

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL

RAFAEL DOS SANTOS STEINKE

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO SISTEMA DE ADUÇÃO DE
UMA MICRO CENTRAL HIDRELÉTRICA SITUADA EM RIO
BRANCO DO SUL/PR

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

RAFAEL DOS SANTOS STEINKE

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO SISTEMA DE ADUÇÃO DE
UMA MICRO CENTRAL HIDRELÉTRICA SITUADA EM RIO
BRANCO DO SUL/PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia de Produção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, sede Ecoville, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção Civil

Orientador: Prof. Dr. Ivan Azevedo Cardoso

CURITIBA
2014

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO SISTEMA DE ADUÇÃO DE UMA MICRO CENTRAL HIDRELÉTRICA SITUADA EM RIO BRANCO DO SUL/PR

Por

RAFAEL DOS SANTOS STEINKE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 09 de setembro de 2014, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Ivan Azevedo Cardoso, Dr.
UTFPR

Prof. Gilberto Manoel Alves, Dr.
UTFPR

Prof. Jair Ferreira de Almeida, Dr.
UTFPR

RESUMO

STEINKE, Rafael dos Santos. **Análise Técnico-Econômica do Sistema de Adução de uma Micro Central Hidrelétrica Situada em Rio Branco do Sul/PR.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

Este projeto de pesquisa consiste em apresentar uma proposta de projeto técnico-economicamente viável para um novo sistema de adução de uma Micro Central Hidrelétrica, atualmente desativada, localizada no município de Rio Branco do Sul / PR. Este estudo faz parte de um projeto maior de revitalização da usina, visto o seu estado atual de deterioração. Através de visitas ao local, foram coletados dados através de medidas feitas com equipamentos como trenas e estação total. Foram feitas então propostas alternativas para o projeto do sistema de adução da usina com o objetivo de sua revitalização. Foram estudadas três alternativas a fim de se adotar a melhor possível. A primeira foi manter a configuração original; a segunda foi diminuir o comprimento do canal de adução e do conduto forçado, para diminuir as perdas; a terceira foi fazer a casa de máquinas embaixo da barragem, eliminando o canal de adução, e reduzindo o custo com conduto forçado. Obtiveram-se valores viáveis, assim contribuindo para que se possa ter o maior aproveitamento possível na geração de energia elétrica pela usina.

Palavras-chave: Micro central hidrelétrica. Revitalização. Conduto forçado. Canal de adução.

ABSTRACT

STEINKE, Rafael dos Santos. **Análise Técnico-Econômica do Sistema de Adução de uma Micro Central Hidrelétrica Situada em Rio Branco do Sul/PR.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

This research project is to present a proposal for technical and economically viable project for a new system of water supply of a micro hydro-electric power plant, currently disabled, located in Rio Branco do Sul / PR. This study is part of a larger project to revitalize the plant, given its current state of deterioration. Through site visits, data were collected through measurements made with equipment such as tape measures and total station. They were then made alternative proposals for the project plant adduction system with the aim of its revitalization. We studied three alternatives in order to take the best possible. The first was to maintain the original configuration; the second was to decrease the length of the intake channel and the penstock to reduce the losses; the third was to make the engine room below the dam, eliminating the adduction channel, and reducing the cost of penstock. Yielded viable values, thus contributing so you can have the best possible use in the generation of electricity by the plant.

Keywords: Micro hydro-electric power plant. Repowering. Penstock. Adductor channel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arranjo de CHR com os principais elementos nomeados	20
Figura 2 - Arranjo de CHD com os principais elementos nomeados	21
Figura 3 - Arranjo de CHVR com os principais elementos nomeados.....	22
Figura 4 - Arranjo de CHVD com os principais elementos nomeados.....	22
Figura 5 - Localização dos componentes da MCH de Rio Branco do Sul/PR	35
Figura 6 - Barragem da MCH de Rio Branco do Sul/PR	36
Figura 7 - Represa da MCH de Rio Branco do Sul/PR.....	36
Figura 8 - Câmara de carga da MCH de Rio Branco do Sul/PR.....	37
Figura 9 - Local da antiga casa de máquinas da MCH de Rio Branco do Sul/PR.....	37
Figura 10 - Antigo canal de fuga da MCH de Rio Branco do Sul/PR.....	38
Figura 11 - Antigo conduto forçado da MCH de Rio Branco do Sul/PR	38
Figura 12 - Planta geral da MCH de Rio Branco do Sul/PR (cotas em metros)	39
Figura 13 - Perda de carga na entrada da tubulação	44
Figura 14 - Curva $Z^2 \times \rho/\theta$ para sobrepressão	47
Figura 15 - Curva $Z^2 \times \rho/\theta$ para depressão	48
Figura 16 - Planta e elevação dos blocos de apoio.....	50
Figura 17 - Projeções dos blocos de ancoragem	52
Figura 18 - Planta e corte da antiga câmara de carga da MCH de Rio Branco do Sul/PR (cotas em centímetros).....	53
Figura 19 - Canal de adução da MCH de Rio Branco do Sul/PR	54
Figura 20 - Local da câmara de carga da opção 2 da MCH de Rio Branco do Sul/PR	55
Figura 21 - Ábaco para cálculo de perda de carga no canal	56
Figura 22 - Tomada d'água da MCH de Rio Branco do Sul/PR	57
Figura 23 - Esquema da comporta de madeira da tomada d'água.....	58
Figura 24 - Planta e elevação dos blocos de apoio dimensionados (cotas em centímetros)	65
Figura 25 - Planta e elevação do bloco de ancoragem 1 (cotas em centímetros).....	66
Figura 26 - Planta e elevação do bloco de ancoragem 2 (cotas em centímetros).....	67
Figura 27 - Planta da câmara de carga da opção 2 (cotas em centímetros).....	69
Figura 28 - Corte esquemático da câmara de carga da opção 2 (cotas em centímetros)	69
Figura 29 - Perfil do terreno no conduto forçado da opção 2	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vazão esperada e métodos recomendados para escoamento livre.....	18
Tabela 2 - Classificação das centrais conforme a queda de projeto H_d	19
Tabela 3 - Velocidades máximas admissíveis da água na tubulação	32
Tabela 4 - Comparação entre as opções de locação do conduto forçado	40
Tabela 5 - Valores para k_a	43
Tabela 6 - Valores para k_c	45
Tabela 7 - Valores para k_f	49
Tabela 8 - Dimensões para comportas de madeira.....	59
Tabela 9 - Valores para k_g	60
Tabela 10 - Perdas de carga para diferentes vazões na opção 1	62
Tabela 11 - Perdas de carga para diferentes vazões na opção 2	63
Tabela 12 - Dimensões do desarenador	68
Tabela 13 - Potência gerada pelas diferentes vazões na opção 1	72
Tabela 14 - Potência gerada pelas diferentes vazões na opção 2	72
Tabela 15 - Comparativo de preços entre os dois arranjos.....	74
Tabela 16 - Distância dos pontos medidos com a estação total.....	75

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
CERPCH	Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas
CH	Central Hidrelétrica
CHAQ	Central Hidrelétrica de Alta Queda
CHBQ	Central Hidrelétrica de Baixa Queda
CHD	Central Hidrelétrica de Desvio
CHR	Central Hidrelétrica de Represamento
CHV	Central Hidrelétrica de Derivação
CHVD	Central Hidrelétrica de Derivação por Desvio
CHVR	Central Hidrelétrica de Derivação por Represamento
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
Eletrobras	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
GCH	Grande Central Hidrelétrica
MCH	Mini Central Hidrelétrica
NBR	Norma Brasileira
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PNE	Plano Nacional de Energia
Sinapi	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
UHE	Usina Hidrelétrica
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área interna da seção transversal da tubulação
A_m	Área da seção molhada do canal
B_d	Largura do desarenador.
D	Diâmetro interno da tubulação
e	Espessura da parede da tubulação
e_s	Sobre espessura da parede da tubulação devida à corrosão
e_1	Espessura ou diâmetro das barras da grade
e_2	Espaçamento entre as barras da grade
g	Aceleração da gravidade
H_b	Queda bruta – carga estática sobre a tubulação
H_d	Profundidade do desarenador
h_e	Perda de carga na entrada da tubulação
h_g	Perda de carga na grade
H_L	Queda líquida
h_s	Sobrepresão ou depressão hidráulica devido ao golpe de aríete
H_t	Carga hidráulica total sobre a tubulação
J	Perda de carga unitária no canal
J_a	Perda de carga por atrito na tubulação
k_a	Coefficiente de perda de carga por atrito na tubulação
k_{aq}	Número adimensional para classificação da usina pela queda
K_d	Coefficiente de deposição de sedimentos no desarenador
k_e	Coefficiente de perda de carga na entrada da tubulação
k_f	Eficiência das soldas
k_g	Coefficiente de perda de carga na grade.
L_{cf}	Comprimento do conduto
L_d	Comprimento do desarenador
L_s	Distância entre os eixos dos blocos de apoio
p	Carga distribuída ao longo da tubulação
P	Potência instalada
P_i	Pressão hidrostática máxima interna na tubulação
P_m	Perímetro molhado no canal
Q	Descarga na tubulação
R	Raio da curva da tubulação
R_h	Raio hidráulico
t	Tempo de fechamento do dispositivo de fechamento da turbina
v	Velocidade de escoamento da água
v_g	Velocidade da água junto à grade
v_p	Celeridade da onda de pressão
v_s	Velocidade do som na água
Z^2	Parâmetro obtido dos gráficos de Allievi, para variação de pressão
γ_a	Peso específico da água
γ_t	Peso específico da tubulação
η_g	Rendimento do gerador
η_t	Rendimento da turbina
θ	nº de intervalos $2L_{cf}/v_p$ contidos em t
θ_g	Inclinação da grade
ρ	Constante da linha do gráfico de Allievi

ρ_w Massa específica da água
 σ_f Tensão admissível à tração do aço

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.3 JUSTIFICATIVA.....	13
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 POTENCIAL HIDRELÉTRICO DO BRASIL.....	15
2.2 ENERGIA HIDRÁULICA.....	15
2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	16
2.3.1 Método da calha Parshall.....	16
2.3.2 Método dos flutuadores.....	17
2.3.3 Método do molinete.....	17
2.3.4 Método do vertedor (ou vertedouro).....	17
2.3.5 Aplicação dos métodos de medidas de vazão.....	17
2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	18
2.4.1 À potência instalada (P):.....	18
2.4.2 À sua queda (H):.....	18
2.4.3 À forma de captação de água:.....	19
2.4.4 À forma de utilizar as vazões naturais:.....	19
2.5 TIPOS DE ARRANJO.....	19
2.5.1 Centrais Hidrelétricas de Represamento.....	20
2.5.2 Centrais Hidrelétricas de Desvio.....	20
2.5.3 Centrais Hidrelétricas de Derivação.....	21
2.6 ESTUDOS INICIAIS.....	23
2.6.1 Levantamento topográfico.....	23
2.6.2 Levantamento geológico e geotécnico.....	23
2.6.3 Levantamento hidrológico.....	24
2.7 COMPONENTES BÁSICOS DAS PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	25
2.7.1 Barragem.....	25
2.7.2 Tomada da Água.....	26
2.7.3 Sistema de Adução.....	26
2.7.4 Casa de Máquinas ou Casa de Força.....	26
2.7.5 Canal de Fuga.....	27
2.8 SISTEMA DE ADUÇÃO.....	27
2.8.1 Sistema de Baixa Pressão.....	27
2.8.2 Sistema de Alta Pressão.....	28
2.8.3 Canal de Adução.....	28
2.8.4 Desarenador.....	29
2.8.5 Câmara de Carga.....	29
2.8.6 Chaminé de Equilíbrio.....	30
2.8.7 Conduto Forçado.....	32
2.8.8 Blocos de Apoio e de Ancoragem.....	33
3. METODOLOGIA E DIMENSIONAMENTO	35
3.1 LOCALIZAÇÃO E INSTALAÇÕES DA MCH DE RIO BRANCO DO SUL/PR.....	35
3.2 ESTUDOS INICIAIS PARA ALOCAÇÃO DOS ELEMENTOS.....	39
3.3 CONDUTO FORÇADO.....	41

3.3.1	Dimensionamento do conduto forçado	42
3.3.2	Perdas de carga no conduto forçado	43
3.3.3	Variação de pressão no conduto forçado	45
3.3.4	Espessura da parede do conduto forçado	48
3.3.5	Blocos de apoio (selas).....	50
3.3.6	Blocos de ancoragem	50
3.4	CÂMARA DE CARGA	53
3.5	CANAL DE ADUÇÃO	54
3.6	TOMADA D'ÁGUA	57
3.6.1	Comporta	58
3.6.2	Grade de proteção	59
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1	DIMENSIONAMENTO DO CONDUTO FORÇADO.....	61
4.1.1	Variação de pressão no conduto forçado	63
4.1.2	Espessura da parede do conduto forçado	64
4.1.3	Dimensões dos blocos de apoio	65
4.1.4	Dimensões dos blocos de ancoragem	66
4.2	CÂMARA DE CARGA	67
4.3	CANAL DE ADUÇÃO	69
4.4	TOMADA D'ÁGUA	70
4.4.1	Comporta	70
4.4.2	Grade de proteção	70
4.5	POTÊNCIA INSTALADA.....	71
4.5.1	Queda líquida	71
4.5.2	Determinação da potência instalada.....	71
4.6	CUSTO ESTIMADO PARA CADA OPÇÃO DE ARRANJO	72
4.6.1	Opção 1	72
4.6.2	Opção 2	73
4.6.3	Resultado final	74
4.7	DETALHAMENTO DA OPÇÃO 2	75
5.	CONCLUSÃO	77
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
5.2	SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS	77
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICE A – CORTE ESQUEMÁTICO DO CONDUTO FORÇADO.....	81
	ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DA ESTAÇÃO TOTAL UTILIZADA	82

1. INTRODUÇÃO

O mundo utiliza majoritariamente no seu suprimento energético, as fontes energéticas primárias não renováveis, em particular, os combustíveis fósseis – petróleo, carvão mineral e gás natural. Estes combustíveis são grandes emissores de gás carbônico (CO₂), um dos gases relacionados com o “efeito estufa”, causador de elevação da temperatura do planeta e de mudanças climáticas. Devido à poluição causada por esse tipo de energia, e por ela ser limitada no planeta, faz-se necessária a busca por fontes renováveis de energia. Um bom exemplo é a energia hidroelétrica. Apesar do alto custo de instalação, o custo com combustível (a água) é zero. Porém, mesmo sendo considerada limpa, a instalação de uma usina causa impactos ambientais, e como o Brasil é muito rico em fontes para esse tipo de energia, e o custo de transmissão de energia elétrica é alto, uma solução é investir em PCHs (pequenas centrais hidrelétricas), e que sejam construídas próximas aos pontos de consumo.

Segundo Mendes e Pinto (2011), a geração de energia elétrica por PCH no Brasil pode ser feita por:

- Produtor independente: Pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização do Poder Concedente, para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco;
- Agentes Geradores: São agentes titulares de serviço público delegados pelo Poder Concedente, mediante licitação, na modalidade concorrência, à pessoa jurídica ou consórcio de empresas para exploração e prestação de serviços públicos de energia elétrica, nos termos da Lei Nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995;
- Autoprodutores: Pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo, podendo eventualmente, com autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), comercializar o excedente de energia elétrica gerada.

Esse estudo faz parte de um projeto maior de desenvolvimento e revitalização de uma micro central hidrelétrica, situada no município de Rio Branco do Sul/PR, para fins de autoprodução de energia elétrica, que operou há várias décadas e no momento está em ruínas. Aqui o foco é o sistema de adução da micro usina. O projeto visa a reconstrução da micro usina.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo dessa pesquisa é definir o melhor sistema de adução na reativação da micro central hidrelétrica locada no município de Rio Branco do Sul/PR, baseado em diferentes alternativas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Analisar a infraestrutura e o projeto original da usina;
- Averiguar o que pode ser reaproveitado e o que deverá ser substituído;
- Projetar um sistema de adução alternativo para a usina;
- Calcular a viabilidade técnica e econômica do sistema projetado;
- Baseado no custo benefício, verificar o melhor sistema de adução a ser implantado.

1.3 JUSTIFICATIVA

A geração predominante no setor elétrico brasileiro é a geração centralizada, que representa grandes blocos de geração interconectados por linhas de

transmissão e despacho centralizado. Em contrapartida, a geração distribuída se caracteriza pela geração de pequeno porte, localizada na rede da distribuidora local de energia elétrica (RODRIGUES; BORGES; FALCÃO, 2007).

A geração distribuída de energia oferece vantagens ao setor elétrico devido à sua proximidade em relação à carga, o que pode permitir a diminuição das perdas associadas à transmissão de energia elétrica (JENKINS et al., 2000).

O recente processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro tem estimulado a geração descentralizada de energia elétrica, de modo que as fontes não-convencionais, principalmente as renováveis, tendem a ocupar maior espaço na matriz energética nacional. Nesse contexto, as pequenas centrais hidrelétricas terão um papel extremamente importante (AGÊNCIA..., 2003).

O presente trabalho justifica-se pelo fato de que a usina trará benefícios para o autoprodutor, representando uma maior autonomia quanto à geração de energia elétrica e ao reaproveitamento de um espaço que hoje está abandonado.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O processo de pesquisa que foi desenvolvido prevê a realização de estudos de campo na usina com a finalidade de coletar dados para o desenvolvimento dos projetos propostos. Foram utilizados equipamentos como trena física, trena a laser e estação total para realização das medições de distâncias e desníveis. Os dados coletados foram processados, analisados e aplicados em normas técnicas e manuais. Os resultados obtidos foram analisados, e foram sugeridas propostas alternativas do sistema de adução amparadas pela pesquisa teórica. A melhor alternativa será recomendada.

A pesquisa teórica baseia-se no conhecimento obtido através de livros, conhecimentos adquiridos em aulas com os professores e no meio profissional, artigos técnicos, teses e normas técnicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 POTENCIAL HIDRELÉTRICO DO BRASIL

“A energia hidroelétrica é a base do suprimento energético do Brasil, produzida por usinas de grande porte, situadas normalmente distantes dos polos consumidores. A escala dos empreendimentos e o volume da energia a transmitir são consideráveis e denotam elevados investimentos. A construção de uma usina e de suas linhas de transmissão requerem prazos, desde a decisão pela obra até o início da geração, superiores a cinco anos. Isso impõe planos de longo alcance ao setor para programar, a tempo, o suprimento energético indispensável à nação” (MÜLLER, 1995, p 14).

Segundo o Atlas de Energia Elétrica no Brasil (AGÊNCIA..., 2008), o Brasil é o país com maior potencial hidrelétrico: um total de 260 mil MW, segundo o Plano 2015 da Eletrobras, último inventário produzido no país em 1992. Deste montante pouco mais de 30% se transformaram em usinas construídas ou outorgadas. A Aneel cita ainda que de acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030), o potencial a aproveitar é de cerca de 126.000 MW.

A maioria das grandes centrais hidrelétricas brasileiras localizam-se nas bacias do São Francisco. No Paraná, particularmente nas sub-bacias do Paranaíba, Grande e Iguaçu, apesar da existência de unidades importantes na região Norte. Os potenciais da região Sul, Sudeste e Nordeste já estão, portanto, quase integralmente explorados (AGÊNCIA..., 2008)..

2.2 ENERGIA HIDRÁULICA

A energia hidráulica resulta da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, que provocam a evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre; é a energia existente na água e que em determinadas

condições de vazão e altura de queda, pode ser usada para movimentar máquinas. Assim, a energia hidráulica é convertida em energia mecânica. Ao contrário das demais fontes renováveis, representa uma parcela significativa da matriz energética mundial e possui tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas. Atualmente, é a principal fonte geradora de energia elétrica em diversos países e responde por aproximadamente 17% de toda a eletricidade gerada no mundo (CENTRO..., 2013).

Segundo a ANEEL, da água doce que resta no planeta, apenas aquela que flui por aproveitamentos com acentuados desníveis e/ou grande vazão pode ser utilizada nas usinas hidrelétricas – características necessárias para a produção da energia mecânica que movimenta as turbinas das usinas.

2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

Existem inúmeros métodos para medição de vazão. Abaixo, estão listados alguns métodos que podem ser utilizados em PCHs, descritos pela NBR 13403/1995 da ABNT:

2.3.1 Método da Calha Parshall

Utiliza dispositivo com seção convergente, com fundo em nível, seção estrangulada ou garganta, com fundo em declive e seção divergente, com fundo em aclave. A vazão deve ser determinada a partir da leitura, em escala, da lâmina líquida no início da seção convergente.

2.3.2 Método dos flutuadores

Para determinação da velocidade, que consiste em observar-se o tempo necessário para um objeto flutuante deslocar-se em um trecho de comprimento conhecido.

2.3.3 Método do molinete

É utilizado para a determinação da velocidade de um fluido, por meio da sua correlação com o número de rotações de uma hélice ou conchas de um dispositivo chamado molinete.

2.3.4 Método do vertedor (ou vertedouro)

Utiliza um dispositivo, introduzido perpendicularmente às linhas de corrente, que possui abertura por onde o fluxo passa. A vazão deve ser determinada a partir da leitura da carga hidráulica no vertedor.

2.3.5 Aplicação dos métodos de medidas de vazão

A tabela 1 mostra as vazões esperadas e os métodos recomendados para suas aferições em escoamento livre:

Tabela 1 - Vazão esperada e métodos recomendados para escoamento livre

Métodos	VAZÃO (L/s)					
	Até 1	1 a 5	5 a 30	30 a 300	300 a 1000	1000 a 5000
Flutuador	X	X	X	X	X	X
Vertedor triangular		X	X	X		
Vertedor retangular			X	X	X	
Calha Parshall	X	X	X	X	X	X
Molinete				X	X	X

Fonte: ABNT NBR 13403/1995

2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

As centrais hidrelétricas podem ser classificadas sob diferentes aspectos. Critérios como potência gerada, queda, forma de captação de água e função no sistema devem ser considerados.

2.4.1 À potência instalada (P):

A Eletrobras (2014) classifica as PCH's em:

- Micro central: $P \leq 100$ kW;
- Mini central: $100 \leq P \leq 1000$ kW;
- Pequena central: $1.000 \leq P \leq 30.000$ kW;

2.4.2 À sua queda:

A Eletrobras (2014) classifica as PCH's em baixa queda, média queda e alta queda conforme a tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Classificação das centrais conforme a queda de projeto H_d

CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS	QUEDA DE PROJETO - H_d (m)		
	BAIXA	MÉDIA	ALTA
MICRO	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
MINI	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
PEQUENAS	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2014)

2.4.3 À forma de captação de água:

Souza, Fuchs e Santos (1983) classificam as centrais hidrelétricas segundo:

- Centrais em desvio e derivação;
- Centrais em leito de rio ou de represamento.

2.4.4 À forma de utilizar as vazões naturais:

- Centrais a fio de água;
- Centrais com regularização: diária / semanal / anual / plurianual.

2.5 TIPOS DE ARRANJO

As centrais hidrelétricas podem ser classificadas em basicamente 3 tipos de arranjos (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009):

2.5.1 Centrais Hidrelétricas de Represamento (CHR)

Arranjo mais utilizado em GCH (grandes centrais hidrelétricas) e também em CHBQ, as CHR possuem um conduto forçado que faz a interligação direta entre a barragem e a casa de máquinas. A figura 1 demonstra um corte longitudinal, onde os principais componentes estão indicados.

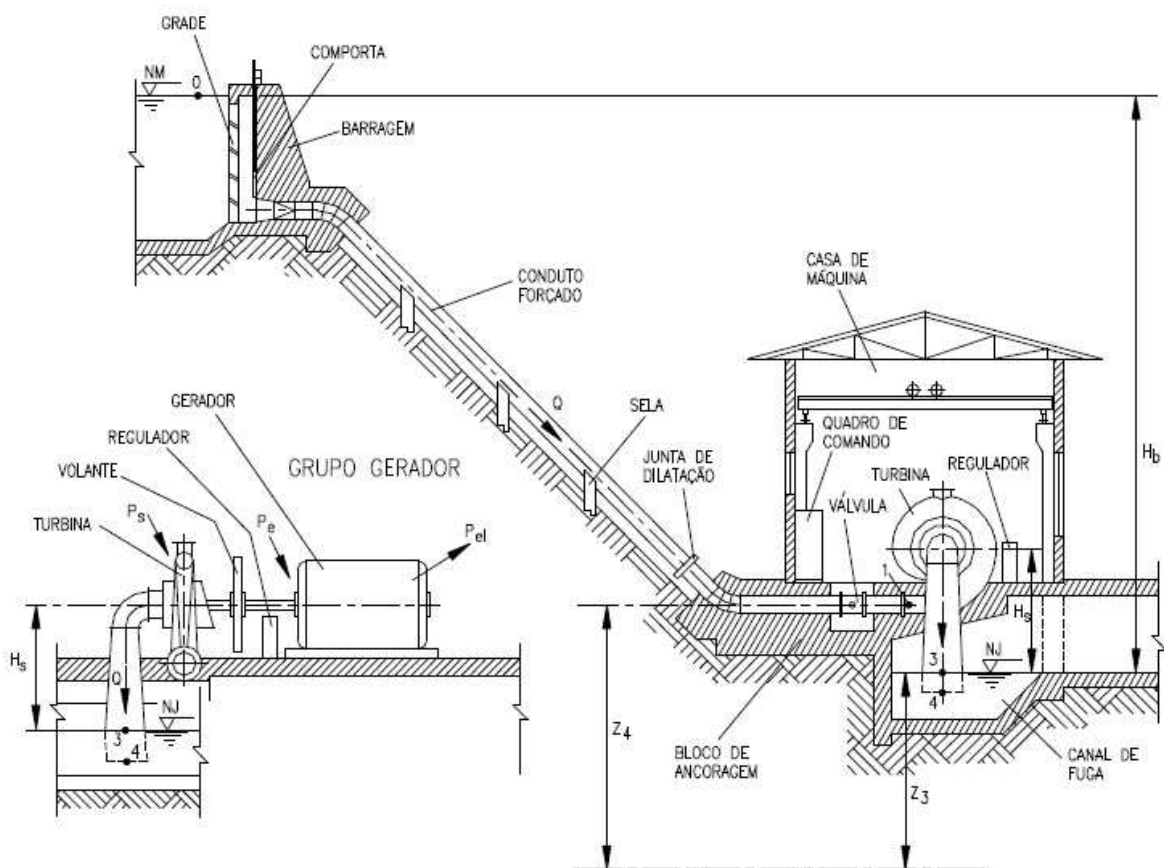


Figura 1- Arranjo de CHR com os principais elementos nomeados

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

2.5.2 Centrais Hidrelétricas de Desvio (CHD)

As CHD caracterizam-se por serem implantadas usando um trecho relativamente grande do rio, na maioria das vezes com corredeiras.

Neste caso, o nível da água de montante deve estar o mais próximo do de jusante, necessitando de um sistema de baixa pressão entre a barragem e o conduto forçado. A figura 2, abaixo, mostra um esquema de uma CHD.

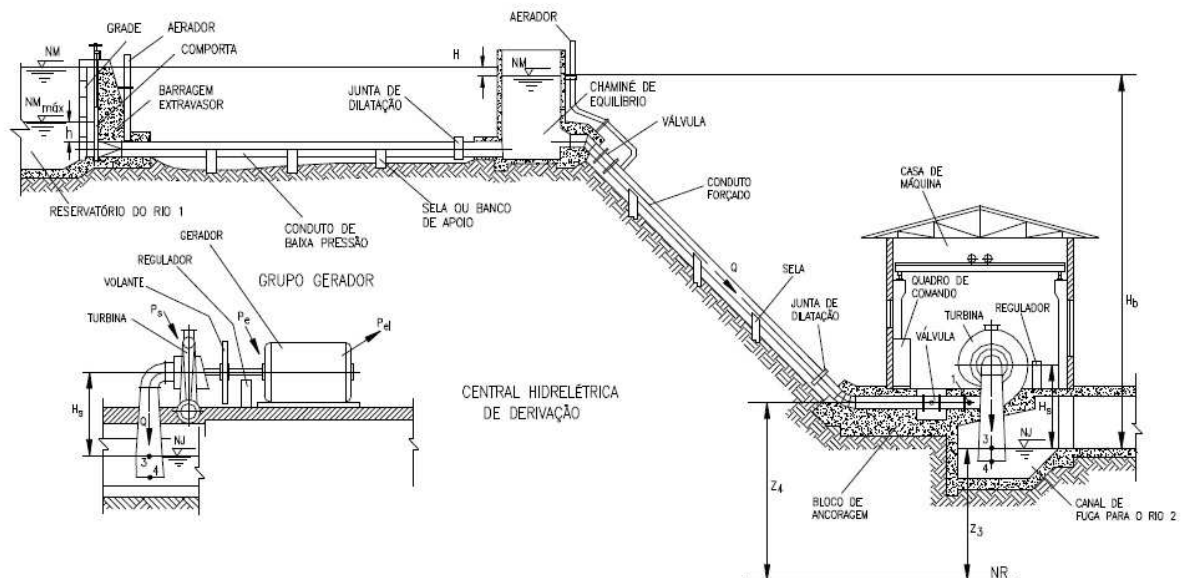


Figura 2 - Arranjo de CHD com os principais elementos nomeados

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

2.5.3 Centrais Hidrelétricas de Derivação (CHV)

As CHV são os arranjos em que o barramento é feito em um rio e a descarga em outro. Elas podem ser divididas entre CHV de represamento (CHVR), e CHV de desvio (CHVD).

A diferença entre os dois consiste que nas CHVD os dois rios escoam em cotas diferentes. Os autores descrevem a incompatibilidade entre os ecossistemas do rio a jusante e do rio a montante como o principal problema a ser solucionado nesse tipo de arranjo.

As figuras 3 e 4 demonstram cortes longitudinais, onde os principais componentes estão indicados.

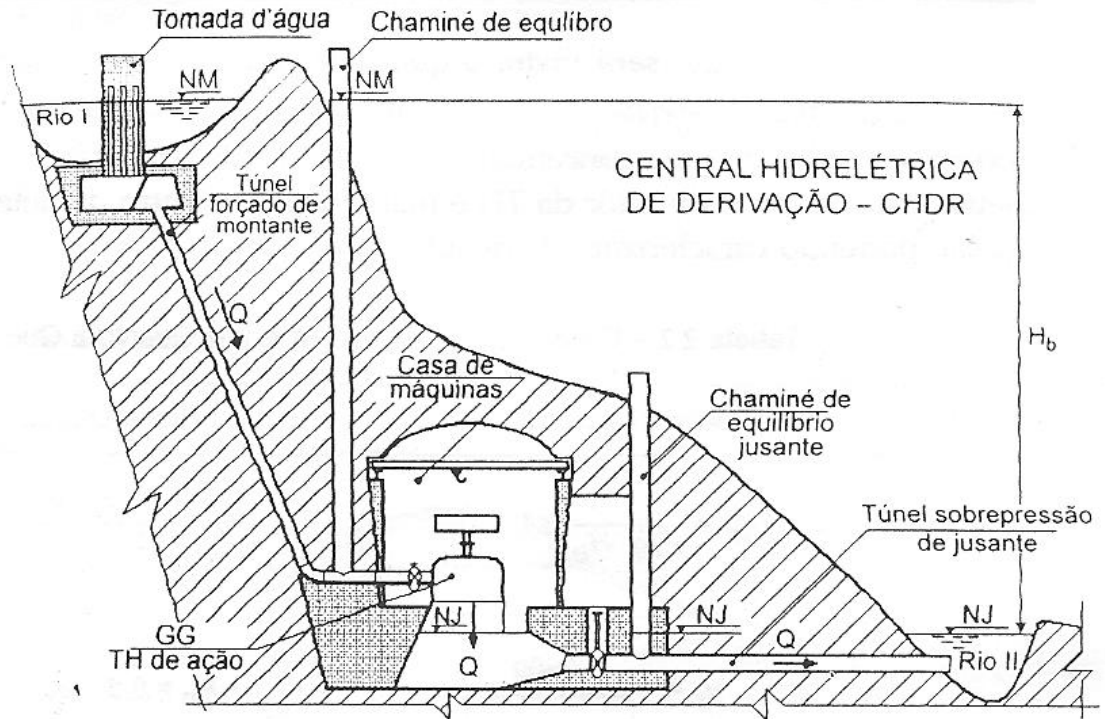


Figura 3 - Arranjo de CHVR com os principais elementos nomeados

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

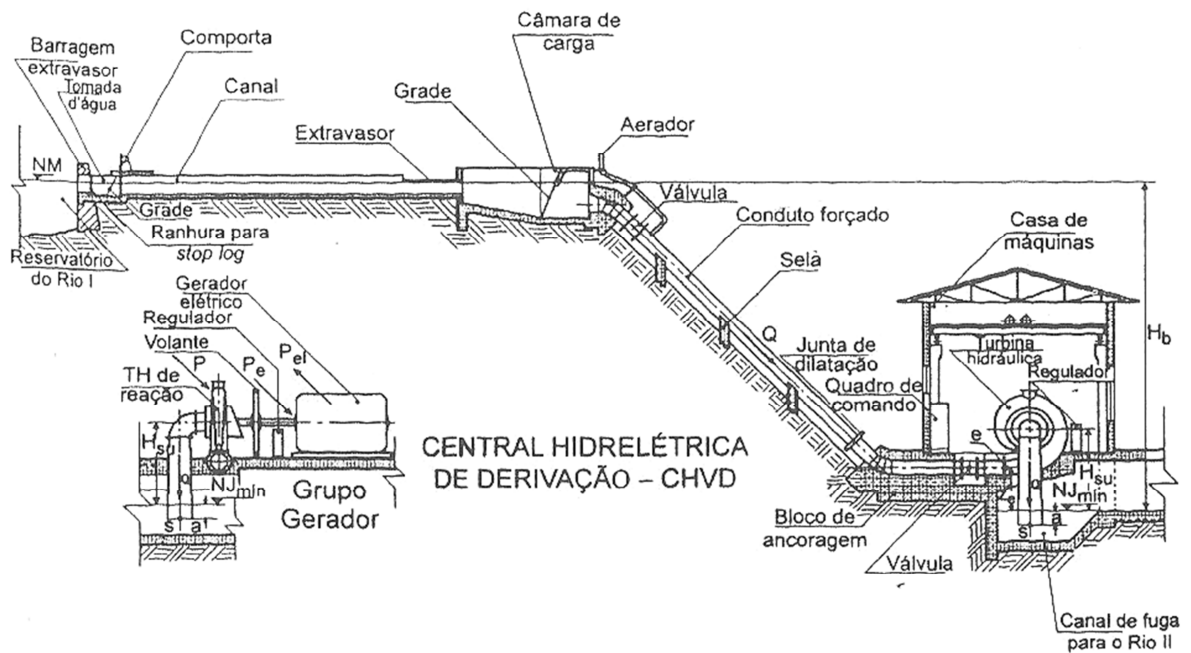


Figura 4 - Arranjo de CHVD com os principais elementos nomeados

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

2.6 ESTUDOS INICIAIS

A Eletrobras (2014) recomenda que sejam feitos os seguintes levantamentos:

2.6.1 Levantamento topográfico

Para o projeto de uma PCH, serão necessários levantamentos topográficos de precisão, listados a seguir, os quais devem ser realizados de acordo com a norma específica:

- Determinação da queda natural no local;
- Planialtimétricos das áreas de implantação das estruturas previstas;
- Planialtimétricos das áreas de empréstimo de solo, jazidas de areia e cascalho e pedreiras;
- Nivelamento da linha d'água do reservatório;
- Cadastro jurídico das propriedades atingidas;
- Levantamento das propriedades atingidas para efeito de subdivisão e averbação legal.

2.6.2 Levantamento geológico e geotécnico

Os levantamentos e estudos geológicos e geotécnicos têm os seguintes objetivos (ELETROBRAS, 2014):

- Investigar as condições das fundações e ombreiras na região das estruturas componentes do aproveitamento, bem como das encostas na vizinhança da obra;

- Pesquisar e caracterizar as áreas de empréstimo de solo, jazidas de areia e cascalho mais próximas do sítio do empreendimento;
- Locais prováveis para lançamento de bota-fora, instalação de canteiro e alojamento de operários.

2.6.3 Levantamento hidrológico

O estudo da vazão de um curso d'água exige a instalação de uma "Estação Fluviométrica", onde serão feitas regularmente observações de altura do nível d'água e realizadas as medições de descarga líquida e, quando necessário, de descarga sólida. É um posto de observação permanente do regime fluvial do rio. A estação fluviométrica é constituída, em síntese, de: dispositivos para obtenção da cota fluviométrica, seção de medição de vazão e referências de nivelamento (ELETROBRAS, 2014).

A escolha do local para instalação da estação ou posto fluviométrico deverá seguir, pelo menos, os seguintes critérios:

- O acesso ao local de implantação da estação deverá ser permanente, a fim de que não haja interrupção na operação da mesma;
- O trecho do rio onde se localizará a estação deverá ser reto e, se possível, tendo a jusante uma queda ou corredeira. Entretanto, na seção de medição de vazão, o escoamento deverá ser laminar (tranquilo) sem turbulências ou redemoinhos;
- É recomendável que as margens sejam estáveis e suficientemente altas para impedir que, nas cheias, o rio transborde.

2.7 COMPONENTES BÁSICOS DAS PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Consideradas as pequenas centrais hidrelétricas acima esquematizadas por Souza, Santos e Bortoni (2009), destacam-se os seguintes componentes:

2.7.1 Barragem

“Barragem é uma obra da engenharia que tem por objetivo reter água para determinados fins, criando, artificialmente, um desnível local” (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p 151).

As ensecadeiras são barragens com a finalidade de desviar um rio por um tempo determinado. Depois de cumprido seu objetivo ela é destruída ou fica submersa.

Os autores classificam as barragens como:

- Barragens de Concreto: Atuam por gravidade;
- Barragens em Arco (com raio constante ou com raio variável): Implantadas em vales;
- Barragens de Contraforte: Enquanto uma das faces da barragem recebe o empuxo da água, os contrafortes têm por objetivo transmitir o peso próprio de toda a estrutura e demais esforços às fundações;
- Barragens de Enrocamento: Construídas com pedras lançadas ou pedras arrumadas manual ou mecanicamente;
- Barragens de Terra: Construídas com terra compactada;
- Barragens Mistas: Compostas por dois ou mais materiais

Eles ainda citam materiais como alvenaria, pedra argamassada ou madeira.

2.7.2 Tomada d'água

Souza, Santos e Bortoni (2009), conceituam a tomada da água como uma obra destinada a captar a água para o funcionamento das turbinas.

A tomada da água é composta por: “grades, comportas, “stop logs”, desarenador, limpa grades, orientadores de fluxo, podendo conter vertedouros para cheias e outros elementos de operação, segurança e manutenção” (JUSTINO, 2006).

2.7.3 Sistema de Adução

O sistema de adução, por se tratar de um item de grande importância para o presente trabalho, será tratado mais além.

2.7.4 Casa de Máquinas ou Casa de Força

Segundo Moreira e Ribas (2001) a casa de máquinas ou casa de força é responsável por abrigar os equipamentos de geração de energia elétrica. Pode ser externa ou subterrânea.

A casa de máquina é composta por grupos geradores e acessórios, quadros de comando e proteção, para-raios, sistema de comunicação, talhas, ponte rolante, sistemas de ventilação e/ou ar condicionado, escritório, baterias, eventual oficina mecânica e elétrica (JUSTINO, 2006).

2.7.5 Canal de Fuga

O canal de fuga é o componente responsável por retornar a água turbinada ao rio. Sua geometria é definida pelo tipo e dimensões da casa de força e também pela distância entre a casa de força e o rio.

2.8 SISTEMA DE ADUÇÃO

A Eletrobras (2014) classifica, segundo o sistema de adução, as PCH de duas maneiras:

- Adução em baixa pressão com escoamento livre em canal / alta pressão em conduto forçado;
- Adução em baixa pressão por meio de tubulação / alta pressão em conduto forçado.

A escolha de um ou outro tipo dependerá das condições topográficas e geológicas que apresente o local do aproveitamento, bem como de estudo econômico comparativo.

Para sistema de adução longo, quando a inclinação da encosta e as condições de fundação forem favoráveis à construção de um canal, este tipo, em princípio, deverá ser a solução mais econômica.

Para sistema de adução curto, a opção por tubulação única, para os trechos de baixa e alta pressão, deve ser estudada.

2.8.1 Sistema de Baixa Pressão

Segundo Souza, Santos e Bortoni (2009), a estabilidade operacional de todos os sistemas que compõem a central hidrelétrica é o ponto de partida que

permite estabelecer quais as condições técnicas para o arranjo ter ou não um sistema de baixa pressão, isto é ser uma CHD, CHV ou CHR.

Os sistemas de baixa pressão podem ser compostos de tomada d'água, conduto de baixa pressão e chaminé de equilíbrio, ou de tomada d'água, canal e câmara de carga com extravasor lateral (JUSTINO, 2006).

2.8.2 Sistema de Alta Pressão

Junges (2007) compõe o sistema de alta pressão por tubulação, blocos de apoio ou ancoragem e juntas de dilatação.

2.8.3 Canal de Adução

Nos casos dos aproveitamentos por desvio , quando é aproveitada a conformação topográfica de uma queda natural e a barragem tem o objetivo de garantir o afogamento da boca da estrutura de captação, torna-se geralmente necessária a utilização de um canal de adução ligando a tomada da água de captação até à câmara de carga, a qual por sua vez acopla-se ao conduto forçado (ELETROBRAS & DNAEE, 1985).

O Manual de Minicentrals Hidrelétricas da Eletrobras & DNAEE (1985) recomenda basear-se na comparação dos custos na escolha do revestimento. Se a geologia local permitir pode-se optar por construir o canal em solo natural, caso contrário pode-se utilizar materiais como pedra argamassada, enrocamento, concreto, etc.

Souza, Santos e Bortoni (2009), atentam quanto ao estudo estatístico que tem indicado que no conduto de baixa pressão a perda total de energia não deve ultrapassar 1% daquela correspondente à queda bruta.

Diante da construção de um canal de adução a céu aberto, uma alternativa oferecida no Manual de Minicentrals Hidrelétricas da Eletrobras & DNAEE (1985), é

a utilização de uma tubulação em baixa pressão como ligação entre a tomada da água e a entrada da tubulação forçada. Essa tubulação em baixa pressão geralmente é construída em aço, e em alguns casos em concreto armado ou em cimento-amianto.

2.8.4 Desarenador

Para os casos de centrais hidrelétricas de desvio ou de derivação e antes da entrada no conduto forçado de centrais hidrelétricas de represamento, Souza, Santos e Bortoni (2009) advertem o uso de um desarenador. Assim os sedimentos em suspensão podem ser depositados e, posteriormente retirados.

2.8.5 Câmara de Carga

Outra estrutura do sistema de baixa pressão é a câmara de carga. Ela é responsável pela interligação entre o canal e o conduto forçado.

“A câmara de carga tem por finalidade, o dimensionamento de sua estrutura e os equipamentos mecânicos de proteção e fechamento iguais à tomada da água” (ELETROBRAS & DNAEE, 1985).

Sob o aspecto hidráulico, a câmara de carga deve ser dimensionada, para atender duas condições críticas de operação da CH (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009):

- Em partida brusca, garantir que não entre ar no conduto forçado;
- Em parada brusca, garantir estabilidade funcional da câmara de carga e do canal adutor.

Souza, Santos e Bortoni (2009) apontam as seguintes hipóteses gerais para o dimensionamento hidráulico da câmara de carga:

- Fluido isento de atrito;
- Tempos nulos para as celeridades;
- Canal e câmara de fundo plano, sendo esta de seção transversal retangular;
- Nível da água de referência horizontal e coincidente com o nível da crista do extravasor lateral localizado no canal adutor junto à câmara de carga.

Segundo estes autores, quando analisada a partida brusca, além das hipóteses gerais, devem ser analisadas as demais hipóteses:

- Aceleração da água no conduto forçado igual ao seu valor médio;
- Vazões variando linearmente com os respectivos tempos hidráulicos.

Quando a adução em baixa pressão for projetada através de uma tubulação, a câmara de carga será substituída, geralmente, por uma chaminé de equilíbrio. No caso de ser projetada uma câmara de carga, ao invés de uma chaminé de equilíbrio, poderá haver um transbordamento em caso de retorno da água, proveniente do golpe de aríete, e, para isso, deve-se prever um vertedouro em uma de suas paredes laterais, com uma área de escoamento dimensionado do mesmo modo que o extravasor previsto para o sistema de adução.

Para o tipo de câmara de carga com vertedouro, deve-se prever que a água extravasada para o terreno seja encaminhada de volta para o rio, sem provocar erosão nas fundações da própria câmara de carga, dos blocos de ancoragem e das selas da tubulação forçada ou de outras estruturas vizinhas (ELETROBRAS & DNAEE, 1985).

2.8.6 Chaminé de Equilíbrio

A chaminé de equilíbrio é uma estrutura, construída em concreto ou aço, constituída de um reservatório cilíndrico de eixo vertical, implantada entre o trecho

de adução constituído por uma tubulação em baixa pressão, e o trecho constituído por uma tubulação forçada (ELETROBRAS & DNAEE, 1985).

Segundo Souza, Santos e Bortoni (2009), a chaminé de equilíbrio é definida como a estrutura que interliga o conduto ou túnel de baixa pressão com o conduto forçado. Sob o aspecto hidráulico, deve ser dimensionada para atender duas situações críticas:

- Em partida brusca, garantir que não entre ar no conduto forçado;
- Em parada brusca, garantir a estabilidade funcional de si própria e do conduto de baixa pressão.

A utilização de chaminés de equilíbrio está ligada ao problema de redução do golpe de aríete nos condutos forçados e às exigências da regulação da frequência nos grupos geradores. Os dois problemas são tanto mais agudos quanto maior o comprimento dos condutos forçados com relação à queda da usina (Eletrobras, 2003).

No caso do golpe de aríete, as ondas de sobre pressão no conduto forçado são absorvidas na chaminé de equilíbrio, não se transmitindo ao conduto de montante. Enquanto isso, a massa líquida em trânsito pelo conduto de baixa pressão se acumula na chaminé – a elevação do nível d'água na chaminé força o escoamento de volta ao reservatório, criando-se um movimento oscilatório que vai sendo amortecido pelas perdas de carga (atrito) ao longo da tubulação (MOREIRA; RIBAS, 2001).

Moreira e Ribas (2001) afirmam que quando a relação entre o comprimento da tubulação e a queda bruta for superior a 5, faz-se necessário o uso da chaminé de equilíbrio. Esta regra pode ser relaxada em função de modificações nos dispositivos de proteção das turbinas, aumentando-se o tempo de fechamento das válvulas e, concomitantemente, elevando-se a inércia do conjunto gerador. Este tipo de adaptação exige estudos específicos e a concordância do fornecedor das turbinas.

O Manual de Dimensionamento de Hidrelétricas da Eletrobras & DNAEE (1985) recomenda a verificação pelo critério da constante de aceleração da água na tubulação. Caso o tempo de aceleração da água na tubulação for inferior a 3

segundos, não haverá necessidade de chaminé de equilíbrio. Porém há uma ressalva quanto a valores até 6 segundos, não havendo necessidade de instalação da chaminé. Acima desse valor, sua instalação é obrigatória.

O Manual cita ainda outro meio de evitar a instalação da chaminé: emprego de válvulas de alívio na entrada das turbinas, quase sempre também dentro de certas limitações, geralmente caras e exigindo consultas diretas ao fabricante.

2.8.7 Conduto Forçado

O conduto forçado é a estrutura que leva o escoamento desde a chaminé de equilíbrio (ou câmara de carga, ou mesmo diretamente do reservatório) até a turbina.

Para o dimensionamento de condutos forçados, o Manual de Minicentrais Hidrelétricas (1985) e as Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (2014), ambos da Eletrobras¹, utilizam a mesma sequência de cálculos.

Primeiramente, considera-se que o diâmetro do conduto é constante, isto é, não se altera ao longo do comprimento.

A Eletrobras & DNAEE (1985) admite, para as minicentrais que a sobre pressão hidráulica devido ao golpe de aríete seja 1/5 da queda bruta. Também a carga hidráulica total sobre a tubulação deverá ser 6/5 da queda bruta.

O manual recomenda, ainda, verificar se foram respeitadas as velocidades máximas admissíveis para cada tipo de tubulação, conforme a Tabela 3:

Tabela 3 - Velocidades máximas admissíveis

MATERIAL	V _{máx} ADMISSÍVEL (m/s)
Aço	5,0
Concreto	3,0

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2014)

¹ O Manual de Minicentrais Hidrelétricas é de autoria da Eletrobras em parceria com o Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica.

Também é necessário fazer a verificação quanto à variação de pressão no conduto forçado. A Eletrobras (2014) utiliza o Método de Allievi para realizar a verificação.

A pressão normal estática ao longo do conduto forçado sofre variações decorrentes do golpe de aríete quando há mudanças súbitas de vazão resultantes de fechamentos ou aberturas rápidas, parciais ou totais, do dispositivo de fechamento da turbina (ELETROBRAS, 2014).

Durante o transitório hidráulico, as oscilações de pressão ao longo da canalização ocorrem de maneira brusca, provocando ruídos semelhantes a pancadas. Por isso, o transitório hidráulico também é comumente denominado de Golpe de Aríete. As sobrepressões e subpressões que ocorrem durante o transitório hidráulico podem causar sérios problemas à tubulação e seus equipamentos, se estes não forem dimensionados para suportar tais sobrecargas, comprometendo a segurança e o funcionamento do sistema. Desse modo, a quantificação das pressões máximas e mínimas é de fundamental interesse para o projetista, a fim de que este possa dimensionar a tubulação e introduzir equipamentos protetores, cuja finalidade é amortecer as variações de carga, prejudiciais à vida útil da instalação (FRANÇA, 2006).

Segundo a Eletrobras & DNAEE (1985), o valor de sobrepressão é necessário para o dimensionamento da espessura da tubulação, para suportar a pressão interna. Já o valor de depressão, é necessário para verificar se a linha piezométrica, durante o golpe de aríete, não corta a tubulação, a fim de evitar pressões negativas no interior desta. Pressões negativas podem provocar um afundamento das paredes da tubulação.

2.8.8 Blocos de Apoio e de Ancoragem

A tubulação que conduz a água desde a tomada da água até as turbinas deve ser instalada sobre blocos de apoio e de ancoragem.

Os blocos de apoio têm como objetivo principal servir de apoio à tubulação, permitindo o deslizamento livre sobre eles. São construídos de concreto e devem

conter uma superfície de papelão grafitado ou outro material que permita o deslize da tubulação. Segundo a Eletrobras & DNAEE (1985), geralmente possuem espaçamentos iguais entre si.

Já os blocos de ancoragem têm como função “absorver os esforços longitudinais desenvolvidos na tubulação” (ELETROBRAS & DNAEE, 1985, p 241). São locados em trechos muito longos e mudanças de direção.

3. METODOLOGIA E DIMENSIONAMENTO

3.1 LOCALIZAÇÃO E INSTALAÇÕES DA MCH DE RIO BRANCO DO SUL/PR

A MCH (micro central hidrelétrica) em estudo está localizada na Rua Borges de Medeiros, no bairro Vila Velha, no município de Rio Branco do Sul/PR, região metropolitana norte de Curitiba/PR (latitude $25^{\circ}10'49.40''S$. e longitude $49^{\circ}18'16.75''O$). A figura 5, abaixo, mostra a localização da MCH de Rio Branco do Sul/PR e os seus componentes originais:



Figura 5 – Localização dos componentes da MCH de Rio Branco do Sul/PR

Fonte: Google Earth (2014)

A MCH de Rio Branco do Sul/PR conta, atualmente, com uma barragem (figura 6), um canal de adução, e uma câmara de carga em ruínas (figura 8). Sua represa precisa de uma limpeza, pois se encontra assoreada (figura 7).



Figura 6 – Barragem da MCH de Rio Branco do Sul/PR

Fonte: Autoria própria (2014)



Figura 7 – Represa da MCH de Rio Branco do Sul/PR

Fonte: Autoria própria (2014)



Figura 8 – Câmara de carga da MCH de Rio Branco do Sul/PR

Fonte: Autoria própria (2014)

A figura 9 abaixo mostra o equipamento usado na medição sobre o local onde ficava a antiga casa de máquinas, e na figura 10 o canal de fuga.



Figura 9 – Local da antiga casa de máquinas da MCH de Rio Branco do Sul/PR

Fonte: Autoria própria (2014)



Figura 10 – Antigo canal de fuga da MCH de Rio Branco do Sul/PR
Fonte: Autoria própria (2014)

Na figura 11 abaixo, pode-se observar o local por onde descia o conduto forçado que deverá ser substituído por estar corroído.



Figura 11 – Antigo conduto forçado da MCH de Rio Branco do Sul/PR
Fonte: Autoria própria (2014)

3.2 ESTUDOS INICIAIS PARA ALOCAÇÃO DOS ELEMENTOS

Foram sugeridas três opções. A primeira foi manter a posição original do sistema de alta pressão. A segunda foi colocá-lo de forma a abreviar o trajeto da água pelo canal de baixa pressão, evitando a reconstrução de um canal elevado de 31 m de comprimento. A terceira opção foi posicionar a casa de máquinas logo abaixo da barragem. Na figura 12 está a planta geral da MCH em estudo, bem como as três opções de locação das novas instalações (cotas em metros).

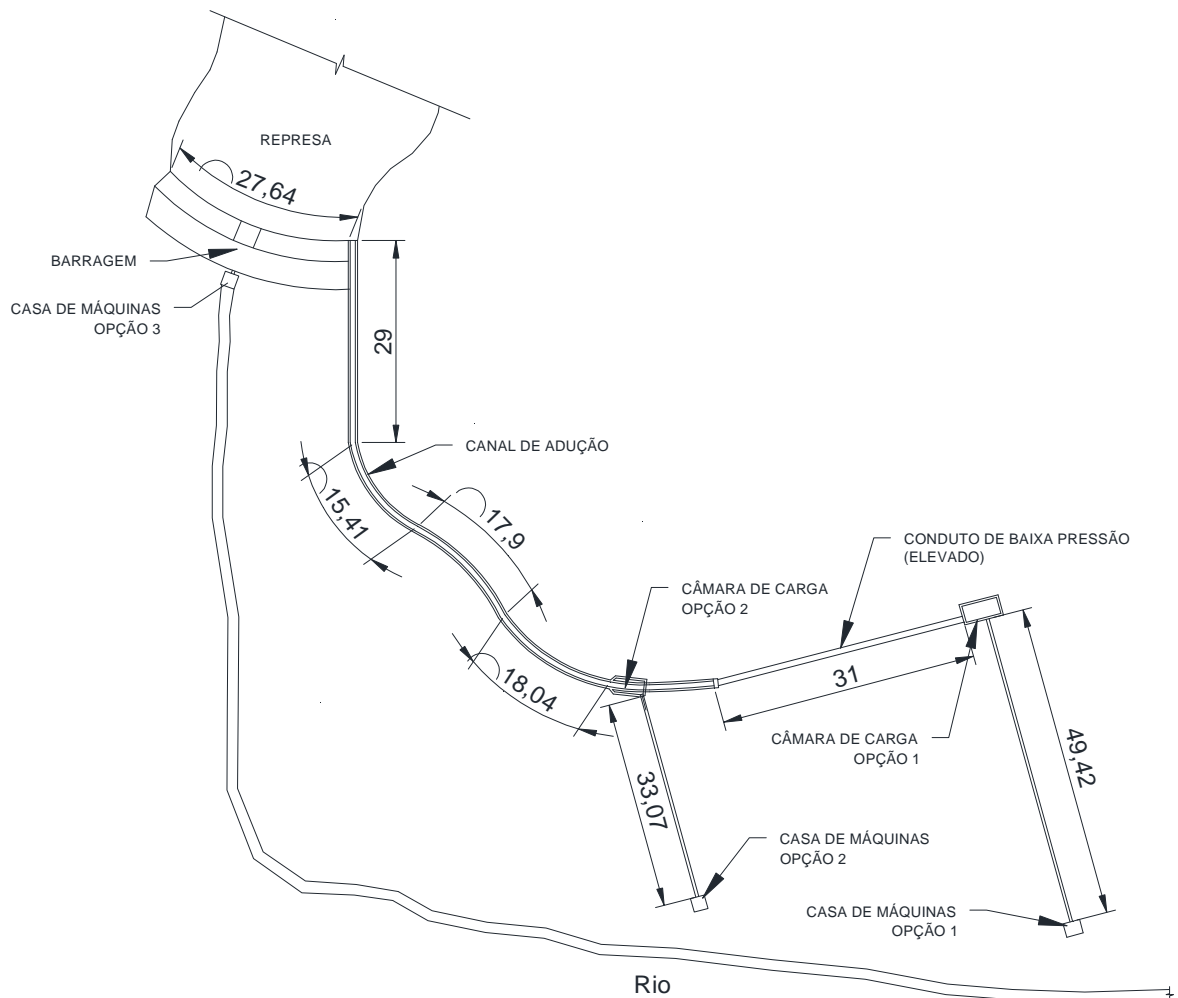


Figura 12 – Planta geral da MCH de Rio Branco do Sul/PR (cotas em metros).

Fonte: Autoria própria (2014).

Paralelamente a este estudo estão sendo feitas medições através de vários métodos para estimar as vazões. De acordo com medições feitas anteriormente e fornecidas pelo proprietário, temos os seguintes valores de vazão: 0,191 m³/s para vazão máxima, 0,140 m³/s para vazão média, e 0,017 m³/s para vazão mínima.

Para realização das medidas dos componentes da MCH em estudo, bem como os desníveis e demais distâncias foram utilizadas a estação total da marca Leica de modelo TS 02 (as especificações estão no anexo A) com prisma da marca Leica (modelo gpr111), e trena de 30 m da marca Western. Com os dados de cada opção foi feito a seguinte tabela comparativa para início do dimensionamento:

Tabela 4 – Comparação entre as opções de locação do conduto forçado

OPÇÃO	VAZÃO (m ³ /s)	COMPRIMENTO DA TUBULAÇÃO DE ALTA PRESSÃO (m)	COMPRIMENTO DO SISTEMA DE BAIXA PRESSÃO (m)	QUEDA BRUTA (m)
1	0,191	51	123	21,37
2	0,191	38,67	80	20,96
3	0,191	5	0	10

Fonte: Autoria Própria (2014)

A partir destes dados, podemos ter uma estimativa da potência instalada do aproveitamento hidrelétrico da MCH em estudo para cada um dos três arranjos, usando a equação 1:

$$P = 9,81 \times \eta_t \times \eta_g \times Q \times H_L \quad (1)$$

Onde:

P (kW) = Potência instalada;

η_t = Rendimento da turbina;

η_g = Rendimento do gerador;

Q (m³/s) = Vazão de projeto;

H_L (m) = Queda líquida;

9,81 = aceleração da gravidade (m/s²);

$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ (massa específica da água, já incluída na equação para que o resultado saia em kW).

Segundo o Manual de Minicentraís Hidrelétricas, os valores dos rendimentos η_t e η_g são fornecidos pelos fabricantes. Na falta de informações, pode-se empregar um valor conservativo para o rendimento global turbina/gerador igual a:

$$\eta_t \cdot \eta_g = 0,73, \text{ onde: } \eta_t = 0,77 \text{ e } \eta_g = 0,95.$$

Sendo assim, a equação 1 ficará da seguinte forma:

$$P(\text{kW}) = 7,16 \times Q \times H_L \quad (2)$$

Considerando que a potência instalada é diretamente proporcional à queda líquida, conforme descrito na equação 2, mesmo a perda de carga da opção três sendo muito pequena devido ao conduto curto, pode-se concluir que a opção três – posicionar a casa de máquinas logo abaixo da barragem – não é viável, devido à sua queda bruta (tabela 4) ser muito menor do que nas outras duas opções. Existe a possibilidade de utilização desta opção por aproveitar todo o volume do reservatório de forma a se conseguir uma média anual de vazão bem maior do que as demais opções que serão a fio d'água. Esta opção exige um estudo pluviométrico mais detalhado que não é o foco no momento. Portanto, foi descartado o estudo desta opção neste trabalho. Na opção dois, a queda bruta é próxima da queda bruta da configuração atual, tornando viável o estudo desta opção. Depois de calculada a perda de carga total no sistema, utilizamos a equação 2 já com a queda líquida calculada para termos uma melhor estimativa da potência instalada na MCH de Rio Branco do Sul.

3.3 CONDUTO FORÇADO

O conduto forçado da MCH de Rio Branco do Sul foi inteiro destruído devido ao tempo em que esta ficou desativada, e necessita ser refeito. Para dimensionamento do conduto, foi utilizado o Manual de Minicentraís Hidrelétricas (ELETROBRAS & DNAEE, 1985), e as “Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas” da Eletrobras.

3.3.1 Dimensionamento do conduto forçado

A Eletrobras (2014), para PCH indica a equação de Bondschu (3) abaixo para início do dimensionamento:

$$D_e = 1,27 \times \sqrt[7]{\frac{Q^3}{H_t}} \quad (3)$$

Onde:

$$H_t = H + h_s \quad (4)$$

Em que:

D_e (m) = Diâmetro econômico da tubulação; Q (m³/s) = Descarga máxima na tubulação; H_t (m) = Carga hidráulica total sobre a tubulação; H (m) = Queda bruta – carga estática sobre a tubulação; h_s (m) = Sobrepressão hidráulica devido ao golpe de aríete.

Admitindo-se, em minicentrals hidrelétricas, que:

$$h_s = 0,2 H \quad (5)$$

Ou seja:

$$H_t = H + 0,2 H = 1,2 H. \quad (6)$$

Simplificadamente, a equação de Bondschu (3) pode, então, ser escrita da seguinte forma (7):

$$D_e = 1,237 \sqrt[7]{\frac{Q^3}{H}} \quad (7)$$

A seguir, é feita a verificação da velocidade (v) na tubulação com a equação 8:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{3,1416 D_g^2} \quad (8)$$

Onde:

A (m²) = Área interna da seção transversal da tubulação; v (m/s) = velocidade de escoamento; Q (m³/s) = Vazão de projeto.

3.3.2 Perdas de carga no conduto forçado

Conhecidos os diâmetros da tubulação e a velocidade da água, calcula-se a perda de carga (J) devido ao atrito, através da equação de Scobey (9):

$$J_a = 410 k_a \times \frac{v^{1,9}}{D^{1,1}} \times L_{cf} \quad (9)$$

Onde:

J_a (m) = Perda de carga por atrito; k_a = coeficiente que varia com o tipo da tubulação; v (m/s) = velocidade da água; D (cm) = diâmetro interno da tubulação; L_{cf} (km) = Comprimento do conduto.

A Eletrobras (2014) estipulou os seguintes valores para k_a:

Tabela 5 - Valores para k_a

CONDUTO	k _a
Aço novo, com juntas soldadas ou sem costura	0,32
Cimento-amianto	0,34
Concreto armado	0,38

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2014)

Embora a perda de carga por atrito seja a principal no conduto, há também outras perdas a serem consideradas. Uma delas é a perda na entrada do conduto (h_e), calculada através da equação 10 abaixo:

$$h_e = k_e \times \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

Onde:

h_e (m) = Perda de carga na entrada do conduto; v (m/s) = Velocidade da água; g (m/s²) = Aceleração da gravidade;

k_e = Coeficiente variável de perda de carga em função da forma da boca do conduto, como ilustrado na figura 13:

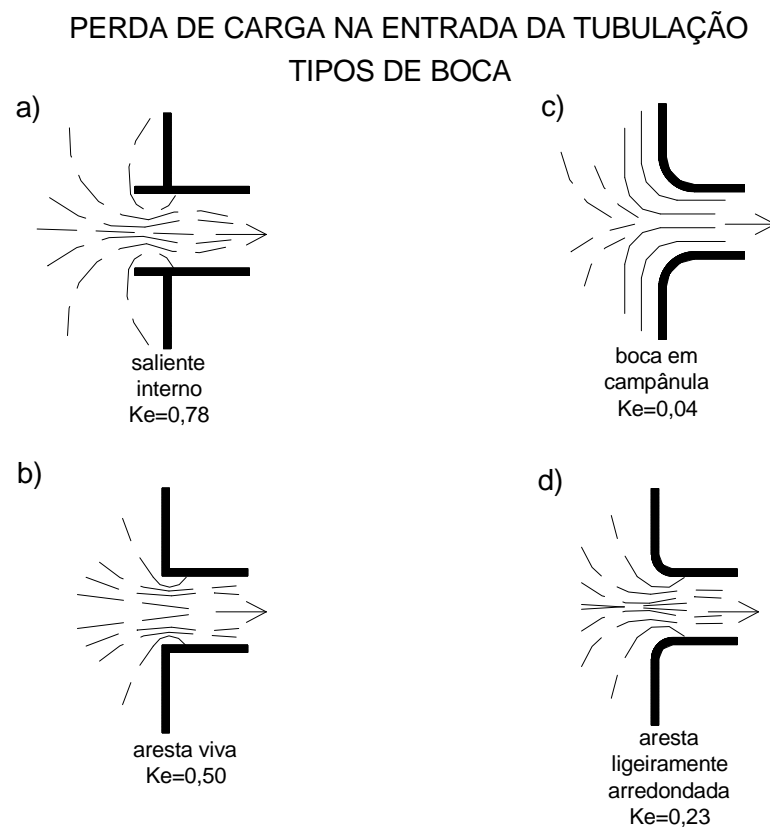


Figura 13 – Perda de carga na entrada da tubulação

Fonte: Eletrobras (2014)

Foi calculada, ainda, a perda de carga nas curvas do conduto usando a equação 11:

$$h_c = k_c \times \frac{v^2}{2g} \quad (11)$$

Onde:

h_c (m) = Perda de carga nas curvas do conduto;

v (m/s) = Velocidade da água;

g (m/s²) = Aceleração da gravidade;

k_c = Coeficiente que varia de acordo com o ângulo de deflexão da curva, conforme está apresentado na tabela 5 abaixo. Para os valores da tabela 4 serem válidos, a seguinte relação deve ser atendida:

$$\frac{R}{D} \geq 2,$$

Onde:

R = Raio da curva.

Como $R = 1,27$ m, e $D = 0,4$ m, então podemos usar a tabela 6:

Tabela 6 - Valores para k_c

ÂNGULO DE DEFLEXÃO	k_c
< 10°	0,0
10° a 15°	0,03
15° a 30°	0,06
30° a 45°	0,09
> 45°	0,13

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2014)

3.3.3 Variação de pressão no conduto forçado

A pressão normal estática ao longo do conduto forçado sofre variações quando há mudanças súbitas de vazão, resultantes de fechamentos ou aberturas rápidas, parciais ou totais, do dispositivo de fechamento da turbina. Essas variações, positivas (sobrepessões) ou negativas (depressões), conforme o engolimento da turbina diminua ou aumente repentinamente, condicionam a espessura da chapa do

conduto (ELETROBRAS, 2014). Para estimar estas variações, utilizamos o Método de Allievi, descrito abaixo:

$$h_s = (Z^2 - 1) \times H \quad (12)$$

Onde:

h_s (m) = Sobrepressão ou depressão, cujo limite máximo é igual a $0,2H$;

H (m) = Queda bruta (m);

Z^2 = parâmetro adimensional obtido dos gráficos de Allievi, para sobrepressão e depressão, em função dos parâmetros ρ e θ , os quais são calculados utilizando-se as seguintes fórmulas:

$$\rho = \frac{v_p \times v}{2 \times g \times H} \quad (13)$$

e

$$\theta = \frac{v_p \times t}{2 \times L_{cf}} \quad (14)$$

Onde:

ρ = Constante da linha;

θ = nº de intervalos $2L/v_p$ contidos em t ;

v_p (m/s) = Celeridade da onda de pressão;

v (m/s) = Velocidade do escoamento;

g = Aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);

H (m) = Queda bruta;

t (s) = Tempo de fechamento do dispositivo de fechamento da turbina;

L_{cf} (m) = Comprimento do conduto.

Na falta de informações do fabricante da turbina, pode-se adotar:

$t = 6,0 \text{ s}$, para condutos curtos ($L \leq 3H$);

$t = 10,0 \text{ s}$, para condutos longos ($L > 3H$).

Dividindo a equação 13 pela equação 14 e simplificando, obtemos a equação 15, que será usada para encontrar o parâmetro Z^2 nos gráficos de Allievi (figuras 14 e 15).

$$\frac{\rho}{\theta} = \frac{v \times L_{cf}}{g \times H \times t} \quad (15)$$

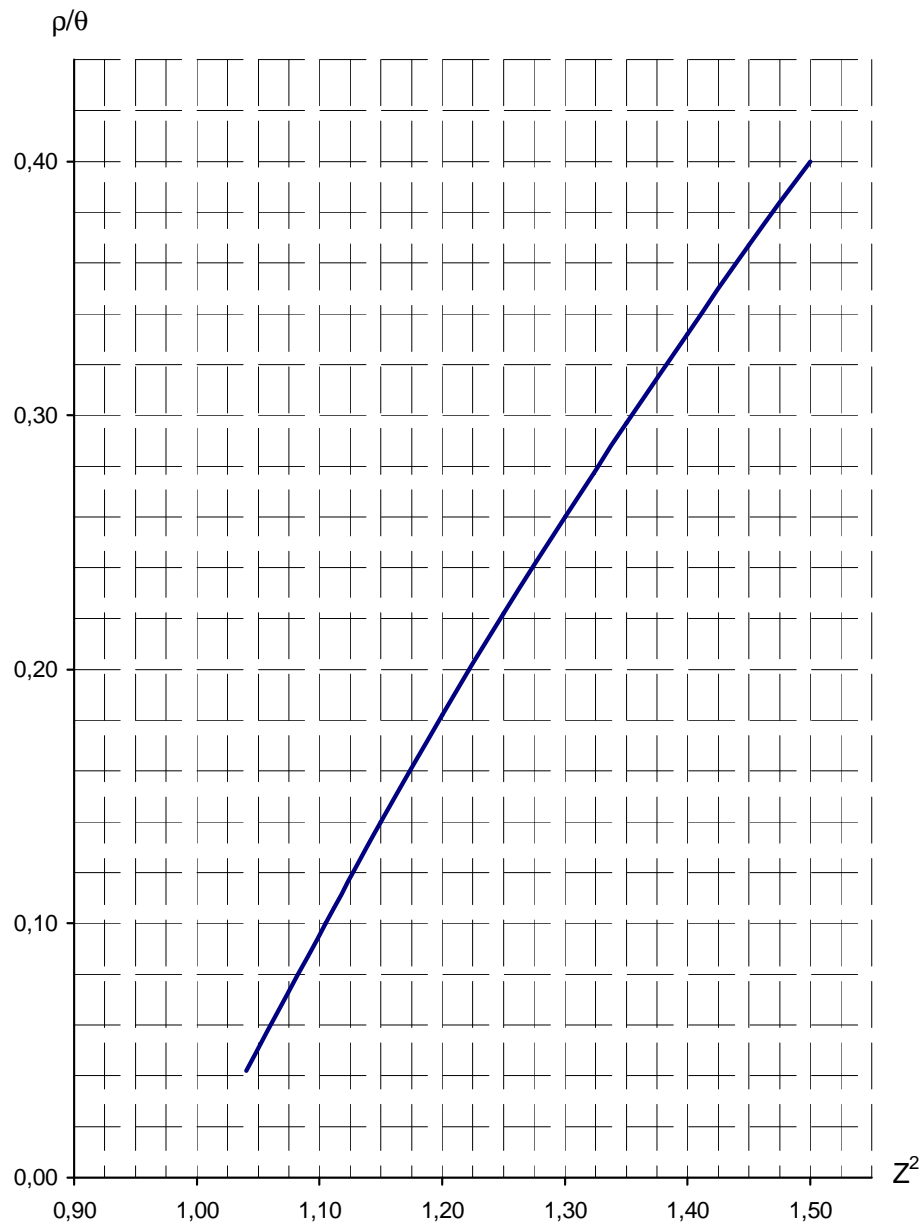


Figura 14 – Curva Z^2 x ρ/θ para sobrepressão

Fonte: Eletrobras (2014)

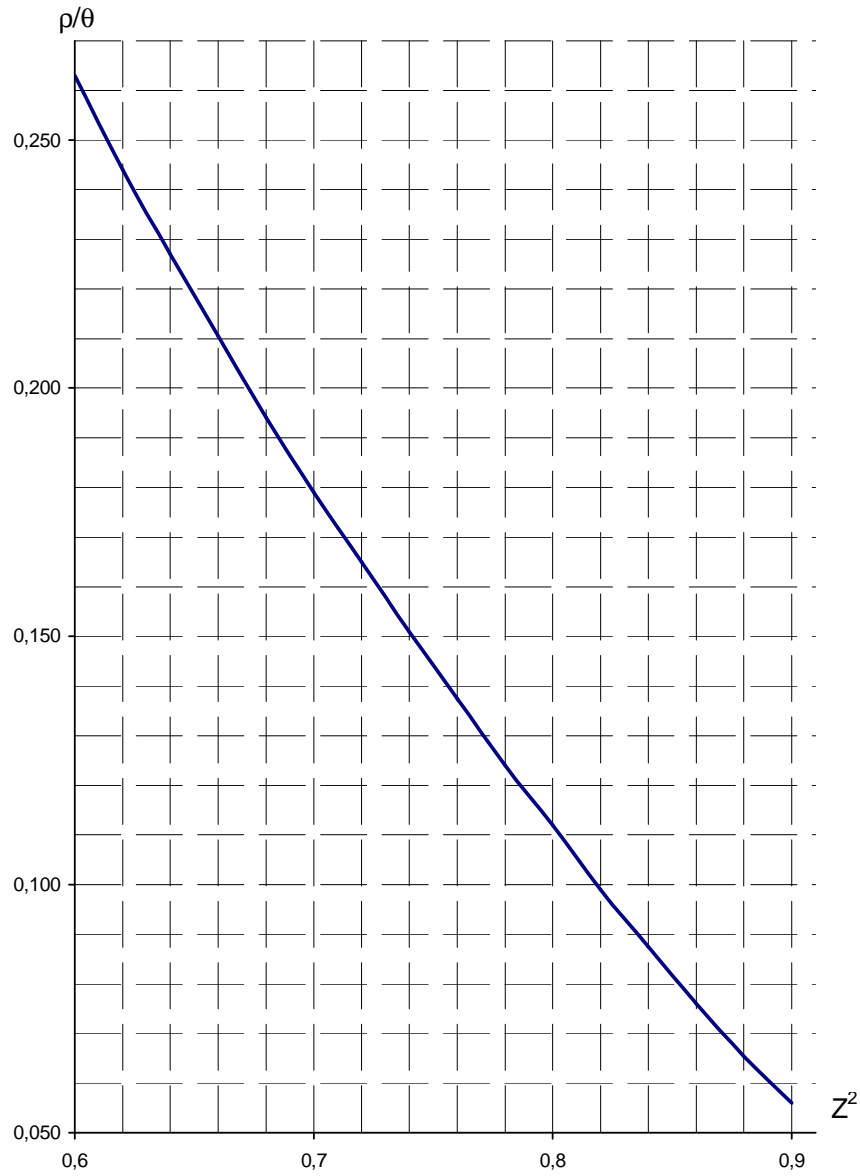


Figura 15 – Curva $Z^2 \times \rho/\theta$ para depressão

Fonte: Eletrobras (2014)

3.3.4 Espessura da parede do conduto forçado

A espessura da tubulação de aço pode ser calculada pela equação 16:

$$e = \frac{P_i \times D}{2 \times \sigma_f \times k_f} + e_s \quad (16)$$

Onde:

e (mm) = espessura da parede;

P_i (kgf/cm²) = pressão hidrostática máxima interna;

D (mm) = diâmetro interno;

σ_f (kgf/cm²) = tensão admissível de resistência à tração do material;

e_s = sobre espessura para corrosão (1,0 mm);

k_f = eficiência das soldas, cujos valores são apresentados na tabela 7:

Tabela 7 - Valores para k_f

TUBULAÇÃO	k_f
Sem costura	1,0
Com costura	
- sem radiografia e alívio de tensões	0,8
- com radiografia ou com alívio de tensões	0,9
- com radiografia e alívio de tensões	1,0
Padronizada de fabricação normal	
- Costura com solda por fusão elétrica	0,8
- Costura com solda por resist. Elétrica (*)	1,0

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2014)

(*) Relativa ao aço ABNT EB 255 CG 30 (ASTM-A283, Grau C), com as seguintes características:

σ_e = tensão de escoamento (2.110 kgf/cm²);

σ_r = tensão de ruptura (3.870 a 4.570 kgf/cm²).

A tensão admissível de resistência à tração para essa classe de aço será:

$$\sigma_f = 0,33 \sigma_{r,méd.} = 0,33 \times 4.220 \approx 1.400 \text{ kgf/cm}^2$$

Recomenda-se, por segurança, adotar (...) a espessura mínima de parede dos condutos forçados, tendo em vista que qualquer defeito de laminação ou efeitos de corrosão afetam o valor da espessura percentualmente. Esse reflexo é maior nas chapas mais finas e é mais difícil a elaboração de uma boa solda nestas chapas.

Além disso, a adoção da espessura mínima é recomendada por motivos construtivos, de montagem e de transporte (ELETROBRAS, 2014).

A espessura mínima, segundo o Bureau of Reclamation, citado nas Diretrizes Para Projetos de PCH, é determinada pela equação 17:

$$e_{mín} = \frac{D+500}{400} \geq 6,35 \text{ mm (1/4")} \quad (17)$$

3.3.5 Blocos de apoio (selas)

A Eletrobras (2014) estipula, para as tubulações de aço, as seguintes dimensões de blocos de apoio de concreto:

A = 1,2D m (altura normal do bloco);

B = 1,6D m (largura normal do bloco);

C = 1,7D m (comprimento normal do bloco).

Abaixo, estão representadas estas dimensões (figura 16):

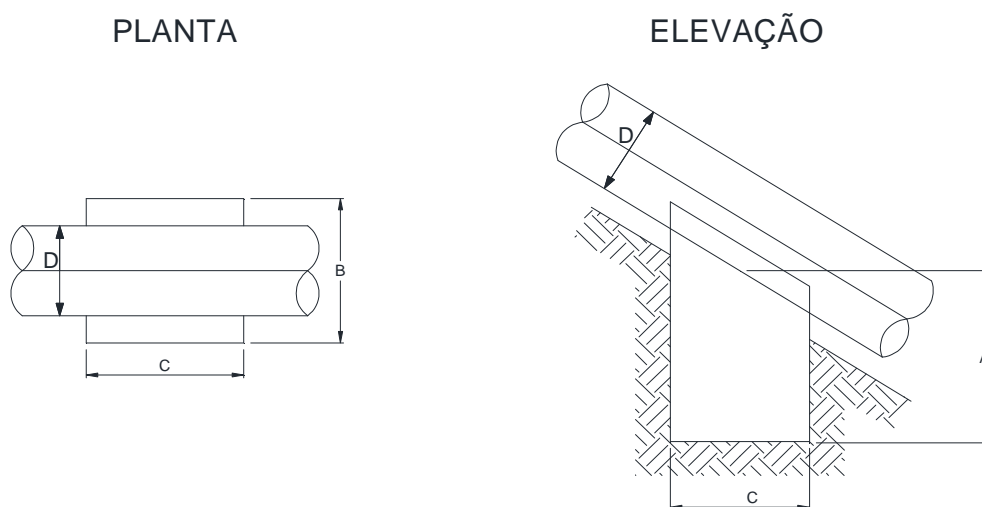


Figura 16 – Planta e elevação dos blocos de apoio

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2014)

Para cálculo do espaçamento entre blocos, foram utilizadas as equações sugeridas por Souza, Santos e Bortoni (2009), em que considera a tubulação como uma viga bi-engastada, descritas abaixo:

$$L_s = 182,61 \times \sqrt[3]{\frac{(D+2 \times e)^4 - D}{p}} \quad (18)$$

Onde:

L_s (m) = Distância entre os eixos dos blocos;

e (m) = Espessura da parede da tubulação;

D (m) = Diâmetro da tubulação;

p (kgf/m) = Carga distribuída ao longo da tubulação;

Em que:

$$p = \gamma_a \times \frac{\pi}{4} \times D^2 + \gamma_t \times \pi \times e \times (D + e) \quad (19)$$

Onde:

γ_a (kgf/m³) = Peso específico da água;

γ_t (kgf/m³) = Peso específico da tubulação.

3.3.6 Blocos de ancoragem

O Manual de Dimensionamento de Hidrelétricas da Eletrobras & DNAEE (1985) recomenda utilizar blocos de ancoragem em cada mudança de direção, e a uma distância máxima de 70 m.

Para o dimensionamento destes blocos, foram utilizadas as equações sugeridas por Souza, Santos e Bortoni (2009), descritas abaixo, com base na figura 17:

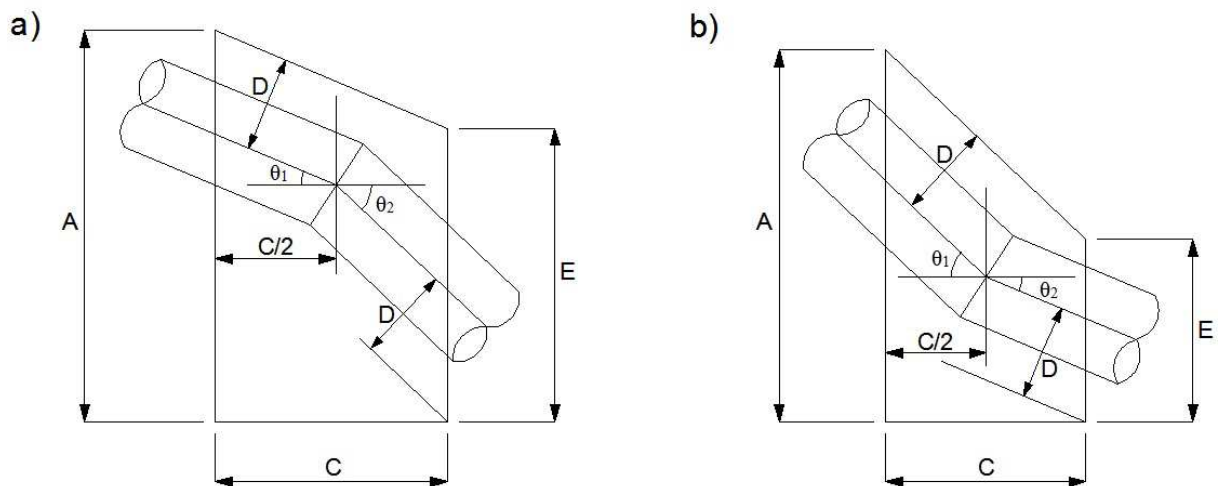


Figura 17 – Projeções dos blocos de ancoragem
Fonte: Adaptado de Souza, Santos e Bortoni (2009)

Para o dimensionamento do bloco da figura 17a foram utilizadas as equações 20 a 23 abaixo, e para a dimensão “E” do bloco da figura 17b foi substituída a equação 23 pela equação 24.

$$B = 2 \times D \quad (20)$$

$$C = 3 \times D \quad (21)$$

$$A = \left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{1}{\cos \theta_2} \right) \times D + (tg \theta_1 + tg \theta_2) \times \frac{C}{2} \quad (22)$$

$$E = \left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{1}{\cos \theta_2} \right) \times D + (tg \theta_2 - tg \theta_1) \times \frac{C}{2} \quad (23)$$

$$E = \frac{2 \times D}{\cos \theta_2} \quad (24)$$

3.4 CÂMARA DE CARGA

Como a estrutura da tomada d'água já existe, e sem desarenador, este foi colocado junto à câmara de carga. O desarenador tem como função criar uma zona de escoamento de baixa velocidade, fazendo com que os sedimentos trazidos pela água ali se depositem. Para dimensionamento do desarenador, de acordo com Eletrobras & DNAEE (1985), foi obedecida a seguinte relação:

$$L_d = \frac{K_d \times Q}{B_d} \quad (25)$$

Onde:

L_d (m) = Comprimento do desarenador;

K_d = coeficiente de deposição que toma valores entre 5 e 10;

Q (m³/s) = Vazão de adução;

B_d = Largura do desarenador.

O valor mínimo recomendável para L_d é de 2,0 m.

As paredes laterais, em planta, devem abrir-se em ângulo de 45°, e a transição entre o fundo do canal e o fundo da câmara de carga deve ser efetuada em rampa com inclinação não superior a 50%. Na figura 18, abaixo, pode ser observada a planta e o corte longitudinal da antiga câmara de carga com suas medidas (em cm):

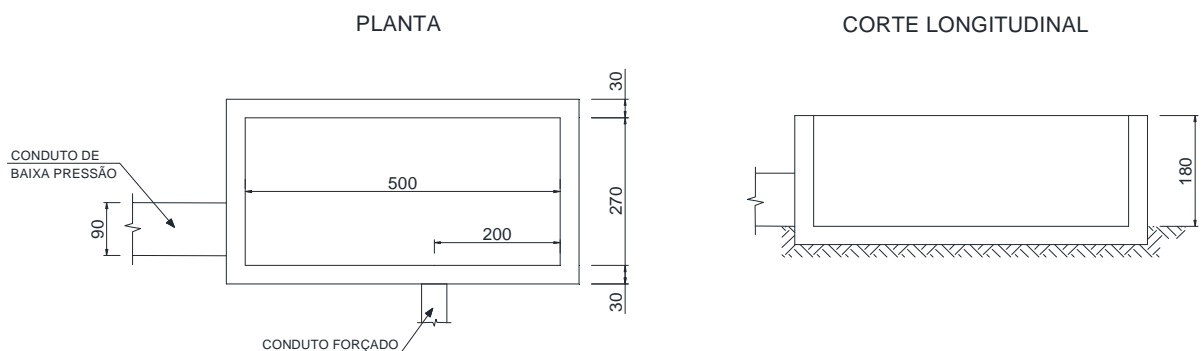


Figura 18 – Planta e corte da antiga câmara de carga – MCH de Rio Branco do Sul/PR (cotas em centímetros).

Fonte: Autoria própria (2014)

3.5 CANAL DE ADUÇÃO

O canal de adução da MCH de Rio Branco do Sul/PR será mantido, necessitando de uma limpeza, pequenos reparos, e acabamento junto à câmara de carga da opção 2 (como pode ser observado na figura 20). Na figura 19, logo abaixo, pode ser observado o canal como se encontra atualmente:



Figura 19 – Canal de adução da MCH de Rio Branco do Sul/PR

Fonte: Autoria própria (2014)



Figura 20 – Local da câmara de carga da opção 2 da MCH de Rio Branco do Sul/PR
Fonte: Autoria própria (2014)

A velocidade máxima da água no canal é de 1 m/s. Com esse dado, calcula-se a área da seção molhada do canal através da equação 26:

$$A_m = \frac{Q}{v} \quad (26)$$

Onde:

A_m (m) = Área da seção molhada do canal;

Q (m³/s) = Vazão no canal;

V (m/s) = Velocidade de escoamento.

Com a razão área molhada/largura do canal, calcula-se a altura da lâmina de água. Em seguida, calcula-se o raio hidráulico pela equação 27:

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} \quad (27)$$

Onde:

R_h = Raio hidráulico;

A_m = Área da seção molhada;

P_m = Perímetro molhado.

Com o valor do raio hidráulico (R_h) e da velocidade da água, foi utilizado o ábaco da figura 21 para cálculo da perda de carga no canal (J).

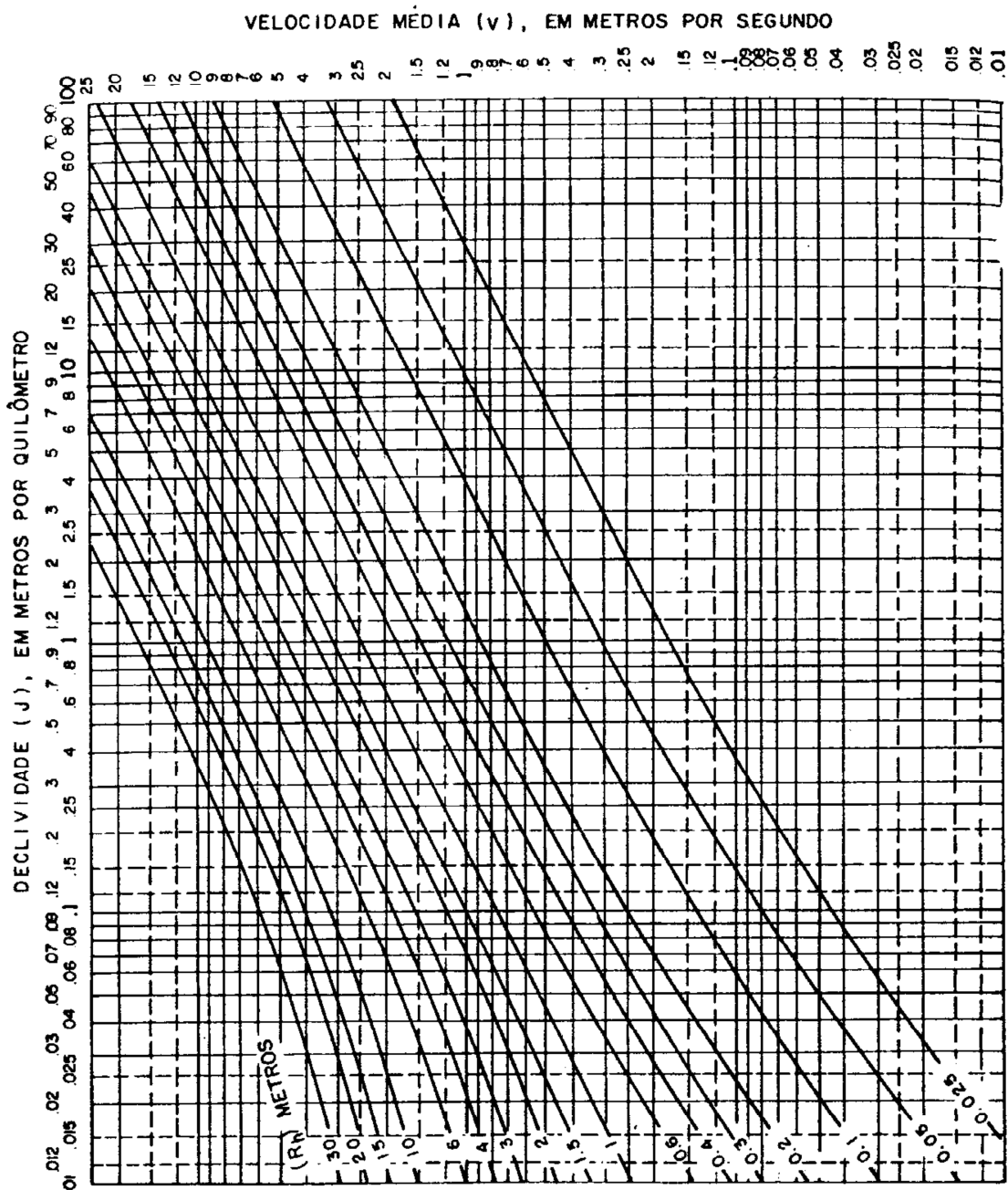


Figura 21 – Ábaco para cálculo de perda de carga no canal

Fonte: Eletrobras & DNAEE (1985)

3.6 TOMADA D'ÁGUA

Segundo o Manual de Minicentrals Hidrelétricas (ELETROBRAS & DNAEE, 1985), a tomada d'água tem as duas seguintes funções:

- Permitir o ensecamento da tubulação forçada ou canal de adução para a realização de obras de manutenção;
- Prover a retenção de corpos flutuantes e de materiais sólidos transportados pela água.

A tomada d'água, bem como o canal aberto de adução da MCH de Rio Branco do Sul serão mantidos, mas há a necessidade de instalação de uma nova comporta e uma grade de proteção que não existem mais. Na figura 22 pode ser observada a tomada d'água e o que sobrou da antiga comporta.



Figura 22 – Tomada d'água da MCH de Rio Branco do Sul/PR
Fonte: Aatoria própria (2014)

3.6.1 Comporta

A tomada d'água deve ser equipada com uma comporta de manutenção com a finalidade de permitir eventuais reparos e inspeções das estruturas civis e dos equipamentos da central. As comportas são do tipo gaveta, capazes de serem operadas sob fluxo hidráulico. Normalmente são operadas manualmente através de um volante ou manivela pertencente a um mecanismo simples, composto de uma haste de aço rosqueada fixa na comporta e um sistema de porca ou sem fim, aparafusadas na travessa superior da estrutura de armação das guias laterais da comporta. As comportas podem ser construídas em aço ou em madeira, sendo a de madeira a mais empregada em minicentraís. As guias laterais das comportas são fabricadas de chapas e perfis estruturais de aço. A figura 23 mostra um esquema de uma comporta de madeira recomendada pelo Manual de Minicentraís Hidrelétricas (ELETROBRAS & DNAEE, 1985) a ser utilizada na MCH de Rio Branco do Sul:

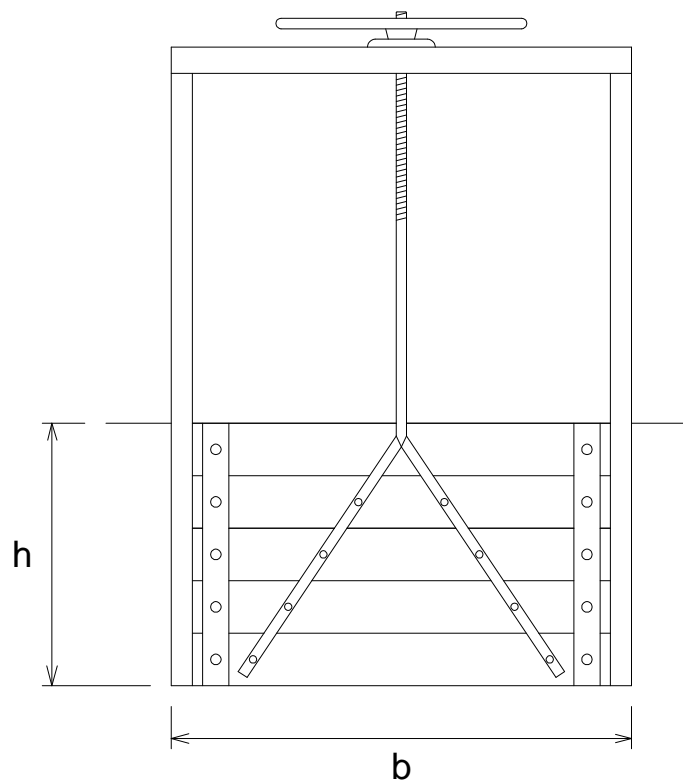


Figura 23 – Esquema da comporta de madeira da tomada d'água
Fonte: Adaptado de Eletrobras & DNAEE (1985)

Na tabela 8, abaixo, estão algumas dimensões de comportas recomendadas por Eletrobras & DNAEE (1985):

Tabela 8 – Dimensões de comportas de madeira:

COMPORTA DE MADEIRA		
ALTURA	LARGURA	ESPESSURA
h (m)	b (m)	l (cm)
0,60	0,40	4
0,60	0,70	4
0,75	0,85	4
0,75	1,00	4
0,90	1,00	4
1,05	1,00	5
1,05	1,20	5
1,05	1,35	5
1,20	1,35	5
1,20	1,50	5
1,40	1,50	5
1,40	1,80	5
1,40	1,95	5
1,55	2,00	6
1,55	2,05	6
1,70	2,05	6
1,75	2,35	6
1,90	2,35	6
2,05	2,35	6
2,20	2,35	6

Fonte: Adaptado de Eletrobras & DNAEE, 1985.

3.6.2 Grade de Proteção

Segundo a Eletrobras (2014), a grade, no paramento de montante da tomada d'água, visa impedir a entrada de corpos flutuantes que possam danificar os equipamentos.

Quando o paramento de montante é inclinado, a grade obedece à mesma inclinação, normalmente, de 75° a 80°. Para as PCHs, podem-se adotar, como padrão, grades com barras chatas ou redondas, espaçadas de 8 a 12 cm.

Segundo Eletrobras (2014), a perda de carga na grade da tomada d'água pode ser estimada utilizando-se a fórmula de Kirschmer (28):

$$h_g = k_g \left(\frac{e_1}{e_2} \right)^{\frac{4}{3}} \times \text{sen}\theta_g \times \frac{v_g^2}{2g} \quad (28)$$

Onde:

h_g (m) = perda na grade;

e_1 (mm) = espessura ou diâmetro das barras;

e_2 (mm) = espaçamento entre as barras;

θ_g = inclinação da grade;

v_g (m/s) = velocidade junto à grade (aprox. 1 m/s);

k_g = coeficiente de perda de carga cujo valor depende das dimensões da grade. Na tabela 9, a seguir, apresentam-se os valores mais comuns:

Tabela 9 - Valores para k_g

TIPO DAS BARRAS	$e_1 / b^{(*)}$	k_g
Retangulares	≥ 5	2,4
Circulares	≥ 5	1,79

(*) b = largura das barras

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2014)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DIMENSIONAMENTO DO CONDUTO FORÇADO

Para o conduto forçado da MCH de Rio Branco do Sul foi adotado como material o aço, e comparadas as duas opções de locação – a original (opção 1), e a alternativa (opção 2).

Utilizando a equação 7, obtemos o diâmetro econômico (D_e) do conduto da MCH de Rio Branco do Sul:

$$D_e = 1,237 \sqrt[7]{\frac{0,191^3}{20,96}} = 0,394 \text{ m} \approx 40 \text{ cm.}$$

Utilizando a eq. 8, verificamos a velocidade máxima dentro do conduto:

$$v = \frac{4 \times 0,191}{3,1416 \times 0,40^2} = 1,52 \text{ m/s} < 5 \text{ m/s} \rightarrow OK!$$

Conhecidos os diâmetros da tubulação e a velocidade da água, calcula-se a perda de carga (J_a) devido ao atrito, através da equação de Scobey (9), para os dois comprimentos das opções estudadas de locação do conduto (opções 1 e 2), conforme estão descritas abaixo:

Opção 1 ($L_{cf} = 0,051 \text{ km}$):

$$J_a = 410 \times 0,32 \times \frac{1,52^{1,9}}{40^{1,1}} \times 0,051 = 0,256 \text{ m}$$

Opção 2 ($L_{cf} = 0,03867 \text{ km}$):

$$J_a = 410 \times 0,32 \times \frac{1,52^{1,9}}{40^{1,1}} \times 0,03867 = 0,194 \text{ m}$$

Onde:

L_{cf} (m) = Comprimento do conduto forçado

$k_a = 0,32$ para o aço (tabela 5).

A perda na entrada do conduto (h_e), foi calculada considerando a entrada com uma aresta ligeiramente arredondada (alternativa “d” da figura 13), onde o coeficiente k_e é igual a 0,23. Para este cálculo, utilizando a equação 10, obtém-se:

$$h_e = 0,23 \times \frac{1,52^2}{2g} = 0,027 \text{ m}$$

Foi calculada, ainda, a perda de carga nas curvas do conduto usando a equação 11. Como o ângulo de deflexão do conduto é de aproximadamente 32° , adotaremos $k_c = 0,09$ (tabela 5). Usando a equação 11 dobrada, já que temos 2 curvas com o mesmo ângulo de deflexão, obtemos a perda de carga nas curvas:

$$h_c = 2 \times 0,09 \frac{1,52^2}{2 \cdot 9,81} = 0,021 \text{ m}$$

Os cálculos acima foram refeitos para as demais vazões, em ambas as opções, e construídas as seguintes tabelas:

Tabela 10 – Perdas de carga para diferentes vazões na opção 1

Vazão (m ³ /s)	v (m/s)	Perda distribuída	Perdas localizadas		Perda Total (m)	%H _b (*)	
		J _a (m)	h _e (m)	h _c (m)			
Máx.	0,191	1,52	0,256	0,027	0,021	0,304	1,423
Média	0,140	1,11	0,142	0,015	0,011	0,168	0,786
Mín.	0,017	0,14	0,003	0,000	0,000	0,003	0,014

(*) Porcentagem da perda em relação à queda bruta

Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 11 – Perdas de carga para diferentes vazões na opção 2

Vazão (m ³ /s)	v (m/s)	Perda distribuída	Perdas localizadas		Perda Total (m)	%H _b (*)	
		J _a (m)	h _e (m)	h _c (m)			
Máx.	0,191	1,52	0,194	0,027	0,021	0,242	1,155
Média	0,140	1,11	0,108	0,015	0,011	0,134	0,639
Mín.	0,017	0,14	0,002	0,000	0,000	0,002	0,011

(*) Porcentagem da perda em relação à queda bruta

Fonte: Autoria própria (2014)

4.1.1 Variação de pressão no conduto forçado

Para estimar as variações de pressão, foi utilizado o Método de Allievi (equações 12 e 15), descrito no item 3.3.3, para as duas opções em estudo. Utilizando primeiramente a equação 15, obtém-se:

Opção 1 (L_{cf} = 51,0 m):

$$\frac{\rho}{\theta} = \frac{1,52 \times 51,0}{9,81 \times 21 \times 6} \approx 0,06$$

Opção 2 (L_{cf} = 38,67 m):

$$\frac{\rho}{\theta} = \frac{1,52 \times 38,67}{9,81 \times 21 \times 6} \approx 0,05$$

Com os valores encontrados acima, foi obtido, através da curva de Allievi (figuras 14 e 15), os seguintes parâmetros Z²:

Para a opção 1, com $\rho/\theta = 0,06$, tem-se que:

Z² = 1,06 para sobrepressão;

Z² = 0,89 para depressão.

Para a opção 2, com $\rho/\theta = 0,05$, tem-se que:

Z² = 1,05 para sobrepressão;

$Z^2 = 0,92$ para depressão.

Substituindo na equação 12 os valores de Z^2 encontrados, foram calculadas as variações de pressão no conduto:

Opção 1:

$$h_s = (1,06 - 1) \cdot 20 = 1,2 \text{ m (sobrepessão);}$$

$$h_s = (0,89 - 1) \cdot 20 = -2,2 \text{ m (depressão).}$$

Opção 2:

$$h_s = (1,05 - 1) \cdot 20 = 1 \text{ m (sobrepessão);}$$

$$h_s = (0,92 - 1) \cdot 20 = -1,6 \text{ m (depressão).}$$

4.1.2 Espessura da parede do conduto forçado

A espessura da tubulação de aço foi calculada pela equação 16, descrito no item 3.3.4:

$$e = \frac{2,1 \cdot 400}{2 \cdot 1400 \cdot 0,8} + 1,0 = 1,36 \text{ mm}$$

Para o cálculo da espessura mínima, foi utilizando a equação 17, descrita no item 3.3.4, obtemos:

$$e_{\min} = \frac{400 + 500}{400} = 2,25 < 6,35 \text{ mm}$$

Portanto, a espessura mínima a ser adotada é de 6,35 mm (1/4").

4.1.3 Dimensões dos blocos de apoio

De acordo com o item 3.3.5, os blocos de apoio têm as seguintes dimensões:

- Altura normal da sela: $A = 1,2 \times 0,4 = 0,48 \text{ m} = 48 \text{ cm}$;
- Largura normal da sela: $B = 1,6 \times 0,4 = 0,64 \text{ m} = 64 \text{ cm}$;
- Comprimento normal da sela: $C = 1,7 \times 0,4 = 0,68 \text{ m} = 68 \text{ cm}$;

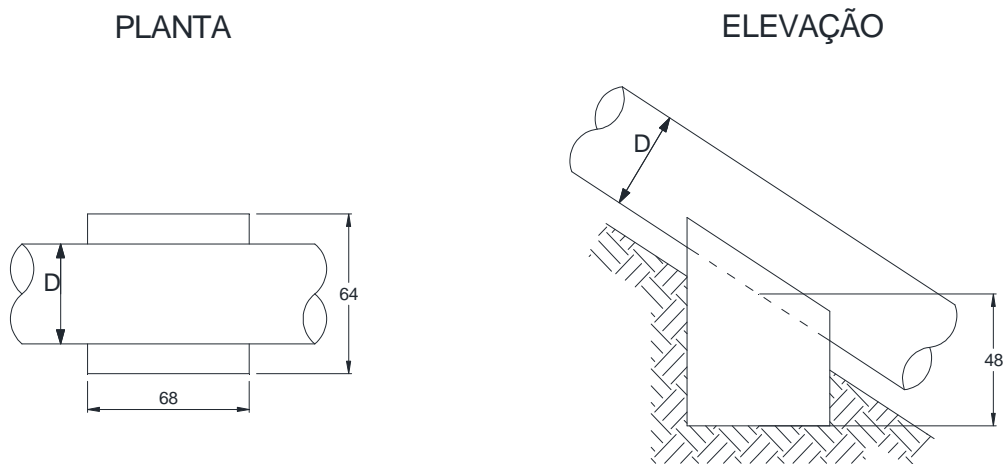


Figura 24 – Planta e elevação dos blocos de apoio dimensionados (cotas em centímetros).

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2014)

Utilizando a equação 19 para calcular a carga atuando na tubulação (p), e utilizando a equação 18 para o cálculo do espaçamento entre blocos (L_s), tem-se que:

$$p = 785,4 \times \frac{\pi}{4} \times 0,4^2 + 63,636 \times \pi \times 0,00635 \times (0,4 + 0,00635) = 189,3 \text{ kgf/m}$$

$$L_s = 182,61 \times \sqrt[3]{\frac{(0,4 + 2 \times 0,00635)^4 - 0,4}{189,3}} = 4,78 \text{ m}$$

4.1.4 Dimensões dos blocos de ancoragem

Para o dimensionamento dos blocos de ancoragem foram utilizadas as equações 20 a 24, e obtidas as seguintes dimensões:

$$B = 2 \times 0,4 = 0,80 \text{ m} = 80 \text{ cm};$$

$$C = 3 \times 0,4 = 1,20 \text{ m} = 120 \text{ cm};$$

$$A = \left(\frac{1}{\cos 0} + \frac{1}{\cos 32} \right) \times 0,4 + (\text{tg } 0 + \text{tg } 32) \times \frac{1,20}{2} = 1,25 \text{ m} = 125 \text{ cm};$$

$$E = \left(\frac{1}{\cos 0} + \frac{1}{\cos 32} \right) \times 0,4 + (\text{tg } 32 - \text{tg } 0) \times \frac{1,20}{2} = 1,25 \text{ m} = 125 \text{ cm};$$

$$E = \frac{2 \times 0,4}{\cos 0} = 0,80 \text{ m} = 80 \text{ cm}.$$

Com base nas dimensões obtidas acima, e na figura 17, foram feitas as plantas e as elevações dos blocos de ancoragem do conduto forçado (figuras 25 e 26, com medidas em cm):

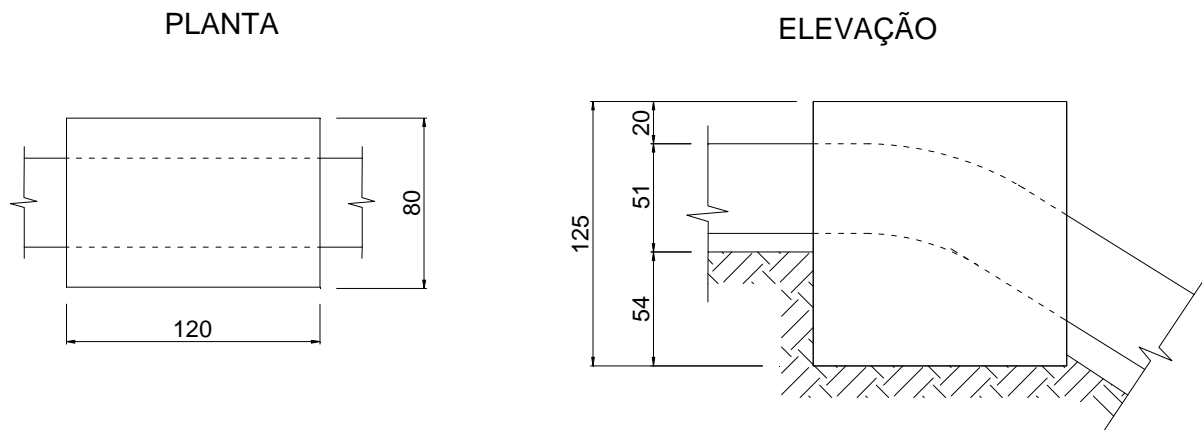


Figura 25 – Planta e elevação do bloco de ancoragem 1 (cotas em centímetros).

Fonte: Autoria própria (2014)

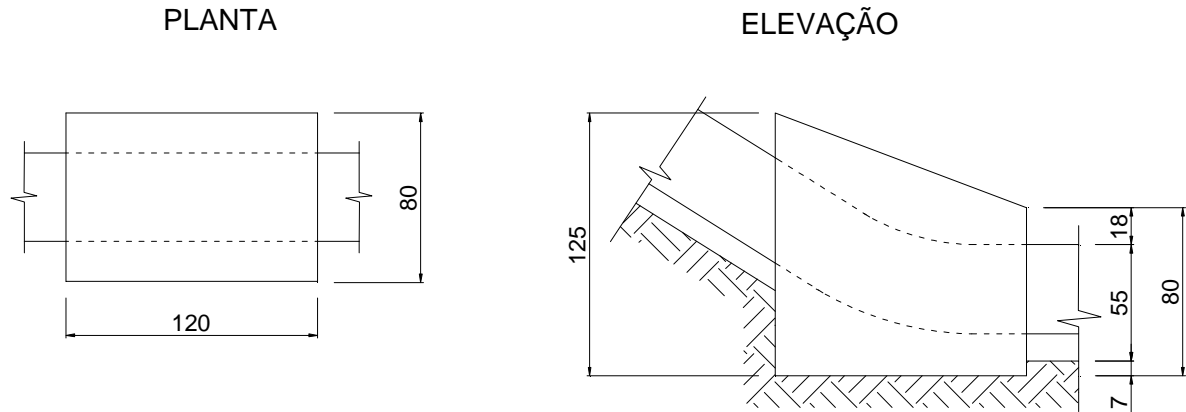


Figura 26 – Planta e elevação do bloco de ancoragem 2 (cotas em centímetros).

Fonte: Autoria própria (2014)

4.2 CÂMARA DE CARGA

Considerando o valor do comprimento do desarenador (L_d) 2,0 metros (mínimo recomendável), e o coeficiente de deposição (K_d) 10 para maior eficiência, inicia-se o dimensionamento utilizando a equação 25:

$$B_d = \frac{10 \times 0,191}{2} = 0,955 \text{ m}$$

Portanto, puderam ser adotadas as seguintes dimensões de cálculo para o desarenador:

Largura (B_d) = 0,955 m;

Comprimento (L_d) = 2,0 m.

Porém, a Eletrobras (2014) nas Diretrizes Para Projetos de PCHs utiliza a seguinte tabela para dimensionamento de desarenadores:

Tabela 12 – Dimensões do desarenador

VAZÃO (m ³ /s)	DIMENSÕES MÍNIMAS (m)		DIMENSÕES RECOM. (m)		H _d (m)
	B _d	L _d	B _d	L _d	
0,1<Q<0,7	2	4	2	4	0,5
0,8<Q<1,6	3	4,5	3	4,5	0,6
1,7<Q<3,0	3,5	5	3,5	5	0,7
3,1<Q<6,5	7	4	7	4	0,9
6,6<Q<10,0	8	5	8	5	1,1
10,1<Q<13,5	9,5	6	9,5	6	1,3
13,6<Q<17,0	11	7	11	7	1,5
17,1<Q<20,0	12	8	12	8	1,7

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2014)

Portanto, as dimensões a serem adotadas, utilizando a vazão de projeto (0,191 m³/s), são as seguintes:

- Largura = 2,0 m;
- Comprimento = 4,0 m;
- Profundidade = 0,5 m.

Somando a altura do desarenador (0,5 m), do diâmetro do conduto (0,4 m), a altura da lâmina de água na vazão máxima (0,3 m) e uma altura de segurança (0,5 m), conclui-se que a altura mínima da câmara de carga deve ser 1,70 m. Nas figuras 27 e 28 abaixo, estão representados a planta e o corte esquemático da câmara de carga com as dimensões calculadas (cotas em centímetros), já adaptada para a opção 2:

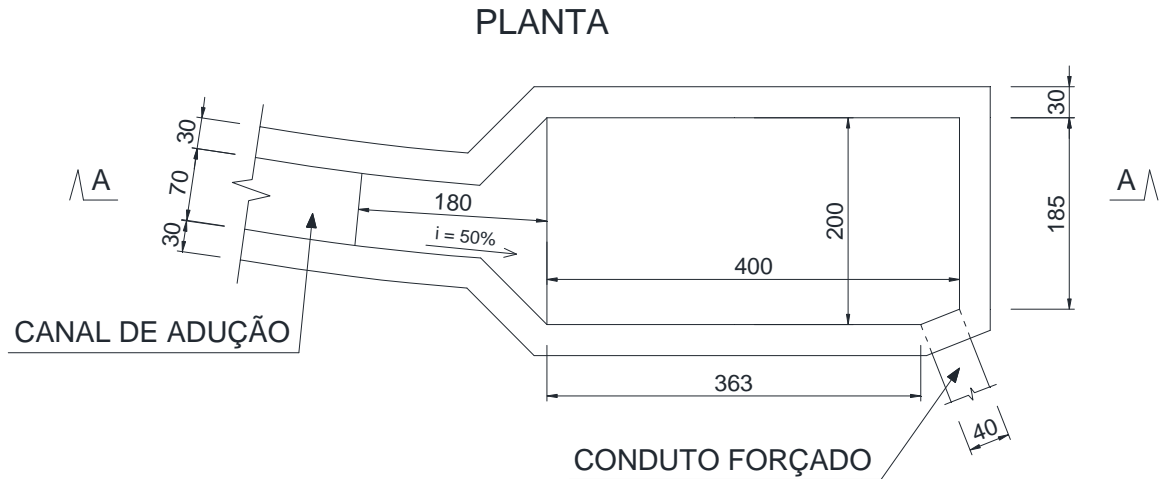


Figura 27 – Planta da câmara de carga da opção (cotas em centímetros).

Fonte: Autoria própria (2014)

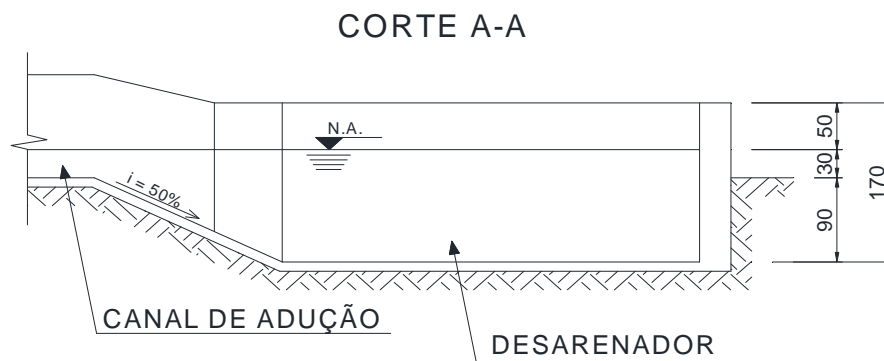


Figura 28 – Corte esquemático da câmara de carga da opção 2 (cotas em centímetros).

Fonte: Autoria própria (2014)

4.3 CANAL DE ADUÇÃO

Utilizando a equação 27 do item 3.5, tem-se o seguinte valor para o raio hidráulico:

$$R_h = \frac{0,7 \times 0,28}{0,7 + 2 \times 0,28} \approx 0,15$$

Com o valor do raio hidráulico, e a velocidade de escoamento no canal, através do ábaco para cálculo de perda em canais (figura 21), tem-se que a perda de carga unitária (J) é de 2,2 m/km.

A perda de carga, portanto, no canal em cada opção, é de:

$$\text{Opção 1:} \quad 0,123 \times 2,2 = 0,271 \text{ m}$$

$$\text{Opção 2:} \quad 0,080 \times 2,2 = 0,176 \text{ m}$$

4.4 TOMADA D'ÁGUA

4.4.1 Comporta

Pela tabela 8, pôde ser adotada a comporta de madeira com as seguintes dimensões:

$$\text{Altura (h)} = 0,75 \text{ m;}$$

$$\text{Largura (b)} = 0,85 \text{ m;}$$

$$\text{Espessura (l)} = 4 \text{ cm.}$$

4.4.2 Grade de Proteção

Para a MCH em estudo, foi adotada uma grade com barras de 3/8" (9,53 mm) e espaçamento de 8 cm. A inclinação da grade será de 90°, obedecendo a inclinação já existente da montante.

Para cálculo da perda de carga na grade da tomada d'água, foi utilizada a fórmula de Kirschmer (28) descrita no item 3.6.2:

$$h_g = 1,79 \cdot \left(\frac{9,53}{80}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \text{sen}90 \cdot \frac{1^2}{2 \cdot 9,81} = 5,35 \times 10^{-3} \text{ m}$$

4.5 POTÊNCIA INSTALADA

4.5.1 Queda Líquida

Para o cálculo da queda líquida somam-se as perdas de carga calculadas anteriormente, e o valor encontrado é descontado da queda bruta. Sendo assim, para as duas opções, foram encontrados os seguintes valores de queda líquida:

a) Opção 1:

$$H_L = 21,37 - (0,256 + 0,027 + 0,021 + 0,271 + 0,0054) = 20,789 \text{ m.}$$

b) Opção 2:

$$H_L = 20,96 - (0,194 + 0,027 + 0,021 + 0,176 + 0,0054) = 20,537 \text{ m.}$$

4.5.2 Determinação da potência instalada

Para determinação da potência instalada utilizamos a equação 2, descrita no item 3.2 para as duas opções:

c) Opção 1:

$$P = 7,16 \times 0,191 \times 20,789 = 28,43 \text{ kW}$$

d) Opção 2:

$$P = 7,16 \times 0,191 \times 20,537 = 28,09 \text{ kW}$$

Com a variação da vazão, a potência gerada pela MCH também varia. As tabelas a seguir mostram esta variação para as duas opções em estudo:

Tabela 13 – Potência gerada pelas diferentes vazões na opção 1

Vazão (m ³ /s)		Queda Líquida (m)	Potência estimada (kW)
Máx.	0,191	20,778	28,416
Média	0,140	20,877	20,927
Mín.	0,017	21,002	2,556

Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 14 – Potência gerada pelas diferentes vazões na opção 2

Vazão (m ³ /s)		Queda Líquida (m)	Potência estimada (kW)
Máx.	0,191	20,536	28,085
Média	0,140	20,621	20,671
Mín.	0,017	20,723	2,522

Fonte: Autoria própria (2014)

4.6 CUSTO ESTIMADO PARA CADA OPÇÃO DE ARRANJO

A partir das dimensões adotadas anteriormente para os elementos da MCH em estudo, com base no relatório de insumos e composições do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (Sinapi, 2014), foi estimado o custo de instalação dos condutos das duas opções estudadas.

4.6.1 Opção 1

Conduto forçado (aço do tipo “Schedule”):

- Comprimento do conduto (m) = 51,0;
- Valor unitário (R\$/m) = 429,44;
- Preço da solda por metro (R\$/m) = 97,60;
- Comprimento da solda por emenda (cm) = 129,7;

- Número de emendas (un.) = 14;
- Total = R\$ 23.673,66.

Blocos de apoio:

- Quantidade de blocos = 16;
- Volume de concreto para cada bloco (m^3) = 0,209;
- Valor unitário do concreto - preparo e lançamento (R\$/ m^3) = 451,02;
- Total = R\$ 1.508,21.

Blocos de ancoragem:

- Quantidade de blocos = 2;
- Volume de concreto para os dois blocos (m^3) = 2,184;
- Valor unitário do concreto - preparo e lançamento (R\$/ m^3) = 451,02;
- Total = R\$ 985,03.

Conduto de baixa pressão (concreto armado):

- Comprimento do conduto (m) = 31,0;
- Valor unitário (R\$/m) = 145,84;
- Instalação do conduto (R\$/m) = 23,87;
- Escoramento (R\$/ m^3) = 27,47
- Altura em relação ao solo (m) = 10;
- Total = R\$ 13.776,71.

4.6.2 Opção 2

Conduto forçado (aço do tipo "Schedule"):

- Comprimento do conduto (m) = 38,67;
- Valor unitário (R\$/m) = 429,44;
- Preço da solda por metro (R\$/m) = 97,60;
- Comprimento da solda por emenda (cm) = 129,7;
- Número de emendas (un.) = 10;

- Total = R\$ 17.872,32.

Blocos de apoio:

- Quantidade de blocos = 10;
- Volume de concreto para cada bloco (m³) = 0,209;
- Valor unitário do concreto, preparo e lançamento (R\$/m³) = 451,02;
- Total = R\$ 942,63.

Blocos de ancoragem:

- Quantidade de blocos = 2;
- Volume de concreto para os dois blocos (m³) = 2,184;
- Valor unitário do concreto - preparo e lançamento (R\$/m³) = 451,02;
- Total = R\$ 985,03.

4.6.3 Resultado final

Com os valores obtidos no item anterior, foi construída a tabela 15 com o comparativo entre os dois arranjos:

Tabela 15 – Comparativo de preços entre os dois arranjos

	Conduto forçado	Blocos de apoio	Blocos de ancoragem	Conduto de baixa pressão	Total
Opção 1	23.673,66	1.508,21	985,03	13.776,71	R\$ 39.943,61
Opção 2	17.872,32	942,63	985,03	0,00	R\$ 19.799,98

Fonte: Autoria própria (2014)

A tabela 15 mostra que a opção 1 (arranjo original) é cerca de 102% mais cara que a opção 2, tornando-a inviável.

4.7 DETALHAMENTO DA OPÇÃO 2

Devido á diferença de custo entre as duas opções, a opção adotada foi a segunda (alternativa à original). Abaixo estão os detalhamentos dos componentes da opção adotada.

Para medir o perfil do terreno, foi utilizada a estação total (ponto "O" da figura 29) medindo os pontos de interesse (pontos 1 a 9 da figura 29), a partir do ponto 1, deslocando o prisma a cada 6 metros aproximadamente (devido ao comprimento de cada lance do conduto), e com as distâncias medidas pela estação, foi construída a seguinte tabela:

Tabela 16 – Distância dos pontos medidos com a estação total (distâncias em metros).

Distâncias a partir do ponto "O"			
Ponto	Horizontal	Vertical	Inclinada
1	22,09	14,029	26,303
2	17,163	10,772	20,397
3	12,201	8,239	14,863
4	7,348	4,945	9,028
5	4,174	2,86	5,205
6	4,472	-2,584	5,044
7	10,27	-4,13	10,979
8	14,186	-5,668	15,186
9	14,721	-6,632	16,045

Fonte: Autoria própria (2014)

Na figura 29 estão representadas as áreas de corte (A, B, C e D) e de aterro a serem realizados para receber o conduto forçado. As áreas são as seguintes:

- Área A (câmara de carga): 3,89 m²;
- Área B: 2,13 m²;
- Área C: 1,94 m²;
- Área D (casa de máquinas): 14,89 m²;
- Área de aterro: 3,45 m².

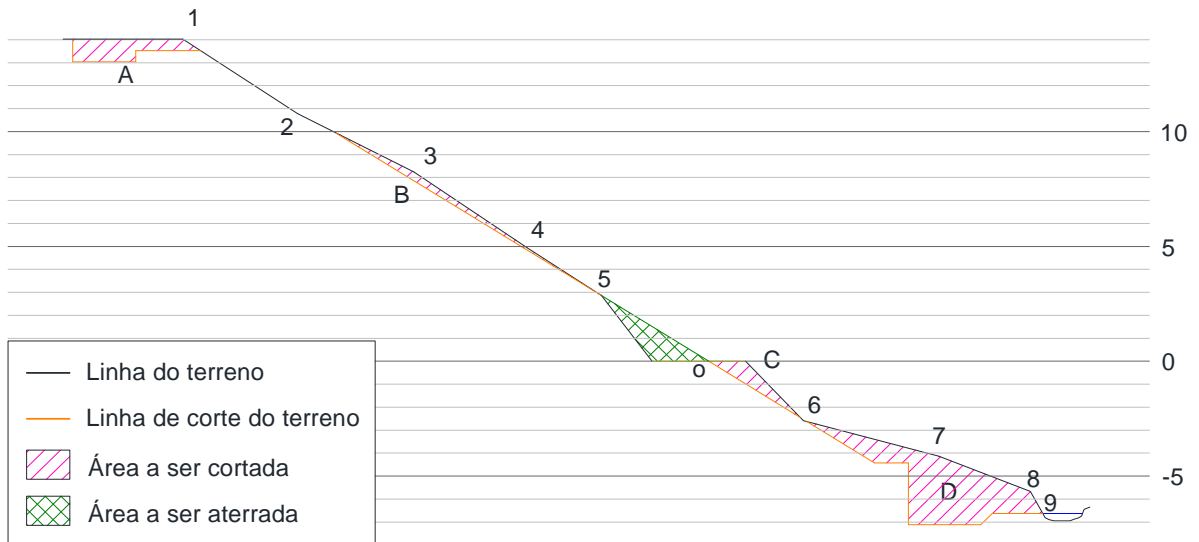


Figura 29 – Perfil do terreno no conduto forçado da opção 2

Fonte: Autoria própria (2014)

5. CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram analisadas as três opções de arranjo propostas de modo que fosse adotado o que melhor aproveitasse o potencial da MCH de Rio Branco do Sul/PR. A terceira opção foi a menos viável, pois sua queda líquida é de aproximadamente 57% menor que nas outras duas opções. Nestas, é aproveitado o canal de adução existente, e a tomada d'água, porém o restante substituído. Dentre estas duas opções, foi calculado que a potência gerada pela MCH seria ligeiramente maior na opção dois, mas com uma diferença muito pequena, ou seja, as duas aproveitam o potencial da micro usina. Porém, o custo de instalação dos novos elementos na segunda opção é cerca de 55% mais barato que o arranjo original da micro usina, uma vez que o conduto forçado da configuração original é 38% mais extenso que na opção dois, e na opção de configuração original teria que ser reconstruindo um conduto de baixa pressão, ou um canal elevado. Como a câmara de carga terá que ser reconstruída em ambas as opções, não há vantagem alguma em manter a planta original da usina. Portanto, conclui-se que a melhor opção é a opção dois, que é a alternativa à configuração original.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Além do material utilizado neste estudo para o conduto forçado (o aço), outros materiais podem ser utilizados em estudos semelhantes (como o concreto, o ferro fundido, o pvc), e que tenham outras propriedades talvez mais vantajosas, como rugosidade menor, diminuindo o atrito no escoamento, facilidade de encontrar

o material e a mão-de-obra capacitada para a instalação, custo menor, ou manutenção mais fácil. Estes fatores, dependendo da topografia da região é fundamental que sejam considerados. Poderia também ser feito ainda um estudo completo como dimensionamento da casa de máquinas, estudo de medição de vazão mais detalhado para estudar a viabilidade da opção três, e em quanto tempo de uso a micro usina pode amortizar o investimento feito para sua revitalização.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. 2008. 3 ed. Brasília: Aneel 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689>. Acesso em: 17 set. 2013.

_____. **Guia do Empreendedor De Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Brasília: 2003. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Guia_empreendedor.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2013.

_____. **Resolução 652, de 9 de dezembro de 2003**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2003652.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13403: Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores – Escoamento livre**. Rio de Janeiro, 1995.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS. **Fontes Renováveis – Hidráulica**. Disponível em: < <http://www.cerpch.unifei.edu.br/hidraulica.php>>. Acesso em: 17 set. 2013.

ELETROBRAS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: 2003. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com.br>> Acesso em: 17 nov. 2013.

_____. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.portalpch.com.br>> Acesso em 24 jul. 2014.

_____; DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de Mini Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: 1985.

FRANÇA, Francis Valter Pêpe. **Verificação da adequação do esquema numérico de MacCormack na solução de transientes hidráulicos em condutos forçados**. 2006. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

JENKINS, N.; ALLAN, R.; CROSSLEY, P. et al. **Embedded Generation**. Londres: The Institution of Electrical Engineers, 2000.

JUNGES, Francieli Cristina. **Análise de viabilidade de implantação de pequena central hidrelétrica na barragem Rodolfo da Costa e Silva**. 2007. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

JUSTINO, Lucimary Aparecida. **Estudos de procedimentos de ensaios de campo em turbinas hidráulicas para PCH**. 2006.158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

LEICA. Leica-Geosystems. Disponível em: <<http://www.leica-geosystems.com>> Acesso em: 25 out. 2014.

MENDES, Ana Luiza Souza; PINTO, Míriam de Magdala. **Autoprodução e Produção Independente de Energia Elétrica a partir de Fontes Renováveis no Brasil**. VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis – Vitória, 2011.

MOREIRA, Jonatas Costa; RIBAS, José Bonifácio Mader. **Conceitos para Projeto de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)**. Brasília: Abacus, 2001. 180 p.

MÜLLER, Arnaldo Carlos. **Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo: Makron Brooks, 1995.

RODRIGUES, Flávia F. C.; BORGES, Carmem L. T.; FALCÃO, Djalma M. **Programação da Contratação de Energia Considerando Geração Distribuída e Incertezas na Previsão de Demanda**. Revista Controle & Automação. Vol.18, nº. 3, jul., ago. e set. 2007.

Sinapi. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. **Relatórios de Insumo e Composição**. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/sinapi>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

SOUZA, Zulcy de; FUCHS, Rubens Dario; SANTOS, Afonso H. Moreira. **Centrais hidro e termelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher; Itajubá-MG: Escola de Engenharia, 1983.

_____; SANTOS, Afonso H. M.; BORTONI, Edson da C. **Centrais Hidrelétricas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DA ESTAÇÃO TOTAL UTILIZADA

Medição Angular (Hz, V)	
Precisão (Desvio padrão ISO17123-3)	3" (1 mgrado), 5" (1,5 mgrado), 7" (2 mgrados)
Método	Absoluto, contínuo, diametral
Resolução	0,1" / 0,1 mgrado / 0,01 mil
Compensação	Compensação centralizada nos 4 eixos (opção ligar, desligar)
Parâmetros de precisões dos compensadores	1", 1,5", 2"

Medição de distância com prisma	
Alcance com prisma circular GPR1	3.500 m
Alcance com fita adesiva (60 mm x 60 mm)	250 m
Precisão / Tempo de medição (Desvio padrão ISO-17123-4)	Padrão: 1,5 mm+2 ppm / tip. 2,4 s, Rápido: 3 mm+2 ppm / tip. 0,8 s, Rastreo: 3 mm+2 ppm / tip. <0.15 s

Figura A.1 – Especificações da estação total utilizada.

Fonte: Leica (2014)