

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA - ELETROTÉCNICA

ÂNGELO BRUNO GARCIA
JORGE AUGUSTO REBELATTO
VITOR POMPERMAIER

**ESTUDO PARA REVITALIZAÇÃO DA MICRO CENTRAL
HIDRELÉTRICA DE RONCADOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2011

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA - ELETROTÉCNICA

ÂNGELO BRUNO GARCIA
JORGE AUGUSTO REBELATTO
VITOR POMPERMAIER

**ESTUDO PARA REVITALIZAÇÃO DA MICRO CENTRAL
HIDRELÉTRICA DE RONCADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Disciplina de Metodologia aplicada ao TCC, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica - Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Manoel Alves.

CURITIBA

2011

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em primeiro lugar ao professor Gilberto Manoel Alves pela idéia do tema e posterior apoio para realização deste trabalho.

À prefeitura municipal de Bocaiúva do Sul pelo apoio e hospitalidade em todas as visitas á cidade.

Um especial agradecimento aos nossos familiares e amigos que, durante o desenvolvimento deste trabalho, compreenderam nossas ausências e nos motivaram a alcançar os nossos objetivos.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente, nosso sincero agradecimento.

“Para conhecermos os amigos é necessário passar pelo sucesso e pela desgraça. No sucesso, verificamos a quantidade e, na desgraça, a qualidade”.

(Confúcio)

RESUMO

GARCIA, Ângelo Bruno. POMPERMAIER, Vitor. REBELATTO, Jorge Augusto. Estudo para Revitalização da Micro Central Hidrelétrica de Roncador. 2011. 162 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

Em reunião realizada em 27 de setembro de 2010 entre o Campus Curitiba da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) e a Prefeitura De Bocaiúva do Sul/PR, foi assinado o Termo de Convênio para criação de um Centro de Educação Ambiental na cidade, incluindo a implantação de uma micro usina para geração de energia elétrica. Este trabalho trata do estudo de revitalização da Micro Central Hidrelétrica de Roncador localizada no município e desativada desde 1959. O desenvolvimento deste trabalho foi fundamentado em estudos teóricos e práticos, incluindo estudos de campo, para a estimativa e avaliação do potencial hidrelétrico e do estado dos equipamentos e estruturas existentes. A reativação da micro usina de Roncador é importante para a universidade, que ganhará uma usina didática complementando o ensino teórico, e para a cidade de Bocaiúva do Sul, pois com a volta de seu funcionamento, além de gerar energia e desenvolver a região, uma área que hoje está completamente abandonada será aproveitada.

Palavras-chave: Bocaiúva do Sul. Implantação. Micro Central Hidrelétrica. Revitalização.

ABSTRACT

GARCIA, Ângelo Bruno. POMPERMAIER, Vitor. REBELATTO, Jorge Augusto. Revitalization of the Micro Hydroelectric Power Plant of Roncador. 2011. 162 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

In a meeting realized in September 27th 2010 between Curitiba Campus from UTFPR (Federal Technological University of Paraná) and Bocaiúva do Sul's city hall, it was signed a term of agreement for the creation of an Environmental Education Center in the city, that includes the implantation of a micro power plant for electricity power generation. This work is about the revitalization of the Micro Hydroelectric Power Plant of Roncador that is off since 1959. The development of this work was based in theoretical and practical studies, including field studies, for estimating and evaluating the hydroelectric potential and the condition of the equipment and existents structures. The reactivation of the micro power plant it will be important to the university, because it will have a didactic power plant for the students analyze the operation of the plant that will increase the quality of education, and for the city, because with the return of its operation, it will generate energy, develop the region and an area that is now completely abandoned will be utilized.

Keywords: Bocaiúva do Sul. Implantation. Micro Power Plant. Revitalization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Usina de Roncador.....	18
Figura 2 – Esquema do arranjo, em corte longitudinal, com principais componentes da Central Hidrelétrica de Represamento	30
Figura 3 – Corte longitudinal esquemático em Central Hidrelétrica de Desvio mostrando seus principais componentes	31
Figura 4 – Corte longitudinal esquemático em Central Hidrelétrica de Derivação Represamento mostrando seus principais componentes	32
Figura 5 – Corte longitudinal esquemático em Central Hidrelétrica de Derivação Desvio mostrando seus principais componentes	32
Figura 6 – Etapas para o dimensionamento das estruturas e equipamentos de uma usina hidrelétrica de pequeno porte	37
Figura 7 – Fluxograma de Atividades para Estudos e Projeto Básico de PCH	38
Figura 8 – Fluxograma de Implantação de uma PCH.....	39
Figura 9 – Barragem Homogênea ($H \leq 10m$)	42
Figura 10 – Barragem de Concreto	43
Figura 12 – Escolha da turbina.....	54
Figura 13 – Turbina Pelton	57
Figura 14 –Rotor Pelton	57
Figura 15 – Turbina Francis Dupla	59
Figura 16 – Arranjo típico de Turbina Francis de eixo vertical.....	59
Figura 17 – Rotor da Turbina Francis.....	60
Figura 18 – Turbina hélice.....	61
Figura 19 – Rotor hélice	61
Figura 20 – Turbina Kaplan.....	62
Figura 21 – Rotor Kaplan	62
Figura 22 – Localização geográfica do município de Bocaiúva do Sul: Visão geral da localização Federal. Inserção Regional.....	66

Figura 23 – Vista aérea da hidrelétrica Roncador	68
Figura 24 – Identificação do local de instalação da MCH Roncador	69
Figura 25 – Fluviograma da MCH Roncador	70
Figura 26 – Represa da hidrelétrica Roncador	71
Figura 27 – Partes constituintes da barragem de concreto	75
Figura 28 – Vista da base da barragem da hidrelétrica Roncador	75
Figura 29 – Vista da barragem da hidrelétrica Roncador	76
Figura 30 – Vista da base de pedras.....	77
Figura 31 – Contrafortes de concreto	77
Figura 32 – Dimensões de barragem	78
Figura 33 – Base da barragem da hidrelétrica Roncador	79
Figura 34 – Erosão na barragem da hidrelétrica Roncador.....	79
Figura 35 – Vertedouro da hidrelétrica Roncador.....	80
Figura 36 – Vista lateral do vertedouro da hidrelétrica Roncador.....	81
Figura 37 – Dimensionamento do vertedouro	81
Figura 38 – Extravasador da hidrelétrica Roncador	84
Figura 39 – Tomada d'água da hidrelétrica Roncador	85
Figura 40 – Tubulação forçada na saída da tomada d'água	85
Figura 41 – Tomada d'água acoplada à tubulação forçada.....	86
Figura 42 – Comporta de madeira da tomada d'água	87
Figura 43 – Conduto forçado existente na hidrelétrica Roncador.....	89
Figura 44 – Medição do conduto forçado	90
Figura 45 – Diâmetro econômico x vazão	93
Figura 46 – Tipos de boca do conduto forçado	98
Figura 47 – Curva de Allievi para sobrepressão.....	103
Figura 48 – Curva de Allievi para depressão.....	104
Figura 49 – Bloco de apoio ou sela	108

Figura 50 – Bloco de ancoragem	109
Figura 51 – Chaminé de Equilíbrio	110
Figura 52 – Interior da Chaminé de Equilíbrio	110
Figura 53 – Chaminé de equilíbrio em centrais a fio d'água.....	116
Figura 54 – Casa de máquinas da hidrelétrica Roncador	118
Figura 55 – Dimensões da casa de máquinas	121
Figura 56 – Casa de máquinas (corte I-I)	122
Figura 57 – Casa de máquinas (corte II-II).....	122
Figura 58 – Campo típico de aplicação de turbinas hidráulicas	125
Figura 59 – Canal de fuga – dimensões básicas.....	126
Figura 60 – Canal de fuga da hidrelétrica Roncador	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das centrais hidrelétricas.....	27
Tabela 2 – Classificação das centrais quanto a Potência e quanto a Queda de Projeto	28
Tabela 3 – Classificação de centrais hidrelétricas de pequeno porte, de conformidade com os diversos países (Unidade: kW).....	29
Tabela 4 – Velocidade de rotação para turbinas hidráulicas	53
Tabela 5 – População censitária segundo a zona.....	66
Tabela 6 – Dimensões do desarenador.....	87
Tabela 7 – Comporta de madeira.....	88
Tabela 8 – Diâmetro econômico.....	92
Tabela 9 – Velocidade máxima da água no interior da tubulação	94
Tabela 10 – Coeficiente de perda na grade	97
Tabela 11 – Coeficiente para cálculo do atrito	99
Tabela 12 – Perda de carga no sistema de adução	100
Tabela 13 – Coeficiente de eficiência de soldas	107
Tabela 14 – Coeficiente de depleção	115
Tabela 15 – Comparação – conduto 115,2 cm x conduto 70 cm	117
Tabela 16 – Dimensão básica de geradores.....	121
Tabela 17 – Principais características das turbinas fabricadas no Brasil	124

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica
BENT	Barragem de Enrocamento com Núcleo de Terra
CEMAT	Centrais Elétricas Matogrossense S/A
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
CERPCH	Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas
CHA	Central Hidráulica de Acumulação
CHBQ	Centrais Hidrelétricas de Baixa Queda
CHD	Centrais Hidrelétricas de Desvio
CHESF	Companhia Hidro Elétrica de São Francisco
CHR	Centrais Hidrelétricas de Represamento
CHVD	Centrais Hidrelétricas de Derivação Represamento
CHVR	Centrais Hidrelétricas de Represamento Desvio
CNAEE	Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
ELETOBRAS	Centrais Elétricas Brasileira
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil
ELETROSUL	Centrais Elétricas do Sul do Brasil
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
ENERSUL	Empresa Energética do Mato Grosso do Sul
ESCELSA	Espírito Santo Centrais Elétricas S.A.
ESHA	The European Small Hydro Association

FEMA	Fundação Estadual do Meio Ambiente
GCH	Grande Central Hidrelétrica
GG	Grupo Gerador
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços
MCHs	Microcentrais Hidrelétricas
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MOP	Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão
NA	Nível de Água
NTC	Norma Técnica da Copel
OLADE	Organização Latino-Americana de Energia
ONS	Operador Nacional de Sistema Elétrico
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PFER	Pequenas Fontes de Energia Renovável
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PROCEL	Programa de Conservação de Energia Elétrica
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
PVC	Poli Cloreto de Vinila
RAE	Relatório Simplificado de Avaliação de Eficiência de Uso da Água
RAS	Relatório Ambiental Simplificado
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RV	Regulador de Velocidade
SNRH	Sistema Nacional de Recursos Hídricos
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SUDERHSA	Superintendência de Desenvolvimento dos Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo

THS	Tarifa Horo-Sazonal
TH	Turbina Hidráulica
UNIPEDE	União Internacional dos Produtores e Distribuidores de Energia Elétrica
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	TEMA.....	17
1.1.1	Delimitação do tema.....	18
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	19
1.3	OBJETIVO	19
1.3.1	Objetivo geral	19
1.3.2	Objetivos específicos.....	20
1.4	JUSTIFICATIVA	20
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
1.7	CRONOGRAMA.....	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	HISTÓRICO DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	23
2.2	ENERGIA HIDRÁULICA.....	26
2.3	CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	26
2.3.1	Arranjos típicos.....	29
2.4	ESTUDO INICIAL.....	33
2.4.1	Levantamento topográfico	33
2.4.2	Levantamento geológico e geotécnico	33
2.4.3	Levantamento hidrológico.....	34
2.5	ARRANJOS TÍPICOS DE MICRO CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	34
2.6	TIPOS DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS QUANTO À CAPACIDADE DE REGULARIZAÇÃO 35	
2.6.1	Central Hidrelétrica fio d'água.....	35
2.6.2	Central Hidrelétrica de acumulação com regulamentação diária do reservatório	36
2.6.3	Central Hidrelétrica de acumulação com regulamentação diária do reservatório	36

2.7	ESTRUTURA DE ESTUDO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA DE PEQUENO PORTE.....	36
2.8	BARRAGENS.....	40
2.8.1	Barragem de terra	41
2.8.2	Barragem de contrafortes	42
2.8.3	Barragem de concreto de gravidade	42
2.8.4	Barragem de enrocamento	44
2.9	VERTEDOIRO OU EXTRAVASOR	45
2.9.1	Vertedouro de borda livre	45
2.9.2	Vertedouro de canal	46
2.9.3	Vertedouro com comportas.....	46
2.10	TOMADA D'ÁGUA.....	47
2.11	SISTEMA DE ADUÇÃO.....	48
2.11.1	Canal de adução e conduto forçado.....	48
2.12	CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	49
2.13	CASA DE MÁQUINAS.....	49
2.14	GERADOR.....	50
2.15	TURBINAS HIDRÁULICAS.....	51
2.15.1	Turbinas Pelton	56
2.15.2	Turbinas Francis.....	58
2.15.3	Turbinas Axiais – Kaplan e Hélice.....	60
2.16	MEIO AMBIENTE E IMPACTOS AMBIENTAIS.....	63
3	MATERIAL E MÉTODOS	65
3.1	HISTÓRIA E CARACTERÍSTICAS DE BOCAIÚVA DO SUL.....	65
3.1.1	Aspectos demográficos, físicos e bióticos	66
3.1.1.1	População	66
3.1.1.2	Hidrografia.....	67
3.1.1.3	Clima.....	67

3.1.1.4	Vegetação	67
3.2	USINA RONCADOR.....	68
3.2.1	Dados hidroenergéticos da Usina de Roncador	69
3.2.2	Reservatório.....	70
3.2.3	Determinação da potência aproveitável	71
3.2.3.1	Potência aproveitável para vazão máxima	72
3.2.3.2	Potência aproveitável para vazão média	72
3.2.3.3	Potência aproveitável para vazão mínima	73
3.2.4	Determinação da potência necessária	73
3.3	BARRAGEM.....	74
3.4	VERTEDOURO	80
3.5	TOMADA D'ÁGUA.....	84
3.5.1	Comporta da tomada d'água.....	87
3.6	CONDUTO FORÇADO.....	89
3.6.1	Diâmetro econômico.....	91
3.6.2	Velocidade da água no conduto.....	94
3.6.3	Estimativa das perdas de carga	95
3.6.3.1	Perda de carga na tomada d'água	95
3.6.3.2	Perda de carga na grade da tomada d'água.....	96
3.6.3.3	Perda de carga na entrada do conduto forçado.....	97
3.6.3.4	Perda de carga por atrito no conduto forçado.....	98
3.6.3.5	Perda de carga total no sistema de adução.....	100
3.6.4	Variação de pressão no conduto forçado	101
3.6.4.1	Sobrepessão	105
3.6.4.2	Depressão	105
3.6.5	Espessura do conduto forçado	105
3.6.6	Blocos de apoio os selas	108
3.6.7	Blocos de ancoragem	108

3.7	CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO.....	109
3.7.1	Cálculo da elevação do nível de água.....	112
3.7.2	Cálculo da depleção do nível de água	113
3.7.3	Altura da chaminé de equilíbrio.....	115
3.8	CASA DE MÁQUINAS.....	118
3.8.1	Escolha do Tipo de Casa de Máquina.....	118
3.8.2	Dimensionamento.....	119
3.8.2.1	Geral	119
3.8.2.2	Instalação típica (recomendável).....	119
3.9	EQUIPAMENTOS ELETROMECAÑICOS.....	123
3.9.1	Turbina.....	123
3.9.2	Seleção do tipo.....	124
3.10	CANAL DE FUGA.....	125
4	CONCLUSÕES.....	128
5	REFERÊNCIAS	130
	ANEXOS	136

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

O Brasil tem hoje uma posição privilegiada em matéria de matriz energética, com 82% de sua eletricidade obtida de fontes renováveis, a maior parte de centrais hidrelétricas, e apenas 18% de usinas termelétricas alimentadas com combustíveis fósseis ou nucleares. Bem menos conhecido é o fato de que apenas 2% da eletricidade gerada no país provêm de pequenas centrais (PCHs ¹) e, menos ainda, que a crise energética que redundou no chamado “apagão” deu um grande impulso para a revitalização dessa forma local e ambientalmente menos impactante de geração, que pode nos próximos anos dobrar sua participação no mix de eletricidade (GREENPEACE, 2004).

A construção de uma micro-usina é viabilizada quando o empreendedor informa à ANEEL a localização do empreendimento e as características do aproveitamento hidráulico, isentando-se de maiores burocracias. Quanto à questão ambiental, esta, mesmo mais simplificada do que em outros empreendimentos hidroenergéticos, depende da decisão dos órgãos ambientais, já que as micro centrais causam impactos ambientais, mesmo que atenuados (VIANA, 2005).

As MCHs (Micro centrais hidrelétricas) são potencialmente importantes para a geração de energia elétrica, especialmente para sistemas isolados e “na perspectiva de universalização do acesso à energia no país ou para o atendimento de unidades agrícolas e industriais (...). Estima-se que haja mais de mil mini e micro-centrais com potências médias da ordem de 300 kW” (VIANA, 2005, p. 4), sem contar aquelas que são ignoradas por terem potência menor de 100 kW. De acordo com a ELETROBRÁS & DNAEE (1982) as classificações em função da potência das usinas hidrelétricas de pequeno porte são:

- Micro-centrais: até 100 kW;
- Mini-centrais: até 1.000 kW;
- Pequenas centrais: até 10.000 kW.

¹ A ANEEL em sua Resolução 652 de 09/12/2003 classifica pequena central hidrelétrica (PCH) como um aproveitamento hidrelétrico com potência entre 1 e 30 MW e cuja área inundada do reservatório não ultrapasse 3 km² (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p.19).

1.1.1 Delimitação do tema

Em reunião realizada no dia 27/09/2010, foi assinado o Termo de Convênio entre o Campus Curitiba, da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), e a Prefeitura De Bocaiúva do Sul, para criação de um Centro de Educação Ambiental na cidade, incluindo a implantação de uma mini usina para geração de energia elétrica (UTFPR - Campus Curitiba 2010).

O trabalho de pesquisa, em questão, estudará a revitalização da Micro Central Hidrelétrica de Roncador no município de Bocaiúva do Sul/PR (Usina Hidrelétrica de Roncador – figura 1), fazendo um diagnóstico de todas as instalações da usina verificando o que deve ser alterado ou acrescentado.

Com o recente convênio firmado, faz-se necessário um estudo para levantar dados da usina, com a pesquisa dos equipamentos, acessórios e estruturas, para o processo de revitalização das instalações.

As usinas hidrelétricas de pequeno porte apresentam configurações específicas hidrológicas e topográficas regionais, portanto de suma importância em estudos de geração de energia elétrica o conhecimento da localização do empreendimento. O aproveitamento em estudo localiza-se no município de Bocaiúva do Sul localizado a 30 km da capital, Curitiba estado do Paraná.



Figura 1 – Usina de Roncador

Fonte: Própria (2011).

1.2 PROBLEMAS E PREMISAS

Depois de realizado o convênio entre a Prefeitura de Bocaiúva do Sul e a UTFPR para a utilização da Micro Central Hidrelétrica de Roncador para fins didático e de geração notou-se que a mesma não se encontra em condições para tais tarefas. Hoje inoperante, a usina possui muitas estruturas, equipamentos e máquinas que estão danificadas e/ou faltantes. Deste modo torna-se necessária uma revitalização da Micro Central para proporcionar condições de reoperação e atender aos interesses da Prefeitura e da Universidade.

Com o completo abandono da região da usina, o quão importante será a revitalização, da MCH de Roncador, quando será implantada em Bocaiúva do Sul e como será feita essa revitalização são as principais perguntas para todos os envolvidos com o tema.

Para a implantação de uma central hidrelétrica, diversas etapas precisam ser cumpridas. Tais etapas podem ser divididas em estudos gerais, projeto, especificações e análise econômico-financeira (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009).

Os estudos hidrológicos aplicados à geração de energia elétrica objetivam fornecer dados e metodologias para o projeto e implantação de uma central hidrelétrica (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009).

Espera-se com este trabalho proporcionar o levantamento das necessidades que deverão ser atendidas para a MCH de Roncador possa contribuir para a geração de energia bem como contribuir para um melhor ensino para os alunos da instituição federal.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo geral

Realizar estudo da situação atual para implantação da usina, o que existe hoje implantado, com levantamento em campo e desenhando o AS BUILT da situação atual e o que será necessário para revitalizar a micro usina de Roncador na cidade de Bocaiúva do Sul/PR.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar as estruturas e equipamentos da usina hoje existentes;
- Levantar as condições em que se encontram os equipamentos, assim como realizar um levantamento de dados técnicos e condições de funcionamento de todas as estruturas (civis, elétrica, hidráulicas, mecânicas, ambientais, arquitetônicas) das instalações;
- Levantar os diagramas e desenhos construtivos do tempo da construção da Usina, assim como os dados técnicos e manuais dos fabricantes dos equipamentos existentes;
- Verificar o que pode ser aproveitado e o que deverá ser trocado;
- Levantar informações técnico-econômicas necessárias para escolha das turbinas e geradores;
- Descrever a importância da revitalização da micro-central hidrelétrica do Roncador;
- Resultados e conclusões.

1.4 JUSTIFICATIVA

Uma usina para entrar em operação, isto é, gerar energia deve atender a requisitos de instalação, que abordam as condições que devem se encontrar os equipamentos e as estruturas, as licenças ambientais, etc. A micro central hidrelétrica de Roncador, usina objeto do nosso estudo, se encontra fora de operação e necessita de uma revitalização.

Logo se faz necessário um levantamento da atual situação da usina, realizando um estudo do que está instalado e as condições dessas instalações para saber o que está danificado, o que deverá ser trocado e tudo o que falta para a micro-central entrar em operação.

Também destaca-se que com as micro e mini centrais elétricas há maior proximidade do consumidor, diminuindo o problema da distância e da perda de energia elétrica. A importância das micro e mini centrais hidrelétricas estão de modo especial na abertura de oportunidades de “investimentos modestos para a iniciativa

privada (...), produtores independentes, autoprodutores e concessionários menores”. (LEITE, 1997).

A reativação da micro usina de Roncador será importante não só para a universidade como para a cidade de Bocaiúva do Sul, pois com a volta de seu funcionamento, além de gerar energia para a própria cidade e de reaproveitar uma área que hoje está completamente abandonada a reativação será importante para melhorar a qualidade do ensino da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Além disso, considera-se de fundamental importância a elaboração de uma orientação dirigida que auxilie no levantamento de dados para avaliar a estrutura hoje existente bem como analisar as condições de seu aproveitamento. Também importante frisar no levantamento de dados técnico-econômicos para a melhor escolha das turbinas e outros equipamentos.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho será realizado por meio de pesquisa aplicada, com registro das informações obtidas. Dentre os tipos de pesquisa serão realizados estudos de campo na usina a fim de avaliar a situação na qual se encontram as estruturas e equipamentos. Usar-se-á, ainda, pesquisa bibliográfica de normas técnicas, trabalhos e teses afins e manuais de fabricantes.

Os objetivos específicos do trabalho, explicitados anteriormente, servirão como roteiro das tarefas a serem desenvolvidas. Entretanto, dois ou mais objetivos poderão ser tratados em paralelo por diferentes membros da equipe, com a finalidade de tornar mais dinâmica a busca por assuntos correlatos ao tema.

O estudo da revitalização da micro usina de Roncador localizada no município de Bocaiúva do Sul será fundamentado em dados Coletados no campo, assim como outras fontes de informação confiáveis e úteis ao tema proposto. Serão feitas análises de todos os temas estudados relacionando-os à realidade do projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A primeira utilização da energia gerada mecanicamente no Brasil data de 1879. No mesmo momento que Thomas Edson divulgava a invenção da lâmpada em Nova York, D. Pedro II inaugurava no Rio de Janeiro a iluminação elétrica, com seis lâmpadas, na estação D. Pedro II, que na época era denominada estação da Corte. (MULLER, 1995). Em 24 de junho de 1883, o imperador inaugurou a usina termelétrica de Campos, no Rio de Janeiro, com potência de 52 kW. Foi a primeira cidade da América Latina e do Brasil a contar com iluminação elétrica pública.

A primeira usina hidrelétrica, situada na bacia do Jequitinhonha, no município de Diamantina, então na província de Minas Gerais, recebeu o nome de Ribeirão do Inferno; foi pioneira e uma das maiores do mundo naquela época, com desnível de 5 metros (MULLER, 1995).

A usina de Marmelos, construída em Juiz de Fora – MG, é a primeira usina hidrelétrica do serviço público do Brasil, ela foi inaugurada em 7 de setembro de 1889, mas durou somente até 1896. A partir de 1899, algumas empresas estrangeiras começaram a ingressar e operar no Brasil, como a The São Paulo Railway e a Light and Power Company Limited. Desde 1931 a União requereu o poder de conceder direitos ao uso de quedas de águas que, em 1934, culminou com a assinatura do Código de Águas, atuante até os dias atuais. Segundo Nascimento, Amaral e Pontes (1997), o Código de Águas era “centralizador, socialista e com grandes restrições àquela liberdade que a iniciativa privada tinha no regime anterior”.

Em 1943, houve a criação de diversas companhias estaduais e federais e em 1960 foi criado o Ministério de Minas e Energia (ESCELSA, 2011).

Em abril de 1961 foi criada a ELETROBRÁS, denominada Centrais Elétricas Brasileiras S. A., para responder à crise da década de 50 em consequência da falta de continuidade de investimentos por parte das empresas estrangeiras. As empresas Light foram compradas pela ELETROBRÁS em 1979. Outras empresas

foram criadas, como as Centrais Elétricas do Sul do Brasil (ELETROSUL), em 1968; as Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE), em 1972 (ALVES, 2007).

Na década de 70, ocorreram mudanças significativas de crescimento no setor elétrico. Diversos projetos entraram em operação, como diversas ampliações de Paulo Afonso, o término de usinas com Ilha Solteira, Marimbondo, Jaguará, Emborcação, São Simão, Itumbiara, Sobradinho, Salto Osório, Foz do Areia, Água Vermelha, Tucuruí e especialmente Itaipu (ALVES, 2007).

Em 1973 foi assinado o tratado entre o Brasil e o Paraguai para a construção da Usina Hidrelétrica Itaipu Binacional. O sonho transforma-se em energia. O primeiro giro mecânico de uma turbina ocorre em 17 de dezembro de 1983. E, finalmente, a Itaipu Binacional começa a produzir energia em 5 de maio de 1984, quando entra em operação a primeira das 20 unidades geradoras do projeto. Dezoito unidades geradoras foram instaladas no espaço de sete anos. Maio de 2007. No mês em que Brasil e Paraguai celebram o 33º aniversário da assinatura do Tratado de Itaipu, entram em operação as últimas duas das 20 unidades geradoras previstas no projeto da usina (ITAIPU BINACIONAL, 2011).

Segundo Muller (1995), na década de 90, a Eletrobrás limitou a atuação das empresas regionais, ou seja, ELETRONORTE, ELETROSUL, CHESF e Furnas junto com a Light e a ESCELSA tornaram-se responsáveis pela distribuição. As outras empresas estaduais e locais, caso os governos detenham a maior parte do capital social, tornaram-se coligadas à Eletrobrás.

Em 1996, surge a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), criada com os objetivos de: regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização da energia elétrica; atender a reclamações de agentes e consumidores; mediar os conflitos de interesses entre os agentes do setor elétrico e entre estes e os consumidores; conceder, permitir e autorizar instalações e serviços de energia; garantir tarifas justas e zelar pela qualidade do serviço; exigir investimentos; estimular a competição entre os geradores e assegurar a universalização dos serviços (INSTITUTO EDP, 2011).

Na década de 90, o Plano Decenal de Expansão (1995-2004), coordenado pela ELETROBRÁS, considerava a urgente necessidade de investimentos em energia elétrica da ordem de US\$ 6 bilhões por ano até 2004, mas o Governo não realizou os investimentos esperados (ALVES, 2007). Goldemberg e Moreira (2005) referem que “a geração de eletricidade no Brasil cresceu a uma taxa

média anual de 4,2% entre 1980 e 2002, e sempre a energia hidráulica foi dominante”.

Em 2001, a população recebeu do Governo Federal o comunicado de que “os reservatórios destinados ao abastecimento de energia elétrica no país estavam com seus volumes de água reduzidos a níveis extremamente baixos. Prenunciava-se, assim, uma grave crise energética para os meses seguintes” (DAWALIBI, 2004).

O alto custo inicial e a disponibilidade de recursos impulsionaram inicialmente a que fossem aproveitados os locais considerados em ótimas condições, em seus aspectos hidráulicos, geológicos, hidrológicos, entre outros (ALVES, 2007).

O Brasil conta com recursos hídricos de grande potencial para serem desenvolvidos por meio de pequenos aproveitamentos hidroenergéticos, como alternativa para que a energia elétrica seja produzida com baixo custo.

O governo federal lança em novembro de 2003 o Programa Nacional de Universalização e Uso de Energia Elétrica, objetivando levar, até 2008, energia elétrica aos 12 milhões de brasileiros que não têm acesso ao serviço. Deste total, 10 milhões estão na área rural. A gestão do programa será compartilhada entre estados, municípios, agentes do setor elétrico e comunidades. Nesse ano, a capacidade instalada de energia elétrica no Brasil está em torno de 77.300 MW (INSTITUTO EDP, 2011).

Nos dias atuais, em uma projeção realizada recentemente pelo departamento de energia do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) apresentou um dado impressionante. Entre 2010 e 2013, os investimentos do setor elétrico brasileiro deverão totalizar R\$ 100 bilhões. Na quinta-feira 18/03/2011, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) anunciou que será no dia 20 de abril o leilão para a construção da usina de Belo Monte, empreendimento estimado em R\$ 30 bilhões. Esse é apenas um dos negócios que colocam em evidência os novos protagonistas do setor elétrico no Brasil (ISTOÉ DINHEIRO, 2011).

2.2 ENERGIA HIDRÁULICA

A energia hidráulica, utilizada para moagem de grãos e bombeamento de água, foi uma das primeiras formas de substituição do trabalho animal pelo mecânico, pois tinha grande disponibilidade de recursos e, principalmente por seu caráter renovável (PORTAL SÃO FRANCISCO, 2011).

De acordo com ELETRONORTE, a primeira hidrelétrica do mundo foi construída no final do século XIX nas quedas d'água das Cataratas do Niágara. Ainda no final do século XIX foi construída a primeira hidrelétrica no Brasil, no município de Diamantina, utilizando as águas do Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, com 0,5 MW (megawatt) de potência e linha de transmissão de dois quilômetros.

Além de ser de fundamental importância para sobrevivência humana, a água é bastante utilizada para outros fins como saneamento, irrigação, lazer, transporte, indústria e produção de energia. Apesar desta grande importância, a água é atualmente um dos maiores problemas em função do desenvolvimento mundial (DOS REIS, 2003).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Para classificação das centrais hidrelétricas devem ser considerados, segundo Souza, Fuchs e Santos (1983), diversos critérios como potência gerada, queda, quanto à forma de captação de água, quanto à forma de utilizar as vazões naturais e quanto a sua função no sistema. A tabela 1 ilustra esses critérios e suas subdivisões.

Tabela 1 - Classificação das centrais hidrelétricas

a) Quanto a sua Potência	P (kW)
a1) Microcentrais	$P \leq 100$
a2) Minicentrais	$100 \leq P \leq 1.000$
a3) Pequenas centrais	$1.000 \leq P \leq 10.000$
a4) Médias centrais	$10.000 \leq P \leq 100.000$
a5) Grandes centrais	$P \geq 100.000$
b) Quanto a sua queda	H (m)
b1) Centrais de baixíssima queda	$H < 10$
b2) Centrais de baixa queda	$10 \leq H < 50$
b3) Centrais de média queda	$50 \leq H < 250$
b4) Centrais de alta queda	$H > 250$
c) Quanto a sua forma de captação de água	
c1) Centrais em desvio e derivação	
c2) Centrais em leito de rio ou de represamento	
d) Quanto à sua forma de utilizar as vazões naturais	
d1) Centrais a fio de água	
d2) Centrais com regularização: diária, semanal, anual e plurianual	
e) Quanto a sua função no sistema	
e1) Centrais de base	
e2) Centrais flutuantes	
e3) Centrais de ponta	

Fonte: Adaptado de Souza, Fuchs e Santos (1983).

A tabela 2 apresenta uma classificação quanto à potência e queda de projeto com algumas considerações diferentes das anteriores.

Tabela 2 – Classificação das centrais quanto a Potência e quanto a Queda de Projeto

CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS	POTÊNCIA - P (kW)	QUEDA DE PROJETO - H_d (m)		
		BAIXA	MÉDIA	ALTA
MICRO	$P < 100$	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
MINI	$100 < P < 1.000$	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
PEQUENAS	$1.000 < P < 30.000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

Essa classificação pode ser diferente de país para país e os métodos de classificação podem variar, em último caso, de acordo com o desenvolvimento tecnológico industrial do país em um determinado período. Logo países em diferentes estágios de modernização apresentarão critérios diferentes para a classificação. Conforme ilustra a tabela 3, observando que a subclassificação das usinas de pequeno porte, na maioria dos países listados, se dá pela potência instalada (BALARIM, 1996).

Tabela 3 – Classificação de centrais hidrelétricas de pequeno porte, de conformidade com os diversos países (Unidade: kW).

País	Micro	Mini	Pequena
Bolívia	100	101 - 1.000	—
China	100	101 - 500	501 - 25.000
Colômbia	—	—	> 20.000
Equador	50	51 - 500	501 - 5.000
Filipinas	—	—	>15.000
França	500	501 - 2.000	2.001 - 8.000
Grécia	100	101 - 1.000	1.001 - 15.000
Índia	100	101 - 2.000	—
Indonésia	—	—	>5.000
Japão	—	—	>10.000
Nova Zelândia	—	10.000	10.001 - 50.000
Noruega	—	—	>10.000
Panamá	100	101 - 1.000	1.001 - 10.000
Peru	5 - 50	51 - 500	501 - 5.000
Polônia	100	101 - 1.000	1.001 - 15.000
Romênia	—	—	5 - 5.000
Suécia	—	100	101 - 15.000
Tailândia	200	201 - 6.000	6.001 - 15.000
EUA	500	501 - 2.000	2.001 - 15.000

Fonte: Balarim (1996).

2.3.1 Arranjos típicos

Existem 3 tipos de arranjos para os componentes das Centrais Hidrelétricas (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009), conforme ilustrado a seguir:

- Centrais Hidrelétricas de Represamento (CHR)
- Centrais Hidrelétricas de Desvio (CHD)
- Centrais Hidrelétricas de Derivação (CHV)
 - Represamento (CHVR)
 - Desvio (CHVD)

A CHR é o arranjo mais utilizado nas Grandes Centrais Hidrelétricas (GCH) e nas Centrais Hidrelétricas de Baixa Queda (CHBQ) e são implantadas em um trecho do rio possuindo ligação direta entre a barragem e a casa de máquinas através do conduto forçado conforme apresentado na Figura 2 que mostra o arranjo nomeando os principais componentes (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

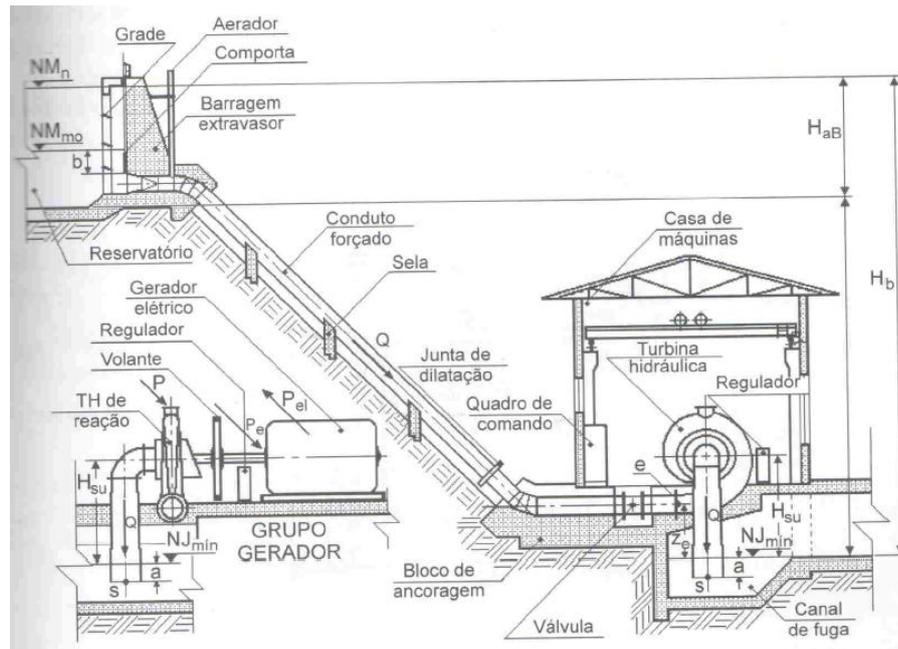


Figura 2 – Esquema do arranjo, em corte longitudinal, com principais componentes da Central Hidrelétrica de Represamento

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

As CHD assim como as CHR são implantadas utilizando um trecho do rio, porém em um trecho grande e com boa declividade geralmente contendo corredeiras. Nesse tipo de arranjo existe a necessidade do nível de água de montante estar mais próximo do de jusante apresentando um sistema de baixa pressão intercalado entre barragem e o conduto forçado, conforme ilustrado na figura 3 (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

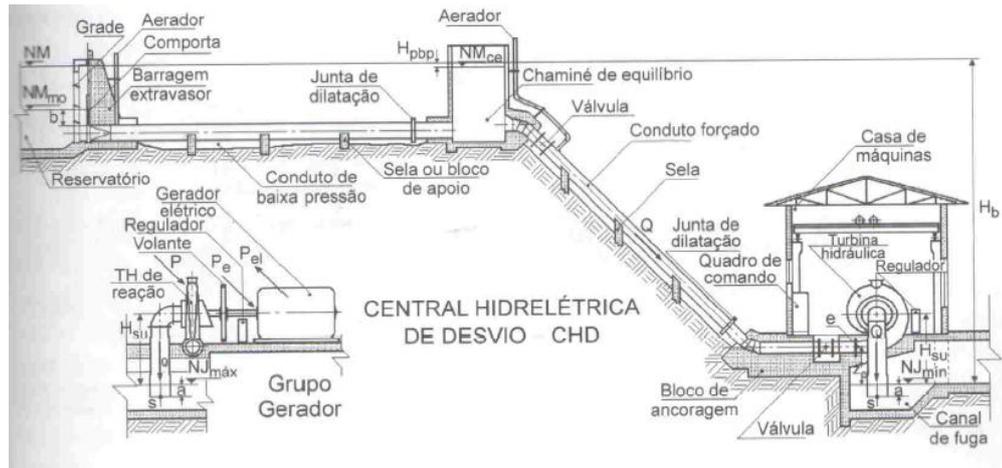


Figura 3 – Corte longitudinal esquemático em Central Hidrelétrica de Desvio mostrando suas principais componentes

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

Finalmente as CHV que são subdivididas em CHVR e CHVD.

As CHV são os arranjos em que o barramento é feito em um rio e a descarga em outro. Este tipo de arranjo está e deverá continuar a ser bastante usado no Brasil devido à topografia de seu solo com rios nascentes e longos trechos escoando em altitudes consideráveis, casos, por exemplo, dos rios nas Serras do Mar e Mantiqueira onde na primeira em relação ao Oceano Atlântico há altitudes que superam 700 m e na segunda em relação a primeiras cotas que superam 800 m.” (SOUZA, 2009, p.39)

Nos exemplos descritos anteriormente os arranjos são de represamento (CHVR) que está ilustrado na figura 4. Já a figura 5 representa o outro tipo de arranjo possível que é o de desvio (CHVD) quando os dois rios escoam com diferença de cotas. Nessa primeira ilustração do arranjo do CHVD com sistema de baixa pressão constituído de canal e câmara de carga. Há também outro tipo de configuração para esse mesmo tipo de central hidrelétrica que contém um sistema de descarga em túnel revestido sobre pressão no qual a figura 5 ilustra os principais componentes do mesmo.

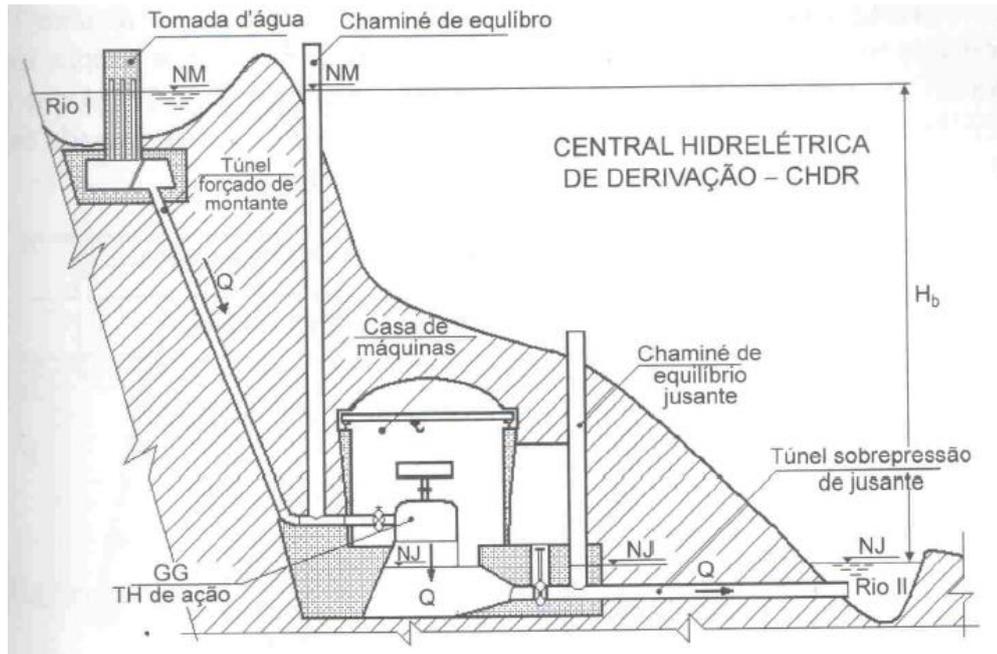


Figura 4 – Corte longitudinal esquemático em Central Hidrelétrica de Derivação
 Representando mostrando seus principais componentes

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

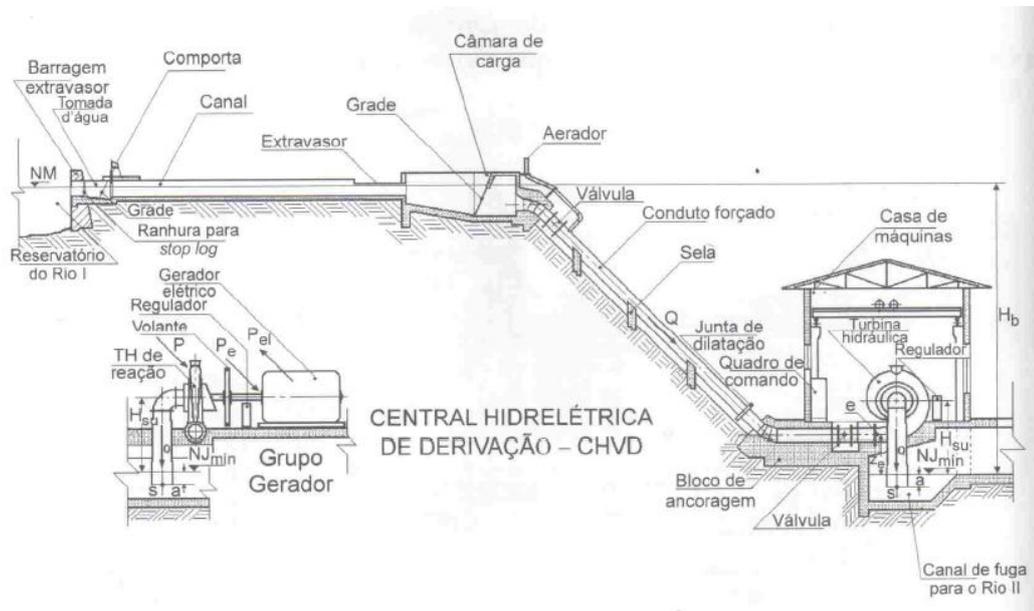


Figura 5 – Corte longitudinal esquemático em Central Hidrelétrica de Derivação Desvio
 mostrando seus principais componentes

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

2.4 ESTUDO INICIAL

Segundo Braga Jr e Salecker (1999), o primeiro item a ser levado em conta para elaboração de um projeto de MCH é se o potencial hidráulico do local atende as necessidades para geração de energia elétrica, e se o aproveitamento deste potencial é economicamente viável.

A estimativa do potencial hidrelétrico é a análise preliminar das características da bacia hidrográfica, especialmente quanto aos aspectos topográficos, hidrológicos, geológicos e ambientais, no sentido de verificar a vocação da bacia para geração de energia elétrica (ELETROBRÁS, 2010).

2.4.1 Levantamento topográfico

Os estudos topográficos devem ser realizados em toda a área de influência da MCH e estar em concordância com a NBR 13133 - Execução de levantamento topográfico (ELETROBRÁS, 2010).

De acordo com Braga Jr e Salecker (1999), os levantamentos topográficos iniciais devem considerar: queda natural, perfis do terreno, local das obras e área inundada.

2.4.2 Levantamento geológico e geotécnico

Os levantamentos e estudos geológicos e geotécnicos são realizados objetivando 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 e locais prováveis para lançamento de bota-fora, instalação de canteiro e alojamento de operários (ELETROBRÁS, 2010).

2.4.3 Levantamento hidrológico

O levantamento hidráulico é realizado com o objetivo de determinar a vazão de projeto, para determinar a potência instalada; vazão de cheia máxima, para dimensionamento do vertedouro; definição do desvio do rio, para dimensionamento e construção da barragem (BRAGA JR; SALECKER, 1999).

2.5 ARRANJOS TÍPICOS DE MICRO CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Segundo o Manual de Micro centrais Hidrelétricas da ELETROBRÁS & DNAEE (1985) as micro centrais hidrelétricas requerem arranjos com uma captação, uma adução à casa de máquinas, onde se processará a geração de energia, e o canal de restituição (canal de fuga) ao rio.

Poderá ser necessária a construção de uma barragem simples, caso o curso do rio tenha grandes variações de níveis de água, com a respectiva estrutura vertedoura. A altura desta barragem pode variar de uma simples soleira vertedoura no leito do curso da água até 3 metros de altura. Essa configuração não apresenta uma grande capacidade de armazenamento de água o que caracteriza um comportamento fio d'água, onde "as vazões naturais do curso d'água serão pelo menos iguais ou maiores que a vazão necessária para atender à potencia elétrica desejada." (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

O arranjo mais conveniente para uma micro central é a que contém a combinação da adução, captação, casa de máquinas e canal de fuga. O arranjo levando em conta as estruturas que devem conter no mesmo, leva em conta o conhecimento dos seguintes fatores (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985);

2.6 TIPOS DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS QUANTO À CAPACIDADE DE REGULARIZAÇÃO

Segundo a ELETROBRÁS (2010) existem três tipos de PCH quanto à capacidade de regularização, são elas:

- a Fio d'Água;
- de Acumulação, com Regularização Diária do Reservatório;
- de Acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório.

2.6.1 Central Hidrelétrica fio d'água

Emprega-se essa configuração nos casos em que “as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista”. (ELETROBRÁS, 2010).

Nesse caso, despreza-se o volume do reservatório criado pela barragem. O sistema de adução deverá ser projetado para conduzir a descarga necessária para fornecer a potência que atenda à demanda máxima. O aproveitamento energético local será parcial e o vertedouro funcionará na quase totalidade do tempo, extravasando o excesso de água. (ELETROBRÁS, 2010)

As PCH fio d'água apresentam algumas simplificações como a dispensa de estudos de regularização de vazão e de estudos de sazonalidade de carga elétrica do consumidor e torna mais fácil a concepção e estudos da tomada d'água. Já na parte do projeto tem-se que as barragens geralmente são baixas, pois somente tem a função de desviar a água para o circuito de adução. Há também um menor custo com indenizações pelo motivo das áreas inundadas serem pequenas. Caso não tenha flutuações consideráveis no nível de água do reservatório, não existe a necessidade da tomada d'água atender a depleções do nível de água. Logo quando a adução primária é projetada através de canal aberto, não havendo a necessidade de atender as depleções, a profundidade do mesmo será a menor possível assim como no caso em que for necessária uma chaminé de equilíbrio que terá uma altura mínima devido ao mesmo motivo (ELETROBRÁS, 2010).

2.6.2 Central Hidrelétrica de acumulação com regulamentação diária do reservatório

Empregado em casos onde as vazões de estiagem do rio são inferiores à vazão necessária para o fornecimento de potência para suprir a demanda máxima do mercado consumidor. Nessa situação um aditivo será fornecido pelo reservatório para que atenda a demanda desejada (ELETROBRÁS, 2010).

2.6.3 Central Hidrelétrica de acumulação com regulamentação diária do reservatório

Segundo a ELETROBRÁS (2010) uma PCH de acumulação com regulamentação mensal é aquela no projeto da mesma considera “dados de vazões médias mensais no seu dimensionamento energético, analisando as vazões de estiagem médias mensais, pressupõe-se uma regularização mensal das vazões médias diárias, promovida pelo reservatório.”

2.7 ESTRUTURA DE ESTUDO DE UMA USINA HIDRELÉTRICA DE PEQUENO PORTE

Segundo Balarim (1996) uma usina hidrelétrica de pequeno porte, no dimensionamento das estruturas e equipamentos, obedece uma seqüência lógica iniciando com o estudo de desvio do rio e termina com a especificação da linha de transmissão, conforme a figura 6.

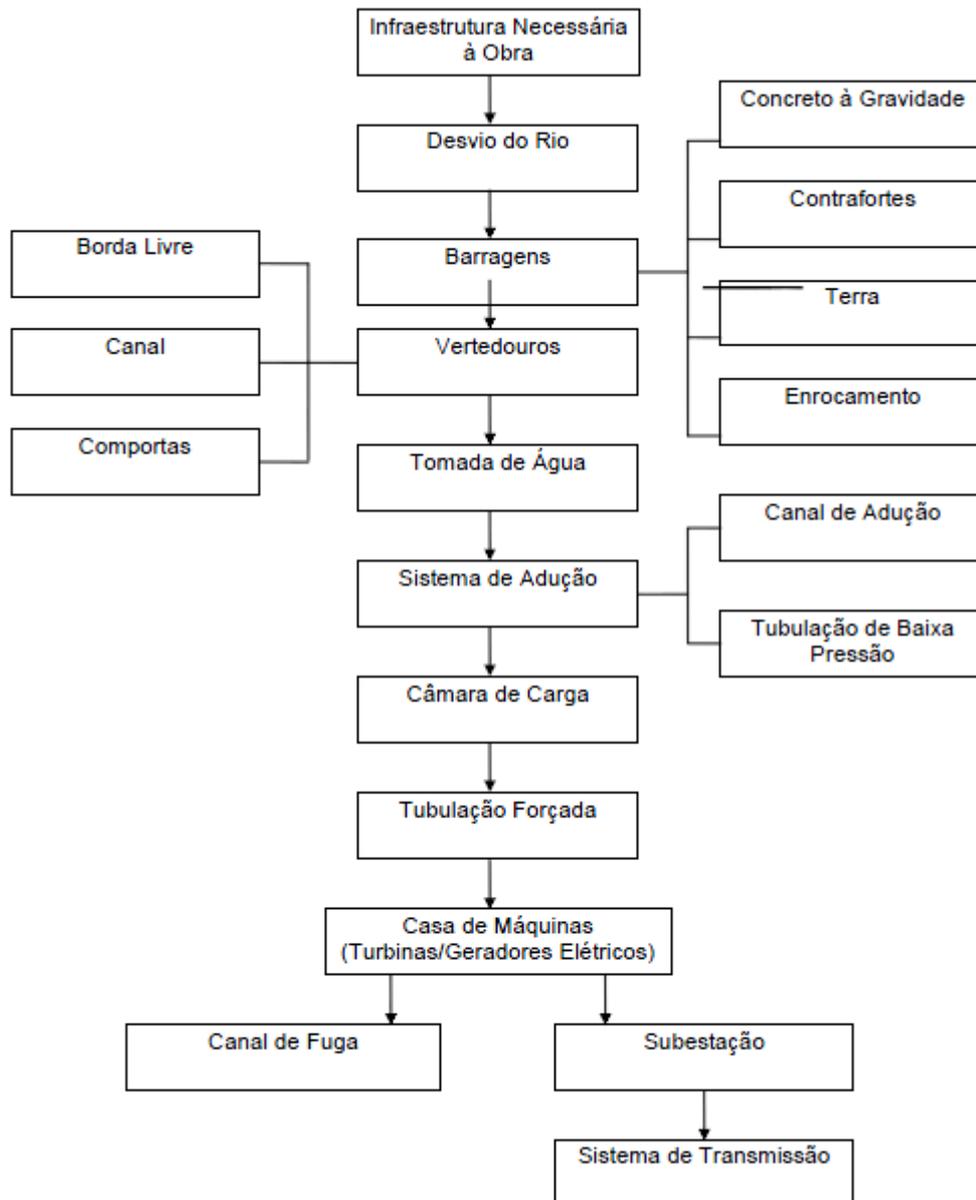


Figura 6 – Etapas para o dimensionamento das estruturas e equipamentos de uma usina hidrelétrica de pequeno porte

Fonte: Balarim (1996).

Já para o estudo e implantação de uma pequena central a ELETROBRÁS (2010) apresenta dois fluxogramas um com as atividades para o estudo inicial e projeto, figura 7, e outro, figura 8, com a seqüência para implementação da usina.

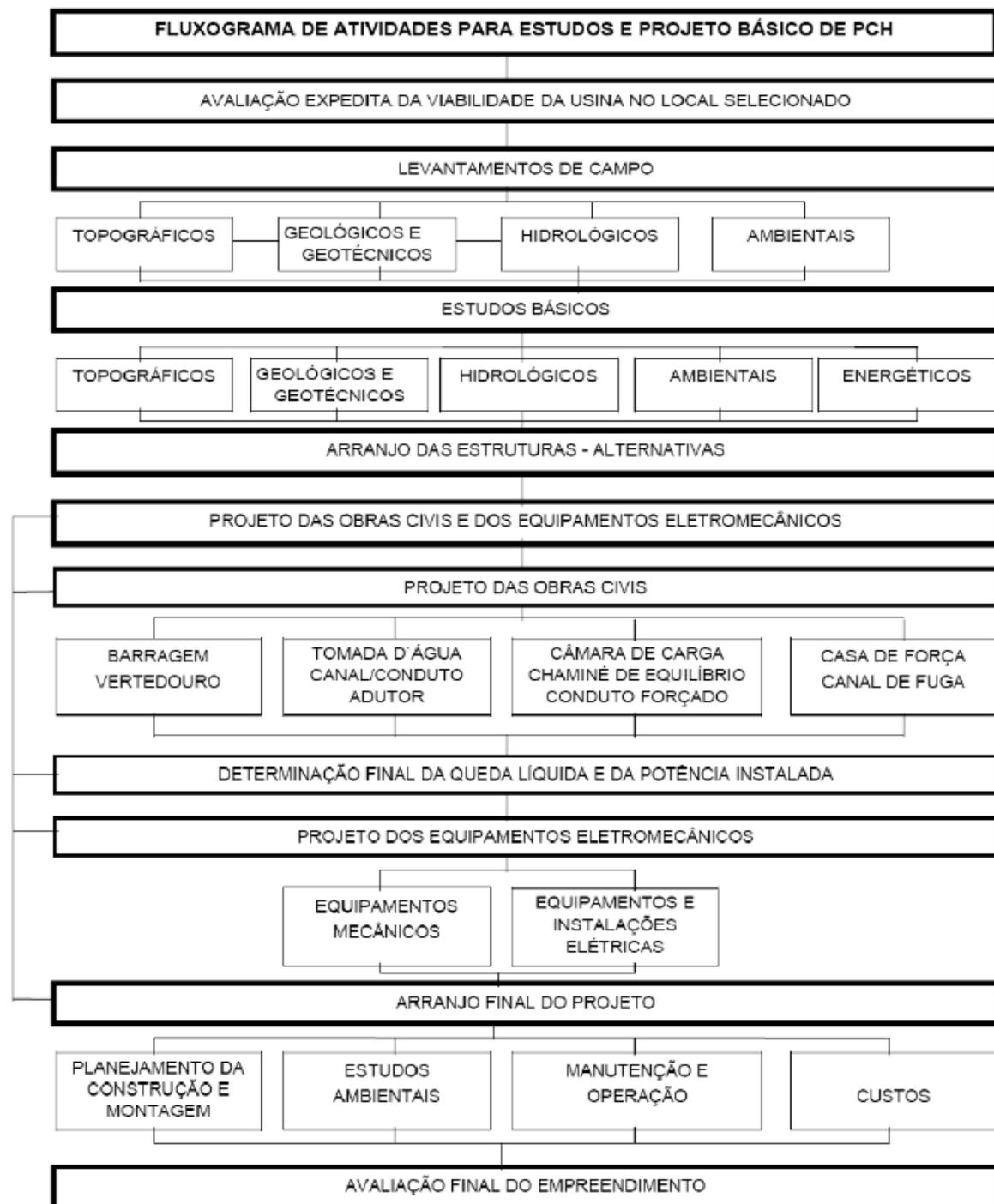


Figura 7 – Fluxograma de Atividades para Estudos e Projeto Básico de PCH

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

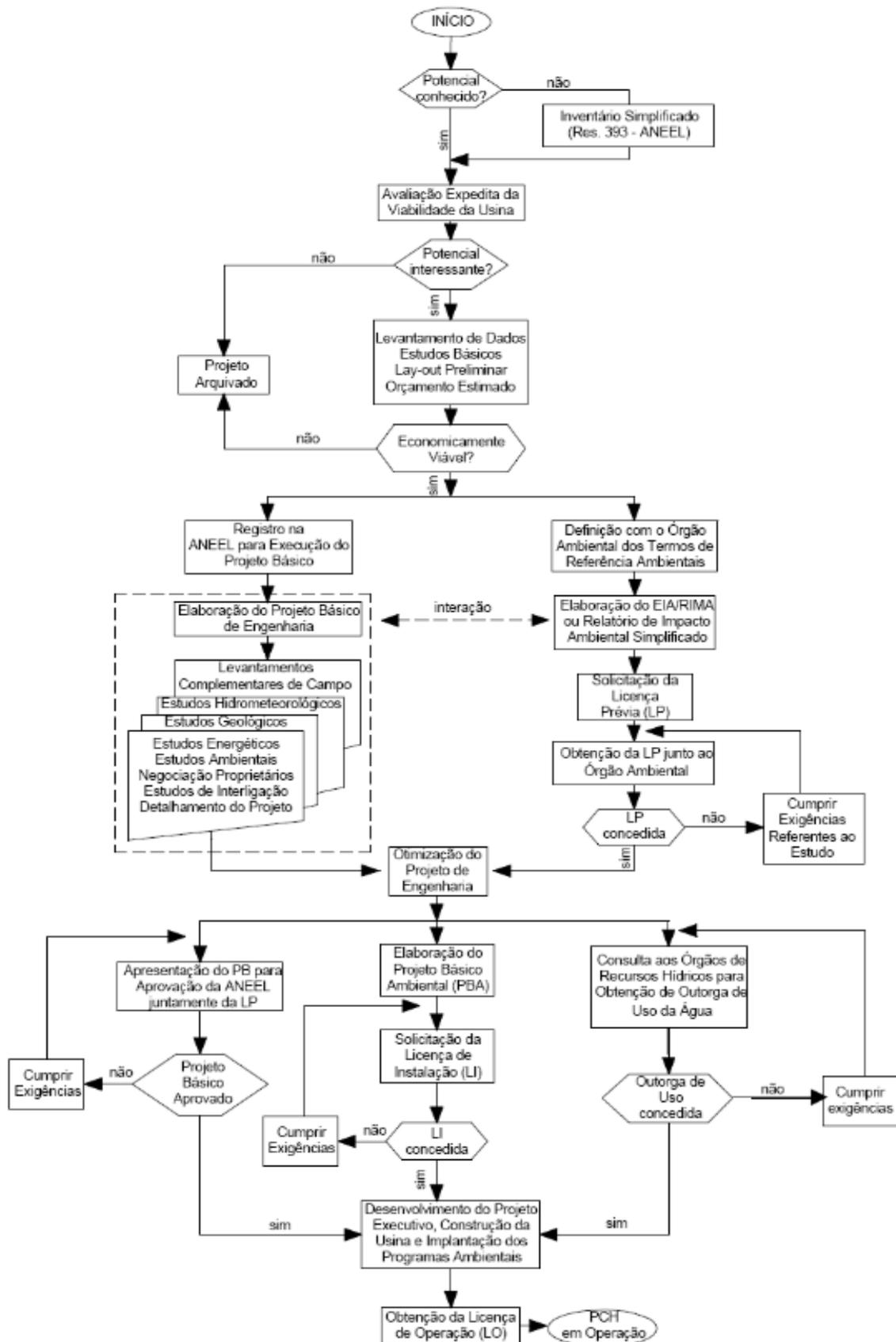


Figura 8 – Fluxograma de Implantação de uma PCH

Fonte: ELETROBRÁS (2010)

2.8 BARRAGENS

Os homens constroem barragens para a utilização dos recursos hídricos há mais de 5000 anos, como é o caso da barragem de Jawa, na Jordânia (LORIGGIO, 2003).

As barragens têm como função primária o armazenamento de água, para fins de abastecimento, irrigação, controle de cheias, navegação, recreação ou geração de energia. A forma construtiva adotada deve ser definida pelas disponibilidades locais de material de construção e pelas características das fundações (CREAGER, 1944).

Hwang (1984) define a barragem como “estrutura disposta em um curso de água para nele armazenar ou reduzir a vazão normal de água. A água acumulada por uma barragem pode atingir grandes alturas, dependendo, naturalmente, da altura da barragem”. Pequenas são as barragens com menos de 10 metros de altura.

A barragem é a estrutura que tem a função de represar a água, visando, com a elevação do nível d’água do rio, possibilitar a alimentação da tomada d’água. No caso de locais de baixa queda, a barragem tem também a função de criar o desnível necessário à produção da energia desejada. Também possibilita a captação para desvio; a elevação do nível das águas, para que ocorra o desnível coerente com um aproveitamento hidrelétrico; e o represamento do rio para que se formem reservatórios regularizadores de vazões, possibilitando diversos tipos de aproveitamento (ELETROBRÁS, 2010).

A ELETROBRÁS & DNAEE (1985) destaca que para as micro centrais hidrelétricas a altura máxima da barragem é da ordem de 3 m. A seleção do tipo de barragem deve considerar as características dos materiais disponíveis e como eles podem entrar em combinação para um melhor aproveitamento das obras.

Os principais tipos de estruturas de barramento utilizados em usinas hidrelétricas de pequeno porte são de concreto à gravidade, de contrafortes, de enrocamento e de terra compactada.

2.8.1 Barragem de terra

As barragens de terra são as estruturas mais usuais para contenção de água e formação de reservatórios, embora nas micro centrais hidrelétricas o seu emprego não chegue a ser generalizado.

Esse tipo de barragem é apropriado para locais onde a topografia se apresente suavemente ondulada, nos vales pouco encaixados, e onde existam áreas de empréstimo de materiais argiloso/arenosos suficientes para a construção do maciço compactado. Destaca-se que, no projeto, deve ser obrigatoriamente, analisado o balanceamento de materiais, no que diz respeito à utilização dos materiais terrosos provenientes das escavações exigidas para a execução da obra, como, por exemplo, as do canal de adução, se houver, e das fundações das estruturas de concreto (ELETROBRÁS, 2010).

Sua construção envolve o uso dos materiais de escavações e o uso de materiais locais naturais disponíveis e requerem um mínimo de processamento. Usando grandes quantidades de escavação e empréstimos locais disponíveis são fatores econômicos positivos relacionados a uma barragem de terra. Além disso, a fundação e as exigências topográficas para barragens de terra são menos restritas do que aquelas para outros tipos. É provável que as barragens de terra continuem a prevalecer mais do que outros tipos para finalidades de armazenamento, em parte porque o número de locais favoráveis para barragens de concreto está diminuindo em consequência do desenvolvimento extensivo do armazenamento de água. Isto é particularmente verdade nas regiões áridas e semi-áridas onde a conservação da água para a irrigação é uma necessidade fundamental (DEPARTAMENTO DO INTERIOR DOS ESTADOS UNIDOS, 1987).

Segundo Balarim (1996) por se tratar de uma estrutura executada em solo, deve-se tomar uma série de providências de proteção dos paramentos, tanto de montante quanto de jusante. É usual se lançar, no paramento de montante, uma camada de enrocamento (rip-rap) com o objetivo de proteger a face contra os efeitos das ondas do lago. No paramento de jusante são plantadas, normalmente, algumas espécies de gramíneas que funcionam no sentido de impedir o efeito da erosão causada pela chuva.

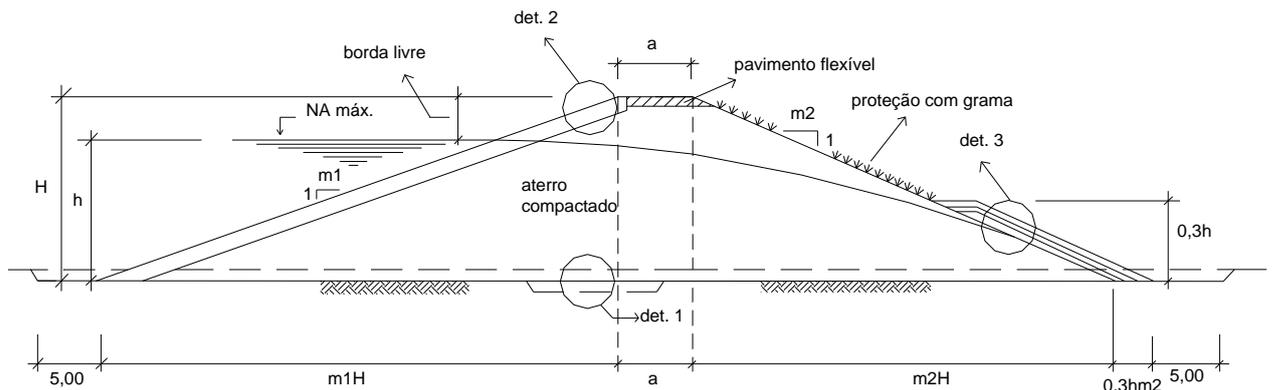


Figura 9 – Barragem Homogênea ($H \leq 10m$)

Fonte: Eletrobrás (2010).

2.8.2 Barragem de contrafortes

De acordo com Souza, Santos e Bortoni (2009) barragem de contrafortes, formada por elementos planos ou curvos que recebem, numa de suas faces o empuxo da água, transmitindo-o nos apoios a contrafortes que têm perfil triangular convencional e cuja função é transmitir o peso próprio de toda estrutura e demais esforços às fundações.

As barragens de contraforte são compostas de plataforma lisa e de múltiplas estruturas de arco. O tamanho das formas e reforços de aço requerido geralmente compensa as economias no concreto. Um razoável número de barragens de contraforte foram construídas nos anos 30, quando a relação custos de mão-de-obra aos custos de materiais era comparativamente baixa. O custo deste tipo de construção geralmente não é competitivo com os outros tipos de barragens quando os custos de mão-de-obra são elevados (ALVES, 2007).

2.8.3 Barragem de concreto de gravidade

A barragem de concreto do tipo muro-gravidade, capaz de resistir, com seu peso próprio, à pressão da água do reservatório e à subpressão das águas que se infiltram pelas fundações (ELETROBRÁS, 2010).

Esse tipo de barragem é recomendado para vales estreitos, encaixados, em maciço rochoso pouco fraturado e com boas condições de fundação. A seção da barragem pode incorporar o vertedouro quando as condições topográficas do local dificultarem a concepção de vertedouro lateral (ELETROBRÁS, 2010).

Quando resistem à ação das forças externas exclusivamente por efeito de seu peso próprio. O princípio estrutural da barragem de gravidade é o peso que constitui o seu corpo principal. As forças envolvidas mais significativas são a força da água sobre o paramento de montante, o peso da barragem propriamente dita, as pressões exercidas sobre o paramento de montante, devido aos depósitos sedimentares, as forças de subpressão e as forças criadas pelo efeito das ondas do reservatório sobre a estrutura (GARCEZ, 1962; ANDRADE, 1982; MASSON, 1988).

Investigações de campo estabelecem dados importantes sobre as condições das fundações. Tais dados, responsáveis pelas maiores preocupações dos projetistas, já que a estrutura repousa sobre um material natural com características de difícil determinação, podem, algumas vezes, até indicar a necessidade de uma mudança do eixo da barragem determinado no pré-dimensionamento.

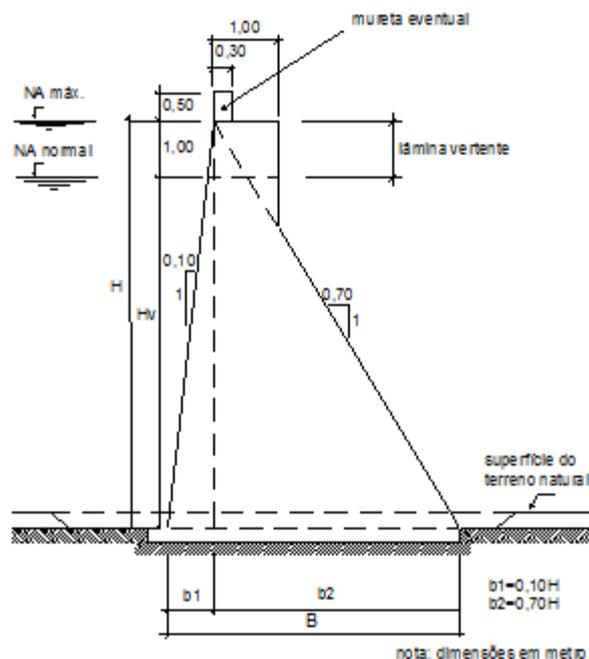


Figura 10 – Barragem de Concreto

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

2.8.4 Barragem de enrocamento

Esse tipo de barragem, com espaldares de rocha e núcleo impermeável, é apropriado para os vales medianamente encaixados em regiões rochosas, nas quais o capeamento de solo muitas vezes não existe ou é pouco espesso, onde existam condições adequadas de fundações e pedreiras facilmente exploráveis a custo competitivo e/ou excesso de escavações obrigatórias em rocha. A inexistência de áreas de empréstimo de solos argilosos torna antieconômica a adoção de barragem de terra nesses locais (ELETROBRÁS, 2010).

Quando construída com pedras lançadas e pedras arrumadas manual ou mecanicamente, cujas seções transversais têm uma forma intermediária entre a barragem à gravidade de concreto e a barragem de terra. Estas barragens possuem uma membrana impermeabilizante, geralmente no paramento ou talude de montante, ligada a um diafragma colocado nas fundações (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

As barragens de enrocamento são utilizadas quando se verifica uma grande disponibilidade de material rochoso, como pedra-de-mão e blocos de maior dimensão. Os fragmentos de rocha compõem o corpo principal da barragem, responsável pela estabilidade da mesma, sendo necessária uma zona de impermeabilização para assegurar a estanqueidade da estrutura.

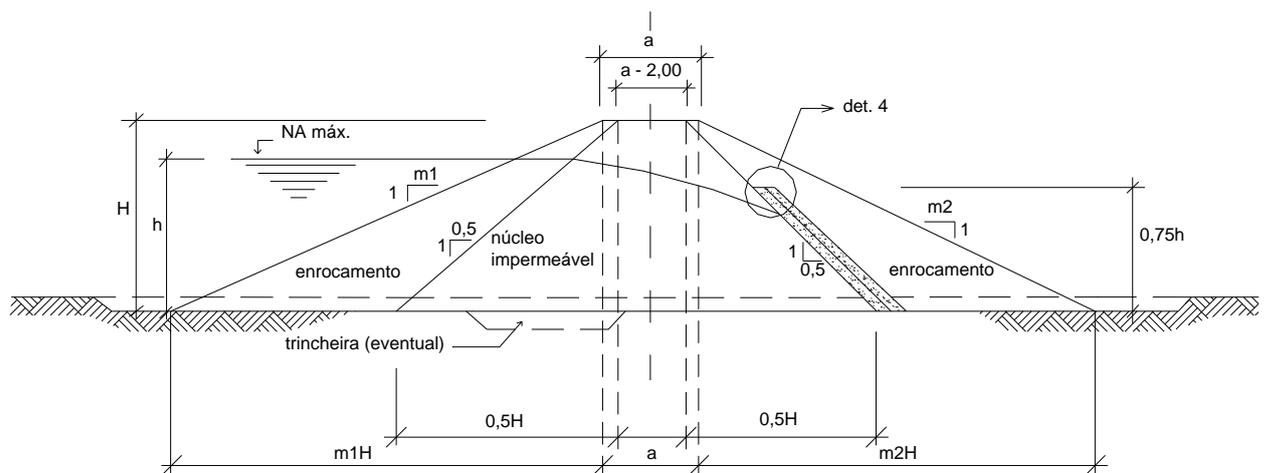


Figura 11 – Barragem de enrocamento convencional

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

2.9 VERTEDOIRO OU EXTRAVASOR

É uma obra projetada e construída com o objetivo de escoar o excesso d'água acumulado pelo reservatório, evitando o risco do nível d'água atingir a crista da barragem (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009). Entende-se então, que é uma estrutura hidráulica construída com o objetivo de escoar o excesso d'água acumulada pelo reservatório, não deixando ultrapassar a cota máxima permitida sem o perigo de danificar a barragem.

A imensa maioria dos aproveitamentos hidrelétricos tem necessidade de elementos destinados a liberar o excesso de água que aflui ao reservatório durante as cheias. Essas estruturas são, não raro, localizadas de modo a acarretar um mínimo de obras civis. Mesmo assim, os vertedouros respondem por uma parcela significativa dos recursos totais para a implantação de uma usina hidrelétrica de pequeno porte (BALARIM, 1996).

A operação segura dos vertedouros é o objetivo principal no projeto. A falha do vertedouro ao executar sua função do projeto pode conduzir à falha da barragem com danos a propriedade e possíveis perdas de vida (ALVES, 2007).

O perfil e a seção de escoamento do vertedouro devem levar em consideração as características locais. A descarga poderá ser feita, em lâmina livre ou então, com o auxílio de dispositivos de controle de vazão como, por exemplo, comportas que mantêm sempre constante o nível da água no reservatório. Em centrais de alta queda, a manutenção do nível do reservatório não é muito importante, mas em centrais de média e, principalmente, de baixa queda, a variação de nível no reservatório pode significar perda da queda disponível.

Existem diversos tipos de vertedouros. Os mais usados em usinas hidrelétricas de pequeno porte são, vertedouro de borda livre; vertedouro de canal; e, excepcionalmente, vertedouro com comportas.

2.9.1 Vertedouro de borda livre

O vertedouro com borda livre é projetado de forma a ter um perfil de escoamento que permita a descarga máxima para uma dada lâmina de água sobre a soleira do vertedouro sem causar danos provenientes do efeito de cavitação na

superfície de escoamento. Procura-se dar à curva de sua superfície um formato de ogiva (BALARIM, 1996).

O vertedouro funciona automaticamente, descarregando toda água que não for engolida pelas máquinas. A desvantagem deste tipo de vertedouro é que não se consegue regular o nível do reservatório, o que limita a lâmina máxima sobre a soleira. Para o projeto de usinas hidrelétricas de pequeno porte, ELETROBRÁS & DNAEE (1982) recomendam o valor máximo de 1 m para a lâmina de água sobre a soleira do vertedouro.

2.9.2 Vertedouro de canal

Os vertedouros de canal são utilizados quando as condições topográficas do sítio impedem que se faça outro tipo de arranjo para esta estrutura de escoamento. Normalmente, são encaixados entre uma encosta e a lateral da barragem, podendo, ainda, se projetar para dentro do reservatório, formando um canal de descarga com saída pela frente da barragem (BALARIM, 1996).

Este tipo de vertedouro somente é recomendado em situações muito específicas, pois o custo das obras de descarga é de tal ordem que onera significativamente o preço final da usina.

2.9.3 Vertedouro com comportas

Os vertedouros com comportas são os que apresentam as melhores características técnicas no que diz respeito ao extravasamento das vazões de cheia (ERBISTE, 1987). Entretanto, estes vertedouros têm elevado custo de instalação, operação e manutenção, o que muitas vezes faz com que se opte por uma das alternativas anteriores.

Os dispositivos de dissipação de energia devem ser utilizados para a proteção do pé dos vertedouros contra a ação destruidora do fluxo da água que, vindo em alta velocidade, se choca contra o fundo do mesmo. Normalmente, no final dos vertedouros existe a formação de um salto hidráulico, responsável pela criação de uma bacia de dissipação - elemento de proteção ao pé do vertedouro (BALARIM, 1996).

A quantidade de energia dissipada nos vertedouros por ocasião das cheias é, com frequência, superior à energia gerada na usina durante o mesmo período de tempo. Isto acontece devido ao fato de a vazão de cheia ser, não raro, superior à vazão de projeto da pequena central hidrelétrica (PCH) (BALARIM, 1996).

2.10 TOMADA D'ÁGUA

Segundo Braga Jr e Salecker (1999), a tomada d'água é a estrutura que, além de fazer a captação da água que será utilizada na geração de energia elétrica, tem o objetivo de evitar que partículas sólidas passem para o sistema hidráulico.

A tomada d'água permite que a água entre no conduto forçado que a levará até a turbina além de bloquear a entrada da água quando necessário. Possui grades de proteção para evitar que corpos estranhos transportados pela água danifiquem algum equipamento da PCH (GOMES, 2010).

Para realizar manutenção na tomada d'água, é necessária a instalação de comportas. Tal manutenção consiste na limpeza do desarenador, que armazena os sedimentos, e das grades de proteção que visam à retenção de corpos flutuantes (BRAGA JR; SALECKER, 1999).

A tomada d'água é dimensionada dividindo a vazão máxima de projeto pela máxima velocidade da água na grade de proteção, da ordem de 1m/s (GOMES, 2010).

Souza, Santos e Bortoni (2009) dizem que a tomada d'água pode ser, basicamente, de superfície ou afogada e sua locação deve levar em consideração os seguintes pontos:

- escoamento, isento de perturbações e de baixa velocidade;
- Mínimo transporte de materiais sólidos submersos e de superfície;
- Possibilidade de acesso à manutenção;
- Garantia de afogamento do conduto forçado ou do conduto de baixa pressão, de modo a eliminar a possibilidade de aeração externa no escoamento.

O projeto da tomada d'água em relação à sua geometria deve ser desenvolvido considerando critérios que resultem mínimas perdas de cargas, juntamente com escoamento com mínimo de perturbações (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 1999).

2.11 SISTEMA DE ADUÇÃO

De acordo com ELETROBRÁS (2010), as PCH's podem ser classificadas de duas maneiras quanto ao sistema de adução:

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

2.11.1 Canal de adução e conduto forçado

O canal de adução é projetado com o objetivo de levar água até a turbina, podendo ser construído de várias maneiras, inclusive utilizando o próprio terreno (BRAGA JR; SALECKER, 1999). O conduto forçado é a tubulação que liga o sistema de baixa pressão com a máquina hidráulica, levando a água sob pressão para a turbina (BRAGA JR; SALECKER, 1999). Essa tubulação pode ser construída com qualquer material capaz de resistir à pressão que ocorra em seu interior. São conhecidas aplicações de tubos feitos em ripas de madeira, tubos de PVC, tubulação de concreto e, o mais comumente utilizado, tubos de aço (BALARIM, 1996).

O dimensionamento do sistema do conduto forçado depende do número de turbinas, vazão turbinada e do comprimento da tubulação (BALARIM, 1996).

2.12 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

É uma estrutura, em concreto ou aço, constituída de um reservatório cilíndrico, de eixo vertical, implantada entre o trecho de adução de baixa declividade, constituído por uma tubulação em baixa pressão e o trecho de adução de grande declividade, constituído por uma tubulação forçada. (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

As chaminés de equilíbrio, ou câmaras de carga, são colocadas como componentes hidráulicos entre a barragem e a tubulação forçada (ALVES, 2007).

Segundo Souza, Santos e Bortoni (2009), o dimensionamento hidráulico da chaminé de equilíbrio deve garantir que, em partida brusca, não entre ar no conduto forçado e que, em parada brusca, garanta a sua própria estabilidade assim como a do conduto de baixa pressão.

2.13 CASA DE MÁQUINAS

É definida como “edificação que abriga os grupos geradores destinados à produção de energia elétrica, bem como os equipamentos auxiliares necessários ao funcionamento da central hidrelétrica” (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985). Seu posicionamento deve ser também levado em consideração devido aos custos relacionados, bem como deve ser observada com atenção a cota do seu piso para que a cheia do rio não a alcance. É importante realizar análise a respeito da posição da casa de máquinas em relação à câmara de carga ao canal de fuga e à distância do consumidor.

De um modo geral, a casa de máquinas pode fazer parte integrante da estrutura da barragem ou estar isolada. O primeiro caso ocorre na maioria das Centrais Hidrelétricas de Represamento (CHR) e nas Centrais Hidrelétricas de Baixa Queda (CHBQ), enquanto nas Centrais Hidrelétricas de Desvio (CHD) as casas de máquinas são isoladas e a céu aberto. (SOUZA, SANTOS, BORTONI, 2009).

Após determinar seu posicionamento e a posição da turbina e de seu tipo, avalia-se a disposição dos equipamentos eletromecânicos, deixando o espaço necessário ao redor dos equipamentos para futura manutenção, incluindo possível desmontagem.

O arranjo típico da casa de força é como em todo projeto dessa natureza, condicionado pelo tipo da turbina e do gerador. Deverão ser previstas, nas dependências da casa de força, áreas destinadas aos equipamentos elétricos e mecânicos auxiliares definidos em cada projeto (ELETROBRÁS, 2010).

Além disso, em cada caso, deverá ser analisada a necessidade de área específica para montagem dos equipamentos, cujas dimensões básicas deverão ser fornecidas pelo fornecedor dos equipamentos principais (ELETROBRÁS, 2010).

ELETROBRÁS & DNAEE (1985) consideram que as casas de máquina sejam do tipo “exterior” cobertas. Sua infra-estrutura é constituída pela instalação “do equipamento eletromecânico e de um pequeno banheiro”. A infra-estrutura envolve fundações e piso (com material que evite o acúmulo de sujeira). A superestrutura é constituída por paredes (de madeira, alvenaria ou pré-moldadas), cobertura (com materiais de baixa condutibilidade técnicas) e dimensionamento cuja instalação típica é recomendável.

2.14 GERADOR

Em PCH's sempre são utilizados geradores síncronos, que operam com velocidade constante independentemente da carga elétrica que é colocada em seus terminais. O dimensionamento do gerador, normalmente solucionado pelo fabricante, considera variáveis como número de pólos, potência, tensão, fator de potência, rendimento, sistema de excitação e aterramento (BALARIM, 1996).

O controle de velocidade do grupo turbo-gerador é feito por um regulador de velocidade, que faz com que a turbina tenha sua potência controlada mesmo com as variações de cargas solicitadas pelo gerador (BALARIM, 1996)

Eletrobrás (2010) dimensiona o gerador em função da potência disponível no eixo da turbina através da equação 1.

$$P_G = P_T \times \left(\frac{\eta_G}{\cos \phi} \right) \quad (1)$$

Onde:

P_G - potência do gerador (kVA);

P_T - potência no eixo da turbina (kW);

η_G - rendimento do gerador;

$\cos \phi$ - fator de potência do gerador.

De acordo com GOMES (2010), o fator de potência é definido em função das necessidades do sistema elétrico ao qual o gerador será conectado e o rendimento, se não indicado pelo fabricante, considera-se:

- 96% para geradores até 1MVA;
- 97% para geradores até 10MVA;
- 98% para geradores até 30MVA;

2.15 TURBINAS HIDRÁULICAS

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) as turbinas hidráulicas (TH) são classificadas em TH de ação e de reação (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009). Na primeira a energia hidráulica disponível é transformada em cinética e posteriormente se transforma em energia mecânica, quando incide nas pás do rotor. Já na de reação, o rotor é totalmente submerso na água e com o escoamento da água ocorre uma diminuição tanto da velocidade como da pressão entre a saída e a entrada do rotor (GOMES, 2010).

A escolha de uma turbina para aplicação em usinas de pequeno porte deve considerar a facilidade de operação e manutenção, capacidade de atendimento (em casos de problemas durante o funcionamento), disponibilidade do fabricante em fornecer peças sobressalentes. E principalmente à confiabilidade e robustez do equipamento, que nesse tipo de aplicação geralmente opera de modo não assistido (ELETROBRÁS, 2010).

Já para escolher a velocidade de rotação da turbina, outros fatores são considerados como potência nominal, altura da queda, tipo de turbina e gerador.

Sendo que este último é o que mais influencia na escolha da velocidade de rotação. Os tipos geradores são assíncrono, síncrono com ou sem multiplicador de velocidade. A velocidade de rotação, para gerador assíncrono e síncrono sem multiplicador, é considerada a mesma para turbina e gerador sendo que se deve procurar uma velocidade síncrona mais próxima da calculada que é encontrada pela equação 2 (ELETROBRÁS, 2010).

$$n = \frac{120 \times f}{p} \quad (2)$$

Onde :

n - velocidade de rotação síncrona (rpm);

f - frequência da rede (Hz);

p - número de pólos do gerador.

A tabela 4 apresenta os valores de velocidade de rotação correspondente ao número de pólos, geralmente utilizados na frequência de 60 Hz:

Tabela 4 – Velocidade de rotação para turbinas hidráulicas

No DE PÓLOS	ROTAÇÃO (rpm)
4	1.800
6	1.200
8	900
10	720
12	600
14	514,3
16	450
18	400
20	360
24	300
28	257,1
30	240
32	225
36	200

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

Segundo a ELETROBRÁS (2010) Outros parâmetros utilizados para a escolha da turbina é a queda líquida (m) e a vazão da turbina (m³/s) conforme ilustra a figura 12, na qual ainda é possível obter a potência (kW) estimada ao interpolar os valores.

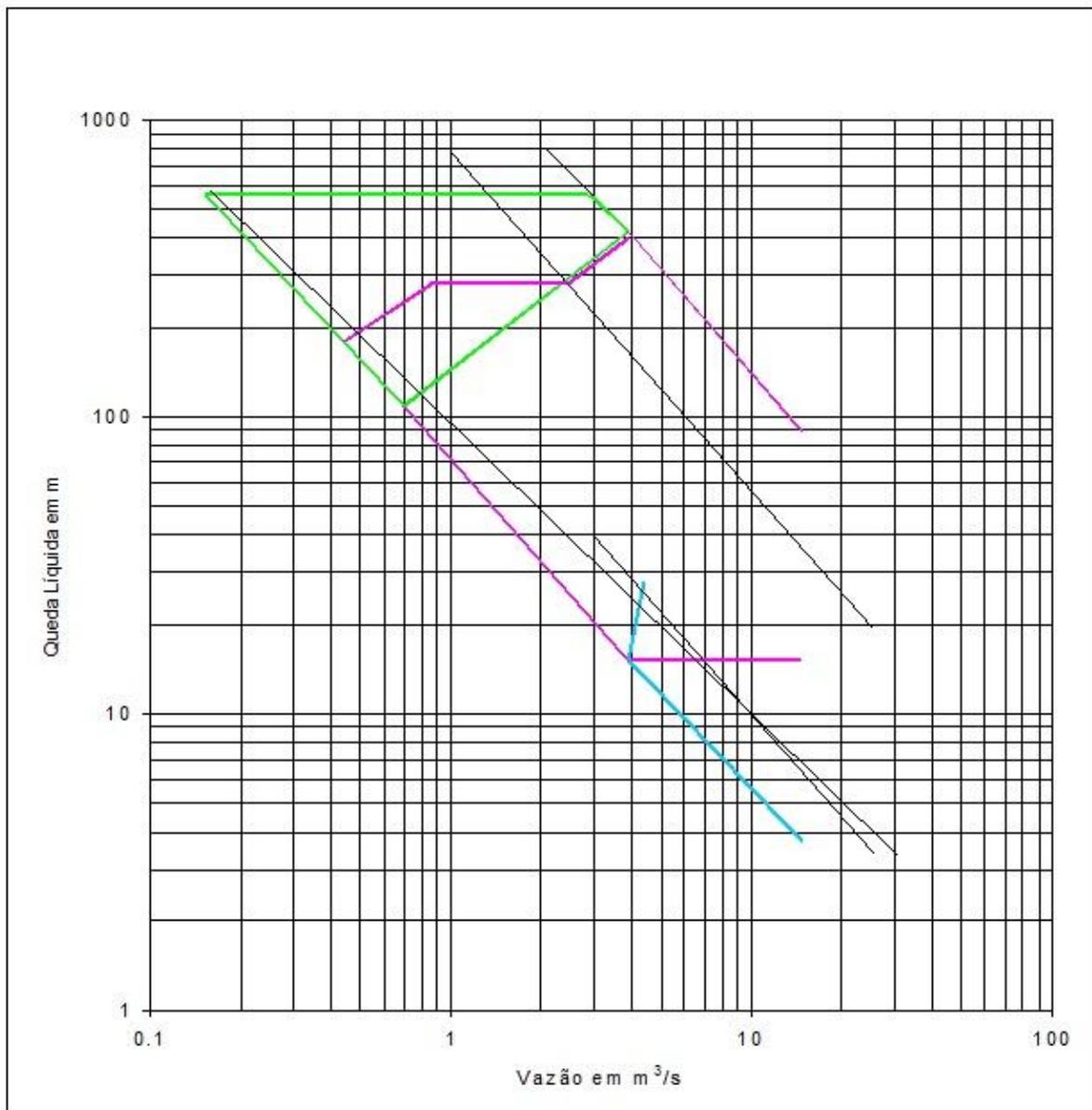


Figura 12 – Escolha da turbina

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

Com esses dados é possível determinar a velocidade específica da turbina a partir da equação 3, utilizando a potência nominal da turbina. Ou calcula-se utilizando a Norma NBR 12591 a partir da vazão nominal da turbina pela fórmula 4. (ELETROBRÁS, 2010).

$$n_s = \frac{nP_n^{0,5}}{H_{liq}^{1,25}} \quad (3)$$

Onde:

n_s - velocidade específica da turbina;

n - velocidade de rotação da turbina (rpm);

P_n - potência nominal da turbina (kW);

H_{liq} - queda líquida (m).

$$N_{qr} = \frac{nQ_r^{0,5}}{H_r^{0,75}} \quad (4)$$

Onde:

N_{qr} - velocidade específica da turbina;

n - velocidade de rotação da turbina (rpm);

Q_r - vazão garantida ou nominal (m³/s);

H_r - queda nominal (m).

E da potência encontrada na figura 12, que é a potência de saída do gerador e considerando um rendimento de 85% para o gerador e turbina, tem-se a equação 5 (ELETROBRÁS, 2010).

$$P_G = 9,81 \times Q \times H_{liq} \times \eta_T \times \eta_G \quad (5)$$

Onde:

P_G - potência na saída do gerador (kW);

Q - vazão da turbina (m^3/s);

H_{liq} - queda líquida (m);

η_T - rendimento da turbina;

η_G - rendimento do gerador.

2.15.1 Turbinas Pelton

As turbinas Pelton são pouco utilizadas em pequenas centrais no Brasil, devido a pequena quantidade de lugares do nosso relevo que tenham quedas suficientemente altas. E são classificadas como uma turbina de ação, pois para provocar o movimento de rotação elas utilizam a velocidade do fluxo de água (GOMES, 2010).

Esta turbina consiste em uma roda circular que tem na sua periferia um conjunto de copos, ou conchas, sobre as quais é inserido tangencialmente um jato de água por um ou mais injetores que são distribuídos uniformemente na periferia da roda. Existem duas opções de eixo para as turbinas Pelton, o eixo horizontal e o vertical e são utilizados em situações de pequenas vazões e elevadas quedas úteis (100 a 500m) em potências que variam de 500 a 12.500 kW (GOMES, 2010).

Segundo Gomes (2010) as turbinas Pelton apresentam um bom desempenho quando operam sob cargas parciais, tendo um funcionamento suave e quase sem cavitação até 20% de sua carga nominal. A fabricação, regulagem e instalação são relativamente simples e podem ser usadas em usinas de grande potência, bem como são largamente utilizadas em micro usinas em localidades de sítios, e fazendas gerando algumas dezenas de kW. As figuras 13 e 14, respectivamente, ilustram uma turbina Pelton e o seu rotor.



Figura 13 – Turbina Pelton

Fonte: Hacker (2011).

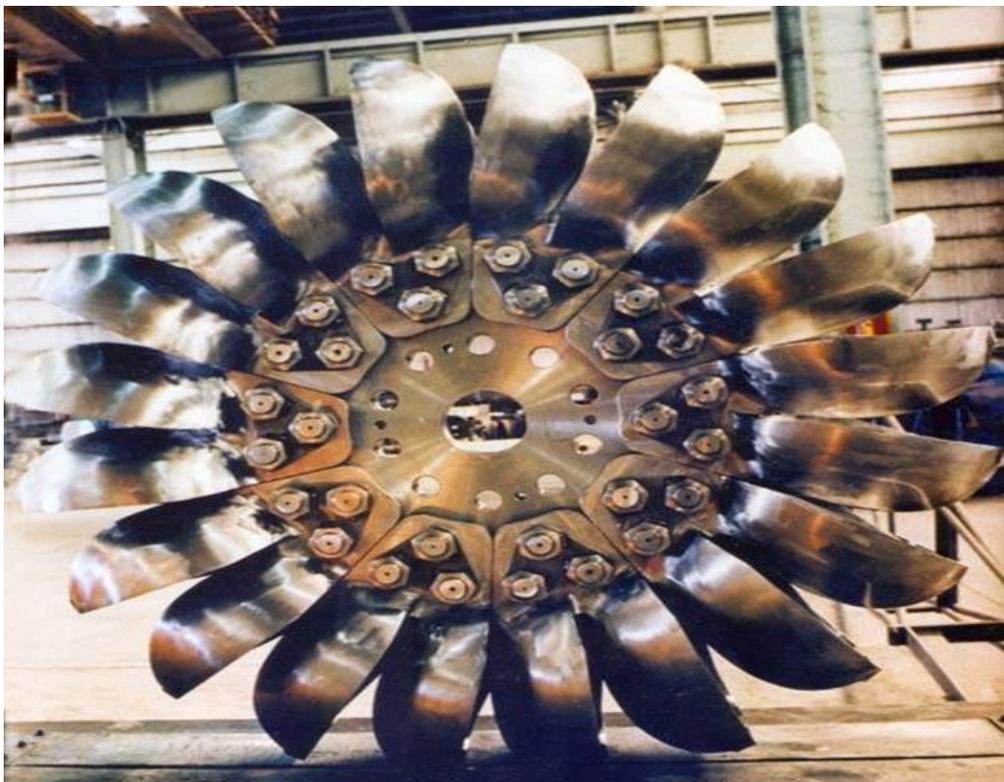


Figura 14 –Rotor Pelton

Fonte: Usiminas (2011).

2.15.2 Turbinas Francis

A turbina Francis, ao contrário da Pelton, é uma turbina de reação devido ao escoamento na zona da roda se processar a uma pressão inferior à da atmosférica. Ainda comparando com a turbina Pelton, as turbinas Francis têm um rendimento máximo mais elevado, com velocidades maiores e com dimensões menores. A característica desta turbina é ter uma roda formada por uma coroa de aletas fixas que constituem uma série de canais hidráulicos recebendo radialmente a água e a orientam para a saída do rotor em uma direção axial (GOMES, 2010).

A entrada na turbina se dá ao mesmo tempo por múltiplas comportas de admissão que ficam dispostas ao redor da roda, e simultaneamente o trabalho é feito sobre as aletas para rodar a turbina e o gerador. Dentre as outras partes constituintes estão a câmara de entrada podendo ser fechada ou aberta com uma forma espiral e o distribuidor que é composto por uma roda de aletas que podem ser móveis e fixas e que tem a função de regular a vazão e o tudo de saída da água (GOMES, 2010).

A aplicação dessas turbinas se dá em quedas úteis de 15 a 250 metros e uma potência entre 500 e 15.000 kW, além de serem de fácil adaptação para diferentes quedas e vazões. As turbinas Francis conseguem manter alto desempenho com cargas parciais de até 70% da carga nominal e funcionam adequadamente com uma carga entre 50% e 70% da carga mesmo tendo uma perda contínua de rendimento. As figuras 15,16 e 17 ilustram a turbina, o arranjo típico e o rotor, respectivamente (GOMES, 2010).

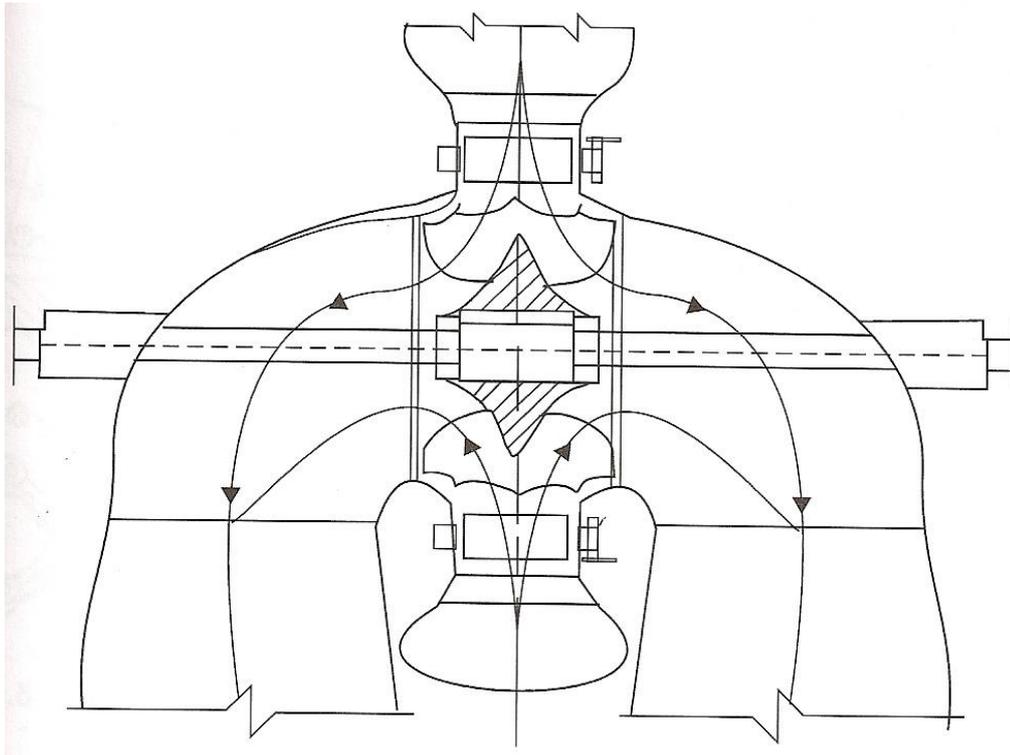


Figura 15 – Turbina Francis Dupla
 Fonte: Souza, Santos e Bortoni (2009).

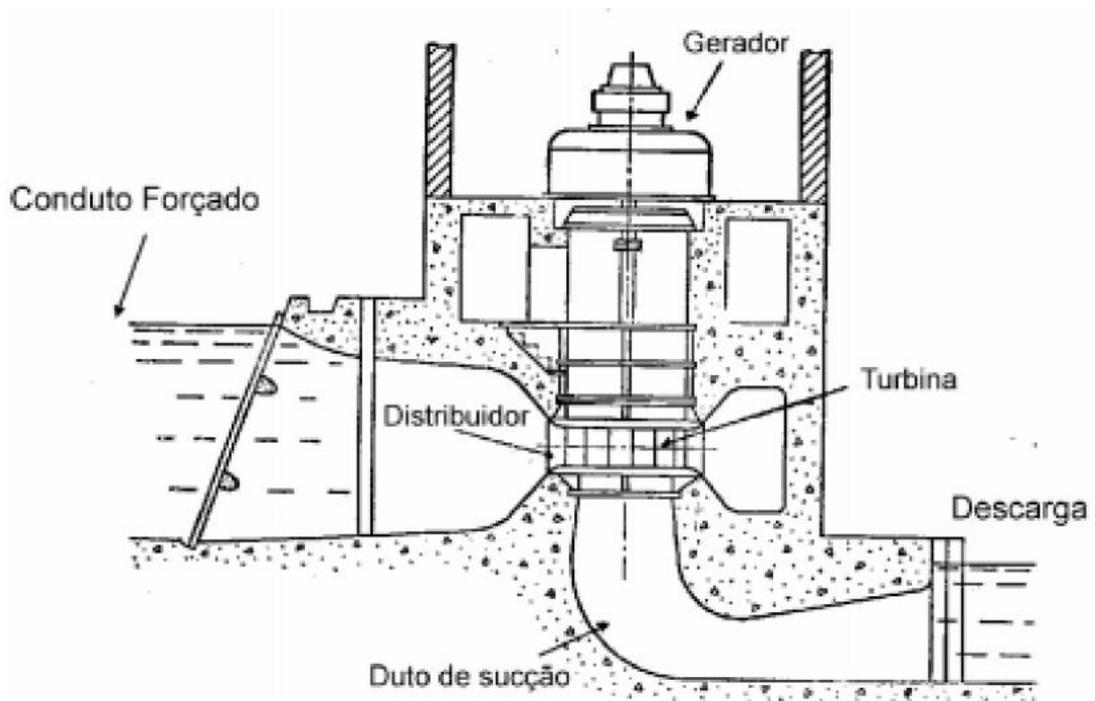


Figura 16 – Arranjo típico de Turbina Francis de eixo vertical
 Fonte: Costa (2003).



Figura 17 – Rotor da Turbina Francis

Fonte: Usiminas (2011).

2.15.3 Turbinas Axiais – Kaplan e Hélice

Ambas são turbinas de reação e utilizadas para grandes vazões e baixas quedas. As turbinas Kaplan e Hélice geralmente têm eixo vertical, porém é possível encontrar com eixo horizontal que são designadas turbinas Bulbo (GOMES, 2010).

São constituídas por um distribuidor, por uma roda com quatro ou cinco pás no formato de hélices e por uma câmara de entrada que pode ser fechada ou aberta. As turbinas Hélices são as turbinas que apresentam estas pás fixas. Já a Kaplan são as que as pás são móveis o que torna possível variar o ângulo de ataque por meio de um mecanismo de orientação que o regulador da turbina tem a função de controlar (GOMES, 2010).

Segundo Gomes (2010) as turbinas tipo Kaplan são reguladas pela ação de distribuidor e com o auxílio da variação do ângulo de ataque das pás do rotor,

possível pelas pás serem móveis, o que possibilita uma boa regulação. As figuras 18, 19, 20 e 21 ilustram respectivamente a turbina Hélice, rotor Hélice, turbina Kaplan e o rotor Kaplan.



Figura 18 – Turbina hélice

Fonte: Alves (2007).

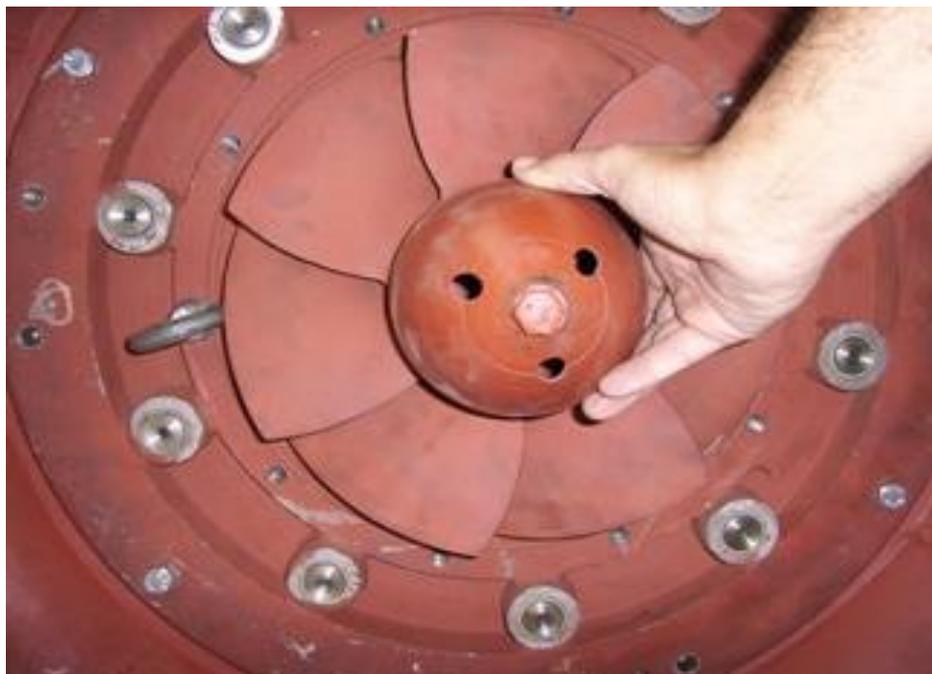


Figura 19 – Rotor hélice

Fonte: Alves (2007).



Figura 20 – Turbina Kaplan
Fonte: Alves (2007).



Figura 21 – Rotor Kaplan
Fonte: Alves (2007).

2.16 MEIO AMBIENTE E IMPACTOS AMBIENTAIS

Segundo o Greenpeace (2004), as pequenas micro e minicentrals hidrelétricas estão em bom posicionamento quanto às emissões de carbono, tornando-se instrumentos importantes para cumprir os cortes previstos no Protocolo de Kyoto e das metas defendidas pelo Brasil no Rio+10, e em Johannesburgo, que é a obtenção de 10% de energia mundial de fontes renováveis até 2010.

As micros e minicentrals hidrelétricas constituem uma forma mais rápida de atender à demanda de energia elétrica da forma como prevê o programa Luz para Todos, mas conforme a lentidão de seu ritmo, é difícil que sua meta de atender a todos os cidadãos até 2008 se concretize.

Para a identificação e a avaliação dos impactos ambientais de forma detalhada, o meio ambiente pode ser representado por “componentes-síntese”, abrangendo: Ecossistemas Aquáticos, Ecossistemas Terrestres, Modos de Vida, Organização Territorial e Base Econômica (ELETROBRÁS, 2010).

Quando houver a previsão de ocorrência de impactos de grande magnitude, provocados pelo empreendimento, esses órgãos deverão exigir a edição e discussão pública de um Estudo e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA). Normalmente, esses impactos potenciais estão associados à existência de populações próximas, à vizinhança com áreas ambientalmente sensíveis, à concepção técnica do aproveitamento envolvendo túneis, à redução da vazão liberada para jusante, dentre outros aspectos (ELETROBRÁS, 2010).

O EIA tem os seguintes objetivos principais: avaliar a viabilidade ambiental do empreendimento e fornecer subsídios para o seu licenciamento (LP) junto ao órgão ambiental competente; complementar e ordenar uma base de dados temáticos sobre a região onde se inserem as obras propostas; permitir, através de métodos e técnicas de identificação/avaliação de impactos, o conhecimento e o grau de transformação que a região sofrerá com a introdução das obras propostas, como agente modificador; estabelecer programas que visem prevenir, mitigar e/ou compensar os impactos negativos e reforçar os positivos, promovendo, na medida do possível, a inserção regional das obras propostas; caracterizar a qualidade ambiental atual e futura da Área de Influência; definir os programas de

acompanhamento/monitoramento que deverão ser iniciados e/ou continuados durante e/ou após a implantação do empreendimento (ELETROBRÁS, 2010).

O desenvolvimento sustentável, utilização do recurso natural de modo seguro e racional, a partir de fontes tradicionais de energia pode ainda possibilitar a sustentabilidade ambiental, em âmbito local e global, bem como reduzir a desertificação, a pobreza rural, a eficiência energética e econômica. (CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL, 2001).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 HISTÓRIA E CARACTERÍSTICAS DE BOCAIÚVA DO SUL

A denominação Bocaiúva vem de uma homenagem a Quintinho Bocaiúva então Ministro das Relações Exteriores do Governo Provisório, conforme Decreto n.º 019 de 11 de janeiro de 1980. Entre riquezas naturais que formam: o Salto do Inferno, as Cachoeiras do Feixo e do Uberaba e Grutas dos Campinhos. Rico em minerais cabendo citar a extração de chumbo, faz parte da Região Metropolitana de Curitiba (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL, 2011).

O município de Bocaiúva do Sul possui uma área territorial de 826 km², distante 41,60 km da Capital (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL, 2011).

De acordo com dados do IBGE (2011), o município está localizado a uma altitude média de 980 m, localizando-se com as coordenadas: Latitude 25°13'00" e Longitude 49°06'00". Possui como áreas limítrofes os municípios de Colombo, Campina Grande do Sul, Rio Branco do Sul, Tunas do Paraná e Adrianópolis.

Criado pela Lei n.º 05 de 16 de março de 1934, o município de Bocaiúva do Sul foi desmembrado do município de Colombo (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL, 2011).

Na data de 02 de janeiro de 1974 o município foi incluso na constituição oficial da Região Metropolitana de Curitiba, fazendo parte do 1º Anel Metropolitano² (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL, 2011).

² O 1º Anel Metropolitano é composto pelos seguintes municípios: Balsa Nova, Bocaiúva do Sul, Contenda, Itaperuçu, Mandirituba e Rio Branco do Sul.



Figura 22 – Localização geográfica do município de Bocaiúva do Sul: Visão geral da localização Federal. Inserção Regional

Fonte: Prefeitura municipal de Bocaiúva do Sul (2011).

3.1.1 Aspectos demográficos, físicos e bióticos

3.1.1.1 População

De acordo com o Censo Demográfico do IBGE no ano de 2010, o município contava com uma população de 10.987 habitantes, dos quais cerca de 61% da população habitam a zona rural e apenas 39% do total se distribuem na zona urbana.

Tabela 5 – População censitária segundo a zona

População	1991	2000	2007	2010
População Total	10.657	9.050	9.533	10.987

Fonte: IBGE (2010).

3.1.1.2 Hidrografia

O município possui uma rede hidrográfica bastante densa que vai em direção ao Oceano Atlântico pelo Rio Ribeira do Iguape. A área está inserida na Bacia do Ribeira, sub-bacia do Rio Capivari (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL, 2011).

Próximos ao núcleo urbano da Região metropolitana de Curitiba estão localizados as nascentes dos principais rios, Rio Ribeira e Capivari, a outorga desses rios é exclusivamente para o abastecimento urbano e a produção de energia (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL, 2011).

3.1.1.3 Clima

O clima é classificado como subtropicais úmidos Mesotérmicos verões frescos com a temperatura média inferior a 22°C, invernos com ocorrências de geadas severas e freqüentes com a temperatura média inferior a 18°C, não apresentando estação seca (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL, 2011).

3.1.1.4 Vegetação

Devido o município encontra-se numa altitude média de 980m, apresenta uma formação florestal de transição com predomínio de espécies de bracatinga, formação típica de Floresta Ombrófila Mista³ e plantio de Pinus. No município encontram-se ainda remanescentes florestais preservados, com a presença de fauna típica da região (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL, 2011).

³ Também denominada Mata de Araucária

3.2 USINA RONCADOR

De acordo com o Instituto de Águas do Paraná a Usina de Roncador localiza-se no município de Bocaiúva do Sul localizada ao Leste do Estado do Paraná – latitude $25^{\circ}11'14''S$ e $49^{\circ}08'23''W$.

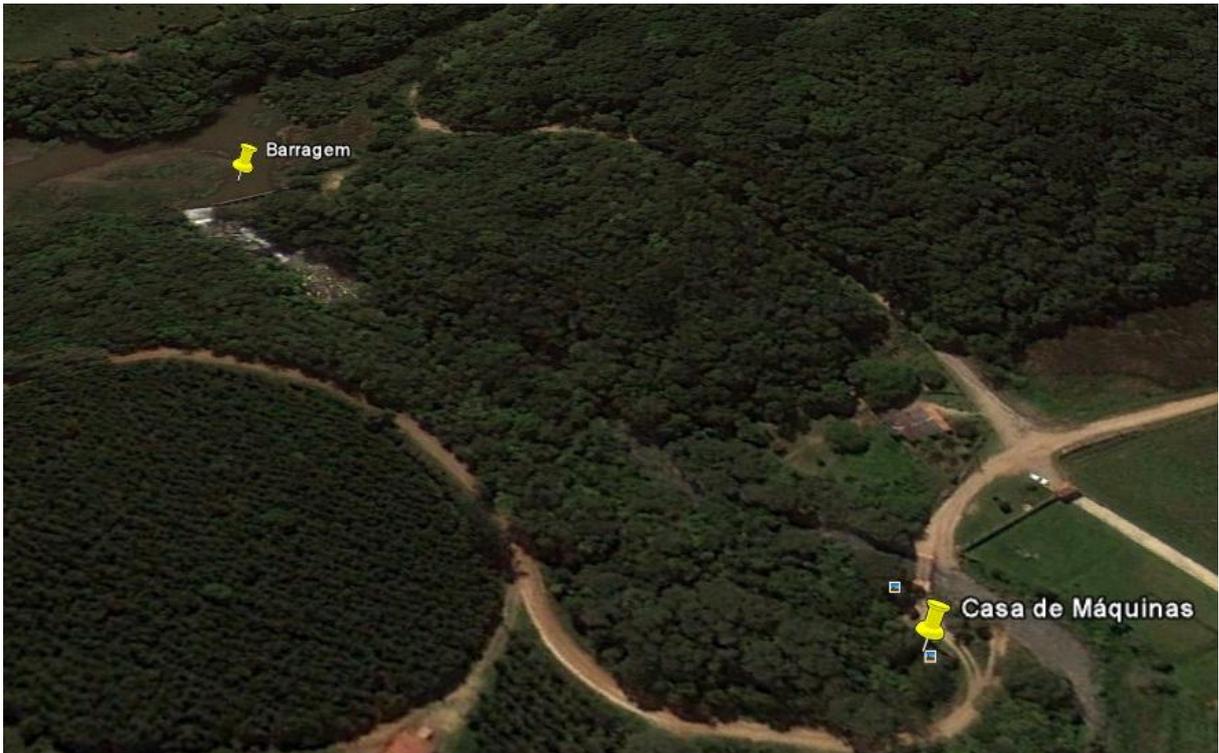


Figura 23 – Vista aérea da hidrelétrica Roncador
Fonte: Google Earth (2011).

De acordo com a prefeitura municipal de Bocaiúva do Sul, entre 1947 e 1951 o Sr. Manoel Costacurta foi o prefeito, e em sua gestão realizou 4 obras de relevância para o município: hospital (hoje Hospital Municipal Santa Júlia); o Grupo Escolar Cel. Gordiano Dias Batista (atual Colégio Estadual "Carlos Alberto Ribeiro" ensino de 1º e 2º graus); a usina Hidroelétrica Roncador, atualmente desativada; e o Clube Recreativo Bocaiuvense.

Segundo o Instituto das Águas do Paraná o início da operação ocorreu em 1953 sendo composto de dois geradores, um de 200kw e outro de 30kw ambos com turbina do tipo Francis. A sua desativação ocorreu em 1959.

A Usina de Roncador apresenta área de 101.164,42 m², distante 3 km de Bocaiúva do Sul e a 44,60 km de Curitiba. Faz parte da Bacia Hidrográfica do Ribeira.



Figura 24 – Identificação do local de instalação da MCH Roncador
Fonte: Própria (2011).

Embora sem nenhum tipo de infra-estrutura, a antiga Usina e sua represa são muito procuradas pelos moradores da região, pois a represa serve como tanque para pescarias. Há ainda uma queda d'água com aproximadamente 115 m que empresta o nome ao local.

3.2.1 Dados hidroenergéticos da Usina de Roncador

Os principais dados hidroenergéticos disponíveis da Usina de Roncador foram medidos em pesquisas no local onde está instalada sendo uma vazão máxima de 2,08m³/s e uma queda bruta de 14,8 m convalidados pelo método do vertedouro.

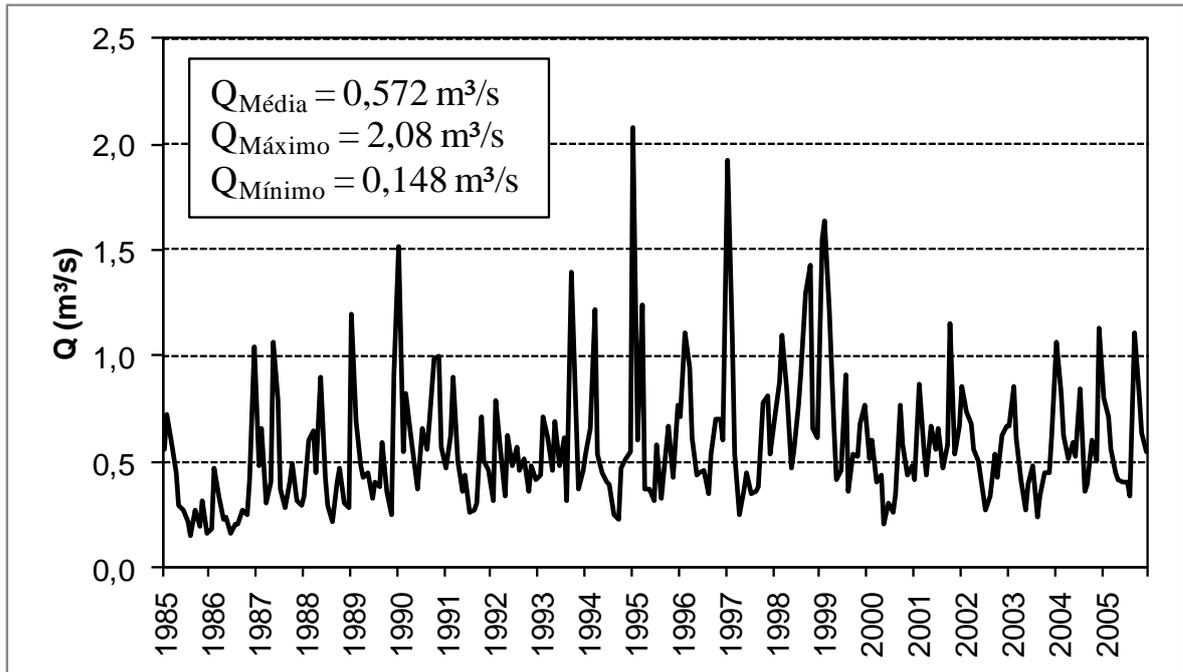


Figura 25 – Fluviograma da MCH Roncador

Fonte: Reis, Filho, Souza (2011).

3.2.2 Reservatório

Esta Usina tem seu funcionamento a fio de água, isto é, o volume criado pela barragem é desprezado. A vazão de estiagem atende a demanda máxima prevista instalada. Sua barragem possui altura pequena, pois sua função é desviar água para o circuito de adução.

Com essas características tem-se uma menor área de alagamento, facilitando o entendimento com os proprietários que circundam do aproveitamento.

A represa vem sofrendo assoreamento contínuo pelo acumulo de solo desprendido de erosões ocasionado pela diminuição da mata ciliar e das demais coberturas vegetais naturais. Apresenta bancos de sedimentos cobertos de vegetação e a presença em grande número de taboa e aguapés que deverão ser retirados pelo processo mecânico. Ocasionalmente a redução do volume de água, tornando-a turva e impossibilitando a entrada de luz e oxigênio para algas e peixes. No caso da represa da Usina de Roncador, esta ação antrópica tem-se mostrado crescente desde a desativação da usina.



Figura 26 – Represa da hidrelétrica Roncador

Fonte: Própria (2011)

3.2.3 Determinação da potência aproveitável

A potência máxima em kW da microcentral hidrelétrica de Roncador será calculada mediante para os valores de vazão disponíveis na figura 25, obtida pelo método do vertedouro. A queda medida de 14,8 m.

Esse potencial é determinado através da equação 6.

$$P = 7,16 \times H \times Q \quad (6)$$

$$P = 6,8 \times H \times Q \quad (7)$$

Onde:

P - potência (kW);

Q - vazão disponível do curso d'água (m³/s);

H - queda bruta (m).

A potência considerando a perda de energia no sistema adutor é estimada em 5% (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985), modificando a equação 6 transformando-a na equação 7.

3.2.3.1 Potência aproveitável para vazão máxima

Substituindo o valor da vazão máxima (2,08 m³/s) obtido na figura 25 nas equações 6 e 7 respectivamente, tem-se:

$$P = 7,16 \times 14,8 \times 2,08$$

$$P = 220,41 \text{ kW}$$

$$P = 6,8 \times 14,8 \times 2,08$$

$$P = 209,33 \text{ kW}$$

A potência aproveitável considerando a máxima vazão sem as perdas no sistema de adução é de 220,41 kW. Já a mesma potência considerando as perdas no sistema de adução é de 209,33 kW.

3.2.3.2 Potência aproveitável para vazão média

Substituindo o valor da vazão média (0,572 m³/s) obtido na figura 25 nas equações 6 e 7 respectivamente, tem-se:

$$P = 7,16 \times 14,8 \times 0,572$$

$$P = 60,61 \text{ kW}$$

$$P = 6,8 \times 14,8 \times 0,572$$

$$P = 57,56 \text{ kW}$$

A potência aproveitável considerando a vazão média sem as perdas no sistema de adução é de 60,61 kW. Já a mesma potência considerando as perdas no sistema de adução é de 57,56 kW.

3.2.3.3 Potência aproveitável para vazão mínima

Substituindo o valor da vazão média (0,148 m³/s) obtido na figura 25 nas equações 6 e 7 respectivamente, tem-se:

$$P = 7,16 \times 14,8 \times 0,148$$

$$P = 15,68 \text{ kW}$$

$$P = 6,8 \times 14,8 \times 0,148$$

$$P = 14,89 \text{ kW}$$

A potência aproveitável considerando a mínima vazão sem as perdas no sistema de adução é de 15,68 kW. Já a mesma potência considerando as perdas no sistema de adução é de 14,89 kW.

3.2.4 Determinação da potência necessária

A determinação da potência do necessário atendimento ao consumo da carga elétrica das instalações é executada “por meio das cargas elétricas horárias de todos os componentes da instalação. A maior carga horária (pico) encontrada define a potência necessária a instalar na central”. (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

Um sistema de carga elétrica, funcionando dentro de um horário e período de consumo estabelecido, é caracterizado por um coeficiente chamado fator de carga, que é obtido através da equação 8.

$$F_c = \frac{Q_{méd}}{Q_{máx}} \quad (8)$$

$$F_c = \frac{0,572}{2,08}$$

$$F_c = 0,275$$

Onde:

F_c - fator de carga;

$Q_{méd}$ - vazão média (m³/s);

$Q_{máx}$ - vazão máxima (m³/s).

3.3 BARRAGEM

A barragem existente na MCH do Roncador é do tipo muro-gravidade e de concreto com uma base de pedras argamassadas. Segundo o Manual de Microcentrais Hidrelétricas (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985) esse tipo de barragem consiste de um muro cuja seção transversal é similar a um triângulo retângulo e é recomendável para vales relativamente estreitos onde o represamento requer alturas próximas a 3 m, e boas fundações em rocha pouco fraturada. Outra razão para essa aplicação é quando devido a encostas íngremes e rochosas dificultam a construção de um vertedouro lateral, construindo-se o vertedouro em um trecho central rebaixado.

Para facilitar a adequação do local para esse tipo de barragem as fundações e ombreiras devem ser de rocha resistente e pouco fraturada. A fácil construção de acessos e a disponibilidade de aproveitamento de materiais da região também ajudam na adequabilidade do local (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

A figura 27 ilustra as partes constituintes da barragem de concreto.

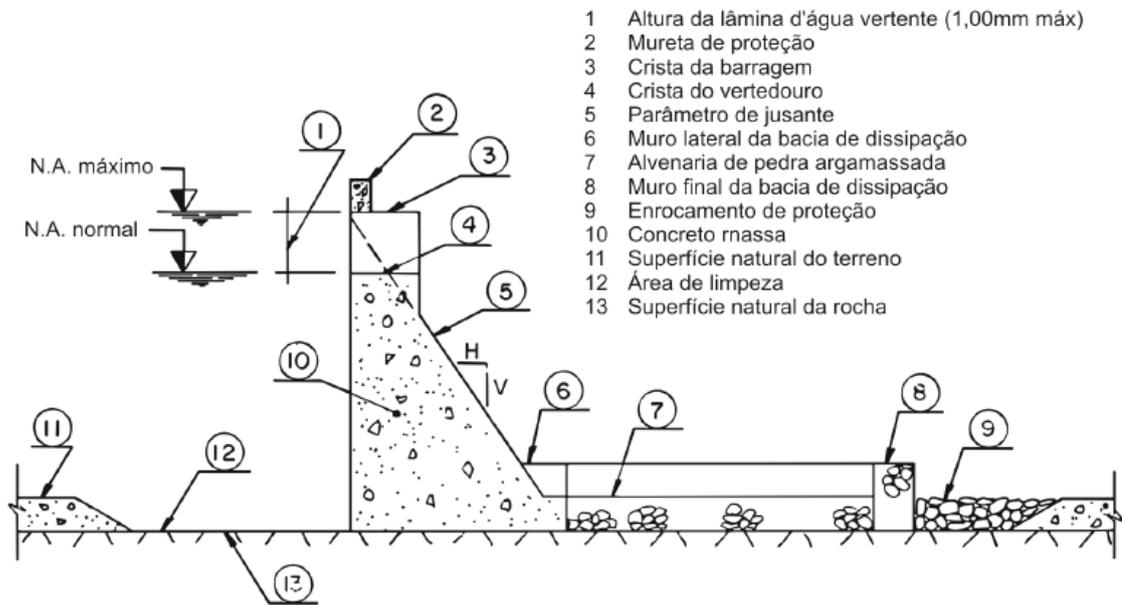


Figura 27 – Partes constituintes da barragem de concreto

Fonte: ELETROBRÁS & DNAEE (1985).



Figura 28 – Vista da base da barragem da hidrelétrica Roncador

Fonte: Própria (2011).

A estrutura existente na MCH do Roncador tem altura de 2,57 m, largura de 58 m, crista de 0,55 m. No trecho à jusante deve ser feito, para amortecer o impacto da água extravasada pelo vertedouro, um tanque ou uma bacia de dissipação. Sendo que esse tanque deve ter a mesma largura do vertedouro e seu fundo deverá ser feita uma laje de alvenaria de pedra argamassada caso a rocha não seja muito resistente. Essa laje adicionada a uma camada de pedras tem como função proteger a rocha da erosão (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).



Figura 29 – Vista da barragem da hidrelétrica Roncador

Fonte: Própria (2011).

Na crista da barragem deve ser construída uma mureta de proteção contra ondas e a construção da estrutura deve ser feita em blocos com juntas verticais vedadas (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

Na barragem existente não tem a mureta de proteção contra ondas e a bacia de dissipação é a base de pedras conforme figura 30.



Figura 30 – Vista da base de pedras

Fonte: Própria (2011).



Figura 31 – Contrafortes de concreto

Fonte: Própria (2011).

As dimensões da barragem, do trecho vertedouro e da bacia de dissipação podem ser visualizadas na figura 32:

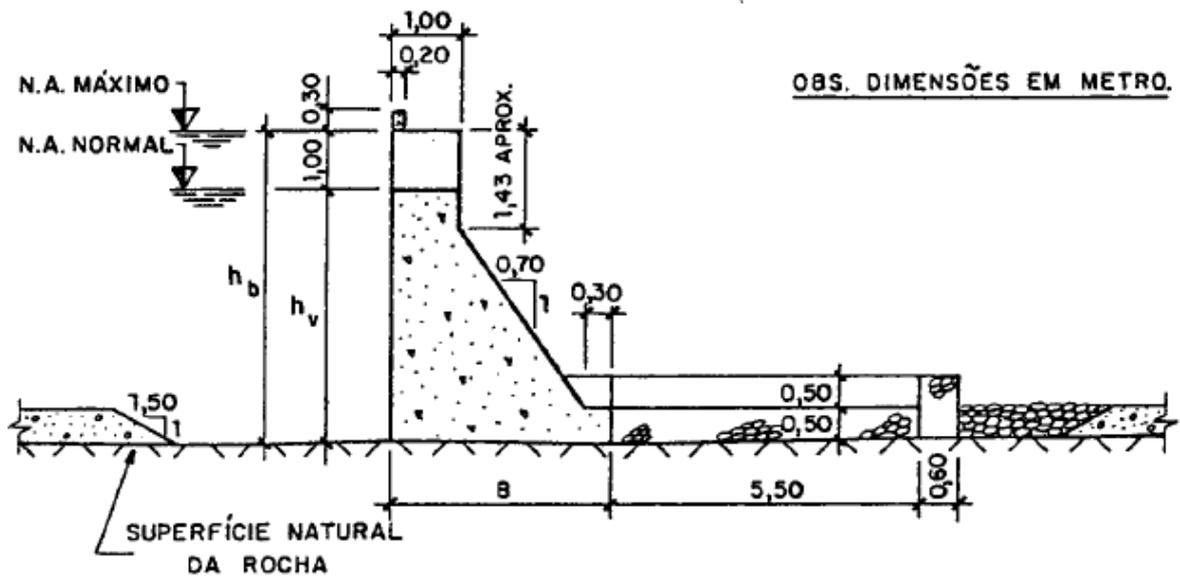


Figura 32 – Dimensões de barragem

Fonte: ELETROBRÁS & DNAEE (1985).

Como a barragem na usina mede 2,57 m, utiliza-se a equação 9 apresentada nas Diretrizes para Projetos de PCH (ELETROBRÁS, 2010).

$$B = 0,7 \times h_b \quad (9)$$

$$B = 0,7 \times 2,57$$

$$B = 1,8m$$

Onde:

B - base da barragem (m);

h_b - altura da barragem (m).

A barragem apresenta erosão no lado direito do talude de jusante, porém essas pequenas erosões não comprometem sua utilização.



Figura 33 – Base da barragem da hidrelétrica Roncador

Fonte: Alves (2011).



Figura 34 – Erosão na barragem da hidrelétrica Roncador

Fonte: Própria (2011).

A barragem apresenta contrafortes para apoio da parede vertical, 9 no lado esquerdo à jusante e 8 no lado direito. Esse contraforte apresenta largura de 0,52 m, altura de 2,6 m e comprimento de 2,6 m. O espaçamento entre os contrafortes é de 1,6 m. Essas medidas variam de acordo com a extensão da barragem, sendo esses resultados os mais encontrados.

3.4 VERTEDOURO

O vertedouro da usina de Bocaiúva do Sul é incorporado pela barragem, isto é, na barragem de concreto tem um trecho rebaixado que é o vertedouro. A estrutura existente tem um comprimento de 7,08 m, crista de 0,54 m e altura de lâmina d'água de 0,47 m e nada impede sua utilização.



Figura 35 – Vertedouro da hidrelétrica Roncador

Fonte: Própria (2011).



Figura 36 – Vista lateral do vertedouro da hidrelétrica Roncador
Fonte: Própria (2011).

Para dimensionar a base da largura do vertedouro, cuja barragem é de concreto, segundo o Manual de Microcentrais Hidrelétricas (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985), é calculado da mesma maneira que uma barragem feita de alvenaria com pedras argamassadas conforme equação 10:

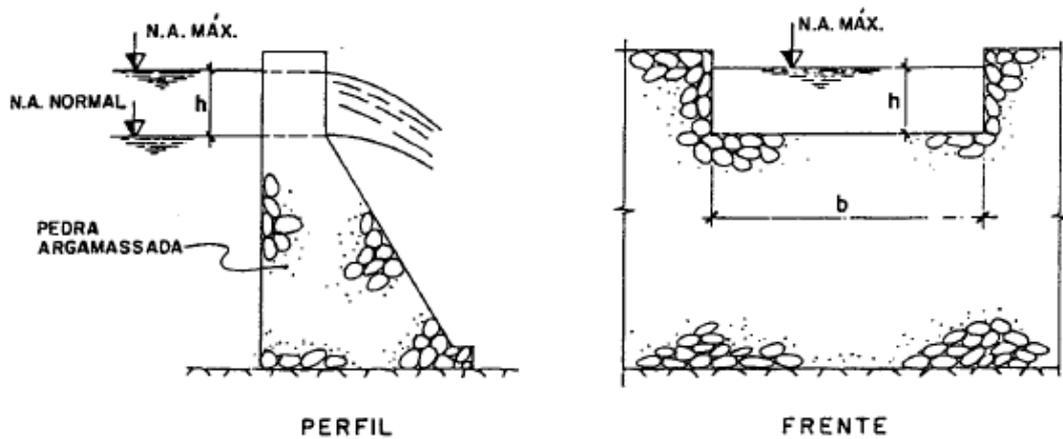


Figura 37 – Dimensionamento do vertedouro
Fonte: ELETROBRÁS & DNAEE (1985).

$$b = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{1,7 \times h^{3/2}} \quad (10)$$

Onde:

b - largura do vertedouro (m);

$Q_{m\acute{a}x}$ - vaz\~ao (m³/s);

h - altura da lâmina d'água (m), que é fixada com base no cotejo entre vários valores, aos pares, de "h" e "b".

Logo a largura necessária do vertedouro será obtida considerando a vazão máxima de 2,08 m³/s (figura 25). O valor medido da lâmina d'água é 0,47 m, substituindo na equação 10:

$$b = \frac{2,08}{1,7 \times 0,47^{3/2}}$$

$$b = 3,78m$$

O vertedouro existente na usina tem largura de 7,08 m, sobrando espaço para extravasar o excesso de água.

De acordo com as Diretrizes para Projetos de PCH (ELETROBRAS, 2010) é possível calcular a vazão máxima suportada pelo vertedouro através da equação 11.

$$Qv_{m\acute{a}x} = C \times b \times \sqrt{h^3} \quad (11)$$

$$Qv_{m\acute{a}x} = 2 \times 7,08 \times \sqrt{0,47^3}$$

$$Qv_{m\acute{a}x} = 4,56m^3 / s$$

Onde:

$Q_{v_{m\acute{a}x}}$ - vazão máxima do vertedouro (m³/s);

C - coeficiente de vazão (Barragem vertedoura =2);

b - largura do vertedouro (m);

h - altura da lâmina d'água (m).

A máxima vazão que o vertedouro existente suporta é de 4,56 m³/s e, conforme a figura 25 tem-se a vazão máxima de 2,08 m³/s. Assim o coeficiente de segurança do vertedouro é dado do pela equação 12.

$$\theta_s = \frac{Q_{v_{m\acute{a}x}}}{Q_{m\acute{a}x}} \quad (12)$$

$$\theta_s = \frac{4,56}{2,08}$$

$$\theta_s = 2,19$$

Onde:

θ_s - coeficiente de segurança do vertedouro;

$Q_{v_{m\acute{a}x}}$ - vazão máxima do vertedouro (m³/s);

$Q_{m\acute{a}x}$ - vazão máxima (m³/s).

Assim o vertedouro suporta até 119% a mais da vazão máxima do reservatório. Para casos em que necessite ou que se deseje forçar um esvaziamento da barragem, há no lado esquerdo a jusante o extravasor com 700 mm de diâmetro.



Figura 38 – Extravasador da hidrelétrica Roncador

Fonte: Reis, Filho, Souza (2011).

3.5 TOMADA D'ÁGUA

O dimensionamento da tomada de água deve levar em consideração duas modalidades: ser ligada na tubulação forçada, possibilitando a condução da água até a máquina, ou descarregar a água captada em canal aberto de adução. A tomada de água tanto permite o ensecamento da tubulação forçada para facilitar obras de manutenção, quanto prevê a retenção de corpos flutuantes. A estrutura de tomada d'água propriamente dita inclui ainda a grade para proteção contra corpos flutuantes e as comportas para controle do escoamento (ELETROBRAS & DNAEE, 1985).

Neste estudo a tomada d'água está ligada na tubulação forçada, permitindo o ensecamento da tubulação. As dimensões da tomada d'água da usina Roncador são 1,2 m de largura e 3,5 m de altura.



Figura 39 – Tomada d'água da hidrelétrica Roncador
Fonte: Própria (2011).



Figura 40 – Tubulação forçada na saída da tomada d'água
Fonte: Própria (2011).

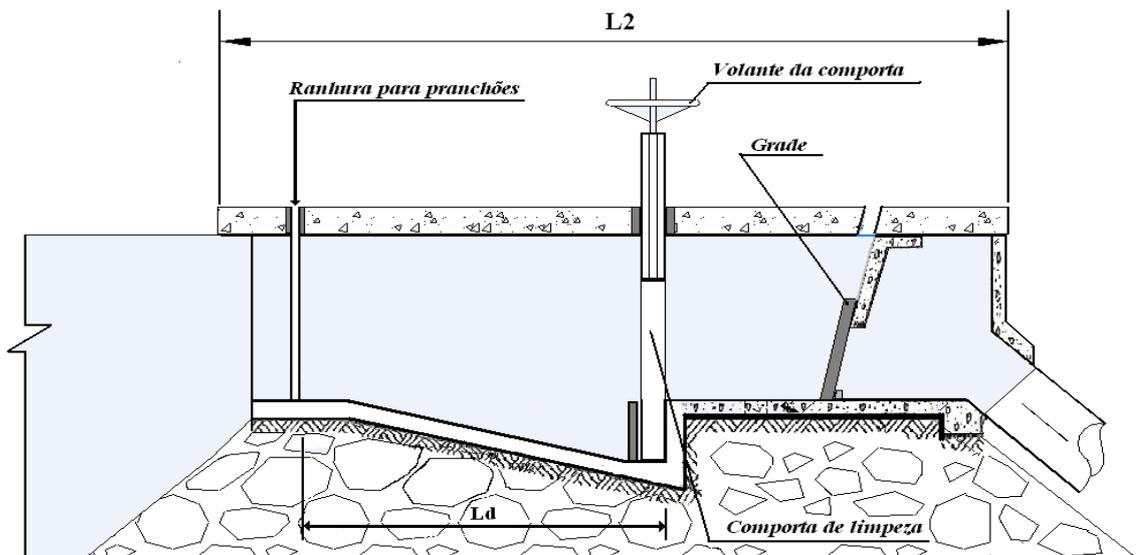


Figura 41 – Tomada d'água acoplada à tubulação forçada

Fonte: ELETROBRÁS, 5.1./B (1985).

O dimensionamento da tomada d'água, conforme ELETROBRÁS & DNAEE, 1985 resume-se no cálculo do comprimento do desarenador. Tal comprimento é fornecido pela equação 13. As medidas mínimas para o desarenador podem ser retiradas da tabela 6, como a vazão é 2,08 m³/s o comprimento recomendável do desarenador (L_d) é de 4m e o comprimento da crista da barragem (L_2) com 0,55m.

$$L_d = \frac{K_d \cdot Q}{B_d} \geq 2,00m \quad (13)$$

Onde:

L_d - comprimento do desarenador (m);

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

Q - vazão de adução (m³/s);

B_d - largura do desarenador (m).

Tabela 6 – Dimensões do desarenador

VAZÃO (m ³ /s)	DIMENSÕES (m)				HC (m)
	MÍNIMAS		RECOM.		
	BC	LC	BC	LC	
0,1<Q<0,7	2,0	4,0	3,0	5,0	0,5
0,8<Q<1,6	3,0	4,5	3,5	6,0	0,6
1,7<Q<3,0	3,5	5,0	4,0	7,0	0,7
3,1<Q<6,5	7,0	4,0	11,5	5,0	0,9
6,6<Q<10,0	8,0	5,0	15,0	6,5	1,1
10,1<Q<13,5	9,5	6,0	16,5	7,5	1,3
13,6<Q<17,0	11,0	7,0	18,0	8,0	1,5
17,1<Q<20,0	12,0	8,0	21,0	9,0	1,7

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

3.5.1 Comporta da tomada d'água

Para efeito de manutenção e situação de emergência deve-se utilizar uma comporta da tomada d'água (ALVES, 2007), figura 42, com dimensões H_c : altura = 0,7m; B_c : largura = 1,0 m e L : espessura = 0,4 m.

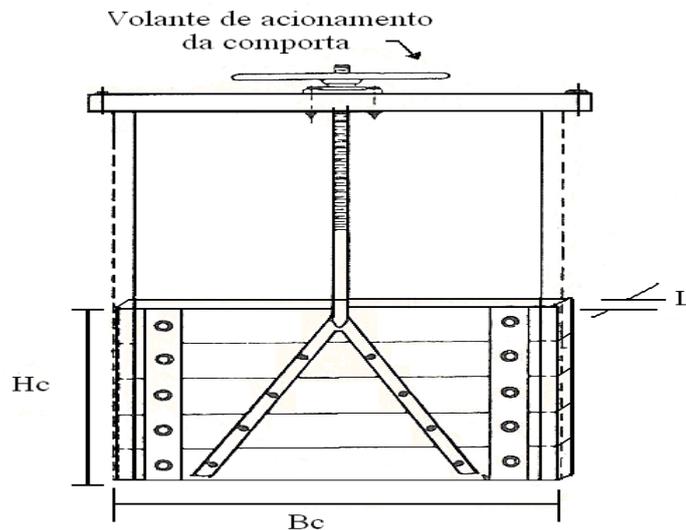


Figura 42 – Comporta de madeira da tomada d'água

Fonte: Adaptado de ELETROBRÁS, 5.1./H (1985).

Tabela 7 – Comporta de madeira

Altura	Largura	Espessura
Hc	Bc	l
(m)	(m)	(cm)
0,6	0,4	4
0,6	0,7	4
0,75	0,85	4
0,75	1,0	4
0,9	1,0	4
1,05	1,0	5
1,05	1,2	5
1,05	1,35	5
1,2	1,35	5
1,2	1,5	5

Fonte: Adaptado de ELETROBRÁS & DNAEE, 5.1/H (1985).

A grade visa impedir a entrada de corpos flutuantes que possam danificar os equipamentos. De acordo com a ELETROBRÁS (2010), para as PCHs, pode-se adotar como padrão, grades com barras chatas ou redondas, espaçadas de 8 a 12 cm, a limpeza da grade pode ser feita manualmente ou mecanicamente.

3.6 CONDUTO FORÇADO

O Conduto forçado da hidrelétrica Roncador, estrutura responsável por levar a água até a turbina, encontra-se bastante danificado e necessita ser trocado em toda a sua extensão. O existente é de aço, com diâmetro de 70 cm e comprimento de 225 m.



Figura 43 – Conduto forçado existente na hidrelétrica Roncador
Fonte: Própria (2011).



Figura 44 – Medição do conduito forçado
Fonte: Própria (2011).

Para dimensionamento do conduito forçado de aço, será utilizado o método indicado pelas Diretrizes para Projeto de PCH (ELETROBRÁS, 2010). Tal dimensionamento é realizado com o diâmetro econômico que, teoricamente, proporciona a maior relação custo-benefício.

3.6.1 Diâmetro econômico

A determinação do diâmetro econômico da tubulação forçada é calculada pela equação 14, de Bondschu:

$$D_e = 127 \times \sqrt[7]{\frac{Q^3}{H_t}} \quad (14)$$

$$H_t = H_b + h_s \quad (15)$$

Onde:

D_e - diâmetro econômico (cm);

Q - descarga de projeto (m³/s);

H_t - queda total (m);

H_b - queda bruta (m);

h_s - sobrepressão devida ao golpe de aríete (m).

Para as PCH, pode-se admitir que:

$$h_s = 0,2 \times H_b \quad (16)$$

$$H_t = 1,2 \times H_b \quad (17)$$

Substituindo na equação 14:

$$D_e = 123,7 \times \sqrt[7]{\frac{Q^3}{H_b}} \quad (18)$$

De acordo com a figura 25, a vazão de projeto da hidrelétrica Roncador é 2,08 m³/s. Sabendo que a queda bruta é de 14,8 m, tem-se:

$$D_e = 123,7 \times \sqrt[7]{\frac{2,08^3}{14,8}}$$

$$D_e = 115,2 \text{ cm}$$

Chega-se assim ao valor de 115,2 cm como sendo o do diâmetro econômico do conduto forçado da hidrelétrica Roncador. Utilizando a equação 18, monta-se a tabela 8 com dimensionamento de diâmetro econômico para vários valores de vazão com a queda sempre constante (14,8 m).

Tabela 8 – Diâmetro econômico

Vazão (m ³ /s)	0,148	0,500	0,572	0,650	0,800	1,000	1,500	2,000	2,080
Diâmetro econômico (cm)	37,12	62,54	66,25	70,00	76,50	84,18	100,15	113,29	115,21

Fonte: Própria (2011).

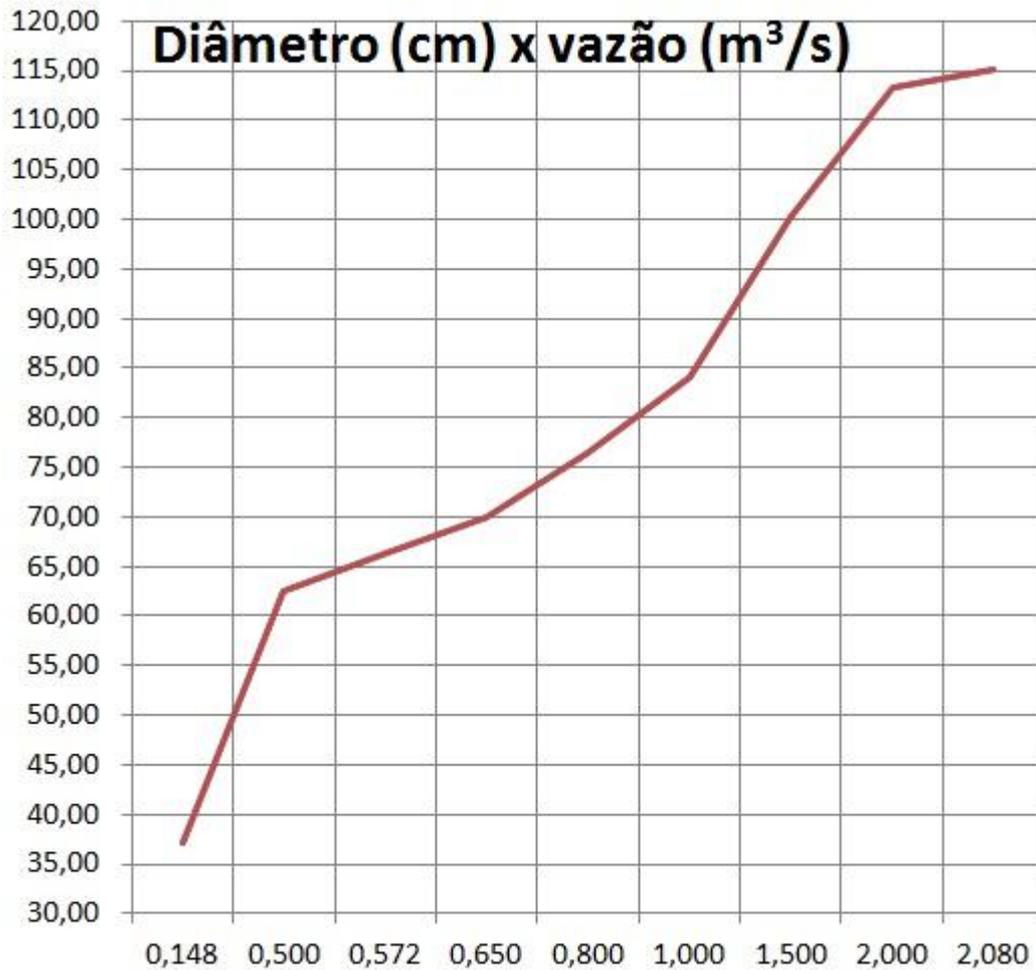


Figura 45 – Diâmetro econômico x vazão

Fonte: Própria (2011).

Pela figura 45, que ilustra a tabela 8, pode-se concluir que para a utilização de um conduto forçado com o mesmo diâmetro do existente (70 cm), a vazão de projeto é de 0,650 m³/s.

3.6.2 Velocidade da água no conduto

Após determinar o diâmetro econômico, deve-se verificar se a velocidade máxima da água no interior da tubulação atende os valores determinados na tabela 9.

Tabela 9 – Velocidade máxima da água no interior da tubulação

MATERIAL	$V_{m\acute{a}x}$ admissível (m/s)
Aço	5,0
Concreto	3,0

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

A equação 19 determina a velocidade da água no interior da tubulação.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4 \times Q}{\pi \times D_e^2} \quad (19)$$

$$v = \frac{4 \times 2,08}{\pi \times 1,152^2}$$

$$v = 2m/s$$

Onde:

v - velocidade de escoamento (m/s);

Q - vazão (m³/s);

D_e - diâmetro econômico (m);

A - área interna da seção transversal da tubulação (m²).

A velocidade de 2 m/s calculada é menor do que a máxima velocidade permitida (5 m/s - de acordo com a tabela 9) e, portanto, aceitável.

Para o caso do conduto forçado de 70 cm de diâmetro com vazão de 0,650 m³/s, a velocidade de escoamento da água é de 1,69 m/s, também aceitável.

3.6.3 Estimativa das perdas de carga

De acordo com as diretrizes para projetos de PCH (ELETROBRÁS, 2010), as perdas de carga do sistema de adução podem ser estimadas através da equação 20, que é o produto de uma constante pela energia cinética do escoamento.

$$h = k \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad (20)$$

Onde:

h - perda de carga em algum ponto do circuito hidráulico de adução (m);

v - velocidade do escoamento, como detalhado a seguir (m/s);

g - aceleração da gravidade (m/s²);

k - coeficiente de perda de carga, que varia para cada caso como será visto a seguir.

3.6.3.1 Perda de carga na tomada d'água

A perda de carga inicial na tomada d'água pode ser estimada através da relação:

$$h_i = k_i \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad (21)$$

Onde:

h_i - perda de carga inicial na tomada d'água (m);

v - velocidade do escoamento (m/s);

g - aceleração da gravidade (m/s²);

k_i - coeficiente de forma da tomada d'água, que varia entre 0,01 e 0,1.

Utilizando a equação 19 e substituindo na equação 21, tem-se:

$$h_i = 0,1 \times \frac{\left(\frac{2,08}{1,2 \times 3,5} \right)^2}{2 \times 9,81}$$

$$h_i = 0,0013m$$

Assim, a perda de carga na entrada da tomada d'água é de 0,0013 m, que equivale a uma perda de carga percentual de 0,0087% da queda bruta.

3.6.3.2 Perda de carga na grade da tomada d'água

A perda de carga na grade da tomada d'água pode ser estimada através da fórmula de Kirschmer:

$$h_g = k_g \times \left(\frac{e_1}{e_2} \right)^{4/3} \times \text{sen} \theta \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad (22)$$

Onde:

h_g - perda na grade (m);

e_1 - espessura ou diâmetro das barras (mm);

e_2 - espaçamento entre as barras (mm);

θ - inclinação da grade (graus);

v - velocidade junto à grade (m/s);

k_g - coeficiente de perda de carga cujo valor depende das dimensões da grade, conforme tabela 10;

g - aceleração da gravidade (m/s²).

Tabela 10 – Coeficiente de perda na grade

TIPO DAS BARRAS	$e_1 / b(^*)$	k_g
Retangulares	≥ 5	2,42
Circulares	≥ 5	1,79

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

Para o cálculo das perdas na grade será considerada uma grade com a mesma área da tomada d'água, com inclinação de 90°, barras circulares de diâmetro 9,53 mm (3/8") espaçadas de 80 mm. Utilizando a equação 19 e substituindo na equação 22, tem-se:

$$h_g = 1,79 \times \left(\frac{9,53}{80} \right)^{4/3} \times \text{sen}90^\circ \times \frac{\left(\frac{2,08}{1,2 \times 3,5} \right)^2}{2 \times 9,81}$$

$$h_g = 0,0013m$$

Assim, a perda de carga na grade da tomada d'água é de 0,0013 m, que equivale a uma perda de carga percentual de 0,0087% da queda bruta.

3.6.3.3 Perda de carga na entrada do conduto forçado

A perda de carga na entrada do conduto forçado pode ser estimada através da equação 23:

$$h_e = k_e \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad (23)$$

Onde:

h_e - perda de carga na entrada do conduto forçado (m);

v - velocidade do escoamento (m/s);

g - aceleração da gravidade (m/s²);

k_e - coeficiente de tipo de boca de conduto forçado (figura 46).

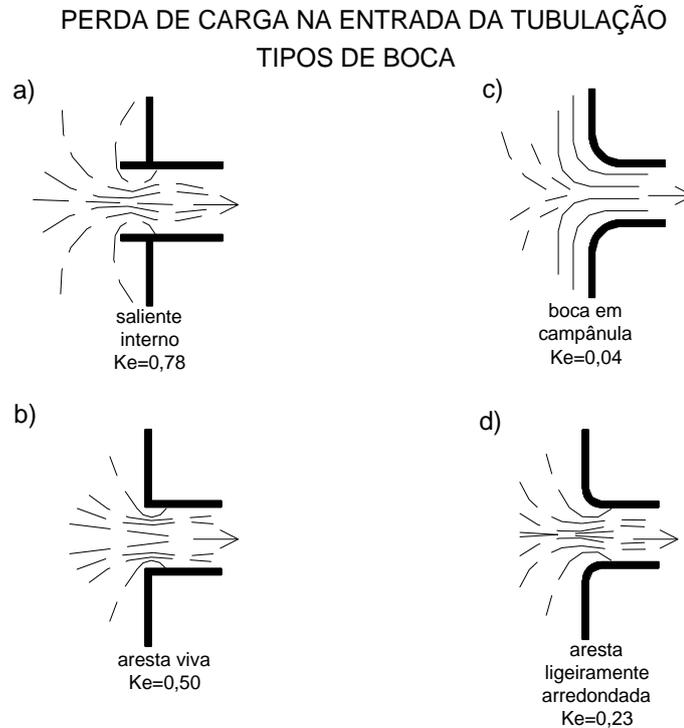


Figura 46 – Tipos de boca do conduto forçado

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

Utilizando a equação 19 e substituindo na equação 23, tem-se:

$$h_e = 0,5 \times \frac{\left(\frac{2,08}{1,04}\right)^2}{2 \times 9,81}$$

$$h_e = 0,101m$$

Assim, a perda de carga na entrada do conduto forçado é de 0,101 m, que equivale a uma perda de carga percentual de 0,6854% da queda bruta.

3.6.3.4 Perda de carga por atrito no conduto forçado

Conhecendo o diâmetro econômico e a velocidade da água no interior da tubulação, estima-se a perda de carga devido ao atrito, utilizando a fórmula de Scobey.

$$h_a = 410 \times k_a \times \frac{v^{1,9}}{D^{1,1}} \times L_{cf} \quad (24)$$

$$h_a = 410 \times 0,32 \times \frac{2^{1,9}}{115,2^{1,1}} \times 0,225$$

$$h_a = 0,5921m$$

Onde:

h_a - perda de carga unitária (m);

k_a - coeficiente que varia com o tipo de tubulação, conforme tabela 11;

v - velocidade de escoamento (m/s);

D - diâmetro do conduto (cm);

L_{cf} - comprimento do conduto (m).

Tabela 11 – Coeficiente para cálculo do atrito

CONDUTO	k_a
Aço (Novo com juntas soldadas.)	0,32
Cimento-amianto	0,34
Concreto armado	0,38

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

Assim, a perda de carga por atrito é de 0,5921m, que equivale a uma perda de carga percentual de 4% da queda bruta.

3.6.3.5 Perda de carga total no sistema de adução

A perda de carga total é calculada pela soma das perdas de cada trecho do sistema de adução.

$$h_t = h_i + h_g + h_e + h_a \quad (25)$$

$$h_t = 0,0013 + 0,0013 + 0,1014 + 0,5921$$

$$h_t = 0,6961m$$

Onde:

h_t - perda de carga total no sistema de adução (m);

h_i - perda de carga na tomada d'água (m);

h_g - perda de carga na grade da tomada d'água (m);

h_e - perda de carga na entrada do conduto forçado (m);

h_a - perda de carga por atrito no conduto forçado (m);

Assim, a perda de carga total no sistema de adução é de 0,6961 m, que equivale a uma perda de carga percentual de 4,7035% da queda bruta.

Tabela 12 – Perda de carga no sistema de adução

	Tomada d'água	Grade da tomada d'água	Entrada do conduto forçado	Atrito no conduto forçado	TOTAL
Perda (m)	0,0013	0,0013	0,1014	0,5921	0,6961
Perda (%)	0,0087	0,0087	0,6854	4,0007	4,7035

Fonte: Própria (2011).

Para dimensionamento da instalação de conduto forçado de 70 cm de diâmetro, será considerada uma perda de carga percentual máxima de 5%, conforme orientação das Diretrizes para Projeto de PCH (ELETROBRAS, 2010).

3.6.4 Variação de pressão no conduto forçado

A pressão normal estática ao longo do conduto forçado sofre variações, positivas (sobrepessões) ou negativas (depressões), 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 (ELETROBRÁS, 2010).

As variações de pressão no interior do conduto forçado condicionam a espessura da chapa do conduto. As Diretrizes para projeto de PCH (ELETROBRAS, 2010) definem que para condutos com uniformidade de diâmetro interno e de espessura de parede, pode-se estimar as variações de pressão através do método de Allievi.

$$h_s = (Z^2 - 1) \times H_1 \quad (26)$$

Onde:

h_s - sobrepressão ou depressão (m), cujo limite máximo é igual a $0,35H_b$;

H_1 - queda bruta subtraindo as perdas (m);

Z^2 - parâmetro obtido dos gráficos de Allievi, para sobrepressão e depressão, em função dos parâmetros ρ e θ , os quais são calculados utilizando-se as equações 27 e 28.

$$\rho = \frac{v_p \times v}{2 \times g \times H_1} \quad (27)$$

$$\theta = \frac{v_p \times t}{2 \times L_{cf}} \quad (28)$$

Onde:

ρ - constante da linha;

θ - no de intervalos $\frac{2L}{v_p}$ contidos em t ;

v_p - celeridade da onda de pressão (m/s);

v - velocidade do escoamento (m/s);

g - aceleração da gravidade (m/s²);

H_1 - queda bruta subtraindo as perdas (m);

t - tempo de fechamento do dispositivo de fechamento da turbina (s);

L_{cf} - comprimento do conduto forçado(m).

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

$t = 6s$, para condutos curtos: $L \leq 3H_b$;

$t = 10s$, para condutos longos: $L > 3H_b$.

As curvas de Allievi apresentados nas figuras 47 e 48 a seguir, são utilizadas para obtenção dos valores do parâmetro Z^2 para sobrepressão e depressão, respectivamente.

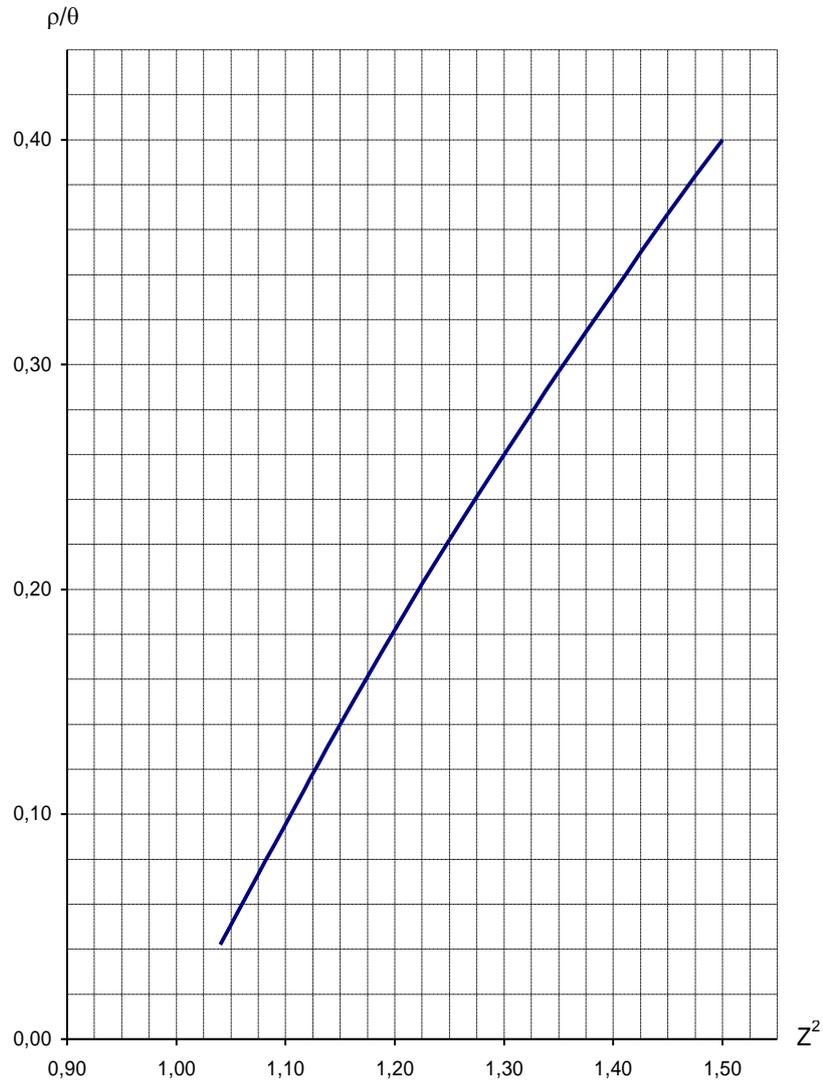


Figura 47 – Curva de Allievi para sobrepressão

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

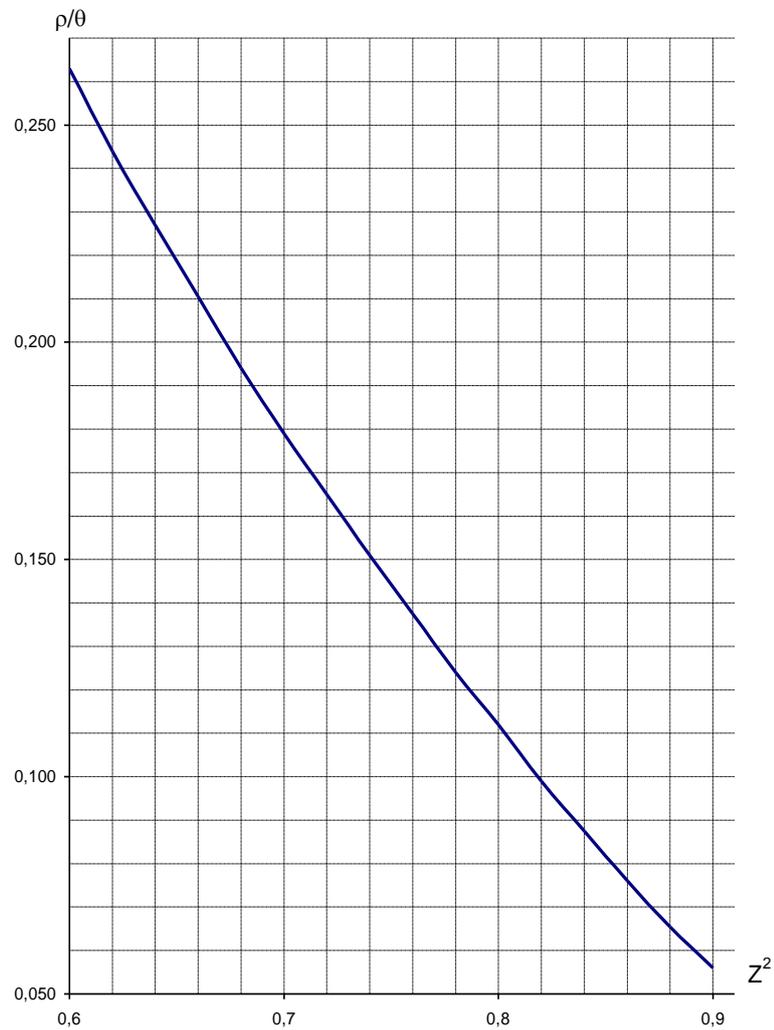


Figura 48 – Curva de Allievi para depressão
Fonte: ELETROBRÁS (2010).

Pelas equações 27 e 28 tem-se:

$$\frac{\rho}{\theta} = \frac{v \times L_{cf}}{g \times H_1 \times t} \quad (29)$$

$$\frac{\rho}{\theta} = \frac{2 \times 225}{9,81 \times 14,1 \times 10}$$

$$\frac{\rho}{\theta} = 0,32$$

Com o valor calculado para $\frac{\rho}{\theta}$, obtém-se os valores de Z^2 pelos gráficos de Allievi para sobrepressão e depressão: 1,35 e 0,54 respectivamente.

3.6.4.1 Sobrepressão

Substituindo os valores obtidos na relação de Allievi na equação 26, pode-se estimar o valor da sobrepressão interna no conduto forçado.

$$h_s = (1,35 - 1) \times 14,1$$

$$h_s = 4,93m$$

3.6.4.2 Depressão

Substituindo os valores obtidos na relação de Allievi na equação 26, pode-se estimar o valor da depressão interna no conduto forçado.

$$h_s = (0,54 - 1) \times 14,1$$

$$h_s = -6,48m$$

3.6.5 Espessura do conduto forçado

De acordo com as diretrizes para projetos de PCH (ELETROBRÁS, 2010), a espessura da parede do conduto forçado de aço pode ser calculada através da equação 30.

$$e = \frac{P_i \times D}{2 \times \sigma_f \times k_f} + e_s \quad (30)$$

$$P_i = H_1 + h_s \quad (31)$$

$$e = \frac{1,903 \times 115,2}{2 \times 1400 \times 0,8} + 1$$

$$e = 1,09mm$$

Onde:

e - espessura da parede (mm);

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

D - diâmetro do conduto (mm);

σ_f - tensão admissível de resistência à tração do material (1400kgf/cm²);

e_s - sobre-espessura p/ corrosão (1,0mm);

k_f - eficiência das soldas, conforme tabela 13;

H_1 - queda bruta subtraindo as perdas (m);

h_s - sobrepressão (m);

Tabela 13 – Coeficiente de eficiência de soldas

TUBULAÇÃO	k_f
Sem costura	1,0
Com costura	
- sem radiografia e alívio de tensões	0,80
- com radiografia ou com alívio de tensões	0,90
- com radiografia e alívio de tensões	1,00
Padronizada de fabricação normal	
- Costura com solda por fusão elétrica	0,80
- Costura com solda por resist. elétrica	1,00

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

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 nessas chapas. Além disso, a adoção da espessura mínima é recomendada por motivos construtivos, de montagem e de transporte (ELETROBRÁS, 2010).

Essa espessura é determinada pela equação 32.

$$e_{\min} = \frac{D + 508}{400} \geq 6,35\text{mm}(1/4") \quad (32)$$

Utilizando a equação 32 para conduto com 115,2 cm de diâmetro, tem-se:

$$e_{\min} = \frac{1152 + 508}{400} = 4,15\text{mm}$$

Utilizando a equação 32 para conduto com 70 cm de diâmetro, tem-se:

$$e_{\min} = \frac{700 + 508}{400} = 3,02\text{mm}$$

Sendo assim, para ambos os casos, recomenda-se a utilização da espessura mínima de 6,35 mm para o conduto forçado.

3.6.6 Blocos de apoio os selas

O bloco de apoio ou sela é a estrutura de concreto onde o conduto se apóia simplesmente, sendo permitido o seu deslizamento sobre o mesmo (ELETROBRÁS, 2010).



Figura 49 – Bloco de apoio ou sela

Fonte: Própria (2011).

3.6.7 Blocos de ancoragem

A orientação da ELETROBRÁS & DNAEE (1985) refere que a utilização dos blocos de ancoragem deve ocorrer em caso de trechos longos e retos de tubulação, cujo espaçamento seja de 80 cm, e também nos pontos de mudança de direção.



Figura 50 – Bloco de ancoragem

Fonte: Própria (2011).

3.7 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

A chaminé de equilíbrio é um reservatório que amortece a variação de pressão ocasionada por um acionamento brusco do dispositivo de fechamento da turbina (ELETROBRAS, 2010). Na hidrelétrica Roncador, a chaminé de equilíbrio é uma estrutura existente construída a uma distância de 35 m da casa de máquinas.



Figura 51 – Chaminé de Equilíbrio

Fonte: Própria (2011).



Figura 52 – Interior da Chaminé de Equilíbrio

Fonte: Própria (2011).

De acordo com as Diretrizes para Projetos de PCH (ELETROBRÁS, 2010), a necessidade de instalação de uma chaminé de equilíbrio pode ser verificada através da equação 33.

$$L_{cf} \geq 5 \times H_b \quad (33)$$

Onde:

L_{cf} - comprimento do conduto (m);

H_b - queda bruta (m).

Considerando que o comprimento do conduto forçado da MCH Roncador é de 225 m e a queda bruta é de 14,8 m, a equação 33 indica a necessidade de instalação de uma chaminé de equilíbrio para a hidrelétrica Roncador.

Segundo as Diretrizes para Projetos de PCH (ELETROBRÁS, 2010), a área mínima da seção transversal da chaminé de equilíbrio é estimada pela equação 34.

$$A_c = \frac{v^2}{2 \times g} \times \frac{L_{cf} \times A_{cf}}{(H_b - h_t) \times h_t} \quad (34)$$

$$A_c = \frac{2^2}{2 \times 9,81} \times \frac{225 \times 1,04}{(14,8 - 0,6996) \times 0,6996}$$

$$A_c = 4,83m^2$$

Onde:

A_c - área da seção da chaminé de equilíbrio (m²);

v - velocidade de escoamento (m/s);

g - aceleração da gravidade (m/s²);

L_{cf} - comprimento do conduto (m);

A_{cf} - área da seção do conduto forçado (m²);

H_b - queda bruta (m);

h_t - perdas no sistema de adução (m).

Para a área mínima calculada, tem-se que o diâmetro mínimo da chaminé de equilíbrio é 2,48 m. Na atual instalação, a chaminé de equilíbrio tem o diâmetro de 3,03 m, área da seção de 7,21 m² e altura de 6,85 m.

3.7.1 Cálculo da elevação do nível de água

A elevação do nível de água será estimada utilizando as equações 35, 36, 37 e 38 definidas nas diretrizes para projetos de PCH (ELETROBRÁS, 2010).

$$Y_e = v \times \sqrt{\frac{A_{cf} \times L_{cf}}{g \times A_c}} \quad (35)$$

$$Y_e = 2 \times \sqrt{\frac{1,04 \times 225}{9,81 \times 4,83}} = 4,44m$$

$$k = \frac{h_t}{Y_e} \quad (36)$$

$$k = \frac{0,6996}{4,44} = 0,157$$

$$z_e = 1 - \frac{2}{3}k + \frac{1}{9}k^2 \quad (37)$$

$$z_e = 1 - \frac{2}{3} \times 0,157 + \frac{1}{9} \times 0,157^2 = 0,8947$$

$$Y_E = z_e \times Y_e \quad (38)$$

$$Y_E = 0,8947 \times 4,44 = 3,98m$$

Onde:

Y_e - elevação sem as perdas do sistema adutor (m);

v - velocidade de escoamento (m/s);

A_{cf} - área da seção do conduto forçado (m²);

L_{cf} - comprimento do conduto (m);

g - aceleração da gravidade (m/s²);

A_c - área da seção da chaminé de equilíbrio (m²);

k - perda de carga relativa;

z_e - coeficiente de elevação;

Y_E - elevação com as perdas do sistema adutor (m).

Chega-se ao valor de 3,98 m para elevação da água no interior da chaminé de equilíbrio.

3.7.2 Cálculo da depleção do nível de água

A depleção do nível de água será estimada utilizando as equações 39, 40 e 41 definidas nas diretrizes para projetos de PCH (ELETROBRÁS, 2010).

$$Y_d = v \times \sqrt{\frac{A_{cf} \times L_{cf}}{g \times A_c}} \quad (39)$$

$$Y_d = 2 \times \sqrt{\frac{1,04 \times 225}{9,81 \times 4,83}} = 4,44m$$

$$k = \frac{h_t}{Y_d} \quad (40)$$

$$k = \frac{0,6996}{4,44} = 0,157$$

$$Y_D = z_d \times Y_d \quad (41)$$

Onde:

Y_d - depleção sem as perdas do sistema adutor (m);

v - velocidade de escoamento (m/s);

A_{cf} - área da seção da chaminé de equilíbrio (m²);

L_{cf} - comprimento do conduto (m);

g - aceleração da gravidade (m/s²);

A_c - área da seção da chaminé de equilíbrio (m²);

k - perda de carga relativa;

z_d - coeficiente de depleção;

Y_D - depleção com as perdas do sistema adutor (m).

Em função do valor da perda de carga relativa calculado com a equação 40, obtém-se o valor do coeficiente de depleção (Z_d) na tabela 14.

Tabela 14 – Coeficiente de depleção

k	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	1	0,837	0,712	0,619	0,539	0,475	0,422	0,378	0,343	0,313	0,289
0,01	0,982	0,823	0,702	0,611	0,532	0,469	0,417	0,374	0,34	0,31	-
0,02	0,964	0,809	0,692	0,603	0,526	0,464	0,412	0,371	0,337	0,308	-
0,03	0,946	0,794	0,683	0,594	0,519	0,458	0,408	0,367	0,334	0,305	-
0,04	0,928	0,78	0,673	0,586	0,513	0,453	0,403	0,364	0,331	0,303	-
0,05	0,91	0,766	0,663	0,578	0,506	0,447	0,398	0,36	0,328	0,3	-
0,06	0,895	0,755	0,654	0,57	0,5	0,442	0,394	0,357	0,325	0,298	-
0,07	0,881	0,744	0,645	0,562	0,494	0,437	0,39	0,353	0,322	0,296	-
0,08	0,866	0,734	0,637	0,555	0,487	0,432	0,386	0,35	0,319	0,293	-
0,09	0,852	0,723	0,628	0,547	0,481	0,427	0,382	0,346	0,316	0,291	-

Fonte: Adaptado de ELETROBRÁS (2010).

Substituindo os valores encontrados na equação 41, tem-se:

$$Y_D = 0,766 \times 4,44$$

$$Y_D = 3,4m$$

Chega-se ao valor de 3,4 m para depleção da água no interior da chaminé de equilíbrio.

3.7.3 Altura da chaminé de equilíbrio

Conhecendo os valores de elevação e depleção da água no interior da chaminé de equilíbrio, pode-se estimar a altura ideal da mesma através da equação 42.

$$H_c = Y_E + y_E + Y_D + y_D \quad (42)$$

$$H_c = 3,98 + 1 + 3,4 + 1$$

$$H_c = 9,38m$$

Onde:

H_c - altura da chaminé de equilíbrio (m);

Y_E - elevação da água (m);

Y_D - depleção da água (m);

$y_E = y_D$ - acréscimo da elevação e da depleção da água por segurança

(1m).

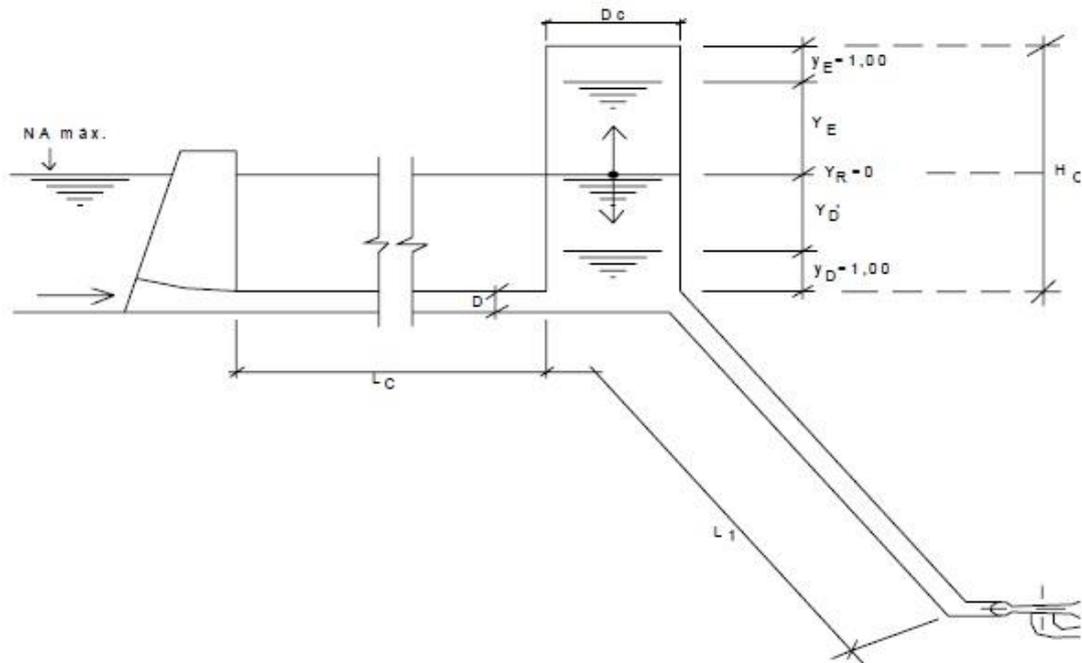


Figura 53 – Chaminé de equilíbrio em centrais a fio d'água

Fonte: ELETROBRAS (2010).

Comparando o valor de 9,38 m obtido para a altura ideal utilizando o método apresentado nas Diretrizes para Projeto de PCH (ELETROBRAS, 2010) com o valor de 6,85 m da altura existente, percebe-se que há uma diferença e que a chaminé deverá sofrer alterações em suas dimensões no caso do dimensionamento

de um conduto com 115,2 cm de diâmetro com vazão de 2,08 m³/s. Para a utilização de um conduto de 70 cm de diâmetro, a situação da chaminé de equilíbrio é bastante semelhante à utilização do conduto de 115,2 cm, conforme tabela 15.

Tabela 15 – Comparação – conduto 115,2 cm x conduto 70 cm

Queda (m)	14,80	14,80
Vazão (m ³ /s)	2,08	0,65
Comprimento (m)	225,00	225,00
Diâmetro econômico (cm)	115,21	70,00
Velocidade escoamento (m/s)	2,00	1,69
Perda de carga sistema de adução (m)	0,70	0,74
Perda de carga sistema de adução (%)	4,73	5,00
Queda com perdas (m)	14,10	14,06
Área seção do conduto (m ²)	1,04	0,38
Área seção da chaminé (m ²)	4,82	1,21
Diâmetro da chaminé (m)	2,48	1,24
Elevação/depleção de água sem perdas (m)	4,44	4,56
Perda de carga relativa	0,16	0,16
Elevação com perdas (m)	3,99	4,08
Coeficiente da depleção	0,77	0,76
Depleção com perdas (m)	3,40	3,44
Altura da chaminé sem coeficiente de segurança (m)	7,39	7,53
Altura da chaminé com coeficiente de segurança (m)	9,39	9,53

Fonte: Própria (2011).

3.8 CASA DE MÁQUINAS

A casa de máquinas ou casa de força será dimensionada em função dos equipamentos eletromecânicos que nela se abrigarão, ou seja, será condicionada pelo tipo de turbina e gerador instalados e pela área de montagem necessária. As elevações serão em função das cotas de jusantes para que o piso da sala dos eletromecânicos seja livre de inundações (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

As instalações existentes de aproximadamente 75 m² encontram degradadas, sendo necessárias reformas quase que na sua totalidade para atender as funções básicas das quais é solicitada.



Figura 54 – Casa de máquinas da hidrelétrica Roncador

Fonte: Própria (2011).

3.8.1 Escolha do Tipo de Casa de Máquina

Segundo Souza, Santos e Bortoni (1999), a casa de máquinas pode compor a estrutura da barragem ou estar isolada.

No presente estudo ela está isolada. Cabe registrar que uma casa de força subterrânea não é uma escolha comum para pequenas centrais.

3.8.2 Dimensionamento

3.8.2.1 Geral

A casa de máquinas é a edificação que abriga os grupos geradores destinados à produção de energia elétrica, bem como os equipamentos auxiliares necessários ao funcionamento da central hidrelétrica (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

De acordo com a ELETROBRÁS & DNAEE (1985) a casa de máquinas é o elemento principal da central hidrelétrica, nela estão concentrados as linhas da rede elétrica, nela estão concentrados os indicadores, dispositivos de proteção e quadro de controle e de comando necessários ao bom funcionamento da central.

Os grupos geradores (turbina e gerador) são assentados em fundação de acordo com o desenho fornecido pelo fabricante da turbina. Os equipamentos são aparafusados para facilitar a remoção em caso de manutenção e reparo (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

O transformador, que entrega a corrente do grupo gerador diretamente a linha a linha de alimentação, deve ser instalado fora da casa de máquinas, devido à maior ventilação e não comprometer o equipamento eletromecânico interno em caso de incêndio (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

3.8.2.2 Instalação típica (recomendável)

Realiza-se primeiramente um pré-dimensionamento no que se refere ao diâmetro do rotor da turbina, seguindo-se a orientação da ELETROBRÁS & DNAEE (1985), pois os demais equipamentos dependem deste dimensionamento, conforme equação 43.

$$Dn = 0,3 \times H_1^{1/8} \times Q^{1/2} + \frac{1}{H_1} \quad (43)$$

$$Dn = 0,3 \times 14,8^{\frac{1}{8}} \times 2,08^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{14,8}$$

$$Dn = 0,6735m$$

Onde:

D_n - diâmetro interno na saída do rotor da turbina (m);

H_l - queda líquida nominal (m);

Q - descarga nominal (m³/s).

O comprimento e a largura da casa de máquinas podem ser verificados pelas equações 44 e 45, respectivamente.

$$C = (6,3 \times D_n) + G_1 + 2,4 \quad (44)$$

$$C = (6,3 \times 0,6735) + 1,4 + 2,4$$

$$C = 8,04m$$

$$L = (3,4 \times D_n) + 4,7 \quad (45)$$

$$L = (3,4 \times 0,6735) + 4,7$$

$$L = 6,98m$$

Onde:

C - comprimento da casa de máquinas (m);

L - largura da casa de máquinas (m);

D_n - diâmetro interno na saída do rotor da turbina (m);

G_1 - dimensão do gerador (m), conforme tabela 16.

Tabela 16 – Dimensão básica de geradores

Potência (kW)	G_1 (m)	Potência (kW)	G_1 (m)
2,4	0,53	20,0	0,83
3,2	0,53	24,0	0,90
4,0	0,57	32,0	0,90
5,2	0,57	40,0	0,90
6,0	0,57	58,0	1,07
7,2	0,61	64,0	1,07
8,0	0,61	80,0	1,07
10,0	0,80	100,0	1,20
13,0	0,83	200,0	1,40
16,0	0,83	225,0	1,40

Fonte: ELETROBRÁS & DNAEE (1985).

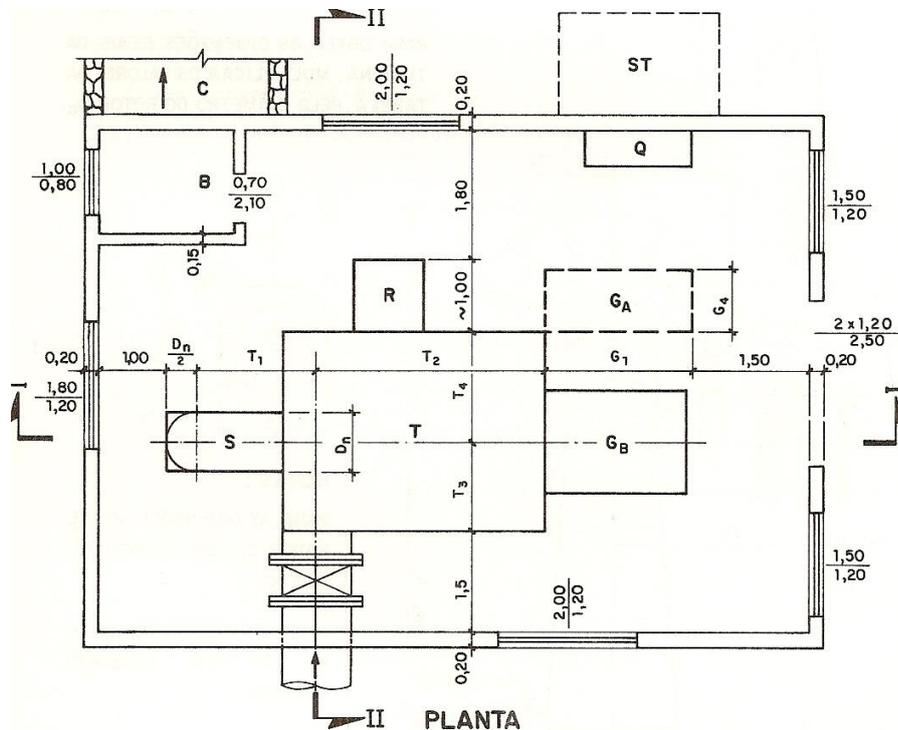


Figura 55 – Dimensões da casa de máquinas

Fonte: ELETROBRÁS & DNAEE (1985).

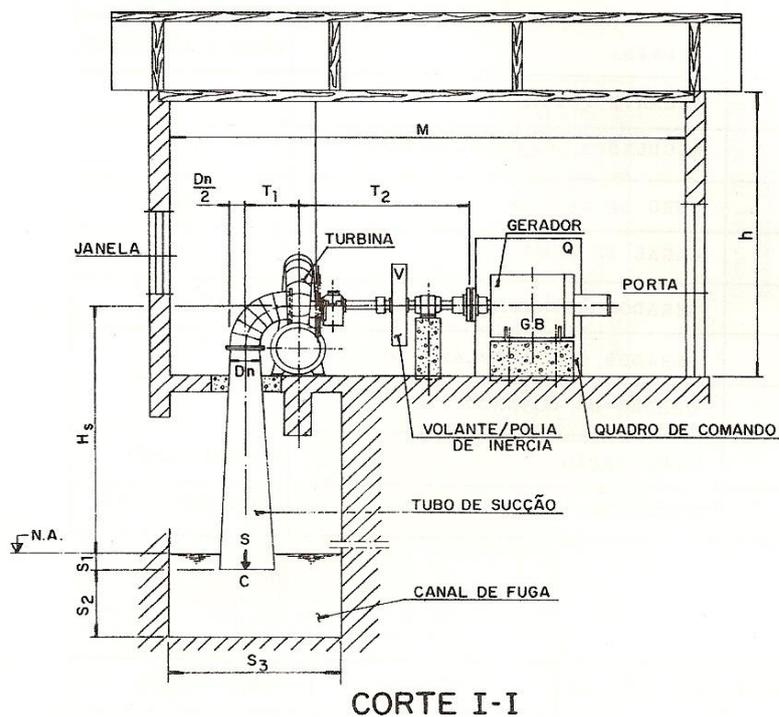


Figura 56 – Casa de máquinas (corte I-I)
 Fonte: ELETROBRÁS & DNAEE (1985).

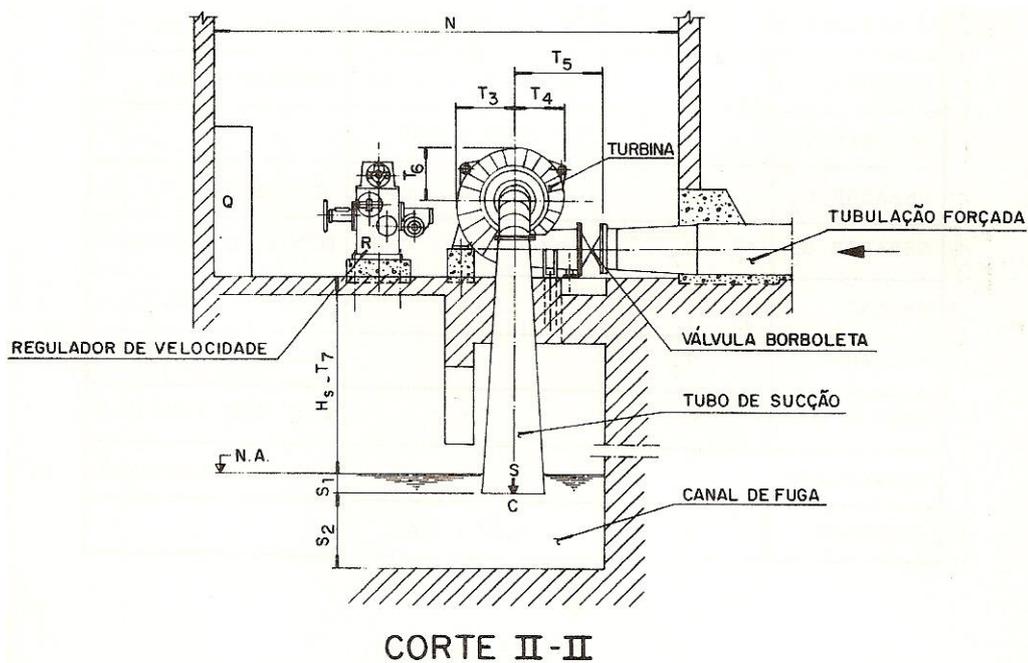


Figura 57 – Casa de máquinas (corte II-II)
 Fonte: ELETROBRÁS & DNAEE (1985).

3.9 EQUIPAMENTOS ELETROMECAÑICOS

Uma instalação elétrica tem nos equipamentos eletromecânicos sua parte principal. Eles possibilitam a transformação da energia hidráulica em mecânica e, mais tarde, em energia elétrica. Fazem parte dos eletromecânicos os grupos geradores (turbinas e geradores elétricos) e os outros equipamentos necessários para o bom funcionamento da usina. Será realizado um pré-dimensionamento, no que se refere à determinação do diâmetro do rotor da turbina (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

3.9.1 Turbina

Segundo Lauterjung (1991),

(...) a seleção do tipo de turbina depende do campo de aplicação, quer dizer principalmente da queda e da vazão da água e demais critérios, tais como a sensibilidade a materiais em suspensão (na água motriz), a possibilidade e magnitude da manutenção, assim como do custo dos equipamentos.

A escolha do tipo de turbina deve levar em consideração as condições de queda de água em altura e vazão, exigindo que tenha especialmente as seguintes características: “segurança de funcionamento, rendimento elevado, regularização fácil, capacidade de adaptação ao número exigido de rotações, baixo custo e (...) custo mais econômico quanto ao custo de aquisição, instalação e conservação” (PEDROSO, 1982).

Pedroso (1982) orienta que o critério técnico  que a turbina tenha a maior rotação possível, trabalhe com cavitação controlada no campo entre Q_{max} e Q_{min} e que o rendimento máximo seja reduzido em 5% para a Grande Central Hidrelétrica (GCH) e 10% para a Pequena Central Hidrelétrica (PCH).

O Ministério das Minas e Energia (1985) recomenda que “as turbinas hidráulicas utilizadas nas minicentrais hidrelétricas devem ser selecionadas de modo a se obter facilidade de operação e manutenção, dando-se grande importância  sua robustez”. Deve ser analisado, o preço e garantia oferecida pelo fabricante quanto  “ausência de cavitação no rotor da turbina”.

As principais características que auxiliam a seleção das turbinas para microcentrais hidrelétricas fabricadas no Brasil encontram-se na tabela 17.

Tabela 17 – Principais características das turbinas fabricadas no Brasil

NOME	ROTAÇÃO ESPECÍFICA		VAZÃO	QUEDA	POTÊNCIA	$\eta_{\text{máx}}$
	Ns		Q (m ³ /s)	H [m]	kW	
	Nº Jatos	Ns				
	1	30				
PELTON	2	30 – 50	0,05 - 50	30 – 1800	0,1–300.000	70 - 91
	4	40 – 60				
	6	50 – 70				
MICHELL- BANKI	40 – 160		0, 025 – 5	1 – 50	1 - 750	65 - 82
	Tipo	Ns	0,05 – 700	2 – 750	1 – 750.000	80 - 93
FRANCIS	Lenta	60 – 170				
	Normal	150 – 250				
	Rápida	250 – 400				
HÉLICE KAPLAN	300 – 800		0,3 – 1000	5 – 80	2 – 200.000	88 - 93

Fonte: Adaptado de Tiago Filho (2004)

3.9.2 Seleção do tipo

Utilizando a figura 58, escolheu o tipo de turbina a ser utilizada, de acordo com a vazão e a queda verificamos que o ideal para ser instalado na usina Roncador é a turbina tipo Francis.

Os cálculos demonstram que se pode instalar uma turbina de potência de 200kW para quando a vazão for máxima e aproveitar o maior potencial possível da hidrelétrica e outra de 15kW que garante que a usina estará operando, gerando energia, o máximo do tempo possível.

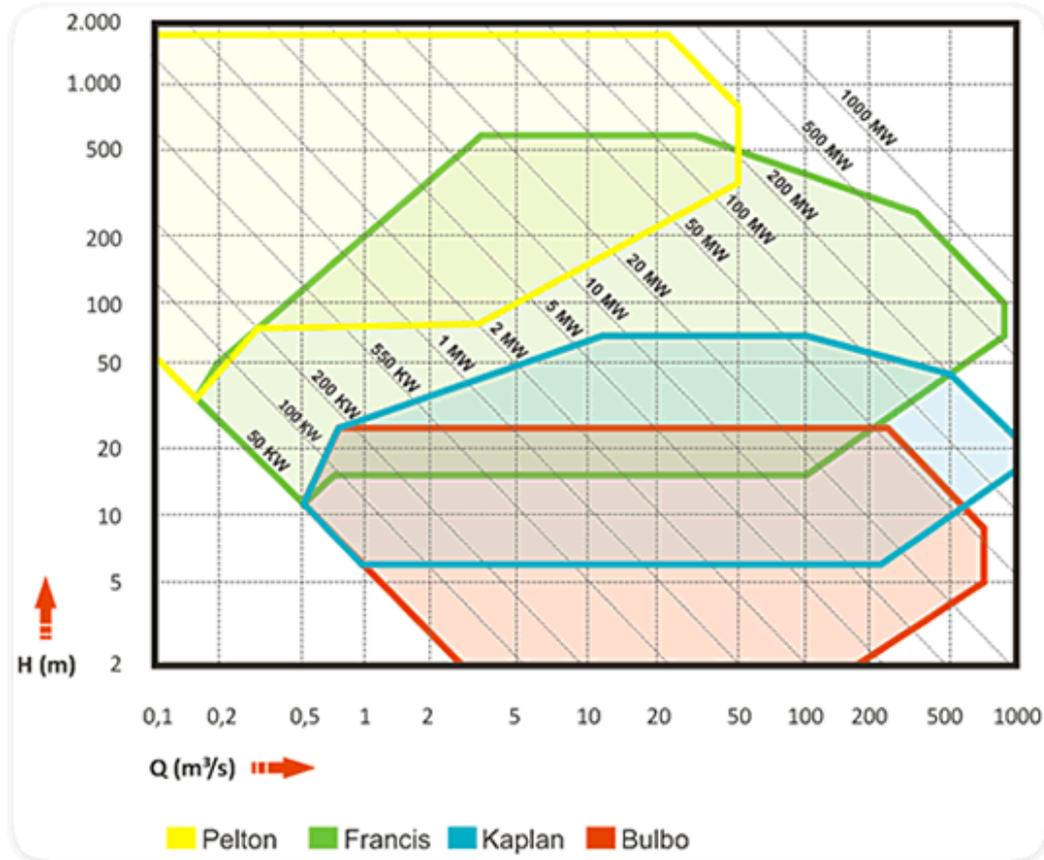


Figura 58 – Campo típico de aplicação de turbinas hidráulicas
Fonte: Hacker (2011).

3.10 CANAL DE FUGA

O canal de fuga se localiza na casa de máquinas e conduz a água turbinada até o leito do rio localizada à jusante do tubo de sucção, entre a casa de força e o rio. Sua função é restituir a vazão turbinada ao rio (ELETROBRÁS & DNAEE, 1985).

De acordo com Alves (2007), as dimensões do canal de fuga são calculadas pelas equações 46 e 47.

$$L = (0,1 \times Q) + 1,3 \quad (46)$$

$$L = (0,1 \times 2,08) + 1,3$$

$$L = 1,508m$$

$$C = (0,05 \times Q) + 2,3 \quad (47)$$

$$C = (0,05 \times 2,08) + 2,3$$

$$C = 2,404m$$

Onde:

L - profundidade (m);

C - largura do canal de fuga (m);

G - fornecido pelo fabricante (0,3 m);

Q - vazão turbinada (2,08 m³/s).

O canal de fuga dimensionado apresenta profundidade de 1,508 m e com largura de 2,404 m.

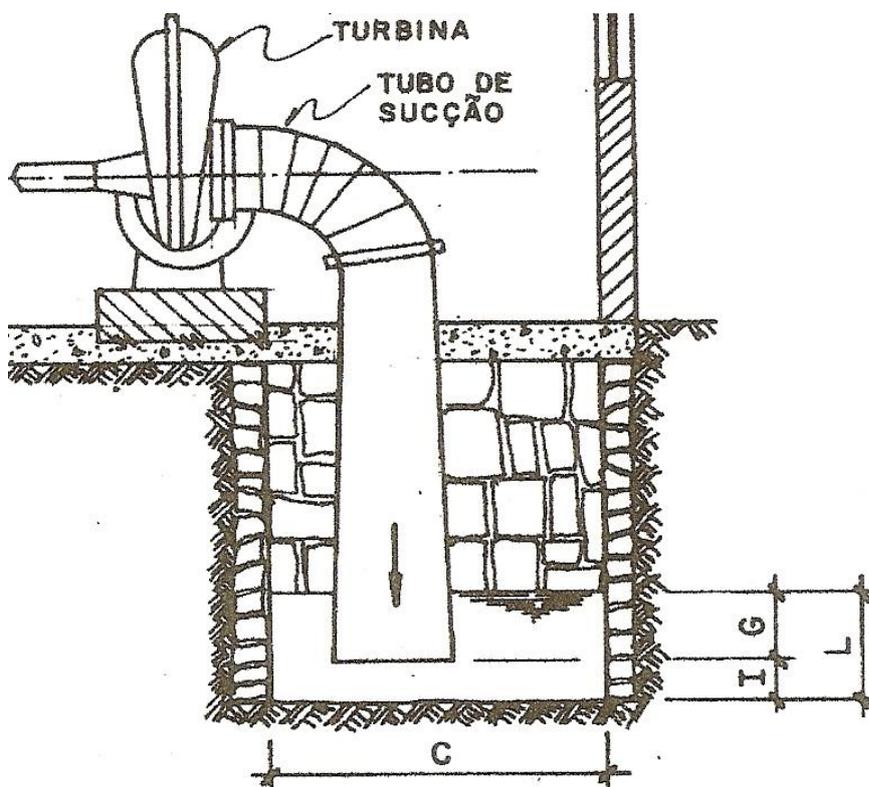


Figura 59 – Canal de fuga – dimensões básicas

Fonte: ELETROBRAS (1985).



Figura 60 – Canal de fuga da hidrelétrica Roncador

Fonte: Própria (2011).

4 CONCLUSÕES

Este trabalho demonstra que existem várias formas de se avaliar riquezas a serem agregadas em implementos isolados, especialmente no que diz respeito à instalação da MCH Roncador no município de Bocaiúva do Sul – PR. Pois com certeza trará ao local progresso de natureza tecnológica com sua instalação e ainda irá gerar um acréscimo para a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR com a criação de um laboratório didático.

O maior resultado esperado com a revitalização da usina não se resume somente em oferecer energia elétrica, mas principalmente também em atender as necessidades da UTFPR e do município de uma forma sustentável, como uma fonte de conseguir ampliar e melhorar o ensino da universidade.

Com levantamento de dados no local da usina, que está inoperante desde 1959, verificou-se o completo abandono das instalações. E após análise observou-se a necessidade de fazer vários reparos para colocá-la em operação.

A usina de Bocaiúva do Sul é uma usina de uso público e é do tipo fio d'água onde o volume criado pela barragem é desprezado. Tem uma queda de 14,8 m, com um fator de carga de 0,275 e foi calculada uma potência para vazão máxima de 209,33 kW e apresenta uma vazão mínima capaz de gerar 15 kW, que garante a geração de energia durante a maior parte do ano.

A barragem existente é do tipo muro de gravidade e de concreto na qual o vertedouro é incorporado. Sendo que a altura da barragem é de 2,57 m com crista de 0,55m e largura de 58 m, já o vertedouro apresenta largura 7,08 m, crista 0,54 m e nível d'água máximo 0,47 m. Em análise constatou-se perda de reboco e erosão, com a reforma pode-se aproveitar a estrutura da barragem e conseqüentemente o vertedouro.

O reservatório vem sofrendo assoreamento contínuo pelo acúmulo de solo desprendido de erosões ocasionado pela diminuição da mata ciliar e das demais coberturas vegetais naturais. E apresenta bancos de sedimentos cobertos de vegetação sendo necessário fazer um desassoreamento e dragagem no reservatório da usina.

O conduto forçado, de tamanho 225 m e diâmetro de 700 mm, está muito danificado apresentando na sua extensão muitos buracos e partes faltantes,

uma destas é a extensão que o liga na tomada d'água, logo terá que ser substituído por completo e não será possível a reutilização do existente. Parte integrante do sistema de adução a chaminé de equilíbrio encontrada no local apresenta diâmetro de 3,03 m e altura 6,85 m distante 35 m da casa de máquinas, também irá precisar de reformas para colocá-la em operação sendo que está completamente tomada pela vegetação local.

A casa de máquinas, sem teto e com paredes faltantes e danificadas, encontra-se completamente destruída sendo necessária fazer a reconstrução completa para atender as funções básicas das quais é solicitada.

Originalmente na usina existiam dois gerados com turbinas tipo Francis com potência de 200 kW e 30 kW, sendo que somente uma delas foi encontrada e está foi removida e levada para restauração, a outra provavelmente foi roubada pois não se encontra no local. De acordo com os estudos elaborados neste trabalho constatou-se que a turbina tipo Francis é a que mais se adequa às características de queda e vazão da usina.

Na atualidade, o mais difícil de obter é um lugar que tenha potencial para gerar energia sem que acarrete grandes impactos ambientais e para a comunidade local. Com o aproveitamento do local e das estruturas existentes verificamos que por já haver uma barragem o impacto ambiental é minimizado e as reformas necessárias para reativar a usina não acarretarão danos para população local. Pelo contrário trará benefícios para cidade e população, que reaproveitará o local que hoje se encontra abandonado. O projeto é viável técnico, econômico, social e ambiental, dentro do mecanismo de desenvolvimento sustentável.

5 REFERÊNCIAS

ALVES, Gilberto M. **Avaliação da viabilidade de aplicação de uma microcentral hidrelétrica, para atender consumidores localizados em regiões isoladas**. 2007. 156 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12591: Dimensões principais de turbinas hidráulicas para pequenas centrais hidrelétricas (PCH)**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13133: Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro, 1994.

ANDRADE, R. M. de. **A drenagem nas fundações das estruturas hidráulicas**. Engevix, 1982.

BALARIM, CARLOS ROBERTO. **Avaliação expedida do custo de implantação de micro centrais hidrelétricas**. 1996. 162 f. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 1996.

BETTA HIDROTURBINAS INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **Micro central hidrelétrica Betta: um destino inteligente para a água que corre em sua propriedade**. Franca, 2005. Catálogo de equipamentos.

BRAGA JR, Roberto Alves; SALECKER, Julio Cesar. **Mini e Micro centrais hidroelétricas**. Londrina: UEL, 1999.

BRANCO, Samuel Murgel. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Moderna, 1990.

BREDOW, Edgard Walter. **Turbinas hidráulicas: gráficos e tabelas**. Curitiba, 2006. Catálogo de equipamentos.

CEPEL. Relatório Técnico ADG, A/PER Projeto 1462: **Estruturas para redes de distribuição rural**, n. 279, 2001.

COSTA, Antônio Simões. **Turbinas Hidraulicas e Condutos**. Disponível em < <http://www.labspot.ufsc.br/~simoies/dincont/turb-hidr-2003.pdf>>. Acesso em: 18/10/2011.

CREAGER, W. P.; JUSTIN, J. D.; HINDS, J. **Engineering for dams**. Londres: Wiley & Sons, 1944.

DAWALIBI, Marcelo. **Licenciamento ambiental simplificado dos empreendimentos do setor energético, suas implicações legais e constitucionais**. Disponível em <http://www.mp.sp.gov.br/caouma/Doutrina/Amb/Teses/Marcelo%20Dawalibi.htm> Acesso em 15/10/2010.

DEPARTMENT of Interior, Bureau of Reclamation. **Design of Small Dams**, 3rd ed. Denver,CO: U.S. Government Printing Office, 1987, p. 62

DOS REIS, Lineu Belico. **Geração de energia elétrica: Tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade**. Barueri-SP: Manole, 2003.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para projetos de PCH**. Disponível em <http://www.portalpch.com.br>> Acesso em 11/10/2010.

ELETROBRÁS/PROCEL. **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. 2. ed. Itajubá, MG: FUPAI, 2001.

ELETROBRÁS. **DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA**. Manual de microcentrais hidrelétricas. Rio de Janeiro: [sn], 1985. 344p.

_____. **Manual de minicentraís hidrelétricas**. Rio de Janeiro: [sn], 1985. 584p.

_____. **Manual de pequenas centrais elétricas**. Rio de Janeiro, 1982

ERBISTE, P. C. F. **Comportas hidráulicas**. Rio de Janeiro: Campus/Eletróbás, 1987.

ESCELSA. **História da Energia Elétrica no Brasil**. Disponível em <http://www.edpescelsa.com.br/aescelsa/historia-ee-brasil.asp>> Acesso em 15/04/2011.

GARCEZ, L. N. **Construções hidráulicas**. São Paulo: Blucher, 1962.

GOLDEMBERG, José; MOREIRA, José Roberto. **Política energética no Brasil**, v.19, n. 55, p.215-28, 2005.

GOMES, Carla da Gama S. **Noções de geração de energia utilizando algumas fontes de baixo impacto ambiental**. 2010. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

GREENPEACE. **Energia positiva para o Brasil**. Disponível em http://www.greenpeace.org.br/energia/pdf/dossie_energia_2004.pdf> Acesso em 11/10/2010.

HACKER INDUSTRIAL. **Turbinas Hidráulicas**. Disponível em: <<http://www.hacker.ind.br>> Acesso em: 18/10/2011.

HWANG, Ned H. C. **Fundamentos de sistemas de engenharia hidráulica**. Tradução: Archibald Joseph Macintyre. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1984.

IBGE. **Censo cidades**. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=410310#>> Acesso em 18/10/2011.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. **Recursos hídricos**. Disponível em <http://www.suderhsa.pr.gov.br>> Acesso em 18/10/2011.

INSTITUTO EDP. **História da energia elétrica no Brasil**. Disponível em http://www.institutoedp.com.br/institutoedp/pesquisadores_estudantes/energia_eletrica/historia_energia_eletrica/historia_energia_eletrica.asp> Acesso em 28/04/2011.

ITAIPU. **Nossa História**. Disponível em <http://www.itaipu.gov.br/nossa-historia>> Acesso em 11/10/2010.

ISTOÉ DINHEIRO. **O novo mapa da energia**. Disponível em http://www.institutoedp.com.br/institutoedp/pesquisadores_estudantes/energia

[_eletrica/historia_energia_eletrica/historia_energia_eletrica.asp](#)> Acesso em 29/04/2011.

KOELLE, E.; LAURIA, D. **Turbinas e instalações hidrelétricas**. São Paulo: EDUSP, 1993.

LAUTERJUNG, Helmut. **Selecion de la turbina**. Montevideo – Uruguay, GTZ, 1991.

LEITE, Antonio Dias. **A energia do Brasil**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.

LORIGGIO, D. D. **Análise crítica dos critérios de projeto da laje de concreto em barragens de enrocamento com face de concreto**. Anais... do II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2003.

MASSON, J. **Estruturas de aproveitamentos hidrelétricos**. Rio de Janeiro: Campus, 1988.

MELLO, Antônio. **CAPÍTULO 3 - Tipos de turbinas hidráulicas aplicadas às pequenas, mini e microcentrais hidráulicas**. Disponível em <http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas%20Hidr%20E1ulicas/CAP%20DTULO%203REV.htm> > Acesso em 09/06/2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Manual de minicentrais hidrelétricas**. Brasília, 1985.

_____. **Energia como vetor de desenvolvimento**. Brasília: MME, 2005.

MULLER, Arnaldo Carlos. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995.

NASCIMENTO, José Guilherme A. do; AMARAL, Cristiano Abijao de; PONTES, Paulo Richard. **A indústria hidrelétricas no Brasil e a busca de novos paradigmas**. XXII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Anais... São Paulo: CESP – Companhia Energética de São Paulo, 1997.

PEDROSO, Hermínio Braga. **Roteiro para projeto de pequenas e médias usinas hidrelétricas**. Goiânia: UFG, 1982.

PORTAL SÃO FRANCISCO. **Energia Hidrelétrica.** Disponível em <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/meio-ambiente-energia-hidreletrica/meio-ambiente-energia-hidreletrica-4.php> Acesso em 09/06/2011.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIUVA DO SUL. **O município.** Disponível em <http://www.bocaiuvadosul.pr.gov.br> > Acesso em 18/10/2011.

REIS, Josilene F.; FILHO, Sérgio Luiz O. J.; SOUZA, Wellington Linconl C. **Medição da Vazão da Usina Hidrelétrica de Roncador.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SALAZAR, Juan David Zuluaga. **Clasificación de Microturbinas Pelton.** Disponível em <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/turbinas/turbinas.html> > Acesso em 09/06/2011.

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

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

TIAGO FILHO, Geraldo Lucio. **Eficiência dos equipamentos de PCHs no Brasil.** Itajubá-MG: EFEI, 2004.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Sistema de Bibliotecas. Normas para elaboração de Trabalhos Acadêmicos.** Curitiba, 2008.

USIMINAS. **Geração de Energia.** Disponível em: <<http://www.usiminas.com>>. Acesso em: 18/10/2011.

UTFPR - Campus Curitiba. Disponível em <http://www.utfpr.edu.br/curitiba/estrutura-universitaria/assessorias/ascom/noticias/acervo/convenio-entre-campus-curitiba-e-prefeitura-de-bocaiuva-do-sul-cria-centro-de-educacao-ambiental-e-mini-usina-para-geracao-de-energia-eletrica>. > Acesso em 16/10/2010.

VIANA, Fabiana Gama; VIANA, Augusto Nelson Carvalho. **Microcentrais hidrelétricas: alternativa às comunidades rurais isoladas**. Campinas: UNICAMP, 2005.

ANEXOS

ANEXO A – Vista geral da hidrelétrica Roncador.

ANEXO B – Vistas e cortes da barragem da hidrelétrica Roncador.

ANEXO C – Vistas e cortes do conduto forçado da hidrelétrica Roncador.

ANEXO D – Vistas e cortes da casa de máquinas da hidrelétrica Roncador.

ANEXO E – SUDERHSA - Cálculo da seção transversal da hidrelétrica Roncador.

ANEXO F – SUDERHSA – Levantamento topo batimétrico da hidrelétrica Roncador.

ANEXO G – SUDERHSA – Relatório de medição de descarga líquida da hidrelétrica Roncador.

ANEXO H – SUDERHSA - Seção transversal da hidrelétrica Roncador.

ANEXO A – Vista geral da hidrelétrica Roncador.

ANEXO B – Vistas e cortes da barragem da hidrelétrica Roncador.

ANEXO C – Vistas e cortes do conduto forçado da hidrelétrica Roncador.

ANEXO D – Vistas e cortes da casa de máquinas da hidrelétrica Roncador.

ANEXO E – SUDERHSA - Cálculo da seção transversal da hidrelétrica Roncador.

ANEXO F – SUDERHSA – Levantamento topo batimétrico da hidrelétrica Roncador.

ANEXO G – SUDERHSA – Relatório de medição de descarga líquida da hidrelétrica
Roncador.

ANEXO H – SUDERHSA - Seção transversal da hidrelétrica Roncador.