 - Intervalos normais de operação de diferentes turbinas em função da rotação específica**

Pelo exposto se conclui que a turbina Mitchell-Banki Cross-Flow (ou Fluxo-Cruzado) é a mais adequada para o aproveitamento hidráulico.

### 2.3 - ESPECIFICAÇÃO DA BOMBA E PONTO DE OPERAÇÃO

A bomba foi especificada procurando atender a vazão e altura manométrica esperada. Foram observados vários tipos e modelos de bombas, procurando especificar a que melhor se adaptasse ao sistema hidráulico proposto, o que significa ter seu ponto de funcionamento o mais próximo possível do máximo rendimento.

Também foi considerada a possibilidade de operações parciais, devendo o sistema ser capaz de operar com baixas cargas na turbina (redução de 25% na carga).

As bombas estudadas com base nos dados fornecidos pelos fabricantes foram:

- Sulzer, bipartida, modelo SMN 253-640, curva original número 6.3300.815/1 (1170 RPM curva original), ponto de projeto com vazão de 0,30 m<sup>3</sup>/s e altura manométrica de 154 m.c.a, a uma rotação de 1598 RPM, rendimento de 79% e rotor de 640 mm.
- KSB, bipartida, modelo KSB RDL 300-620 B, ponto de projeto com vazão de 0,30 m<sup>3</sup>/s, altura manométrica de 140 m.c.a. com rotação de 1750 RPM, rendimento de 79% e rotor de 590 mm.
- ABS, bipartida, modelo ABS Z22-350/300-61, curva número 6662-3, ponto de projeto com vazão de 0,33 m<sup>3</sup>/s e altura manométrica de 150 m.c.a. com rotação de 1780 RPM, rendimento de 78% e rotor de 580 mm.

Estas bombas apresentam características hidráulicas muito próximas. A Tabela 4 apresenta opções de sistemas de recalque onde é destacada em **negrito** a opção escolhida, que consiste em duas adutoras de 600 mm, com dois conjuntos Turbo-Bomba por adutora, apresentando uma vazão total de projeto no recalque em torno de 1,20 m<sup>3</sup>/s, com vazão total consumida pelo sistema de 15 m<sup>3</sup>/s. O conjunto opera com bomba ABS Z22-350/300-61, curva 6662-3, com rotação de 1780 RPM.

Bombas de outros fabricantes podem ser utilizadas, desde que apresentem desempenho igual ou superior às bombas utilizadas no projeto.

**Tabela 4 - Diferentes Opções de Recalque**

Número de Conjuntos por Adutora	Diâmetro Adutora (mm)	Número de Adutoras	Custo por Adutora (Real)	Vazão Turbinada Total (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Recalc. por Adutora (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Total de Recalque (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Total consumida pelo Sistema (m <sup>3</sup> /s)
*2	600	2	1.988.890	13,72	0,60	1,20	15
2	650	2	2.391.484	13,72	0,68	1,36	15
2	700	2	2.575.444	16,88	0,84	1,68	18,56
2	900	2	3.794.397	17,6	0,92	1,84	19,44
2	1000	1	4.001.444	—	—	—	—
3	700	2	2.575.444	21,7	0,95	1,90	23,7
3	900	2	3.794.397	26,4	1,4	2,8	29,2
3	1000	1	4.001.444	13,5	1,6	1,6	15,1
4	700	1	2.575.444	12,6	1,0	1,0	13,60
4	900	1	3.794.397	16,8	1,65	1,65	18,45
4	1000	1	4.001.444	17,6	1,8	1,8	19,40
6	700	1	2.575.444	9,96	0,84	0,84	10,8
6	900	1	3.794.397	13,5	1,4	1,4	14,9
6	1000	1	4.001.444	15,0	1,65	1,65	16,7
7	700	1	2.575.444	10,5	0,85	0,85	11,35
7	900	1	3.794.397	14,9	1,5	1,5	16,41
7	1000	1	4.001.444	16,8	1,8	1,8	18,6

Para os resultados apresentados na tabela foram utilizados os seguintes dados:

- Extensão da adutora: 6.612 metros
- Desnível geométrico: 113,1 metros
- Carga líquida na turbina: 31 m.c.a.
- Rendimento da turbina: 69%
- Rendimento da bomba: 75%
- Rendimento da Transmissão: 95%



**Tabela 4 - Diferentes Opções de Recalque**

Número de Conjuntos por Adutora	Diâmetro Adutora (mm)	Número de Adutoras	Custo por Adutora (Real)	Vazão Turbinada Total (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Recalc. por Adutora (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Total de Recalque (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Total consumida pelo Sistema (m <sup>3</sup> /s)
*2	600	2	1.988.890	13,72	0,60	1,20	15
2	650	2	2.391.484	13,72	0,68	1,36	15
2	700	2	2.575.444	16,88	0,84	1,68	18,56
2	900	2	3.794.397	17,6	0,92	1,84	19,44
2	1000	1	4.001.444	—	—	—	—
3	700	2	2.575.444	21,7	0,95	1,90	23,7
3	900	2	3.794.397	26,4	1,4	2,8	29,2
3	1000	1	4.001.444	13,5	1,6	1,6	15,1
4	700	1	2.575.444	12,6	1,0	1,0	13,60
4	900	1	3.794.397	16,8	1,65	1,65	18,45
4	1000	1	4.001.444	17,6	1,8	1,8	19,40
6	700	1	2.575.444	9,96	0,84	0,84	10,8
6	900	1	3.794.397	13,5	1,4	1,4	14,9
6	1000	1	4.001.444	15,0	1,65	1,65	16,7
7	700	1	2.575.444	10,5	0,85	0,85	11,35
7	900	1	3.794.397	14,9	1,5	1,5	16,41
7	1000	1	4.001.444	16,8	1,8	1,8	18,6

Para os resultados apresentados na tabela foram utilizados os seguintes dados:

- Extensão da adutora: 6742 metros
- Desnível geométrico: 113,1 metros
- Carga líquida na turbina: 31 m.c.a.
- Rendimento da turbina: 69%
- Rendimento da bomba: 75%
- Rendimento da Transmissão: 95%

O rendimento adotado de 75% para as bombas é devido às variações na carga da turbina, que resulta em aumento ou diminuição na rotação da bomba, o que a leva a operar fora do seu ponto de projeto. Sendo assim, o rendimento já não é mais o rendimento do ponto de projeto, que no caso das bombas analisadas é de aproximadamente 80%.

Com base na Tabela 4, a opção adotada foi a (\*). O critério para a escolha foi o custo da adutora, a vazão recalçada, a vazão total consumida, e principalmente a possibilidade de montagem por etapas, uma vez que o sistema escolhido consta de duas adutoras e quatro conjuntos de recalque.

A seguir são apresentados dois gráficos do sistema de recalque para uma única adutora (600 mm), tendo dois conjuntos Turbo-Bomba acoplados e uma válvula borboleta na extremidade final da adutora, simulando diferentes aberturas. Estes dois gráficos correspondem à opção adotada e a diferença entre eles é a carga atuante na turbina, de 31 metros no gráfico da figura 5 e 23 metros no gráfico da figura 10. A redução na carga faz com que seja reduzida a rotação na turbina e conseqüentemente na bomba, o que resulta na redução da vazão e carga na bomba. A tabela 5 apresenta o ponto de funcionamento do sistema hidráulico adotado (diâmetro da adutora e número de conjuntos Turbo-Bomba) para diferentes números de conjuntos operando e também a vazão obtida pelo sistema para uma carga na turbina reduzida de aproximadamente 25%, ou seja, uma carga de 23 m.c.a.

Os gráficos construídos cujos resultados se encontram na Tabela 4 (Diferentes Opções de Recalque), encontram-se em anexo neste volume.

**Tabela 5 - Vazões de Recalque para Diferentes Condições de Operação**

Número de conjuntos de recalque	Número de conjuntos por Adutora	Número de conjuntos operando por adutora	Carga na turbina (m.c.a.)	Rotação na Bomba (RPM)	Vazão recalçada por adutora (m <sup>3</sup> /s)	Vazão total recalçada (2 adutoras) (m <sup>3</sup> /s)
4	2	1	31	1780	0,40	0,80
			23	1533	0,23	0,46
		2	31	1780	0,60	1,20
			23	1533	0,34	0,68

Legenda da Abertura de Válvulas:

Cada linha ascendente dos gráficos das figuras 9 e 10 corresponde a um coeficiente denominado Ks da válvula, que corresponde a uma abertura em graus (a abertura máxima desta válvula é 90 graus) e então pode-se calcular a porcentagem de abertura, sendo assim:

respectivamente, de baixo para cima:

$K_s = 0,15$ : implica 87 graus de abertura ou 97%

$K_s = 70$ : implica 30 graus de abertura ou 33%

$K_s = 175$ : implica 20 graus de abertura ou 22%

$K_s = 280$ : implica 15 graus de abertura ou 16,6%

## Adutora Banabuiú - Duas Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação

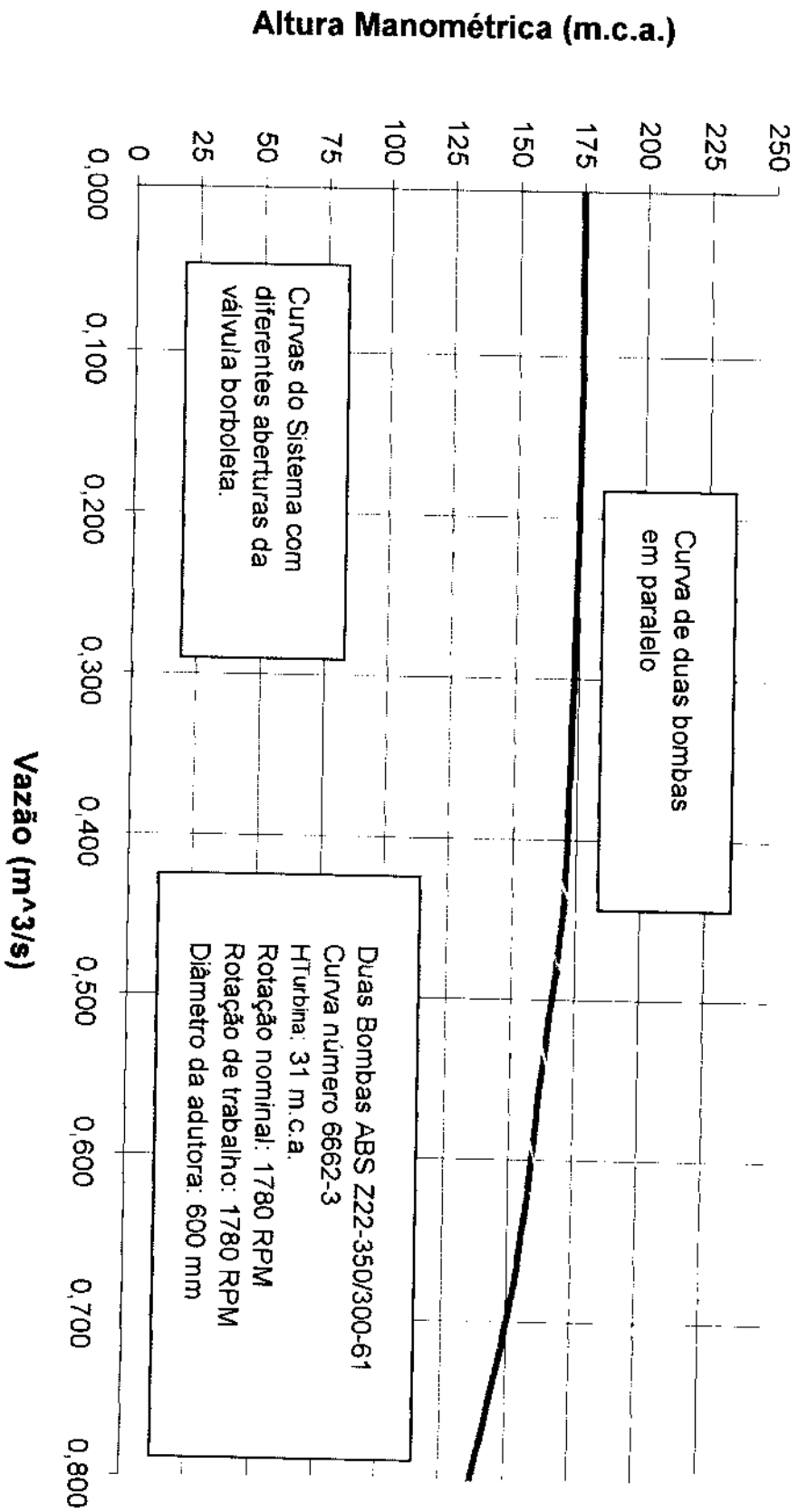
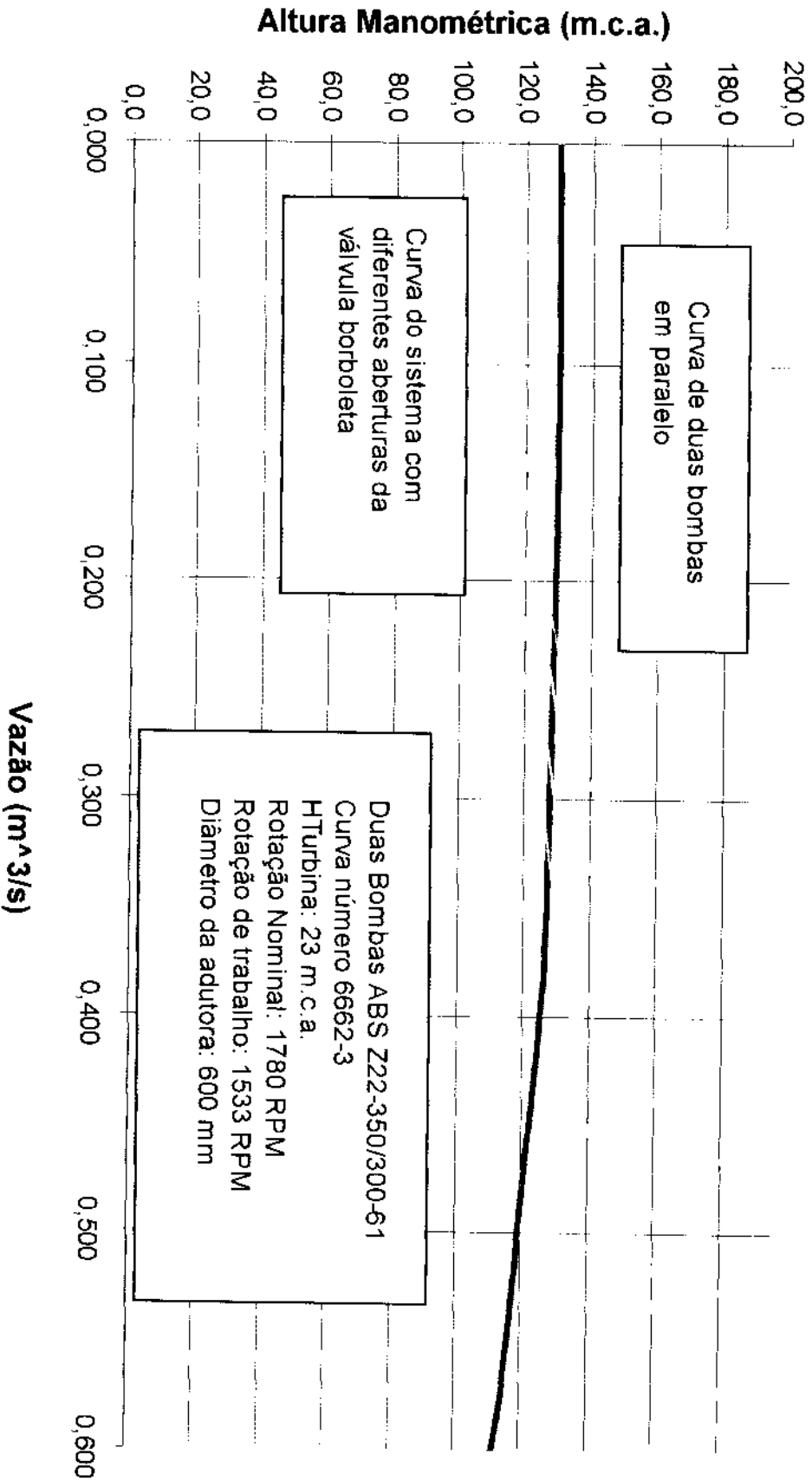


Figura 9 - Pontos de operação para carga na turbina de 31 m.c.a.

## Adutora Banabuiú - Duas Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação



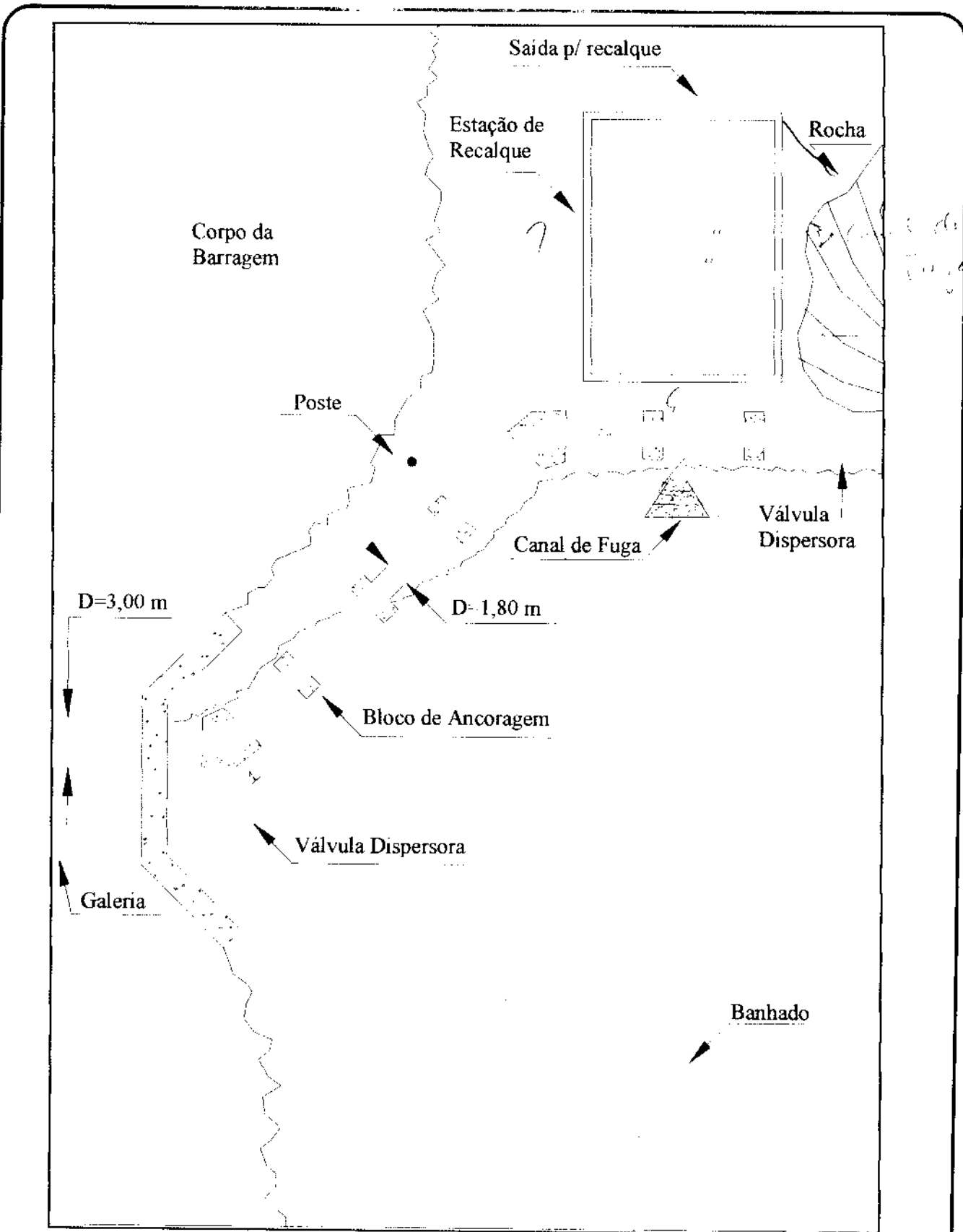
**Figura 10 - Pontos de operação para carga na turbina de 23 m.c.a.**

#### 2.4 - ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA HIDRÁULICO AÇUDE-BARRILETE

O sistema hidráulico alimentador de bombas e turbinas será constituído por meio de uma tubulação proveniente da tomada d'água do açude, sendo capaz de abastecer por gravidade tanto o sistema hidráulico das turbinas, como o das bombas. A tubulação, que é única, chegará à casa de máquinas (estação elevatória) permitindo duas ramificações, uma destinada ao barrilete da turbina e outra ao barrilete das bombas. Na extremidade desta tubulação será implantada a válvula dispersora hoje instalada no final da galeria do açude. Estes barriletes seriam os de entrada na casa de máquinas. Haverá dois barriletes de saída, que serão os de recalque para cada uma das duas adutoras. A vazão turbinada deverá deixar a casa de máquinas através de um canal de fuga construído sob o piso da casa de máquinas.

Portanto, neste item será feito o dimensionamento do sistema hidráulico Açude-Barrilete verificando se as vazões (e cargas) obtidas através do escoamento gravitário atendem às vazões e cargas necessárias para o acionamento das turbinas. A figura 11 apresenta um esquema (sem escala) do sistema hidráulico proposto.

As galerias existentes no açude Banabuiú (duas), possuem diâmetros de 3 metros, porém são reduzidas a 1,80 metros no flange que faz a conexão com a válvula dispersora cônica. Considerando o sistema açude-barrilete como sendo um "penstock", este não deveria apresentar perdas superiores a 1% neste trecho. Porém admitiu-se perdas de até 6%, que ocorrerão quando a válvula dispersora e turbinas estiverem operando. A razão principal para se admitir perdas de até 6% é a redução de custos da tubulação entre açude e barrilete.



**Figura 11 – Desenho esquemático do sistema hidráulico de recalque**







Os valores adotados para a rugosidade absoluta do tubo ( $e$ ) e viscosidade cinemática foram de:

$$e = 0,00025 \text{ m (tubo de aço com leve enferrujamento)}$$

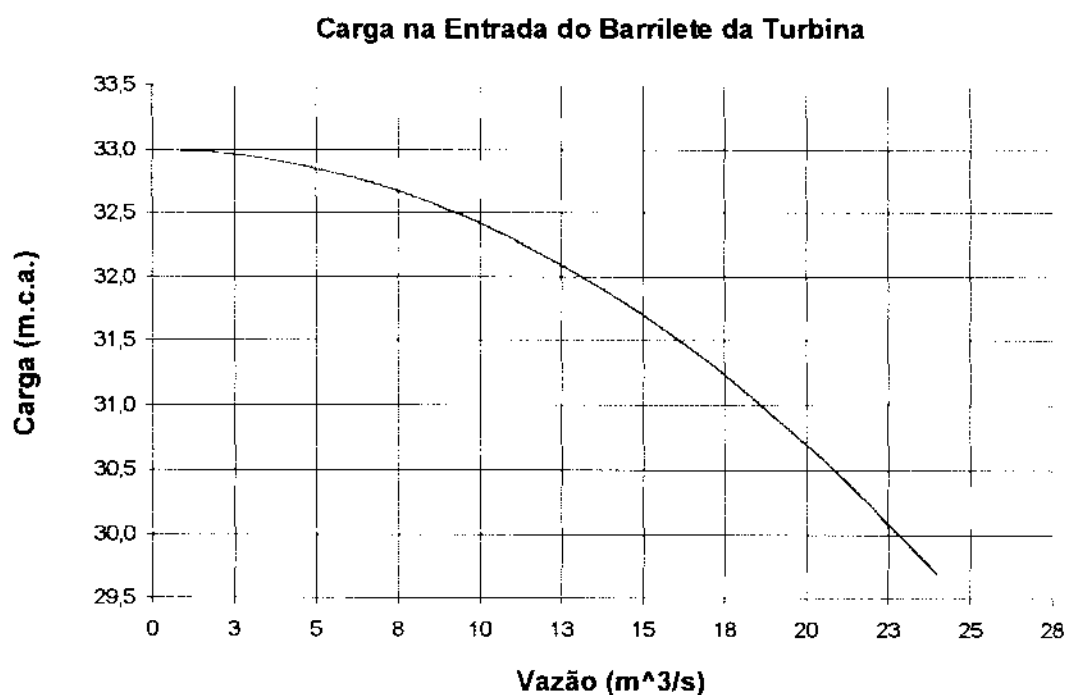
$$\mu = 0,000000876 \text{ (para temperatura de } 26^\circ\text{)}$$

- **Equação e Gráfico da Perda de Carga para o Sistema Gravitário Açude-Barrilete**

Para o sistema constituído de dois trechos com diâmetros diferentes e desprezando a perda de carga na redução do diâmetro tem-se:

$$\Delta H = f_1 \frac{310}{3} \frac{V_1^2}{2 \times 9,81} + f_2 \frac{80}{1,8} \frac{V_2^2}{2 \times 9,81}$$

Que origina o seguinte gráfico:



**Figura 12 - Carga na entrada do barrilete de adução em função da vazão**

De acordo com o gráfico, para a vazão de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  (vazão total consumida pelo sistema) a carga disponível no sistema é de  $31,75 \text{ m.c.a.}$ , porém considerando que a válvula dispersora esteja

fechada. Para o caso da válvula aberta, a carga disponível no sistema pode chegar a 31 m.c.a., que é a carga líquida utilizada no dimensionamento do conjunto Turbo-Bomba.

## 2.5 - ESPECIFICAÇÃO DOS BARRILETES DE ADUÇÃO E RECALQUE

Nos itens seguintes são apresentadas as metodologias para o dimensionamento hidráulico e mecânico dos barriletes de adução das turbinas, de sucção e recalque das bombas. O desenho com o sistema composto pelos barriletes: de adução e derivações para as turbinas, de sucção e suas derivações para as bombas em 45° e os de recalque, podem ser vistos no Tomo II – Desenhos – Volume 1.

### 2.5.1 - Barriletes de Adução das Turbinas

O critério para o dimensionamento hidráulico do barrilete alimentador das turbinas é o da velocidade, devendo a mesma ficar em no máximo 4 m/s, sendo que o ideal é entre 1,8 e 2,2 m/s, que é considerada como ótimo pelos fabricantes de turbinas. Estes limites de velocidade se baseiam em uma adaptação da forma de Bresse e tem como princípio a utilização do coeficiente K bem próximo a 0,8, uma vez que os parâmetros passíveis de utilização variam de 0,7 a 1,13. Desta forma, o diâmetro do barrilete que teve início com  $\varnothing = 1,80$  m sofreu uma redução após duas derivações (saída para as turbinas em 45°). A velocidade na entrada de cada turbina foi mantida a mesma, tomando-se as derivações com um diâmetro de 1,50 m, que resulta em velocidades da ordem de 1,94 m/s para vazão turbinada de 3,4 m<sup>3</sup>/s. A vazão de projeto turbinada foi acrescida em 5%, (fator de segurança em decorrência do possível funcionamento da turbina submetida a cargas mais elevadas que a de projeto), resultando em 3,6 m<sup>3</sup>/s a vazão para cada turbina, o que implica em uma velocidade admissível de 2,0 m/s. Os diâmetros das derivações devem ser todos de:

$$D = \left( \frac{4 \times Q}{\pi \times V} \right)^2$$

Onde:

$Q$  = vazão (m<sup>3</sup>/s)

$V$  = velocidade média do escoamento (m/s)

$D$  = diâmetro (m)

$$D = \left( \frac{4 \times 3,6}{\pi \times 2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$D = 1,50m$$

Portanto todas as derivações do barrilete em direção à turbina deverão ter o diâmetro mínimo de 1,50 m.

Após duas derivações (vazões para duas turbinas), o barrilete deverá ter uma redução no seu diâmetro, passando a ter o mesmo diâmetro que as derivações, o que desta forma mantém adequada a velocidade de escoamento nas derivações. A seguir é apresentada a Tabela 6 - Resumo das Características Hidráulicas do Barrilete de Adução e Derivações, com seus respectivos diâmetros, vazões, áreas das seções e velocidades.

**Tabela 6 - Características Hidráulicas do Barrilete de Adução e Derivações**

	Seções no Barrilete				Derivações do Barrilete			
	*S <sub>B1</sub>	S <sub>B2</sub>	S <sub>B3</sub>	S <sub>B4</sub>	*S <sub>D1</sub>	S <sub>D2</sub>	S <sub>D3</sub>	S <sub>D4</sub>
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	14,4	10,8	7,2	3,6	3,60 m <sup>3</sup> /s			
Diâmetro (m)	1,80	1,80	1,50	1,50	1500 mm			
Velocidade (m/s)	5,65	4,24	4,07	2,00	2,00 m/s			
Área das seções (m <sup>2</sup> )	2,54	2,54	1,77	1,77	1,77 m <sup>2</sup>			

\*S<sub>B</sub> e \*S<sub>D</sub> são respectivamente as seções dos barriletes e das derivações.

O desenho relativo ao sistema hidráulico Açude-Barrilete, barrilete de adução e derivações, em escala, podem ser vistos no Tomo II - Desenhos, Volume 1.

### 2.5.2 - Barriletes de Sucção das Bombas

O critério para o dimensionamento hidráulico do barrilete de sucção também é o critério de velocidade. Desta forma, a tubulação do barrilete deve ter um diâmetro tal que a velocidade no seu interior não ultrapasse 2 m/s, no caso de água fria (Azevedo Netto & G. A. Alvarez, Manual de

Hidráulica, 1991). Quanto à altura de sucção, não haverá problemas posto que as bombas trabalharão manometricamente afogadas.

O barrilete foi dimensionado admitindo-se uma velocidade de 1 m/s. Tomando a vazão de projeto acrescida em 5% (fator de segurança em decorrência do possível funcionamento da turbina sob carga maiores que às de projeto) para os quatro conjuntos, pois, embora as adutoras sejam independentes possuindo cada qual 2 conjuntos de recalque, o barrilete de sucção será o mesmo para as quatro bombas. Desta forma a vazão total recalçada de projeto para o barrilete de sucção será de 1,42 m<sup>3</sup>/s (com um pequeno acréscimo em relação à vazão de recalque para que o sistema trabalhe com folga). A partir destes valores (velocidade e vazão) chega-se facilmente ao diâmetro necessário da tubulação. A medida que ocorre a redução da vazão devido à sucção da primeira até a quarta bomba, o diâmetro vai sendo reduzido de forma a manter a velocidade dentro de limites aceitáveis, de forma que o líquido tenha a mesma velocidade no flange de entrada de todas as bombas.

Para a velocidade de escoamento de 1 m/s, o diâmetro no início do barrilete (na derivação do sistema hidráulico Açude-Barrilete) será de:

$$D = \left( \frac{4 \times Q}{\pi \times V} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Onde:

$Q$  = vazão (m<sup>3</sup>/s)

$V$  = velocidade média do escoamento (m/s)

$D$  = diâmetro (m)

$$D = \left( \frac{4 \times 1,42}{\pi \times 1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$D = 1,3m$$

A vazão de projeto na sucção neste item para cada bomba é de 0,35 m<sup>3</sup>/s, e mantendo-se a velocidade em 1 m/s, a vazão para o segundo trecho será de 1,07 m<sup>3</sup>/s, o que resulta em um diâmetro para a segunda seção de:

$$D = \left( \frac{4 \times 1,07}{\pi \times 1} \right)^2$$

$$D = 1,17m$$

Da mesma forma, para o terceiro trecho, a vazão então será de 0,72 m<sup>3</sup>/s, o que confere para o trecho em questão um diâmetro de:

$$D = 0,96m$$

Para o quarto trecho, ainda com a velocidade de 1 m/s, o barrilete terá o diâmetro da própria derivação que faz a conexão entre barrilete e turbina. Para a vazão de 0,36 m<sup>3</sup>/s, o diâmetro necessário é da ordem de:

$$D = 0,67m$$

Portanto, as derivações do barrilete para todas as bombas deverão ter um diâmetro da ordem de 670 mm. Todas as derivações deverão sair do barrilete em 45°. Os desenhos relativos ao sistema hidráulico Açude-Barrilete, barrilete e derivações podem ser vistos no Tomo II - Desenhos, Volume 1.

### 2.5.3 - Barrilete de Recalque

O dimensionamento hidráulico, como nos itens anteriores, também foi baseado no critério de velocidade. À medida que são acrescentadas as vazões oriundas das diversas bombas ao barrilete, o diâmetro vai sendo aumentado de forma a manter a mesma velocidade que deve ser menor que a velocidade da tubulação de recalque. Normalmente a velocidade no barrilete de recalque é menor que 3 m/s (Macintyre, A. J., Bombas e Instalações de Bombeamento, 1997). A velocidade de projeto da adutora para a vazão de 0,60 m<sup>3</sup>/s para cada adutora é de aproximadamente 2,04 m/s, portanto a velocidade no barrilete não deverá exceder este valor. A vazão na saída de cada bomba é da ordem de 0,31 m<sup>3</sup>/s.

Fixando a velocidade de recalque em 1 m/s, valor usual em instalações de recalque, o diâmetro na saída das bombas deverá ser de:

$$D = 0,66m$$

Já no barrilete propriamente dito, à partir da segunda bomba, o diâmetro deverá ser de:

$$D = 0,93m$$



Com o qual seguirá a tubulação até o encontro com o início da adutora.

A formulação utilizada no cálculo é a mesma dos itens anteriores (2.5.1 e 2.5.2).

#### 2.5.4 - Espessura da Parede das Tubulações

A espessura da parede da tubulação (dimensionamento mecânico), do Sistema Hidráulico Açude-Barrilete e dos barriletes de adução da turbina e sucção das bombas teriam, a princípio, espessuras diferentes. Porém, por estarem submetidas a pressões e sobrepressões baixas muito próximas, (no caso do sistema hidráulico Açude-Barrilete e barrilete de adução e sucção das bombas), o dimensionamento resultou na espessura mínima estrutural. A espessura mínima estrutural é a espessura mínima que deve ter a tubulação para resistir ao transporte, corrosão, flecha mínima, esforços sobre os apoios e resistir ao próprio peso.

No caso do barrilete de recalque, as pressões atuantes são em função das pressões originadas pelas bombas somadas aos transitórios ocorridos em funções de manobras inerentes ao sistema e ou acidentes. Isto posto, o valor de projeto calculado resultou em um valor menor que a espessura mínima.

A espessura mínima estrutural é a espessura mínima que deve ter a tubulação para resistir ao transporte, corrosão, flecha mínima, esforços sobre os apoios e resistir ao próprio peso. Este item foi desenvolvido com base na literatura encontrada sobre o assunto, constituída pelo "Curso de Tubulações Hidráulicas" – Departamento de Engenharia Hidráulica da UFMG, 1972, o qual é baseado nas normas:

- **American Water Works Association (AWWA)**

Norma H-1 (ANSI A-21.1) – Computation of Strength and Thickness of Cast Iron Pipe.

Norma M-11 – Steel Pipes

- **American National Standard Institute – American Standard Code for Pressure Piping – (ANSI B.31)**

- **Normas da ABNT**

P-NB-126, EB-5, EB-6, EB-43, EB-103, EB-109, EB-137.

Também sobre o assunto, consta o livro "Tubulações Industriais", cujo autor é Telles, P.C.S., EPUSP, 1976, 4ª Edição, o qual tem por base normas da ANSI (American National Standard Institute).

Doravante, ao se citar a referência bibliográfica, subentende-se as normas utilizadas nos cálculos.

A determinação da espessura da parede foi feita considerando um tubo de parede fina de espessura (e) e diâmetro (D), considerando (D) muito maior que (e). Usualmente considera-se um tubo de parede fina se  $D \gg 40 \times e$ .

O dimensionamento da espessura foi feito com base no Aço ASTM A283D que apresenta as seguintes características (Curso de Tubulações Hidráulicas, UFMG, 1972):

- Limite de escoamento: 2240 kg/cm<sup>2</sup>
- Tensão admissível (50% do limite de escoamento): 1120 kg/cm<sup>2</sup>

Para o caso de tubos não enterrados, o dimensionamento é feito em função da pressão interna (Curso de Tubulações Hidráulicas, UFMG, 1972; Telles, 1976), onde:

$$\sigma_{Adm} = \frac{P \times D}{2 \times t}$$

Onde:

$P$  = pressão interna (m.c.a.)

$D$  = diâmetro (m)

$t$  = espessura do tubo (m)

A espessura do tubo pode ser determinada então por:

$$t \geq \frac{P \times D}{2 \times \sigma_{Adm}}$$

Com o valor da espessura calculada, verifica-se o valor da pressão de colapso. Deve ser analisado se a pressão de colapso é superior à pressão externa de projeto caso o tubo possa estar sujeito a vácuo. A pressão de colapso é dada pela seguinte fórmula (Curso de Tubulações Hidráulicas, UFMG, 1972):

$$P_c = 35280000 \left( \frac{t}{D} \right)^3$$

Onde:

$t$  = espessura do tubo (m)

$D$  = diâmetro do tubo em (m)

$P_c$  = pressão de colapso (m.c.a.)

O espaçamento máximo entre apoios foi definido a partir da equação para a verificação da flecha máxima e da tensão máxima atuante na parede do tubo, onde a primeira (flecha máxima, segundo o Curso de Tubulações Hidráulicas, UFMG, 1976) é dada por:

$$f = 0,0015(qt + ql) \frac{L^4}{I_0}$$

Onde:

$qt$  = peso próprio do tubo (kg/m)

$ql$  = peso do líquido contido (kg/m)

$L$  = vão entre suportes (m)

$I_0$  = momento de inércia da seção transversal (cm<sup>4</sup>)

Reescrevendo a equação:

$$L = \left( \frac{f \times I_0}{0,0015 \times (qt + ql)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

A tensão máxima atuante na parede do tubo devido aos momentos fletores relativos às cargas, como peso próprio, peso do líquido contido no interior e sobrecargas externas que podem estar atuando sobre o tubo, dependerá do sistema de apoios e do tipo de carregamento. Neste caso o cálculo será feito como viga contínua, simplesmente apoiada em vários suportes sucessivos, igualmente espaçados. Para esta configuração, a maior tensão devida aos momentos fletores que ocorrerá na seção transversal de cada apoio é dada por (Curso de Tubulações Hidráulicas, UFMG, 1972):

$$S_r = \frac{10 \times L^2}{Z} (qt + ql)$$

Onde:

$S_r$  = tensão máxima na parede do tubo (kg/cm<sup>2</sup>)

$L$  = vão entre suportes (m)

$Z$  = momento resistente da seção transversal (cm<sup>3</sup>)

$qt$  = peso próprio do tubo (kg/m)

$ql$  = peso do líquido contido (kg/m)

Partindo desta equação e reescrevendo-a em outra forma pode-se verificar o espaçamento máximo entre apoios a partir da tensão máxima atuante nas paredes dos tubos:

$$L = \left( \frac{S_r \times Z}{10(qt + ql)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Foi considerada ainda a tensão concentrada que se verifica na região dos suportes. Para tubos de aço com paredes flexíveis, a tensão localizada é dada por (Curso de Tubulações Hidráulicas, UFMG, 1972):

$$S_T = f \frac{R}{t^2} \log \frac{D}{2 \times t}$$

Sendo:

$S_T$  = tensão concentrada máxima (lbs/pol<sup>2</sup>)

$f$  = coeficiente cujo valor é dado por:

$$f = 0,02 - 0,00012(A - 90)$$

$A$  = ângulo de apoio (graus)

$R$  = reação dos pesos no suporte (lbs)

$D$  = diâmetro do tubo (pol)

$t$  = espessura do tubo (pol)

Para o dimensionamento da espessura da tubulação devemos determinar a pressão de projeto, que é diferente da pressão de trabalho da tubulação. Pressão de projeto neste item será a pressão de trabalho acrescida da sobrepressão e subpressão decorrente do transitório gerado por alguma manobra.

Com uma avaliação simplificada e conservadora, o transiente hidráulico foi determinado a partir da equação de MICHAUD, dada por:

$$\Delta H = \pm \frac{2 \times L \times \Delta V}{g \times t}$$

Onde:

$\Delta H$  = variação da pressão máxima em torno da pressão estática normal (m.c.a.)

$L$  = comprimento da tubulação (m)

$\Delta V$  = variação da velocidade antes e depois do golpe (m/s)

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$t$  = tempo de fechamento eficaz (s)

A equação de MICHAUD leva em consideração uma variação linear da velocidade de escoamento em função do tempo (como o fechamento de uma válvula), portanto o tempo de fechamento deve estar de acordo com a equação abaixo, caracterizando uma manobra lenta.

$$t \geq \frac{2 \times L}{a}$$

Onde:

$t$  = tempo de fechamento eficaz (s)

$L$  = comprimento da tubulação (m)

$a$  = velocidade de propagação (m/s)

A equação para a velocidade de propagação da onda é dada por:

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D}{e}}}$$

Onde:

$c$  = velocidade de propagação (m/s)

$k$  = coeficiente que leva em consideração o módulo de elasticidade = 0,5 para tubos de aço.

$D$  = Diâmetro do tubo (m)

$e$  = espessura do tubo (m)

Com o valor da sobrepressão e subpressão somado à carga estática determina-se a pressão de projeto.

A espessura calculada não é a espessura utilizada. A espessura calculada é o valor mínimo que a tubulação deve ter para que os tubos resistam aos esforços mecânicos.

Em virtude dos processos de fabricação não terem um controle de qualidade ideal, tubos de aço fabricados a partir de chapas, devem ser acrescidos na espessura em 0,25 mm (Curso de Tubulações Hidráulicas, UFMG, 1972).

Para locais onde o fluido é agressivo, propiciando a corrosão do material do tubo, deve-se adotar uma sobre-espessura para evitar-se a corrosão na parede do tubo. Para o caso de águas neutras, a espessura deve ser aumentada em 1,5 mm (Curso de Tubulações Hidráulicas, UFMG, 1972); segundo Telles, (Tubulações Industriais, 1976), a sobre espessura para escoamento com água agressiva deve ser de 3 a 4 mm.

Mesmo em tubulações com baixa pressão interna e esforços externos reduzidos, o tubo deve ter uma espessura mínima para não se deformar pelo próprio peso e para possibilitar o manuseio. Para tubos aéreos, estes devem ter uma **espessura mínima estrutural** que os permita vencer os vãos entre suportes. De acordo com o "Curso de Tubulações Hidráulicas", UFMG, 1972, a espessura mínima dos tubos de aço é de 1% do diâmetro, com o mínimo de 4 mm. Já segundo Telles, (Tubulações Industriais, 1976), por motivos de resistência estrutural (para evitar a necessidade de vãos muito

pequenos entre os suportes) e também resistência à corrosão, adota-se geralmente, para tubos de aço, a seguinte espessura mínima, independente do valor que tenha a pressão: 9 mm para diâmetros nominais maiores que 14".

Cabe ainda lembrar que o coeficiente de 1,4 utilizado para majorar o peso próprio da tubulação e volume contido na mesma é um coeficiente de segurança para a conversão de carga características em cargas de cálculos, muito comum em levantamentos de carga para o dimensionamento de estruturas.

- **Espessura da Tubulação do Sistema Hidráulico Açude-Barrilete e Barriletas (Adução turbina e Sucção bombas)**

Para a especificação da espessura da tubulação no sistema hidráulico Açude-Barrilete foi necessário determinar-se a carga de projeto no sistema, que neste caso, não é considerada a carga de 33 m.c.a., mas sim a carga máxima em decorrência das variações do nível do reservatório. Portanto a carga de projeto neste item foi de 45 m.c.a., valor obtido quando o reservatório atinge a cota de 137,5 metros somada ao incremento de carga devido a algum transitório gerado por operações inerentes a instalação, ou ainda por falhas humanas e ou de equipamentos.

A partir desta pressão de projeto, com base na tensão admissível do aço, e coeficientes de segurança, determina-se a espessura da tubulação do Sistema Hidráulico Açude-Barrilete, onde foram verificadas as resistências a pressão interna e externa.

O transitório foi calculado a partir da equação de MICHAUD e também através do método das características, onde para o fechamento lento da válvula (30 segundos) tem-se uma sobre carga de 9 m.c.a.. Portanto a carga de projeto neste item será de 54 m.c.a., resultante da soma da carga que é função do nível do reservatório mais a sobrecarga devido ao transitório. Os resultados obtidos tanto para adução das turbinas (caso mais crítico) quanto para sucção das bombas foram inferiores a espessura mínima de cálculo. A espessura de projeto, no caso da calculada ser menor que a mínima, foi tomada como sendo a menos crítica entre as mínimas presentes na literatura encontrada, ou seja, 9 mm para diâmetros maiores que 14" (Tubulações Industriais, Telles, 1976) e 1% do diâmetro como espessura mínima (Curso de Tubulações Hidráulicas", UFMG, 1972).

- Diâmetro utilizado no cálculo (adução turbinas): 1,80 m
- Diâmetro utilizado no cálculo (sucção bombas): 1,30 m
- Espessura calculada (adução turbinas):  $e = 6,15$  mm
- Espessura de projeto (adução turbina):  $e > 18$  mm

- Espessura calculada (adução bomba):  $e = 4,9$  mm
- Espessura de projeto (adução bomba):  $e > 13$  mm
- Espaçamento máximo entre apoios: 4,5 m
- Flecha máxima admitida: 0,0025 m

Obs: Nos valores calculados foram acrescentados ainda 0,25 mm devido a imperfeições na fabricação e 1,5 mm devido ao meio ser agressivo (corrosão).

- **Espessura da Tubulação do Barrilete de Recalque**

A carga de projeto para este sistema foi considerada como sendo a carga do ponto de operação (da ordem de 154 m.c.a.), acrescida por uma carga devida a um transitório decorrente de alguma manobra ou falha no sistema.

O tempo de fechamento para a válvula foi considerado como sendo de 30 segundos para o cálculo do transitório à partir da equação de MICHAUD e também através do método das características, que resulta em uma sobre carga de 106 m.c.a., dando origem a uma carga de projeto de 261 m.c.a.

A partir desta pressão de projeto, com base na tensão admissível do aço, e coeficientes de segurança, determina-se a espessura da tubulação do Sistema Hidráulico de recalque, que tem origem na saída das bombas até o encontro com a adutora. Os resultados obtidos foram:

- Diâmetro utilizado no cálculo: 0,60 m
- Espessura calculada: 10,3 mm (maior que o mínimo de 1% do diâmetro e que 9 mm, critérios presentes nas referências citadas anteriormente)
- Espessura de projeto:  $e > 10,3$  mm
- Espaçamento máximo entre apoios: 4,5 m
- Flecha máxima admitida: 0,0025 m

OBS: Espessura calculada é diferente da de projeto, que deve atender ao mínimo. Nesse caso, como as pressões e extensões são respectivamente baixas e curtas, a sobrecarga é pequena, o que resulta em valores mínimos.

OBS: Nos valores calculados foram acrescentados ainda 0,25 mm devido a imperfeições na fabricação e 1,5 mm devido ao fato do meio ser agressivo (corrosão).



### 3 - ADUTORA

As principais características das adutoras encontram-se no Tomo II, Volume III – Perfil e Caminhamento Adutoras, inclusive o número e posicionamento de ventosas, registros e acessórios de segurança, de acordo com as normas e recomendações da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

#### 3.1 - ESCOLHA DO TRAÇADO DO SISTEMA ADUTOR

A escolha do traçado do sistema adutora foi feita baseada em comparações das cartas da SUDENE disponíveis e através de levantamentos e visitas a campo. As alternativas encontram-se em anexo.

#### 3.2 - CÁLCULO DAS PERDAS DE CARGA

As perdas de carga por atrito ao longo da tubulação foram calculadas utilizando-se a fórmula universal de Darcy-Weisbach. O fator de atrito foi determinado através das formulações explícitas de Swamee e Jain. A seguir são apresentadas as duas formulações com os respectivos significados de suas variáveis.

Fórmula Universal de Darcy-Weisbach:

$$\Delta H = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

Onde:

$\Delta H$  = Perda de carga (m)

$f$  = fator de atrito

$L$  = Comprimento da tubulação (m)

$D$  = Diâmetro do tubo (m)

$V$  = Velocidade média do escoamento (m/s)

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

Formulação Explícita de Swamee e Jain:

D:\ANB TRAB\banbun\RELATORIOS Abril 2009\Textos, Planilhas\Vol.2 - Memorial de Cálculo Banabun.doc

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{5,74}{\text{Re} y^{0,9}} + \frac{e}{3,7D} \right) \right]^2}$$

Válida para o intervalo:

$$5 \times 10^5 \leq \text{Re} y \leq 10^8$$

$$10^{-6} \leq \frac{e}{D} \leq 10^{-2}$$

Onde:

$f$  = Fator de atrito (adimensional)

$e$  = Rugosidade do tubo

$D$  = Diâmetro da tubulação

$\text{Re}$  = Número de Reynolds

Sendo que o número de Reynolds é dado por:

$$\text{Re} y = \frac{VD}{\mu}$$

Para:

$V$  = Velocidade do escoamento (m/s)

$D$  = Diâmetro da tubulação

$\mu$  = Viscosidade cinemática

### 3.3 - ESCOLHA DO DIÂMETRO E NÚMERO DE ADUTORAS

O diâmetro da tubulação foi determinado conforme exposto anteriormente. Neste caso o diâmetro adotado de 600 mm, com duas adutoras em paralelo, foi determinado em função da vazão a ser recalçada, que por sua vez é função da vazão regularizada e carga disponível para as turbinas, além do custo da tubulação e condições de operação do menor número de conjuntos possíveis. Foi considerada a velocidade de escoamento em torno de 2,0 m/s para a linha de recalque, uma

velocidade econômica no sentido de economia de energia hidráulica. Fórmulas como a de Bresse, não são aplicáveis neste caso, pois não considerados o custo de energia elétrica para se efetuar o recalque. Deve-se lembrar que foi adotada a solução de duas adutoras por ser impossível a operação de recalque com apenas uma ou duas turbo-bombas com rendimento satisfatório, fato que ocorrerá muitas vezes, de acordo com a possibilidade de liberação de água do açude.

Chamamos de rendimento satisfatório a tentativa de evitar o conjunto de fatores hidráulicos que interferem ou comprometem o sistema, como cavitação, transientes, ou simplesmente a baixa velocidade que pode provocar a deposição de sedimentos.

### 3.4 - ESPESSURA DA CHAPA DA ADUTORA

Como no item "Espessura da Tubulação do Barrilete de Recalque", a carga de projeto para este sistema foi considerada como sendo a carga do ponto de operação (da ordem de 154 m.c.a.), acrescida por uma carga devida a um transitório decorrente de alguma manobra ou falha no sistema. Também neste item o tempo de fechamento para a válvula foi considerado como sendo de 20 segundos para o cálculo do transitório à partir da equação de MICHAUD que resulta em uma sobre carga de 140,21 m.c.a., dando origem a uma carga de projeto de 294,2 m.c.a.

A partir desta pressão de projeto, com base no aço com Limite de Elasticidade de 310MPa com tensão máxima admissível de 3100 kg/cm<sup>2</sup> e coeficiente de segurança igual a 2 (valor utilizado em sistemas hidráulicos considerando condições normais de operação do sistema, não sujeito a eventos catastróficos), determina-se a espessura da adutora, que tem origem na extremidade do barrilete de recalque. Os resultados obtidos foram:

- Diâmetro utilizado no cálculo: 600 mm
- Espessura calculada: 5,7 mm
- Espessura calculada acrescida de 0,65mm devido ao efeito de corrosão, imperfeições no material, padronização comercial e para que fique com o valor acima de 1% do diâmetro, resultando em: 6,35 mm
- Espessura de projeto (valor mínimo):  $e > 5,7$  mm (Baseado na referência "Tubulações Industriais, Telles, 1976)
- Espaçamento máximo entre vãos de apoio: 3,5 m

Portanto a espessura que atende aos requisitos de transporte, armazenagem, resistência a corrosão etc., é a de 6,35 mm, a qual deverá ser utilizada na adutora.

Com o intuito de apresentar o procedimento dos cálculos realizados no dimensionamento mecânico dos barriletes, segue abaixo o cálculo explícito para o caso da adutora:

a) Cálculo da variação de pressão (transitório)

Utilizando Michaud:

$$\Delta H = \pm \frac{2 \times 6742m \times 2,04 \frac{m}{s}}{9,81 \frac{m}{s^2} \times 20s} = 140,21m.c.a..$$

Logo a pressão de projeto para o dimensionamento será:

$$P = 154 + 140,2 = 294,2m.c.a. \text{ (máxima)}$$

$$P = 154 - 140,2 = 13,8m.c.a. \text{ (mínima)}$$

b) Espessura do Tubo (para trecho aéreo)

$$t \geq \frac{29,42 \frac{kg}{cm^2} \times 600mm}{2 \times 1550 \frac{kg}{cm^2}} \geq 5,7mm$$

Tubo comercial mais próximo: t = 6,35mm

c) Espessura do tubo (para trecho em vala)

De acordo com o "Curso de Tubulações Hidráulicas", UFMG, 1972, a experiência em casos práticos demonstra que os tubos de aço usuais resistem facilmente às maiores cargas móveis que se possam ter, desde que a camada de terra por cima do tubo tenha uma espessura pelo menos igual ao diâmetro e que a deformação diametral fique dentro dos limites geralmente aceitos, que é de 5%, para o caso de tubos sem revestimento. A verificação através da fórmula de Spangler, citada na norma M-11 da AWWA permitiu a verificação. A equação é dada por:

$$\delta = \frac{F \times K \times W \times r^3}{12 \times (E \times I + 0,61 \times E' \times r^3)}$$

$\delta$  = Deformação diametral horizontal, em polegadas

$K$  = Fator de deformação contínua a longo prazo: entre 1,25 a 1,50.

$K$  = Fator dependente do fundo de vala: para fundo de vala plana,  $K=0,1$

$W$  = Carga de aterro por unidade de comprimento, em lbs/pé

$r$  = raio externo do tubo, em polegadas

$E$  = Módulo de elasticidade do aço, em lbs/pol<sup>2</sup>

$I$  = Momento de inércia da seção transversal do tubo, em pol<sup>4</sup>

$E'$  = Módulo de resistência do solo, variando entre 200 e 1200

Para o cálculo de  $W$ :  $W = C1 \times g \times B \times D$

Onde:

$C1$  = Coeficiente numérico dependente do tipo de aterro e da relação entre a profundidade e a largura da vala

$g$  = peso específico da terra colocada sobre o tubo

$B$  = largura da vala

$D$  = diâmetro externo do tubo

OBS: deve ser utilizado um sistema de unidades adequado.

Calculando:

$$W = 1,18 \times 1920 \frac{kg}{m^3} \times 0,80m \times 0,6126m = 1110,33 \frac{kg}{m} = 747,1 \frac{lbs}{pés}$$

$$\delta = \frac{1,375 \times 0,1 \times 747,1 \times 13,149^3}{12 \times (28,48 \times 10^6 \times 2430,5 + 0,61 \times 700 \times 13,149^3)} = 0,281 \times 10^{-6} pol$$

Como a deformação diametral é menor que 5%, a espessura de 6,35 mm é adequada para adutora.

d) Pressão de Colapso

$$P_c = 35280000 \times \left( \frac{0,0063m}{0,60m} \right)^3 = 40,84m.c.a.$$

e) Espaçamento máximo entre apoios para adutora aérea, admitindo uma flecha de 0,0025 m:

$$f = 0,0025m$$

$$I_0 = \frac{1}{64} \times \pi \times D^4_E - \frac{1}{64} \times \pi \times D^4_I = \frac{1}{64} \times \pi \times (61,26)^4 - \frac{1}{64} \times \pi \times (60)^4 = 55145,6cm^4$$

$$qt = 115,28 \frac{kg}{m} \times 1,4 = 161,4 \frac{kg}{m} \text{ (onde 1,4 corresponde a um fator de segurança)}$$

$$ql = 282,7 \frac{kg}{m} \times 1,4 = 395,8 \frac{kg}{m} \text{ (onde 1,4 corresponde a um fator de segurança)}$$

$$L \leq \left( \frac{0,0025m \times 55145,6cm^4}{0,0015 \times \left( 161,4 \frac{kg}{m} + 395,8 \frac{kg}{m} \right)} \right)^{\frac{1}{4}} \leq 3,58m$$

f) Espaçamento máximo em função da tensão máxima na parede do tubo considerando o mesmo como uma viga contínua, simplesmente apoiada:

Sendo  $Z$  o momento resistente da seção transversal dado por:

$$Z = \frac{I_0}{raio_{ext}} = \frac{55145,6cm^4}{30,63cm} = 1800cm^3$$

$$L \leq \left( \frac{1550 \frac{kg}{cm^2} \times 1800cm^3}{10 \times \left( 115,28 \frac{kg}{m} \times 1,4 + 282,7 \times 1,4 \frac{kg}{m} \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 22,4m$$

g) Verificação da Tensão Concentrada na região dos suportes:

$$f = 0,02 - 0,00012 * (A - 90), \text{ para } A = 120^{\circ}, \text{ resulta } f = 0,0164$$

Tomando os apoios como sendo a cada 3,5 metros, resulta em:

$$R = 2106,6lb$$

Sendo também:

$$D = 25,6''$$

$$t = 0,354''$$

$$S_T = 0,0164 \times \frac{2106,6lb}{(0,354'')^2} \log \frac{25,6''}{2 \times 0,354''} = 30,2 \frac{kg}{cm^2}$$

#### Alternativa para uma maior vida útil:

Apesar da espessura adotada ser de 6,35mm com LE 310MPa, pode-se, como uma alternativa mais duradoura para as adutoras, utilizar a proteção catódica como meio para evitar maiores agressões em termos de oxidação, tanto pelo meio quanto pelo próprio fluido, geralmente com altos teores de sais no Estado do Ceará. O estudo da utilização ou não deste tipo de proteção deverá ser feita pela empresa executora da obra e deve levar em conta a disponibilidade de verba excedente para o projeto, ou ser instalada numa segunda etapa.

### 3.5 - TRANSIENTE HIDRÁULICO

As notas do cálculo do Transiente Hidráulico foram baseados somente em Michaud e Alliev devido ao sistema ser puramente mecânico, não sendo possível um transiente ser gerado por uma queda de energia, por exemplo, além do fato da espessura da chapa adotada possuir o dobro de sua necessidade mecânica (em torno de 4,5mm), o que confere mais segurança ao sistema. Mesmo assim foram previstos alguns acessórios de proteção que estão representados no Tomo II, Volume III – Perfil e Caminhamento / Adutoras.

## 4 - PROJETO ESTRUTURAL

### 4.1 - PROJETO ESTRUTURAL DA ESTAÇÃO DE RECALQUE

#### Casa de Máquinas

Devido ao porte das tubulações e máquinas hidráulicas instaladas foi necessária a confecção do projeto estrutural, compreendendo o dimensionamento de lajes, vigas e pilares, assim como a fundação. Foram levantadas as cargas atuantes que são:

- **Peso próprio da estrutura**
  - Alvenaria
  - Concreto
  - Cobertura
- **Peso das máquinas hidráulicas**
- **Peso próprio da tubulação de alimentação + volume**
  - Peso Próprio
  - Volume
- **Peso próprio da tubulação de recalque + volume**
  - Peso Próprio
  - Volume
- **Carga acidental**

As vigas foram calculadas separadamente de acordo com a carga atuante na sua área de influência, assim como os pilares e os blocos de fundação. Os resultados dos esforços, e as áreas de aço para cada seção estão apresentados nas tabelas anexas dos projetos, respectivamente para lajes, vigas e pilares.

O projeto estrutural, detalhamento e planta de formas é apresentado no Tomo II Volume 2 – Projeto Estrutural. Todos os cálculos foram realizados por software específico.

#### 4.2 - PROJETO ESTRUTURAL DOS BLOCOS DE ANCORAGEM E APOIOS

##### A - Introdução

Para o caso de mudanças de direções e derivações nas tubulações costuma-se utilizar blocos de ancoragem cuja finalidade é absorver os esforços originados nestas duas situações (mudanças de direções e derivações). As ancoragens podem ser de concreto simples ou armado, funcionam normalmente apenas por gravidade e eventualmente com tirantes fixados na rocha ou profundamente cravados no terreno.

##### B - Esforços Considerados



Para o caso dos blocos de ancoragem em estudo foi considerado somente o Empuxo, enquanto que no caso dos pilaretes de apoio foram considerados dois esforços, o peso próprio da tubulação somado ao peso do líquido e o deslizamento sobre os berços de apoio que causam um momento fletor na base dos pilaretes. O sistema de apoio da tubulação nos pilaretes foi escolhida de forma que se reduzisse ao máximo o momento fletor atuante na base do mesmo, tornando assim possível adotar uma fundação exequível.

### B1 - Empuxo (Esforço)

$$R = 2 \times S \times \gamma \times h \times \sin \frac{\alpha}{2}$$

Onde:

$R$  = Empuxo ou Esforço (kgf)

$S$  = Seção da canalização ( $m^2$ )

$\gamma$  = Peso específico do líquido ( $kg/m^3$ )

$h$  = Pressão interna (m.c.a.)

$\alpha$  = Ângulo da curva ( $^\circ$ )

### B2 - Força de Deslizamento Sobre os Berços de Apoio

$$F = f \times \cos \alpha \times \left( P + W - \frac{T}{2} \right)$$

Onde:

$F$  = força atuante sobre os berços de apoio (kgf)

$f$  = Coeficiente de atrito entre tubo e berço de apoio

$\alpha$  = ângulo da tubulação com a horizontal ( $^\circ$ )

$P$  = Peso próprio do tubo entre blocos de ancoragem (kg)

$W$  = Peso do líquido no tubo entre blocos de ancoragem (kg)

$T$  = Peso do tubo com líquido no entre o primeiro bloco e o primeiro pilarete (kg)

Obs.: O coeficiente de atrito entre tubo e berço de apoio varia de 0,4 (para tudo sobre placa com graxa) a 0,6 para tubo de aço sobre placa de aço. Estas duas opções não são possíveis de serem adotadas em virtude do elevado momento fletor resultante na base do pilar, o que poderia causar o deslocamento da estrutura. A hipótese de aumento dos componentes da fundação para combater este momento resultaria em grandes volumes de concreto, tornando a solução não adequada. O sistema de apoio da tubulação adotado é o sobre rolos, onde, desta forma, a tubulação fica praticamente livre sobre os pilaretes e engastada aos blocos de ancoragem. Neste caso o valor do coeficiente de atrito, de acordo com a literatura, é muito menor que 0,4, e neste projeto foi adotado como sendo de 0,2.

### **C - Constantes Utilizadas nos Cálculos (Blocos e Pilaretes)**

- Ângulo: 45° (todas as curvas e derivações são a 45°)
- Área da Seção da Tubulação: 2,55 m<sup>2</sup> (diâmetro nominal de 1,80 metros)
- Peso específico do líquido: 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Pressão interna: 54 m.c.a. (pressão referente ao transitório causado por manobras previstas)
- Coeficiente de Atrito do solo: 0,5 (referente a areia e pedregulho)
- Concreto: Fck 150 kgf/cm<sup>2</sup>
- Densidade do Concreto: 2400 kg/m<sup>3</sup>
- Densidade do Aço: 8000 kg/m<sup>3</sup>
- Tensão Admissível para Rocha Alterada: 3 kg/cm<sup>2</sup>
- Coeficiente de atrito entre tubo e berço de apoio com rolete: 0,2

### **D - Cálculo dos Blocos**

Devido as diferentes configurações exigidas para os blocos em função da sua posição ao longo da canalização os mesmos foram calculados individualmente, sendo designados por números, sendo constituídos pelos Blocos 1, 2, 3 e 4, apresentados nos desenhos referentes aos blocos de ancoragem. Também consta nestes desenhos os pilaretes intermediários aos blocos, cuja principal função não é absorver esforços, mas sim única e exclusivamente servirem de apoio. O princípio adotado para o dimensionamento dos blocos é o da ancoragem pelo próprio preso, onde é

conveniente que o bloco esteja no mínimo 60 cm abaixo da superfície do terreno. Desta forma o peso necessário para o bloco é dado por:

$$P_{Bloco} = \frac{R}{\mu}$$

Onde:

$$P_{Bloco} = \text{Peso do bloco (kg)}$$

$$R = \text{Esforço atuante (kg)}$$

$$\mu = \text{Coeficiente de atrito (adimensional)}$$

#### E - Área de Contato com o Solo

A área de contato do bloco de ancoragem com o solo deve ser suficiente para que o solo resista à carga, ou seja, a tensão atuante seja menor que a tensão admissível. Esta área foi determinada pela seguinte fórmula:

$$A = \frac{P}{\sigma_{adm}}$$

Onde:

$$A = \text{Área (m}^2\text{)}$$

$$P = \text{Peso do Bloco (kg)}$$

$$\sigma_{adm} = \text{Tensão admissível do solo (kg/m}^2\text{)}$$

#### F - Cálculo dos Pilaretes

Os pilaretes foram calculados como pilar segundo a Norma NBR-6118 e NB-1 através de um software para cálculos estruturais; foram considerados seu peso próprio, o da tubulação e do líquido.

A força de atrito atuante nos apoios devido a dilatação e contração da tubulação são função da variação de temperatura e foi utilizada no seu dimensionamento como momento atuante. Em consequência da variação da cota do terreno ao longo do caminho da tubulação, os pilaretes foram calculados para o caso mais crítico (maior altura).

#### G - Cálculo do Bloco 1

D:ANB TRABALHADOR RELATORIOS Abril 2001 Lectos Flacilias Vol2 - Memorial de Cálculo Baseado.doc

Como exemplo de cálculo segue abaixo o cálculo do bloco de ancoragem número 1. O Desenho do bloco com suas dimensões pode ser visto nos desenhos referentes aos blocos de ancoragem.

**- Cálculo do Empuxo**

$$R = 2 \times S \times \gamma \times h \times \text{sen} \frac{\alpha}{2}$$

$$R = 2 \times 2,55 \times 1000 \times 54 \times \text{sen} \frac{45}{2}$$

$$R = 105391 \text{ (kg)}$$

**- Cálculo do Peso Necessário**

$$P_{\text{Bloco}} = \frac{R}{\mu}$$

$$P_{\text{Bloco}} = \frac{105391}{0,5}$$

$$P_{\text{Bloco}} = 210782 \text{ (kg)}$$

**- Cálculo do Volume Mínimo de Concreto**

$$Vol_c = \frac{P_{\text{Bloco}}}{\text{Densidade}_c}$$

$$Vol_c = \frac{210782}{2400}$$

$$Vol_c = 87,82 \text{ (m}^3\text{)}$$

Obs: O valor de 87,82 m<sup>3</sup> corresponde ao **volume mínimo** de concreto necessário para a ancoragem.

**- Altura do Bloco**

$$Hb = \frac{Vol_{Bloco}}{Área_{Bloco}}$$

$$Hb = \frac{87,82}{16,00}$$

$$Hb = 5,5 \text{ (m)}$$

Esta altura é insuficiente, pois a linha de terra esta na cota 92,00 metros e a tubulação será apoiada na cota 97,43 metros, restando ainda ser acrescentada a profundidade mínima que deve ser aprofundado o bloco. O valor mínimo abaixo da linha de terra é de 0,60 metros, que no caso foi adotada como sendo de 1,20 metros, devido ao local ser, em algumas épocas do ano, alagado, tipo de solo, e à grande dimensão do bloco.

Desta forma, a altura entre o apoio do tubo e a base do bloco é de 6,63 metros, resultando em um volume de 106,08 m<sup>3</sup>, que é 17% maior que o volume mínimo de concreto calculado.

Altura adotada para o Bloco 1 pode ser vista nos desenhos referentes a Blocos de Ancoragem.

#### - Verificação da Resistência do Solo

Para um vão de 5 metros, a carga atuante é de:

- Peso do Aço: 4120 kg
- Peso do Líquido: 12723 kg
- Peso do Bloco: 254592 kg

Peso total resultante: 271435 kg

$$\sigma_{Atuante} = \frac{P}{A}$$

$$\sigma_{Atuante} = \frac{271435}{16}$$

$$\sigma_{Atuante} = 16965 \text{ kg/m}^2$$

$$\sigma_{Atuante} = 1,69 \text{ kg/cm}^2 < \sigma_{Adm.} = 3,00 \text{ kg/cm}^2 \text{ ok!}$$

#### - Dimensionamento estrutural

O dimensionamento estrutural foi feito considerando o bloco de ancoragem como sendo um pilar, onde resultados para uma carga de 24 ton, momento fletor atuante de 933979 kgf.m, para uma seção considerada como sendo de 230 x 500 cm, com altura de 8,70 metros, para um fck de 150 kgf/cm<sup>2</sup>, tensão admissível do aço de 4,35, resultou em área de aço mínima de 575 cm<sup>2</sup> (NBR-6118), correspondente a 0,5% da área de concreto. Como a área do bloco é de 16 m<sup>2</sup>, a área de aço será de 800 cm<sup>2</sup>. O resultado da armadura é de:

- 100  $\phi$  32 mm, espaçamento de 16 cm, 8700 de comprimento (armadura longitudinal)
- 30  $\phi$  12,5 mm, espaçamento de 30 cm, 1571 cm de comprimento (estribos)

## H - Cálculo do Pilarete

### H1 - Dimensionamento Estrutural

Estes pilaretes foram dimensionados como pilar obedecendo às normas NB-1 e NBR-6118.

#### - Cálculo da Força de Atrito

$$F = f \times \cos \alpha \times \left( P + W - \frac{T}{2} \right)$$

Onde:

$$f = 0,2 \text{ (para tubo de aço sobre apoio com rolete)}$$

$$\alpha = 0^\circ \text{ (tubulação é horizontal)}$$

$$P = 30488 \text{ (kg)}$$

$$W = 94153 \text{ (kg)}$$

$$T = 15160 \text{ (kg)}$$

$$F = 0,2 \times \cos 0 \times \left( 30488 + 94153 - \frac{15160}{2} \right)$$

$$F = 23412 \text{ kgf}$$

A força de atrito atuante em cada pilarete é de:

$$F_1 = \frac{23412}{6}$$

$$F_1 = 3902 \text{ kgf}$$

#### - Cálculo do Momento Fletor Característico atuante no pilarete

$$M_k = F_1 \times H$$

Onde

$H$  = Altura da extremidade do pilar até a base do bloco

$F_1$  = Força de atrito atuante em cada pilarete

$$M_k = 3902 \times 5,5$$

$$M_k = 21461 \text{ Kgf.m}$$

#### - Cálculo da Carga Vertical Característica Atuante no Pilarete

- Peso próprio: 18816 kg
- Peso do líquido: 12750 kg
- Peso do tubo: 4120 kg

Carga Característica Total: 35686 kg

#### - Especificação das Estacas

Devido as dimensões do pilarete e cargas atuantes, adotou-se 4 estacas por bloco. As cargas para cada uma das estacas são as apresentadas abaixo:

- Carga devido ao momento fletor atuante: 36000 kg (para cada estaca)
- Carga devido ao peso próprio (para 4 estacas):
  - Peso próprio: 18816 kg
  - Peso do líquido: 12750 kg

- Peso do tubo: 4120 kg
- Peso do bloco de transição: 4320 kg

Total (4 estacas): 40006 kg

Total p/ estaca: 10001 kg

Carga total por estaca (peso próprio + carga devida ao momento fletor): 46000 kg

Cada estaca recebe uma carga característica de 46 ton. Não foi adotado neste caso nenhum coeficiente de segurança em virtude de não se considerar a força de tração atuante nas estacas opostas.

#### - Resultados Obtidos Através do Software para Cálculos Estruturais

Dados de entrada:

- Carga Normal de Cálculo: 49960 kg
- Momento atuante de cálculo: 30045 kg.m
- Comprimento de Flambagem: 10 m
- Fck: 150 kgf/cm<sup>2</sup>
- Aço CA44
- Cobrimento das armaduras: 5 cm
- Lados do pilarete: 280 x 56 cm

Resultados:

- Índice de esbeltez (lado 280 cm): 12
- Índice de esbeltez (lado 56 cm): 61
- Tensão Simples no Concreto: 3,18 kgf/cm<sup>2</sup>
- Área de aço em função dos esforços: 43,10 cm<sup>2</sup>
- Área de aço mínima (NBR-6118): 125,44 cm<sup>2</sup>
- Área de aço adotada: 125,44 cm<sup>2</sup>
- Área de aço por face: 47,05 cm<sup>2</sup> (lado 280 cm)
- Área de aço por face: 15,69 cm<sup>2</sup> (lado 56 cm)
- Distribuição das armaduras (por face):



- Longitudinal (lado 280): 22  $\phi$  16 mm – esp. de 12 cm
- Longitudinal (lado 56): 11  $\phi$  16 mm – esp. de 4 cm
- Estribos: 27  $\phi$  12,5 mm – esp. de 19 cm
- Área de fôrma: 34 m<sup>2</sup>
- Volume de concreto: 7,84 m<sup>3</sup>

## H.2 - Fundação do Pilarete

A literatura recomenda utilizar-se de blocos apoiados diretamente sobre o solo para cargas de até 500 KN; sendo assim não é possível a utilização de blocos de concreto (Fundação Rasa). Esta impossibilidade também é devida ao momento fletor atuante no pilar, o que implicaria em blocos astronômicos para combater este momento, tornando inadequada esta solução. A opção possível para este caso é a fundação profunda através da utilização de blocos sobre estacas. A função do bloco é distribuir as cargas do pilar para as estacas, conter os arranques dos pilares e corrigir pequenos desvios de posicionamento das estacas.

### - Especificação da Estaca

Para o caso de bloco sobre quatro estacas:

- Carga devida ao momento fletor atuante: 36 ton. por estaca
- Carga devida ao:
  - Peso próprio: 18816 kg
  - Peso do líquido: 12750 kg
  - Peso do tubo: 4120 kg
  - Peso do bloco: 4320 kg

Total: 40 ton. (para 4 estacas)

Total para uma estaca: 10 ton.

- Carga total atuante em cada estaca: 46 ton.

A estaca deverá suportar carga maior ou igual a 46 ton., ser pré-moldada (centrifugada ou protendida). O diâmetro adotado para a estaca foi de 36 cm.

Dados utilizados:

- Espaçamento entre centros de estacas: 90 cm
- Largura do bloco: 120 cm
- Comprimento do bloco: 300 cm
- Altura do bloco: 65 cm
- Carga atuante: 184 ton.
- $F_y k$ : 5 ton./cm<sup>2</sup>
- Aço: CA50B
- $F_{ck}$ : 150 kgf/cm<sup>2</sup>
- Cobrimento das armaduras: 5 cm.

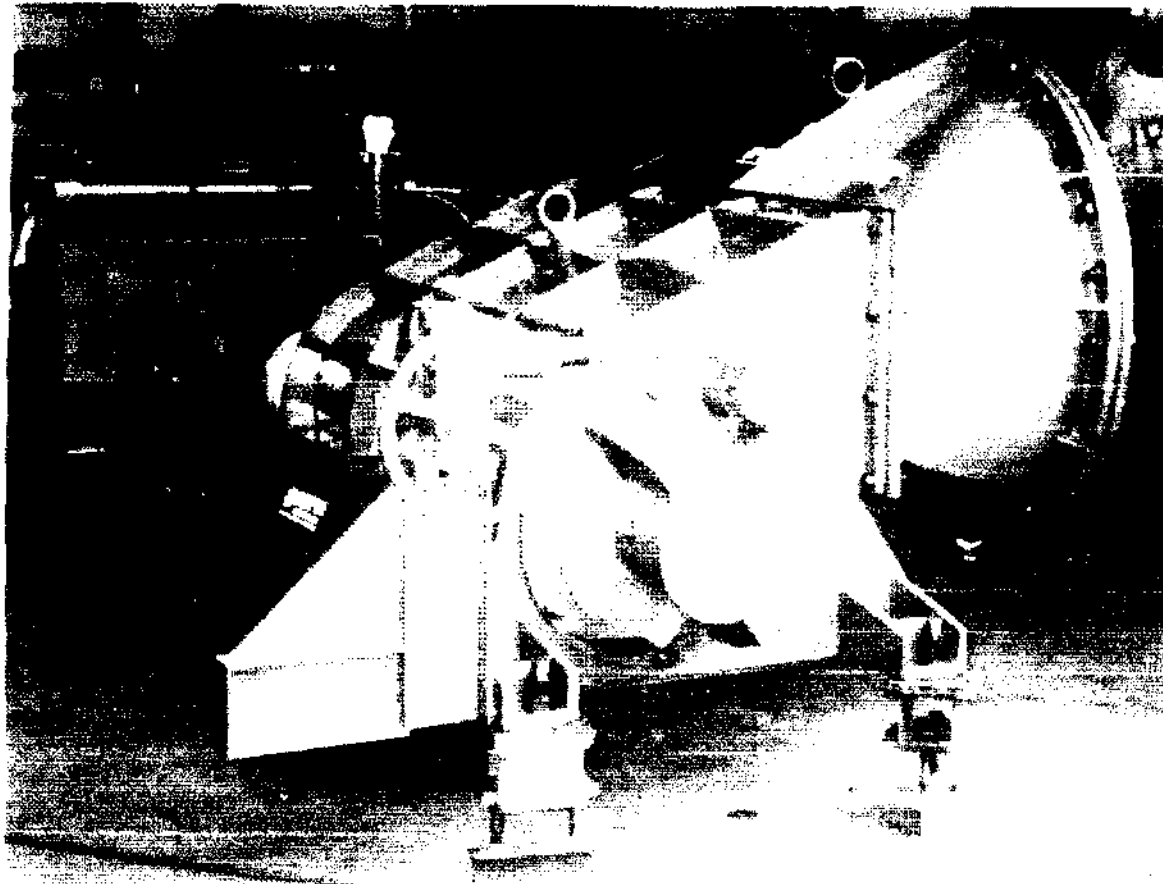
Resultados obtidos:

- Área de aço para cada lado do bloco: 10 cm<sup>2</sup>
  - 10  $\phi$  16 mm – esp. 3 cm – c = 712 cm (lado 120 cm)
  - 10  $\phi$  16 mm – esp. 3 cm – c = 352 cm (lado 300 cm)
- Área de aço para estribos verticais: 9 cm<sup>2</sup>
  - 10  $\phi$  16 mm – esp. 22 cm – c = 352 cm (lado 300 cm)
  - 10  $\phi$  16 mm – esp. 5 cm – c = 712 cm (lado 120 cm)

I. Bibliografia

- **Manual de Hidráulica** – José M. Azevedo Neto, 7<sup>a</sup> edição, Edgard Blücher LTDA.
- **Bombas e Instalações de Bombeamento** – Archibald Joseph Macintyre, Guanabara Dois, 1980.
- **Norma NB1-1978** – Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado

**ANEXOS**



**Anexo I - Fotografia de Turbina e Transmissão Similar à Especificada**

## Anexo II - Estudo de possibilidades

A seguir são apresentadas, a título de informação, todas as curvas estudadas para se chegar à curva mais apropriada para o sistema.

Legenda da Abertura de Válvulas:

Cada linha ascendente dos gráficos seguintes corresponde a um coeficiente denominado  $K_s$  da válvula, que corresponde a uma abertura em graus (a abertura máxima desta válvula é 90 graus) e então pode-se calcular a porcentagem de abertura, sendo assim:

Respectivamente, de baixo para cima:

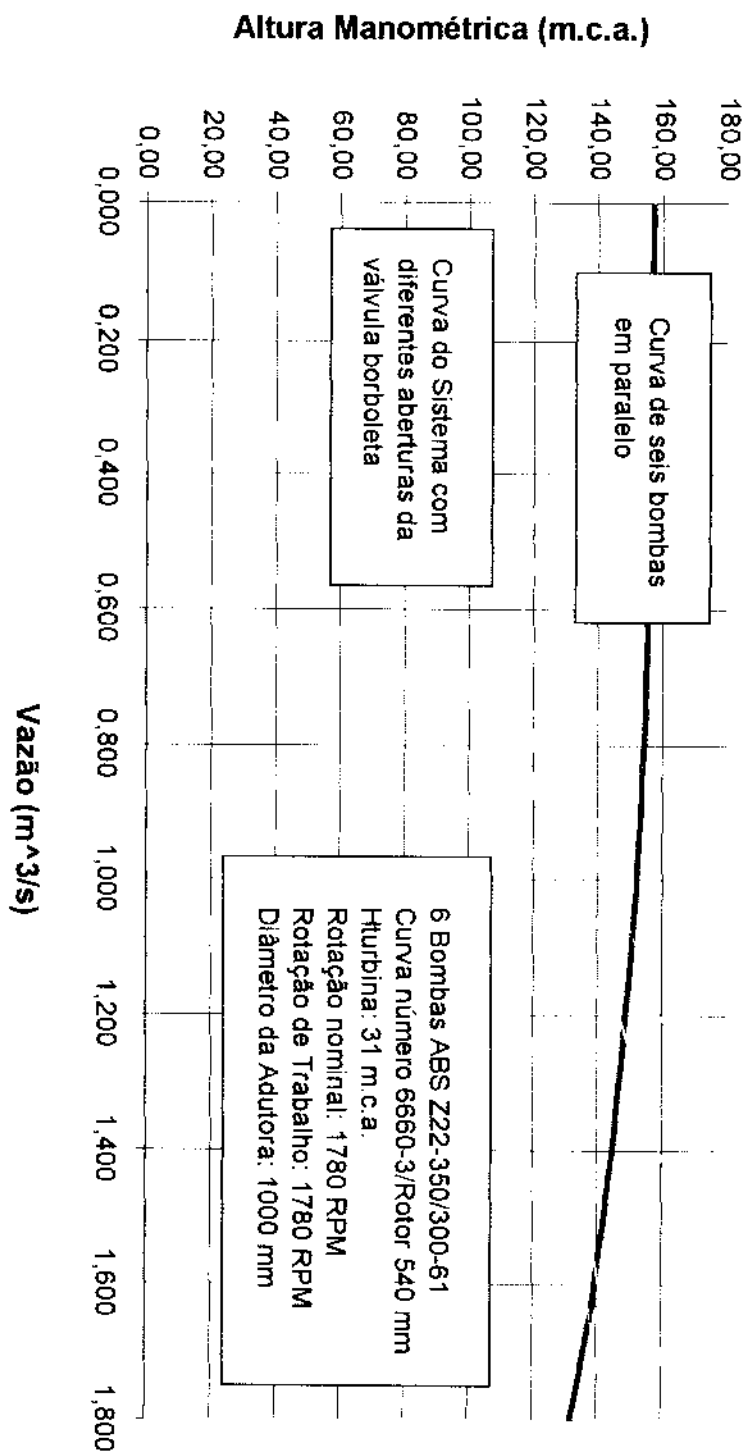
$K_s = 0,15$ : implica 87 graus de abertura ou 97%

$K_s = 70$ : implica 30 graus de abertura ou 33%

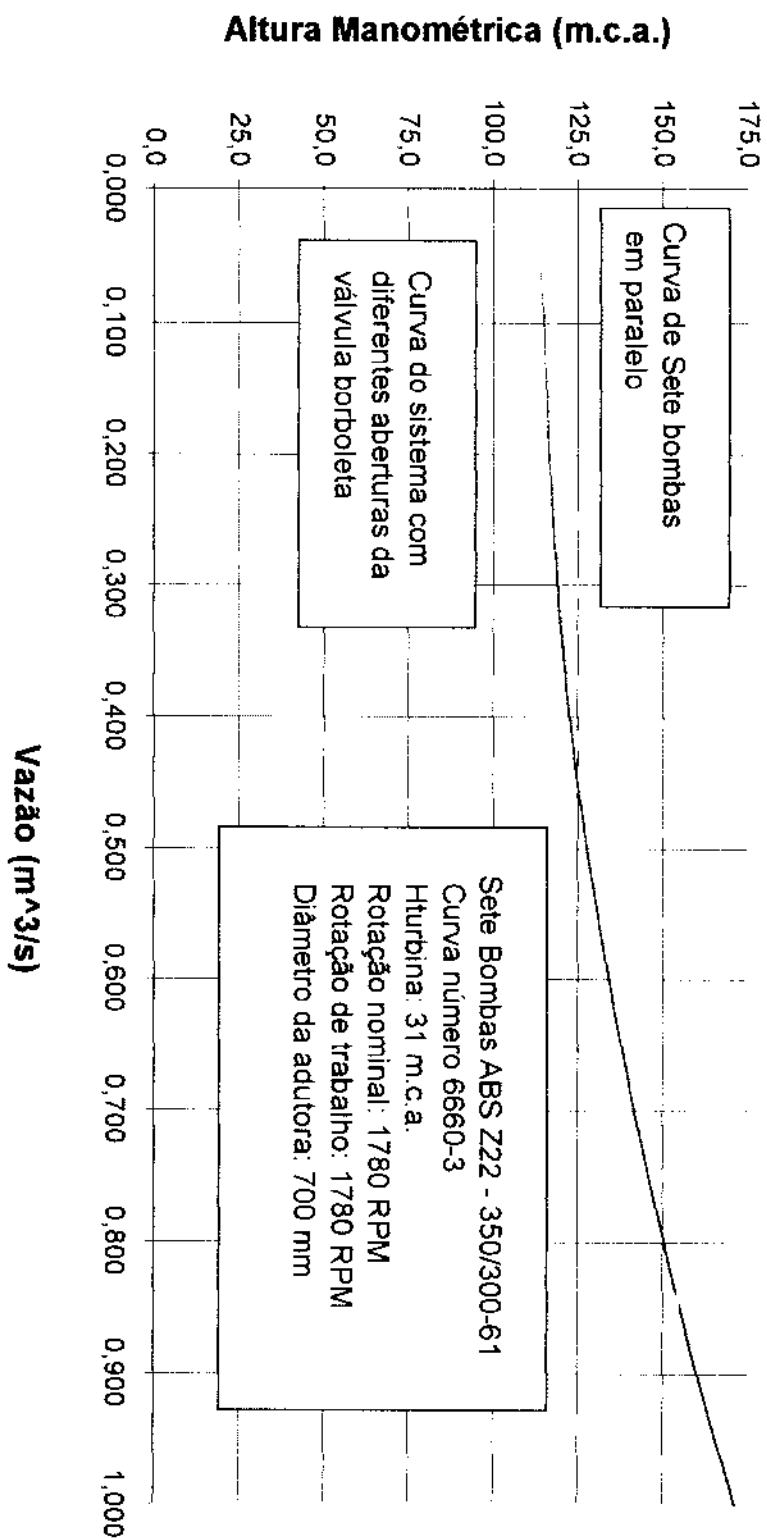
$K_s = 175$ : implica 20 graus de abertura ou 22%

$K_s = 280$ : implica 15 graus de abertura ou 16,6%

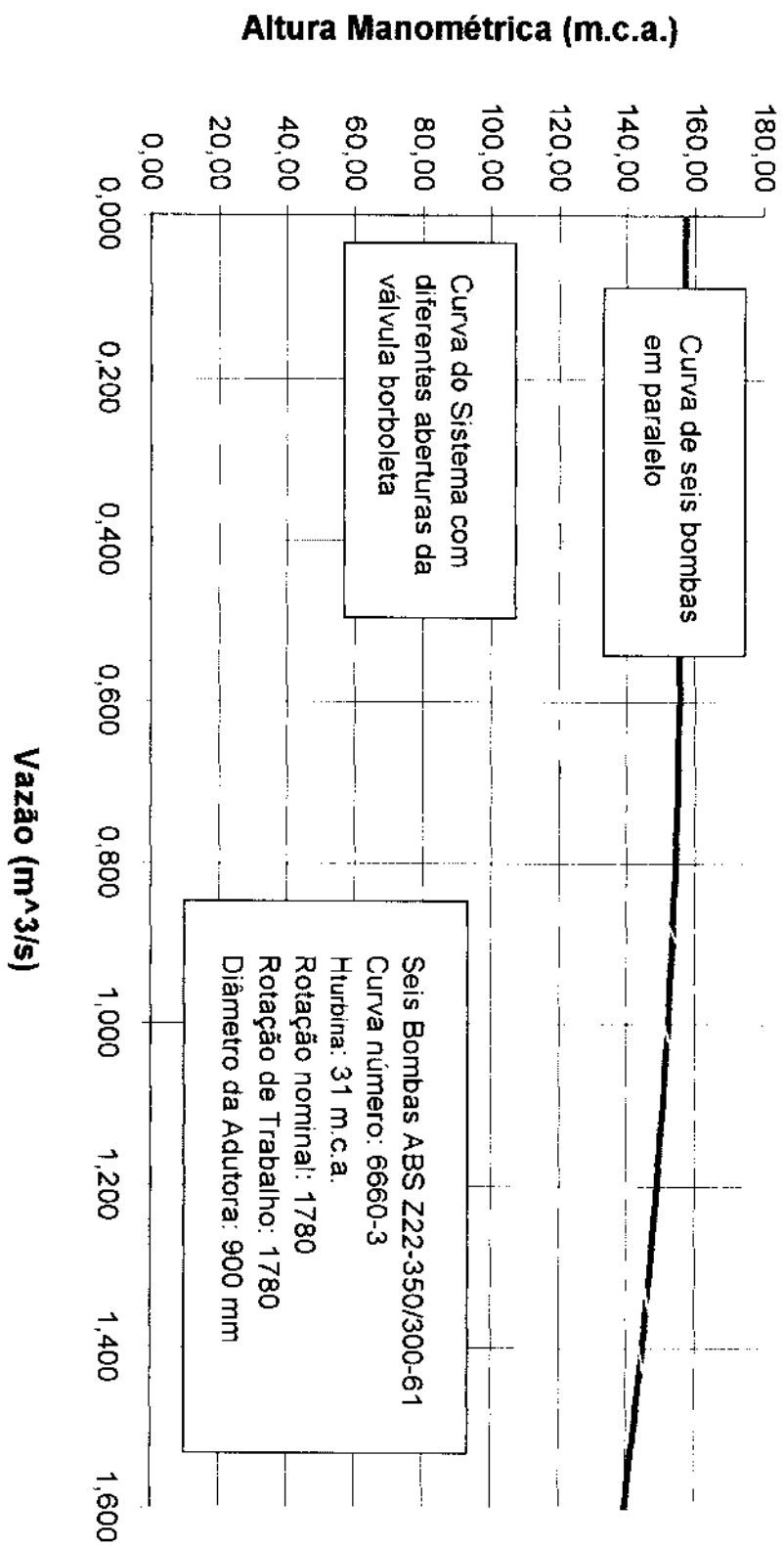
## Adutora Banabuiú - Seis Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação



## Adutora Banabuiú - Sete Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação

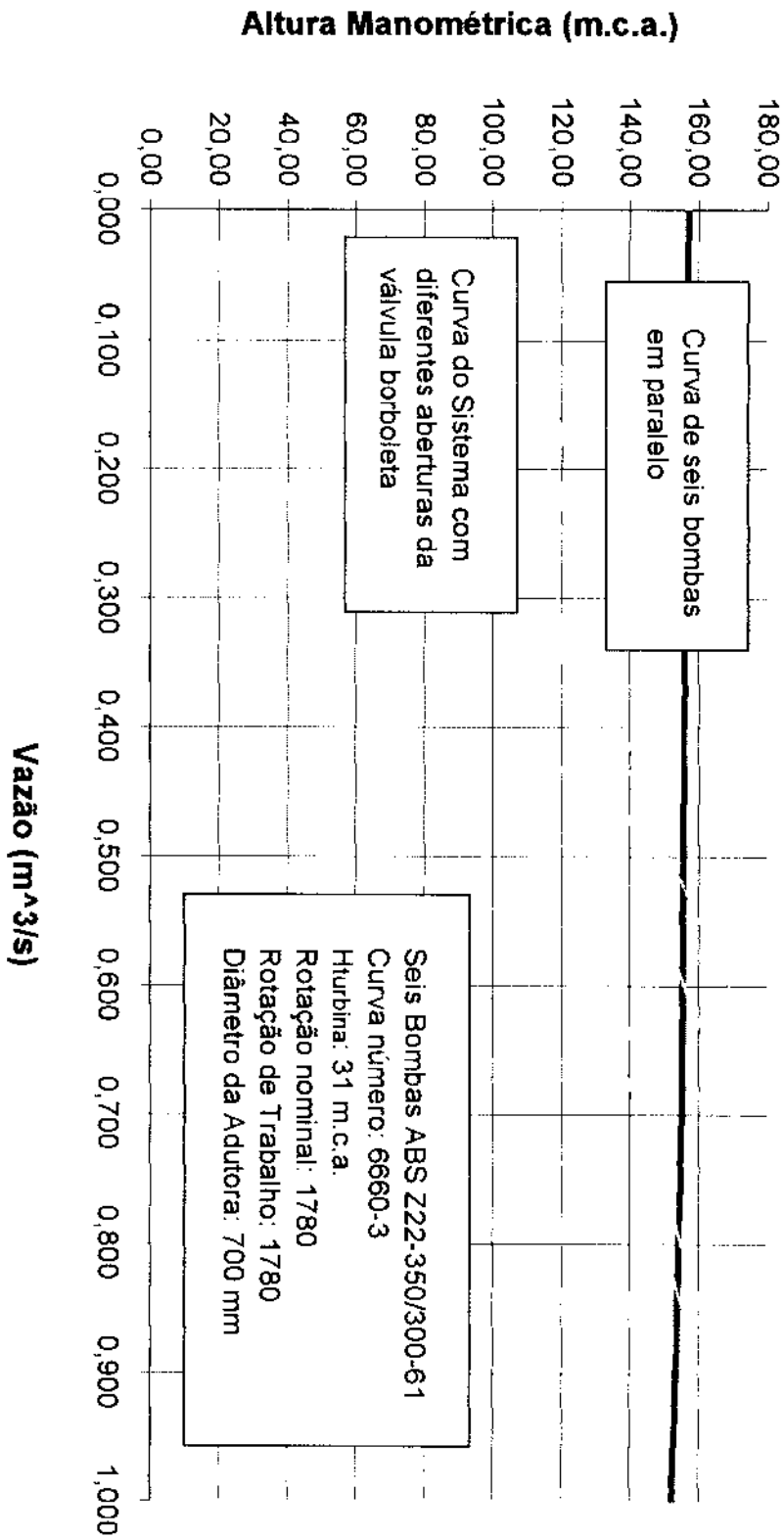


## Adutora Banabuiú - Seis Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação

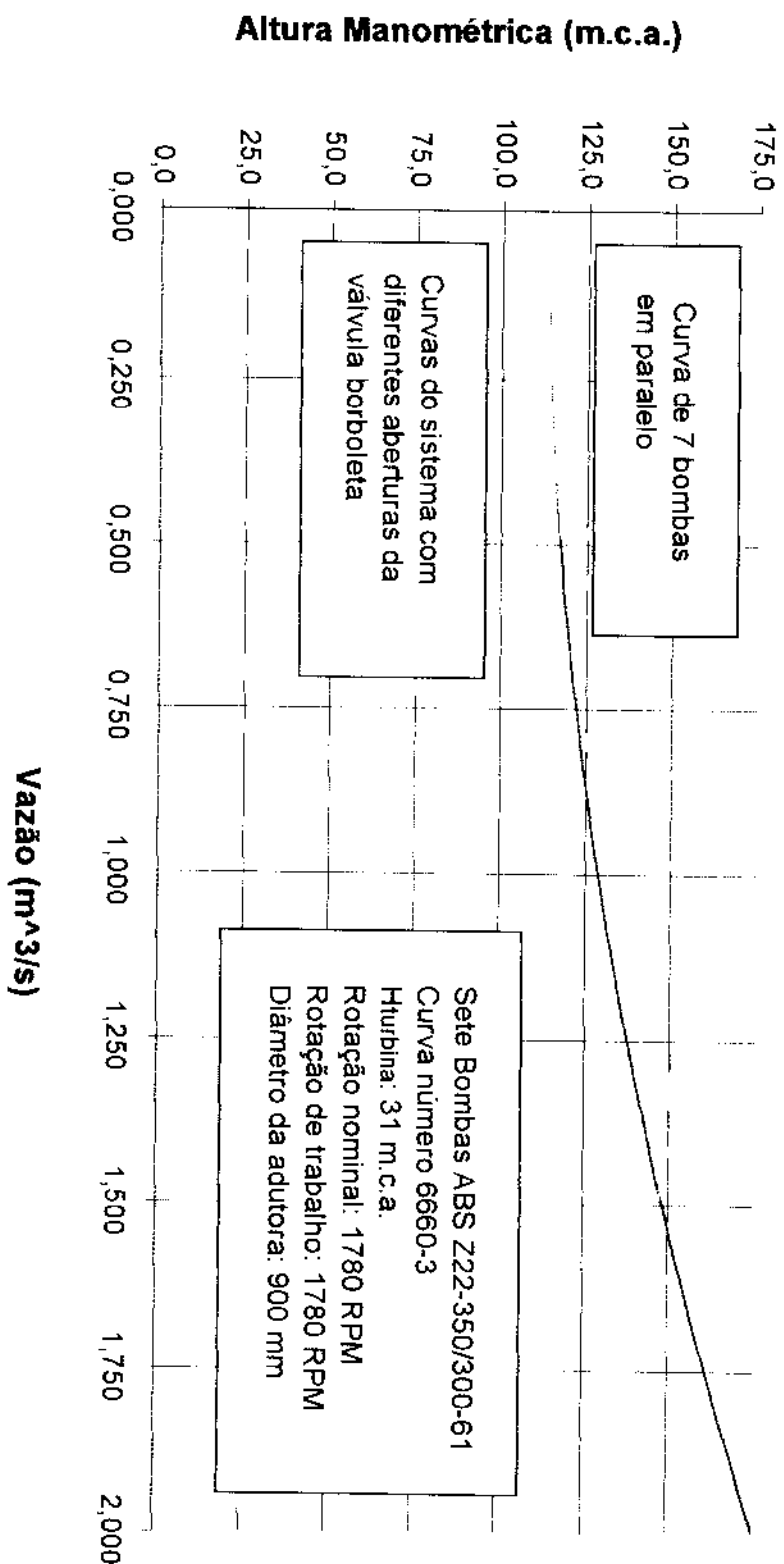




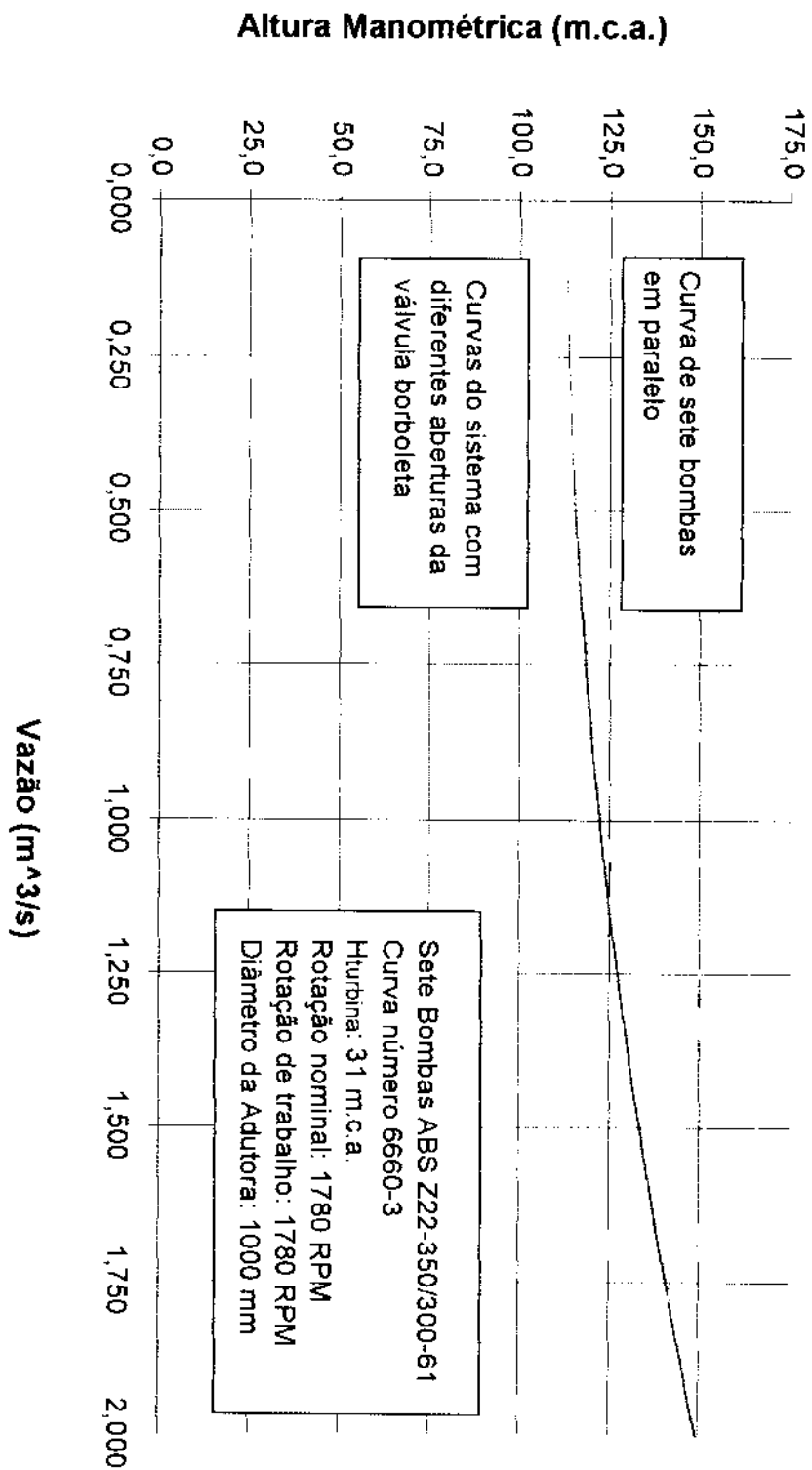
## Adutora Banabuiú - Seis Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação



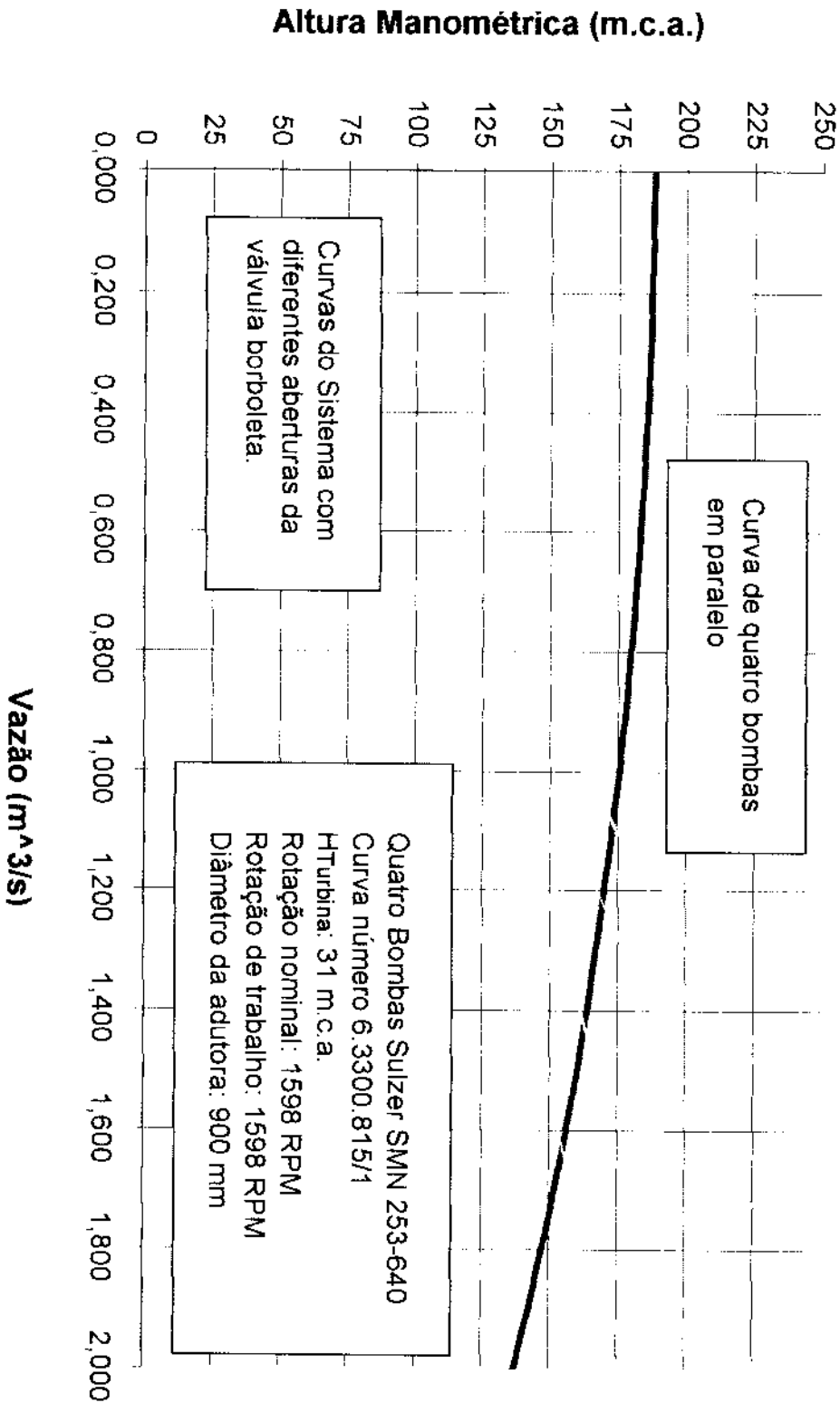
## Adutora Banabuiú - Sete Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação



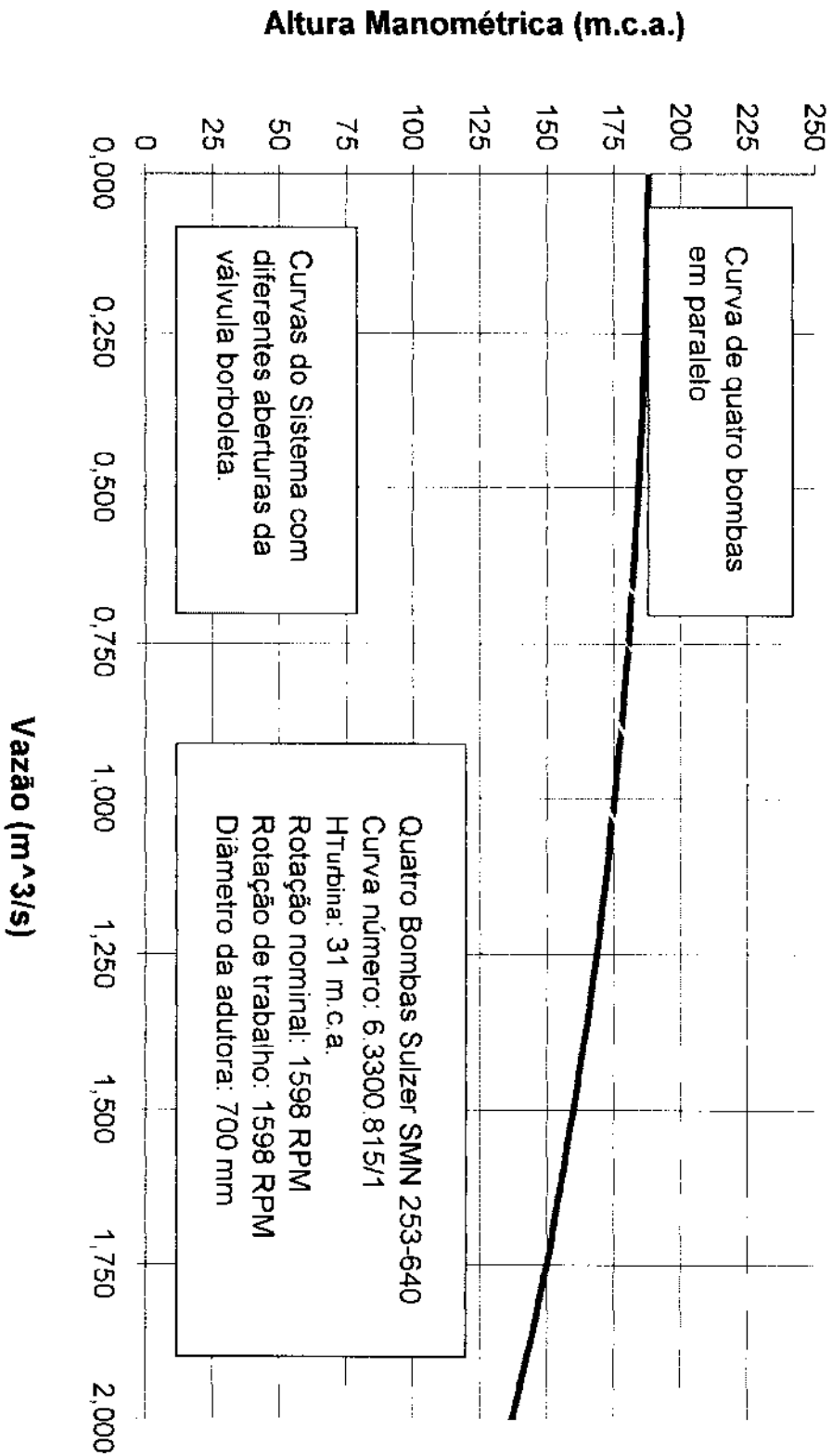
## Adutora Banabuiú - Sete Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação



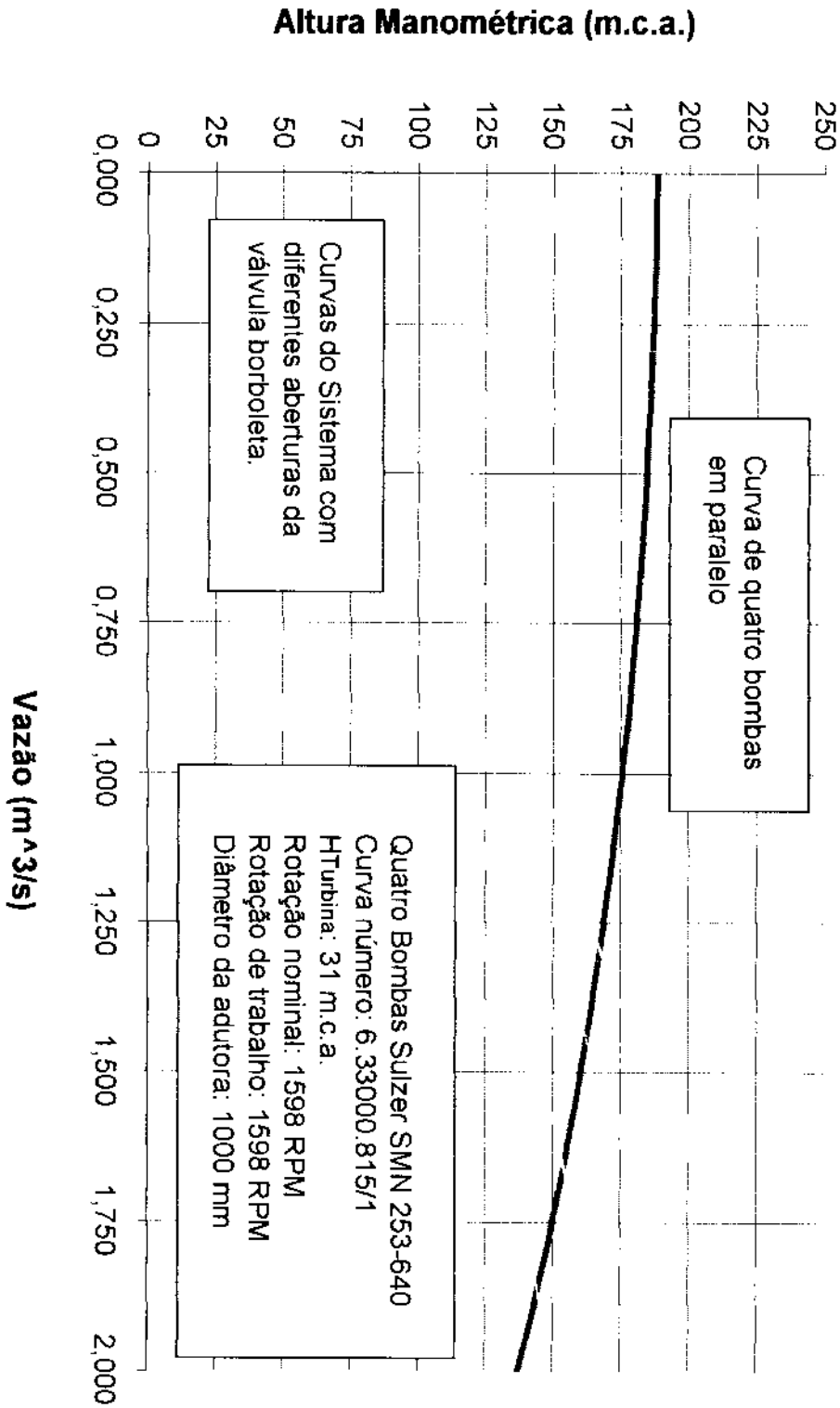
## Adutora Banabuiú - Quatro Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação



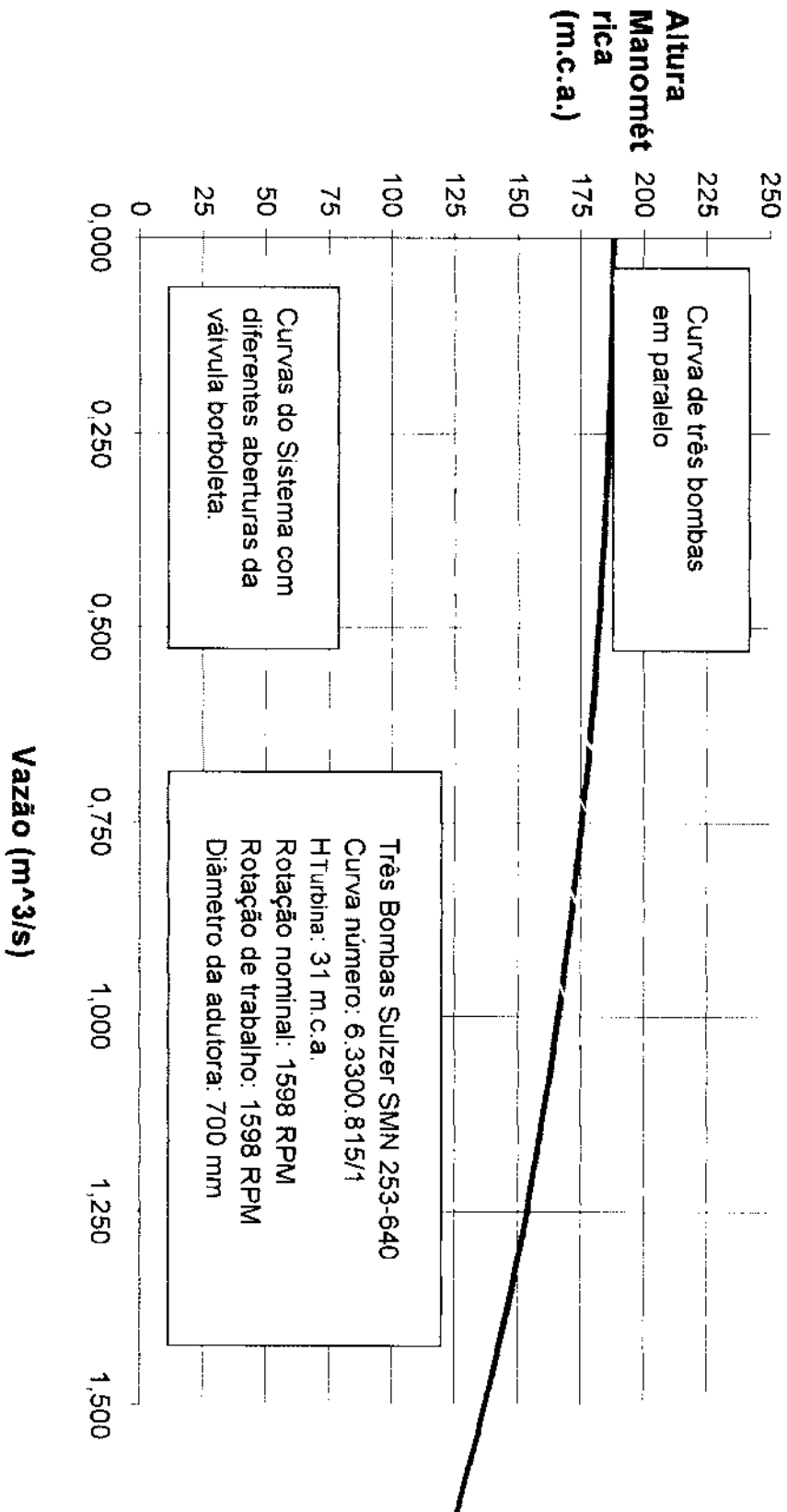
## Açude Banabuiú - Quatro Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação



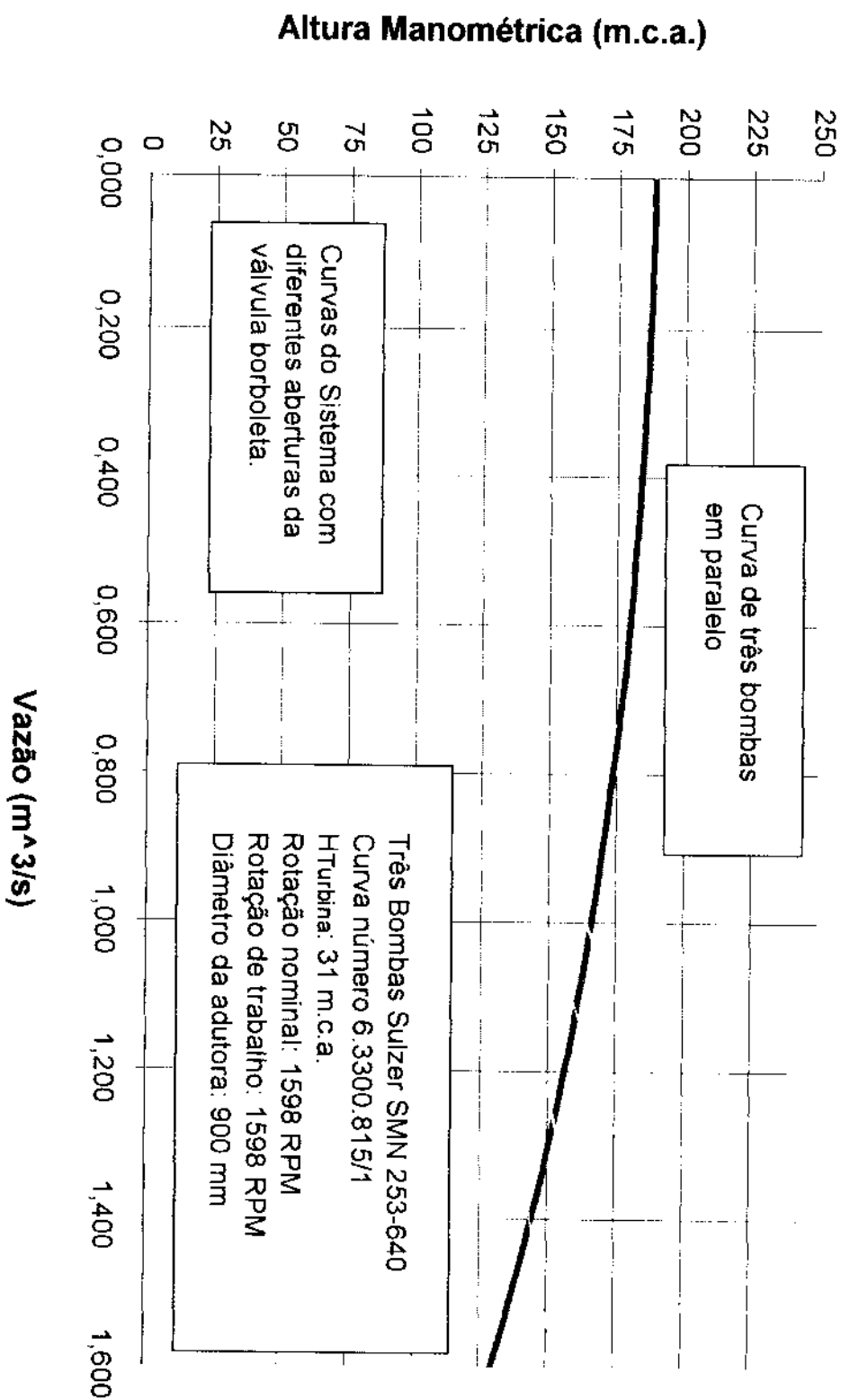
## Adutora Banabuiú - Quatro Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação



## Adutora Banabuiú - Três Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação

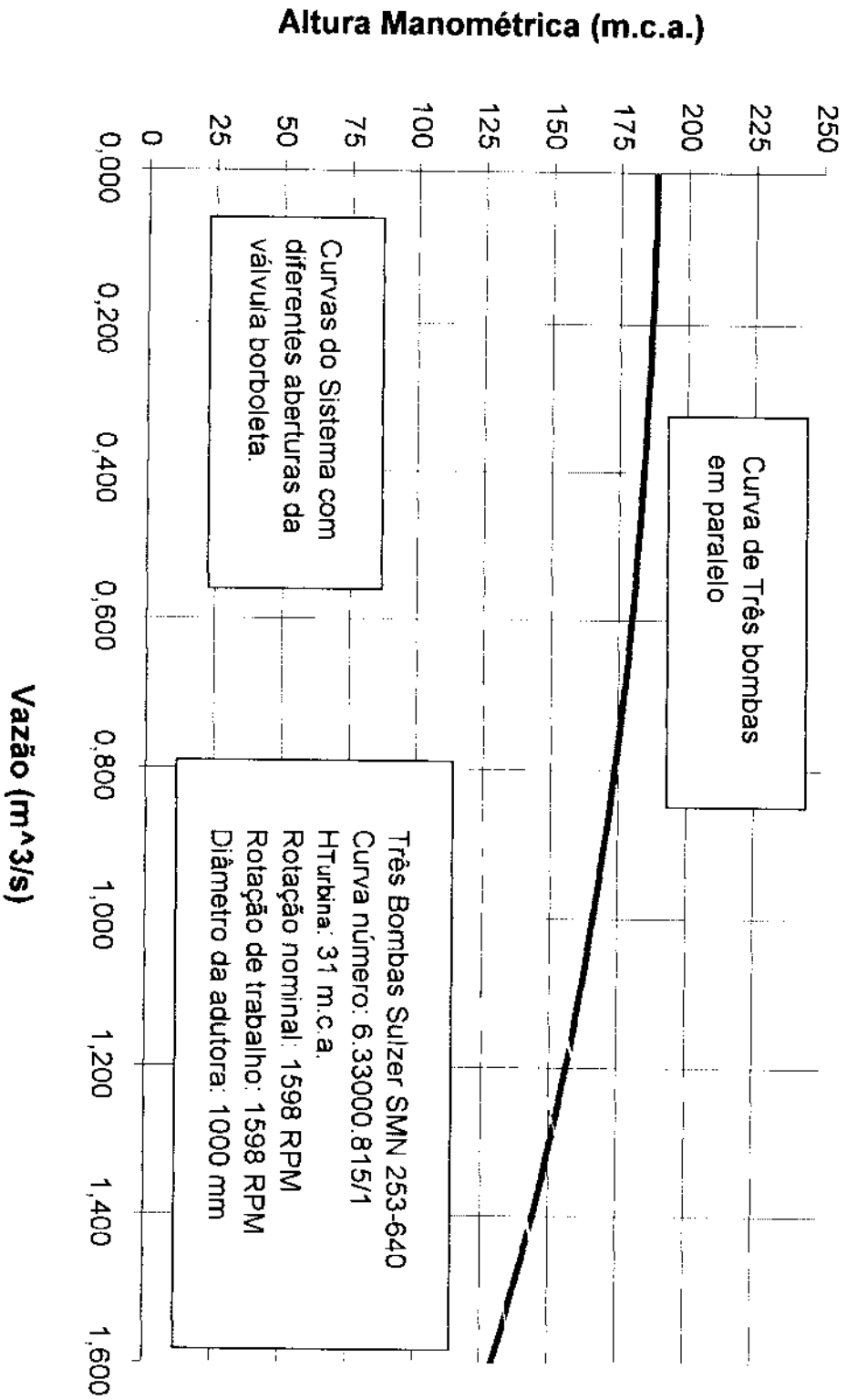


## Adutora Banabuiú - Três Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação

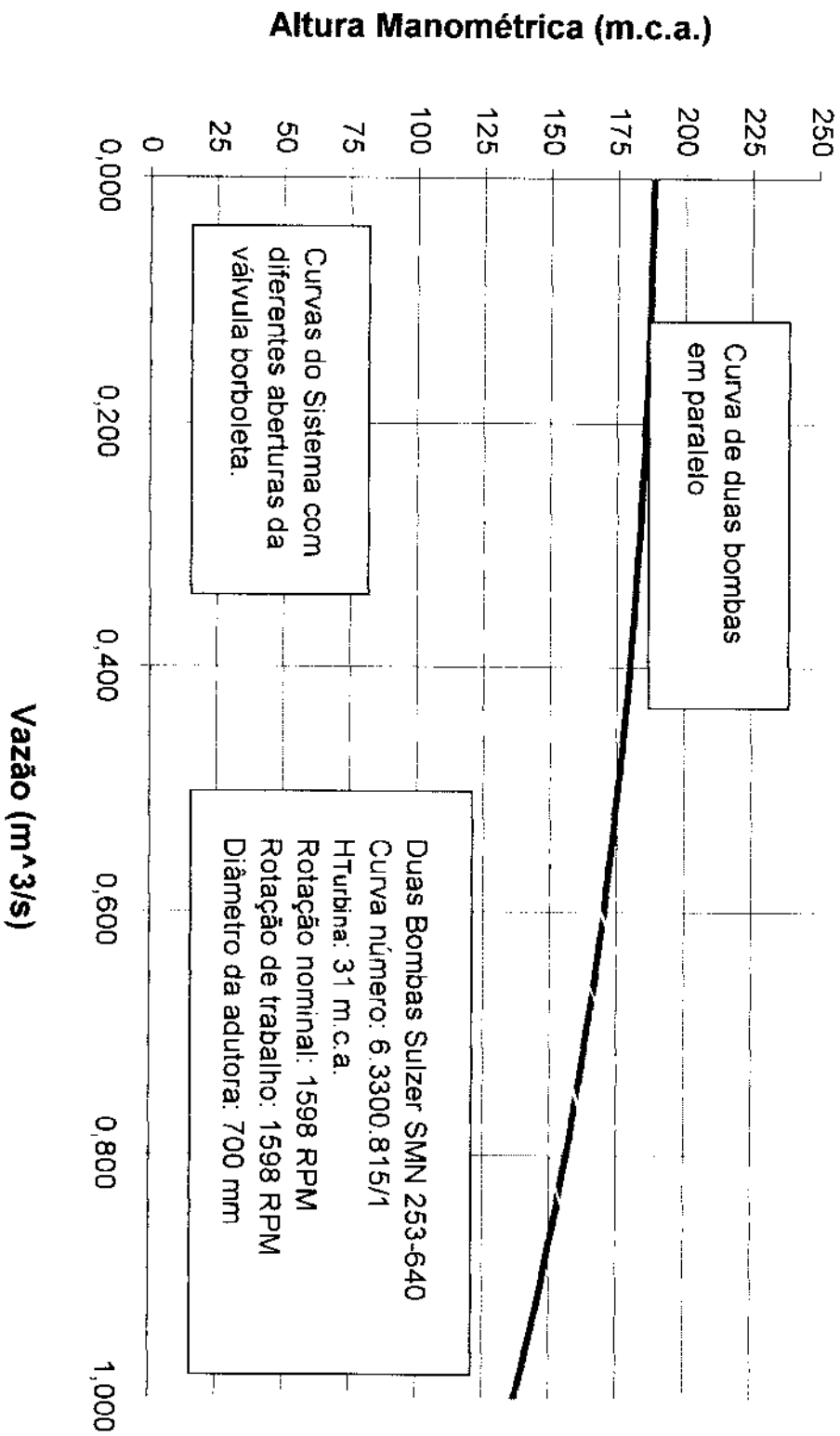




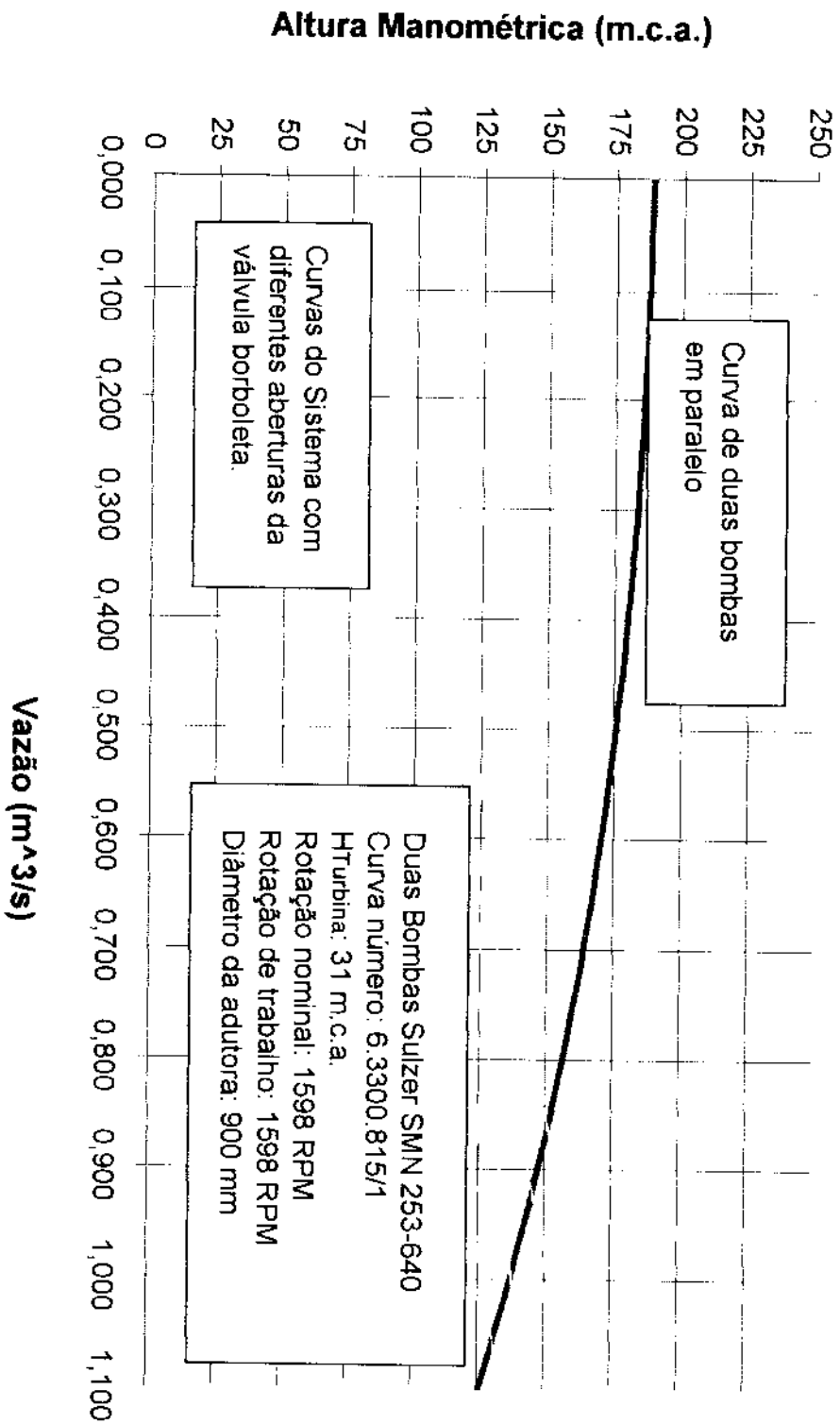
## Adutora Banabuiú - Três Bombas em Paralelo Sistema com Diferentes Pontos de Operação



## Adutora Banabuiú - Duas Bombas em Paralelo com Diferentes Pontos de Operação



## Adutora Banabuiú - Duas Bombas em Paralelo com Diferentes Pontos de Operação



### Anexo III - Alternativas de Traçado

**Anexo IV - Simulação de Operação, Taxa de Ociosidade e Justificativa Econômica Dados Registrados de Descarga pela COGERH:**

<b>Data (Mês/Ano)</b>	<b>Vazão (l/s)</b>
Mai/96	5000
Jun/96	5000
Jul/96	5000
Ago/96	8000
Set/96	11000
Out/96	15000
Nov/96	12000
Dez/96	9000
Jan/97	6000
Fev/97	6000
Mar/97	8000
Abr/97	0
Mai/97	8000
Jun/97	8000
Jul/97	10000
Ago/97	10000
Set/97	12000
Out/97	12000
Nov/97	11000
Dez/97	9000
Jan/98	5000
Fev/98	10000
Mar/98	10000
Abr/98	9000
Mai/98	9000
Jun/98	8000
Jul/98	9000
Ago/98	12000
Set/98	13000
Out/98	12000
Nov/98	12000
Dez/98	8000
Jan/99	6000

<b>Data (Mês/Ano)</b>	<b>Vazão (l/s)</b>
Fev/99	7000
Mar/99	5000
Abr/99	6000
Mai/99	2000
Jun/99	5000
Jul/99	7000
Ago/99	8000
Set/99	9000
Out/99	9000
Nov/99	8000
Dez/99	7000
Jan/00	3000
Fev/00	1000
Mar/00	1000
Abr/00	1000
Mai/00	1000
Jun/00	2000
Jul/00	4500
Ago/00	4500
Set/00	7000

Na figura IV-A, são demonstradas as vazões liberadas na coluna esquerda e os pontos de operação das bombas na coluna direita, com dados dos últimos anos, onde exceto pelo ano de 96, são considerados anos com baixos índices pluviométricos registrados na quadra chuvosa. Pode-se tomar então como uma condição de operação em condições críticas.

Os dados considerados em relação às bombas(vazões) são relativos aos já calculados anteriormente.

### Taxa de Ociosidade

As taxas de ociosidade registradas foram, para o caso das vazões liberadas de Maio de 96 a Agosto de 2000:

Tabela IV-A

Taxa de ociosidade da bomba 1 =	12%
Taxa de ociosidade da bomba 2 =	30%
Taxa de ociosidade da bomba 3 =	66%
Taxa de ociosidade da bomba 4 =	88%

As taxas para as bombas 3 e 4 podem ser consideradas altas, mas justifica a sua instalação o fato de que não se tem nenhum sistema de bombeamento reserva. A bomba 4, para esta situação crítica ou de baixo rendimento seria utilizada como bomba reserva das outras em 88% do período.

Cabe ressaltar que as bombas 1 e 2 teriam taxas de ociosidade bem próximas a zero com alguns ajustes na operação açude. Teria de ser pesquisada a possibilidade de tomar a demanda à jusante do açude o mais regular possível, otimizando o sistema como um todo e evitando desperdícios de capacidade instalada de bombeamento.

## **Justificativa Econômica da Utilização de Turbo-Bombas**

### **. Potência instalada com Turbo Bombas:**

\*(Distribuída em 4 conjuntos iguais com potência nominal de 975 c.v. em nível normal de operação, acima da cota 125,5m)

### **. Consumo de energia elétrica poupada:**

Com:

- regime diário de bombeamento igual à 18 horas / dia
- 3 turnos de 6 horas
- utilização média de 70% da potência total

### **. Valor Utilizado para o Kwh:**

### **. Valor mensal Poupado:**

### **. Valor Previsto para 4 conjuntos de Turbo Bombas:**

### **. Tempo de Retorno previsto do Capital investido: ~**

**Obs. :** O tempo de Retorno ainda é mais reduzido no caso de se abater do montante investido nas Turbo Bombas o valor que seria pago na aquisição de Moto Bombas convencionais.