

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANDRESSA YURI BALDON FUJIE
GERSON CLAUDINEI KERETCH
RARIELEN SCHAFHAUSER ORLAMUNDER DE SOUZA**

**PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA
DE RIO BRANCO DO SUL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2016**

**ANDRESSA YURI BALDON FUJIE
GERSON CLAUDINEI KERETCH
RARIELEN SCHAFHAUSER ORLAMUNDER DE SOUZA**

**PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA
DE RIO BRANCO DO SUL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC2 do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Curitiba, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Professor Dr. Gilberto Manoel Alves

CURITIBA
2016

**ANDRESSA YURI BALDON FUJIE
GERSON CLAUDINEI KERETCH
RARIELEN SCHAFHAUSER ORLAMUNDER DE SOUZA**

PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA DE RIO BRANCO DO SUL

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 14 de junho de 2016.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Gilberto Manoel Alves, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Gilberto Manoel Alves, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cicero Fritzen, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eloi Ruffato Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

AGRADECIMENTOS

Ao nosso orientador, professor Dr. Gilberto Manoel Alves, cujo conhecimento nos orientou durante a confecção deste trabalho.

Aos nossos pais e familiares, pelo apoio e inspiração.

Aos amigos, pela parceria em todos os momentos.

Ao senhor Pedro Proença proprietário do terreno onde se encontra a usina que tornou possível o estudo realizado.

RESUMO

YURI BALDON FUJIE, Andressa; KERETCH, Gerson C.; SCHAFHAUSER ORLAMUNDER DE SOUZA, Rarielen. **M`Projeto de implantação da micro central hidroelétrica de Rio Branco do Sul.** 2016. 109f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

Este trabalho tem por objetivo o projeto de implantação da Microcentral Hidrelétrica (MCH) Rio Branco do Sul. O proprietário do terreno, Sr. Pedro Proença, entrou em contato com a UTFPR a fim de realizar o projeto de reativar do potencial energético em sua propriedade, onde antigamente funcionava a Usina Siderúrgica Marumby Limitada - USIMAR. No local foram conduzidos trabalhos de campo por alunos da UTFPR, que levantaram dados sobre a estrutura existente e a topologia do terreno. Estas informações foram compiladas neste trabalho, onde serão apresentadas quais estruturas serão reaproveitadas, revitalizadas ou reconstruídas.

A usina reformada será utilizada pela comunidade acadêmica da UTFPR no estudo de Centrais Hidrelétricas.

Palavras-chave: Micro central Hidroelétrica, turbinas banki, geração energia.

ABSTRACT

FUJIE, Andressa Yuri Baldon. KERETCH, Gerson Claudinei. SOUZA, Rarielen Schafhauser Orlamunder de. Project Implementation of the Micro Hydroelectric Rio Branco do Sul. 2016. 93 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

This work's objective is the revitalization of the micro power plant (MCH) Rio Branco do Sul. The landowner, Sr. Pedro Proença, reached UTFPR to design the project to reactivate the energetic potential in his property, where the power plant Usina Siderúrgica Marumby Limitada - USIMAR used to run. UTFPR students conducted fieldworks on site, collecting data about the existing structure and topology of the land. These data were compiled in this work that will show which structures will be recycled, revitalized or reconstructed.

The academic community of UTFPR will employ the reformed power plant for the study of Hydroelectric Power Plants.

Keywords: Micro Hydropower, turbine banki, energy generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira	15
Figura 2 - Fluxograma de atividades para estudos e projeto básico de PCH.....	17
Figura 3- Trecho do Fluxograma de Atividades para Estudos e Projeto Básico de PCH.....	18
Figura 4 - Fluxograma de Atividades para Estudos e Projeto Básico de PCH.....	23
Figura 5 - Esquema para geração hidrelétrica	28
Figura 6 - Esquema de corte longitudinal em CHR	33
Figura 7 - Estrutura dos componentes para micro e minicentraís hidrelétricas	35
Figura 8 - Barragem de Algodões antes do rompimento	40
Figura 9 - Barragem de alvenaria de pedra argamassada	41
Figura 10 - Barragem de concreto.....	42
Figura 11 - Corte transversal de Turbina Pelton de 2 jatos e eixo horizontal	52
Figura 12 - Corte transversal Turbina Pelton de 6 jatos e eixo vertical	53
Figura 13 - MCH com Turbina Pelton de eixo vertical	54
Figura 14 - Rotor Turbina Pelton eixo vertical ou horizontal.....	54
Figura 15 - Corte transversal Turbina Francis caixa espiral de eixo horizontal	56
Figura 16 - Turbina Francis caixa espiral de eixo horizontal	57
Figura 17 - Rotor Francis caixa espiral de eixo horizontal.....	57
Figura 18 - Corte transversal Turbina hélice em caixa espiral.....	59
Figura 19 - Corte transversal Turbina Hélice em caixa espiral	59
Figura 20 - Rotor Hélice	60
Figura 21 - Rotor Hélice	60
Figura 22 - Campo de aplicação dos tipos de turbinas de acordo com a altura e vazão específica.....	62
Figura 23 - Localização de Rio Branco do Sul	69
Figura 24 - Queda da água	70
Figura 25 - Barragem	70
Figura 26 - Casa de máquinas	71
Figura 27 - Reservatório MCH de Rio Branco do Sul.....	74
Figura 28 - Barragem, vista 1	76
Figura 29 - Barragem, vista 2	77
Figura 30 - Vertedouro	78
Figura 31 - Comporta	79
Figura 32 - Conduto forçado.....	80
Figura 33 - Bloco de apoio	84
Figura 34 – Distância entre Câmara de carga e casa de máquinas.....	85
Figura 35 – Câmara de Carga e Conduto Forçado	86
Figura 36 - Câmara de carga	87
Figura 37 - Campo de aplicação dos tipos de turbinas de de acordo com a altura e vazão específica.....	91

Figura 38 - Catálogo Voith de Francis horizontal	93
Figura 39 - Seleção do tipo da turbina Francis Horizontal.....	93
Figura 40 - Rotações síncronas de referência para as turbinas.....	94
Figura 41 - Dimensões principais Turbina Francis Horizontal	94
Figura 42 - Gerador Síncrono WEG GTA252AIII	96
Figura 43 - Câmara de carga e conduto forçado - MCH de Rio Branco do Sul.....	99
Figura 44 - Principais dimensões da turbina Francis Horizontal.....	101
Figura 45 - Principais dimensões da turbina Michell-Banki	101
Figura 46 - Arranjo 3D da casa de máquinas	104
Figura 47 - Vista em planta da casa de máquinas	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Material utilizado segundo Distância.....	31
Tabela 2 - Material utilizado segundo Rendimento.....	32
Tabela 3 - Material utilizado segundo Velocidade Máxima	44
Tabela 4 - Curva do Vapor de Água.....	61
Tabela 5 - Cálculo Diâmetro Econômico	83
Tabela 6 - Coeficiente de atrito de Manning.....	88
Tabela 7 - Rendimento das turbinas	90
Tabela 8 - Potencia hidráulica das turbinas	90
Tabela 9 - Características técnicas do projeto material PVC	92
Tabela 10 - Características das Turbinas.....	95
Tabela 11 - Características do gerador síncrono GTA252AIII.....	96
Tabela 12 - Potência X Dimensão do gerador.....	102

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	-	Balanco Energético Nacional
CEPEL	-	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CHR	-	Central Hidrelétrica de Represamento
CM	-	Casa de Máquinas
DNAEE	-	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EIA	-	Estudo e Relatório de Impacto Ambiental
EPE	-	Empresa de Pesquisa Energética
GD	-	Geração Distribuída
GG	-	Grupo Gerador
IAP	-	Instituto Ambiental do Paraná
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kW	-	Quilowatts
LI	-	Licença de Instalação
LO	-	Licença de Operação
LP	-	Licença Prévia
MCH	-	Microcentral Hidrelétrica
MW	-	Megawatts
RADA	-	Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental
PCA	-	Plano de controle Ambiental
PCH	-	Pequena Central Hidrelétrica
RCA	-	Relatório de Controle Ambiental
RIMA	-	Relatório de Impacto Ambiental
RV	-	Regulador de Velocidade
UTFPR	-	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	TEMA DE PESQUISA	14
1.1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	16
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	18
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.1	OBJETIVO GERAL	19
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.4	JUSTIFICATIVA.....	19
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
1.5.1	ESTUDOS GERAIS	21
1.5.2	PROJETOS.....	21
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	HISTÓRICO DA ENERGIA ELÉTRICA.....	25
2.2	ENERGIA HIDRÁULICA.....	27
2.2.1	INTRODUÇÃO	27
2.2.2	TRABALHO ESPECÍFICO.....	27
2.2.3	ENERGIA PERDIDA NO SISTEMA DE ADMISSÃO	29
2.2.4	POTÊNCIAS E RENDIMENTOS.....	31
2.2.5	CENTRAL HIDRELÉTRICA DE REPRESAMENTO	32
2.3	CLASSIFICAÇÃO DE USINAS ELÉTRICAS.....	33
2.3.1	ARRANJOS BÁSICOS.....	33
2.3.1.1	Central hidrelétrica a fio d'água.....	33
2.3.1.2	Central hidrelétrica de acumulação com regulação diária do reservatório	34
2.4	ESTRUTURAS DE MINICENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	35
2.5	ANÁLISE INICIAL PARA O PROJETO DE MCH	36
2.5.1	DESVIO DO RIO.....	36
2.5.2	MEDIÇÃO DA VAZÃO	37
2.5.3	BARRAGEM.....	37
2.5.3.1	Barragem de terra.....	39
2.5.3.2	Barragem de Enrocamento	40
2.5.3.3	Barragem de Alvenaria de Pedra Argamassada.....	40
2.5.3.4	Barragem de Concreto do Tipo Gravidade.....	41
2.6	PROJETOS HÍDRICOS.....	42
2.6.1	DIÂMETRO ECONÔMICO PARA O CONDUTO FORÇADO	43
2.6.2	VERTEDOURO OU EXTRAVASADOR	45
2.6.3	TOMADA D'ÁGUA E DESAREANDO.....	45
2.6.4	CONDUTOS DE ADUÇÃO DA ÁGUA.....	46
2.6.5	CÂMARAS DE CARGA	47
2.6.6	CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	47
2.6.7	GOLPE DE ARÍETE.....	48
2.6.8	CASA DE MÁQUINAS	49
2.6.9	CANAIS DE FUGA	50
2.7	TURBINAS HIDRÁULICAS.....	50

2.7.1	TURBINAS PELTON	51
2.7.2	TURBINAS FRANCIS	55
2.7.3	TURBINAS AXIAIS – KAPLAN E HÉLICE.....	58
2.8	CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS	61
2.9	SELEÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS.....	62
2.10	GERADOR.....	63
2.11	REGULADORES DE VELOCIDADE	64
2.12	CARACOL OU CAIXA ESPIRAL	65
2.13	VOLANTE DE INÉRCIA.....	65
2.14	MEIO AMBIENTE E IMPACTO AMBIENTAL	65
2.15	OUTORGA DA ÁGUA	67
3	<u>DADOS E ESTRUTURA DA MICROCENTRAL DE RIO BRANCO DO SUL.....</u>	<u>68</u>
3.1	LOCALIZAÇÃO DA MICROCENTRAL: REFERÊNCIAS	68
3.2	CLASSIFICAÇÃO DA MICROCENTRAL.....	72
3.3	ESTUDO HIDROENERGÉTICO INICIAL	72
3.3.1	MÉTODOS UTILIZADOS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO	72
3.3.2	VAZÃO DE PROJETO	73
3.3.3	ANÁLISE INICIAL DA POTÊNCIA DA MCH DE RIO BRANCO DO SUL	73
3.3.3.1	Determinação da potência bruta do aproveitamento.....	73
3.4	RESERVATÓRIO	74
3.5	BARRAGEM.....	76
3.6	VERTEDOURO	77
3.7	TOMADA D'ÁGUA.....	78
3.8	CONDUTO FORÇADO	79
3.9	CÂMARA DE CARGA.....	80
3.10	CASA DE MÁQUINAS.....	81
3.11	CANAL DE FUGA.....	81
4	<u>DIMENSIONAMENTOS REFERENTES À MICROCENTRAL.....</u>	<u>82</u>
4.1	CONDUTO FORÇADO PARA MICROCENTRAL.....	82
4.1.1	DIÂMETRO ECONÔMICO DO CONDUTO FORÇADO	82
4.1.2	VELOCIDADE DA ÁGUA NO CONDUTO FORÇADO	83
4.1.3	ESPESSURA DO CONDUTO FORÇADO	83
4.1.4	BLOCO DE APOIO.....	84
4.2	CONDUTO FORÇADO COM MULTIPLAS SAÍDAS	85
4.3	CÂMARA DE CARGA.....	86
4.4	DETERMINAÇÃO FINAL DA QUEDA LÍQUIDA E POTÊNCIA A SER INSTALADA	87
4.4.1	DETERMINAÇÃO DAS PERDAS DE CARGA.....	87
4.4.2	DETERMINAÇÃO DA QUEDA LÍQUIDA E POTÊNCIA LÍQUIDA	88
4.5	CASA DE MÁQUINAS.....	89
4.5.1	TURBINAS.....	89
4.5.1.1	Cálculo da Potência das Turbinas.....	90
4.5.1.2	Dimensionamento Turbina Banki.....	92
4.5.1.3	Dimensionamento Turbina Francis Horizontal	92
4.5.2	GERADOR	95
4.5.3	REGULADOR DE VELOCIDADE	96
4.5.4	VOLANTE DE INÉRCIA.....	97

4.5.5	CANAL DE FUGA	97
5	<u>MEDIDAS E MUDANÇAS NECESSÁRIAS À MICROCENTRAL</u>	<u>99</u>
5.1	RESERVATÓRIO, BARRAGEM E VERTEDOURO	100
5.2	CONDUTO FORÇADO	100
5.3	CASA DE MÁQUINAS.....	100
6	<u>CONCLUSÕES</u>	<u>105</u>
7	<u>REFERENCIAS</u>	<u>106</u>

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA DE PESQUISA

No ano de 2015, o reajuste da tarifa de energia elétrica no Paraná foi de 36,8%. A justificativa da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), para autorizar o repasse do aumento ao consumidor final foi o aumento do custo com a geração de energia.

Pode-se observar na Figura 1, que a matriz elétrica brasileira se compõe em sua maior parte (70,6%) de energia oriunda de hidrelétricas, visto que possuímos a maior bacia hidrográfica do mundo. Nos anos de 2014 e 2015, houve grandes períodos de estiagem que acarretaram na diminuição do nível dos rios, e conseqüentemente no aumento no custo da geração de energia elétrica.

Da mesma forma a água de acordo com Alves (2007, p.15) além de ser inerente à vida humana e de seres vivos, é também usada para saneamento, lazer, irrigação e para produção de energia. No entanto, como as reservas mundiais de água estão ameaçadas por diversos fatores, avolumam-se os problemas econômicos, sociais e políticos. E nesse contexto é importante o uso das energias renováveis, tendo em vista o privilégio da disponibilidade de recursos, facilidade de aproveitamento e, primordialmente pelo caráter renovável.

Neste contexto o Portal Brasileiro de Energias Renováveis (2014) descreve o que são fontes de energias renováveis. Onde são os recursos naturais utilizados, capazes de se regenerar.

São classificadas como energias renováveis ou recursos naturais:

- bioenergia;
- energia geotérmica;
- hidrelétrica;
- energia do oceano, incluindo a energia das marés, das ondas e energia térmica;
- energia solar;
- energia eólica.

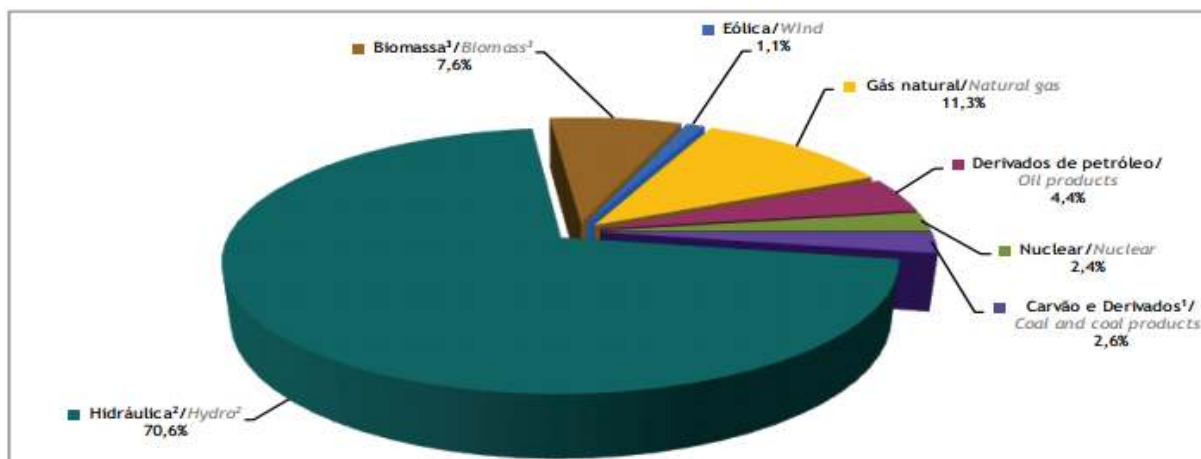


Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira
Fonte: Balanço Energético Brasileiro – BEN (2014).

Um ponto relevante a ser considerado é que ainda não há uma forma econômica viável de se armazenar energia elétrica. Diferentemente de outros sistemas de energia, a eletricidade deve ter um equilíbrio entre oferta e demanda.

Constatou-se que o consumo aumenta em uma proporção maior que em relação à oferta e estima-se que aproximadamente 728 mil domicílios do país não têm acesso à eletrificação (IBGE, 2010).

Existem alternativas apropriadas para atender o acréscimo na demanda nacional. Uma delas é a Geração Distribuída (GD). Dias (2005) define GD como sendo qualquer fonte geradora com produção destinada a cargas locais ou próximas, alimentadas sem transporte através de redes de transmissão.

Uma forma de GD viável é aquela que visa a Mini e Micro geração por meio de centrais hidrelétricas. Segundo ANEEL (2014):

“A micro e a mini geração distribuída consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.”

A Eletrobrás (2000) define micros centrais hidrelétricas (MCHs) como centrais geradoras com potência instalada menor ou igual a 100 quilowatts (kW). Minicentrais ou Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) são as centrais com potência instalada maior de 100 quilowatts (kW) e menor de 1 megawatt (MW).

A geração por pequenas centrais tem grande importância por não necessitar das redes e por conseguir atingir locais isolados onde não existem linhas de transmissão.

1.1.1 Delimitação do Tema

Através de estudos e dados levantados anteriores, o trabalho de conclusão de curso terá por objetivo, através da análise de dados e análise em campo, fazer o estudo para a viabilidade de implantação da MCH Rio Branco do Sul.

Os dois fluxogramas apresentados ao final deste tópico ilustram as etapas e atividades realizadas neste trabalho. A **Figura 2** mostra o fluxograma elaborado pela ELETROBRÁS que apresenta a sequência de estudos para o projeto de uma PCH, também válido para projetos de MCH. A Figura 3 delimita o tema deste trabalho, constitui-se de uma parcela do primeiro fluxograma, onde serão implementados os itens: barragens, tomada d'água, câmara de carga, conduto forçado, casa de máquinas e canal de fuga.

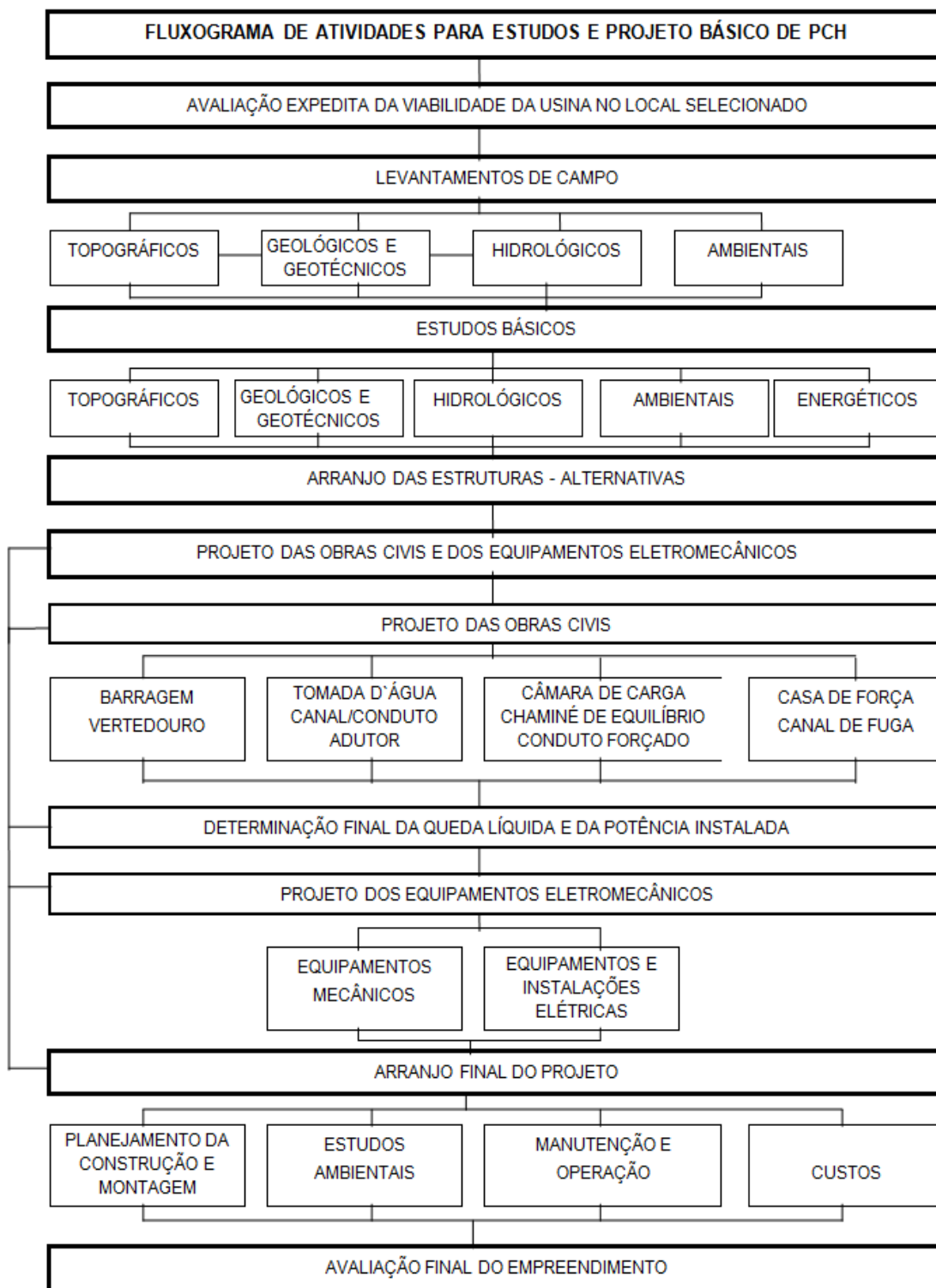


Figura 2 - Fluxograma de atividades para estudos e projeto básico de PCH
 Fonte: Eletrobrás (2000)

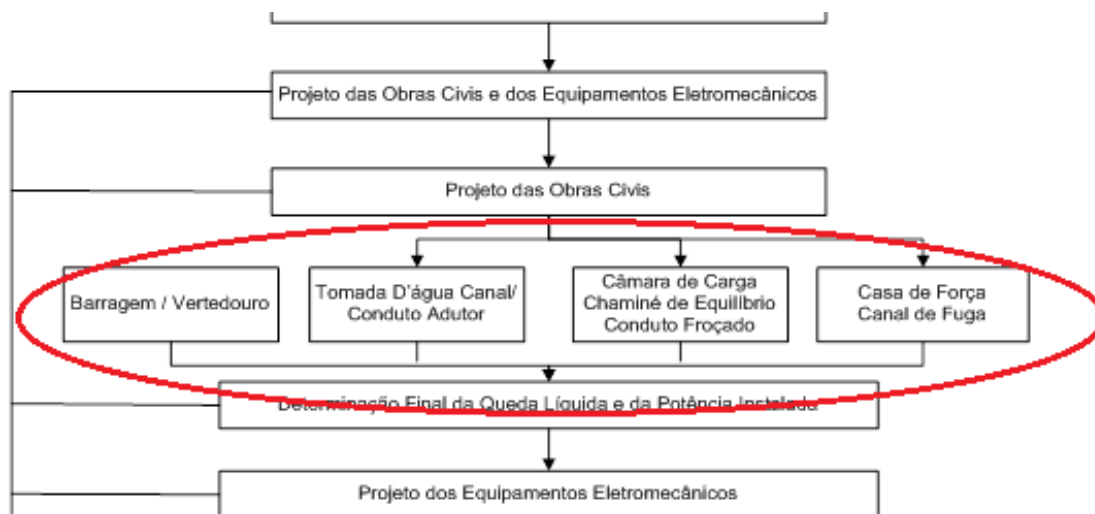


Figura 3- Trecho do Fluxograma de Atividades para Estudos e Projeto Básico de PCH
 Fonte: Eletrobrás (2000).

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

De acordo com o crescimento demográfico e econômico mundial, presume-se um aumento do consumo de energia elétrica. Contudo, esgotam-se os recursos naturais, o que gera preocupações relacionadas a reduções no fornecimento de energia (ALQUÉRES, 2003).

Trata-se de um tema atual devido ao grande aumento do consumo de energia elétrica, e com isto cresce a cada dia a busca por fontes alternativas. A MCH é uma solução encontrada para atender a um pequeno consumidor e até mesmo para alimentar a rede caso a produção de energia seja superior à consumida. Sabendo da relevância social de pequenas centrais que são sistemas de produção de energia renovável (Alves, 2007) e tendo em vista que o Brasil fará pelo menos 50% de sua expansão da necessidade energética pelo sistema hídrico (Portal Brasileiro, 2011). Com esse cenário, torna-se plausível a implantação de micro usinas hidrelétricas MCH para as comunidades rurais na proporção que dispõe condições técnico/econômicas adjuntas às novas tecnologias.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O trabalho de conclusão de curso terá por objetivo realizar um estudo de viabilidade de implantação da Microcentral Hidrelétrica de Rio Branco do Sul. As instalações civis são existentes e permanecerão, serão feitas reformas nos dutos e a casa de máquinas será relocada. Os equipamentos elétricos serão adquiridos conforme as especificações deste trabalho.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal do estudo da viabilidade de reforma e implantação da usina, algumas premissas deverão ser atingidas:

- revisão dos estudos existentes sobre projetos de implantação de MCH;
- análise das estruturas e equipamentos existentes na usina;
- verificar quais partes da usina existente poderá ser reaproveitada;
- análise dos resultados e conclusão sobre a viabilidade da implantação.

1.4 JUSTIFICATIVA

A realização do estudo para a implantação da MCH de Rio Branco do Sul servirá de aprendizado para os alunos da universidade. Já foram realizados alguns estudos sobre o tema, como trabalhos de conclusão de curso sobre a vazão, câmara de carga e conduto forçado, casa de máquinas, entre outros. A partir destas pesquisas, pode-se chegar à viabilidade desta MCH.

Para realizar o projeto de implantação devem ser utilizados todos os dados de projetos já coletados referentes à MCH, bem como os levantamentos de campo atualizados.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos constituem a fase final de apresentação de um projeto de pesquisa. Após ter esclarecido as facetas do problema, sua fundamentação teórica (em que argumentos irá se sustentar/visões que irá refutar) e revisão bibliográfica (o que outros autores já escreveram sobre o assunto), é hora de demonstrar como o problema será abordado empiricamente. Para tanto, é preciso apresentar como isso será feito na seção dos procedimentos metodológicos. Dividiremos o trabalho nas seguintes etapas:

1.5.1 Estudos Gerais

A Eletrobrás (2000) apresenta o fluxograma para o estudo e implantação de uma pequena central, este fluxograma ilustra as etapas e atividades indispensáveis à consecução de uma PCH, como pode ser observado na Figura 4.

O fluxograma de Implantação de uma PCH demonstra os níveis que devem ser percorridos para a implantação de uma PCH e as necessárias interações, principalmente no quesito estudos de engenharia, que envolvem estudos topográficos, geológicos, técnicos, hidrológicos, ambientais, legais e providências institucionais. O fluxograma de Atividades para Estudos e Projeto Básico de PCH descreve a sequência a ser seguida para realizar o projeto de uma PCH. Este procedimento também poderá ser adotado para o caso de MCH.

1.5.2 Projetos

O trabalho será realizado por meio de pesquisa, revisão bibliográfica e registro das informações encontradas. Haverá um levantamento de todos os dados já coletados, através de trabalhos anteriores e pesquisa de campo. O estudo de

campo deverá envolver a avaliação das estruturas e os equipamentos existentes, bem como suas condições para uso ou para rejeição e troca. Serão necessárias pesquisas sobre normas técnicas, catálogos e manuais de fabricantes e pesquisa econômico-financeira.

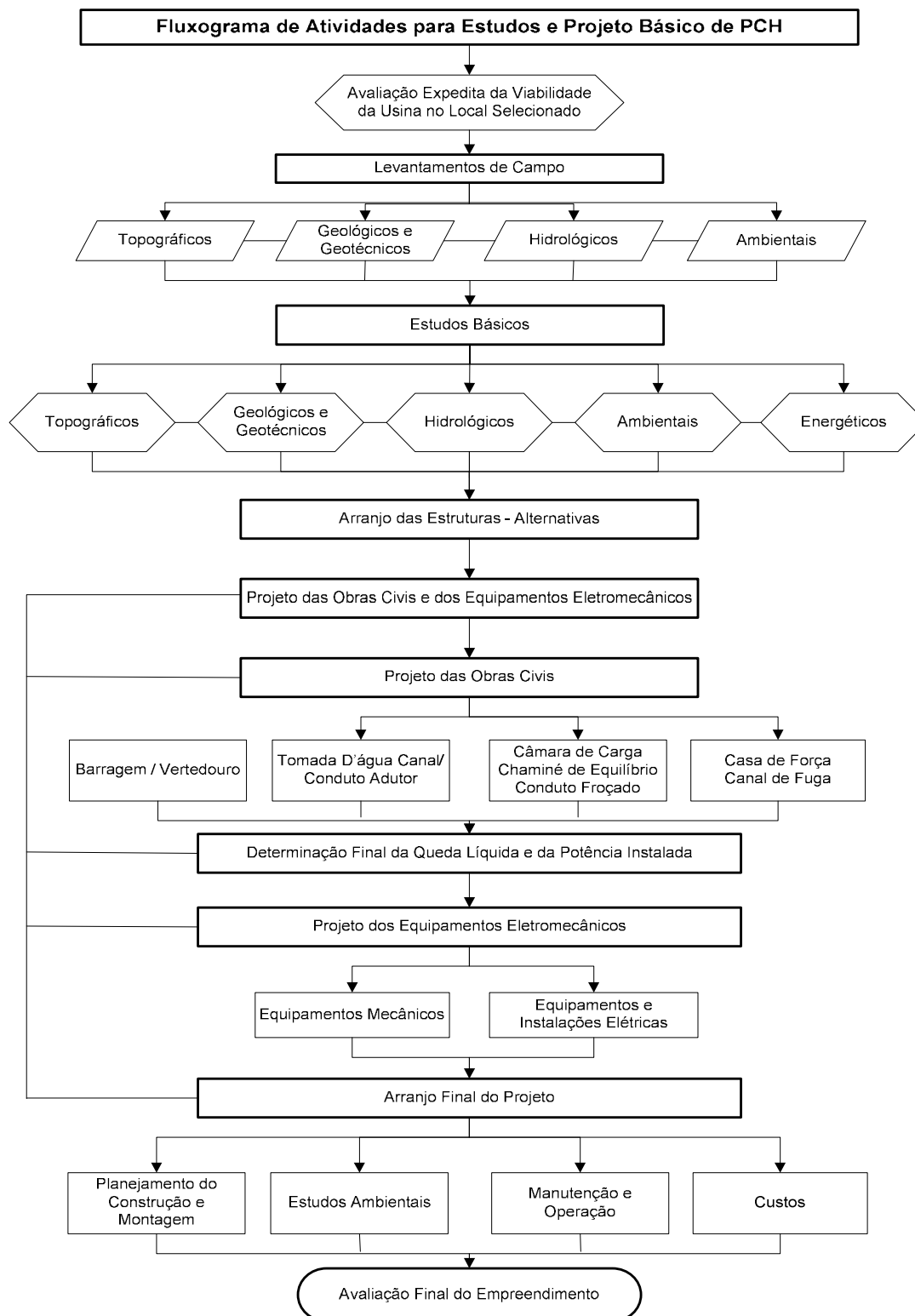


Figura 4 - Fluxograma de Atividades para Estudos e Projeto Básico de PCH
 Fonte: Eletrobrás (2000)

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será dividido de acordo com a seguinte estrutura:

- Capítulo 1 – Introdução

A introdução será composta de: tema de pesquisa, delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos, justificativa, cronograma e procedimentos metodológicos.

- Capítulo 2 – Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão abordados conceitos para melhor compreensão do tema. A fundamentação teórica, que dará base ao projeto e a tudo que será necessário para a construção do mesmo.

- Capítulo 3 – Estrutura da MCH Rio Branco do Sul

Dados que contemplam a estrutura e todos os dados referentes à MCH Rio Branco do Sul.

- Capítulo 4 – Dimensionamentos referente à MCH

Análise dos resultados obtidos, através do estudo que indicará os melhores projetos para a implementação da MCH.

- Capítulo 5 – Medidas e mudanças necessárias à MCH

Neste capítulo, serão feitas as considerações necessárias para mudar na estrutura da MCH.

- Capítulo 6 – Conclusão

Conclusões e demais considerações acerca do estudo realizado.

- Capítulo 7 - Referências

Referências usadas como base para realizar o estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO DA ENERGIA ELÉTRICA

A era da produção em larga escala de energia elétrica começou por volta de agosto de 1895, quando a corrente de água das Cataratas do Niágara foi desviada, atravessando um par de turbinas que foram acopladas em dois geradores de 5000 HP de potência, o que corresponde a 3725 kW. A tensão da energia produzida era de 2.200 volts, e foi utilizada para a manufatura de alumínio na região próxima à queda d'água. No ano seguinte, esta tensão foi elevada para 11.000 volts e transmitida por 32 quilômetros para a cidade de Buffalo, nos Estados Unidos, onde foi utilizada para iluminação (SMIL, 2000).

Este feito marcante só foi possível devido a uma série de descobertas feitas há dois séculos que envolviam a geração e o transporte de energia elétrica. Algumas foram conceituais, outras técnicas, e algumas envolviam o desenvolvimento da tecnologia a ponto de tornar-se a energia elétrica economicamente viável.

No começo do século 18, havia um consenso entre físicos experimentais que vários materiais produziam um efeito, que eles chamavam de eletricidade, quando atritados, e esta condição produzia, além de faísca, o efeito de atração e repulsão. Neste período um inglês, Stephen Hales, demonstrou que esta condição poderia ser incitada em fios metálicos (SMIL, 2000).

Benjamin Franklin, inspirado por seus contemporâneos, criou o conceito de um fluído elétrico que atraía matéria com o fluído e repelia matéria sem o fluído, esta formulação básica ajudou na compreensão do processo da condução (SMIL, 2000).

Posteriormente aos experimentos de Franklin, em 1800, Alessandro Volta propôs um conceito alternativo que o levou a inventar a pilha elétrica. Apesar da pilha de Volta não fornecer tensão elevada o suficiente para produzir faísca, ela podia fornecer corrente contínua e ser facilmente transportada (SMIL, 2000).

Em 1819, o dinamarquês Hans Christian Oersted descobriu que uma corrente elétrica, quando aplicada a um fio metálico, produz efeito magnético, a partir deste e de outros experimentos, Faraday descobriu em 1831 uma corrente

elétrica sendo produzida em um fio condutor próximo a um ímã – o princípio de funcionamento de um gerador (SMIL, 2000).

O primeiro uso prático da energia elétrica foi o telégrafo eletromagnético, desenvolvido com o uso de baterias que produziam corrente elétrica, cabos para cobrir distâncias, e um ímã para produzir efeito em um lado do condutor quando um interruptor é acionado do outro lado. Este experimento foi importante para a compreensão de que, em uma linha de transmissão longa, era melhor ter uma tensão relativamente alta e uma corrente baixa. Neste caso, o gerador inventado por Faraday não foi usado devido à sua ineficiência.

Com o advento de um dínamo auto excitado pelo belga Zenobe Gramme, a produção de energia elétrica em larga escala tornou-se prática pelo princípio de gerador de Faraday (SMIL, 2000).

A distribuição da energia em grande escala proporcionou um novo incentivo para o desenvolvimento de uma fonte de luz, que poderia ser utilizada dentro de residências. Em 1879, Thomas Edison alcançou esse objetivo com a lâmpada incandescente (SMIL, 2000).

Porém, ainda havia o problema da transmissão da energia, que era produzida em pequenas estações, com tensão de saída de no máximo 100 Volts, o suficiente para alimentar cargas a aproximadamente 800 metros de distância da estação. Conceitualmente a solução era fácil: transmitir a energia em tensão elevada e abaixá-la próximo ao consumidor. Para a corrente alternada existe o transformador para converter as tensões, porém na época ainda não existiam motores em corrente alternada, tornando inviável a construção de todo o sistema de geração em corrente alternada apenas para iluminação (SMIL, 2000).

Em 1888, Nikola Tesla revolucionou a geração de energia, ele já havia projetado motores em corrente alternada com operação bifásica e polifásica, porém os sistemas de geração de corrente alternada eram apenas monofásicos. Tesla, então, projetou um gerador que produzia duas ou mais correntes ao mesmo tempo, com suas fases sobrepostas (SMIL, 2000).

Com as patentes de Tesla, George Westinghouse ganhou o contrato para construir os geradores nas Cataras do Niágara. Até o final de 1904 a segunda subestação já estava completa, e já era evidente que a produção em larga escala e

a transmissão de energia elétrica é conceitualmente correta, tecnicamente exequível e economicamente viável.

2.2 ENERGIA HIDRÁULICA

2.2.1 Introdução

Energia hidráulica é a energia obtida através da energia potencial de uma massa de água, ela se manifesta por meio de um desnível de rios e lagos e convertida na forma de energia mecânica por turbinas hidráulicas. Estas turbinas, por sua vez, podem ser utilizadas para o acionamento de geradores.

2.2.2 Trabalho Específico

Considerando dois reservatórios interligados por encanamentos com fluxo contínuo, conforme a Figura 5:

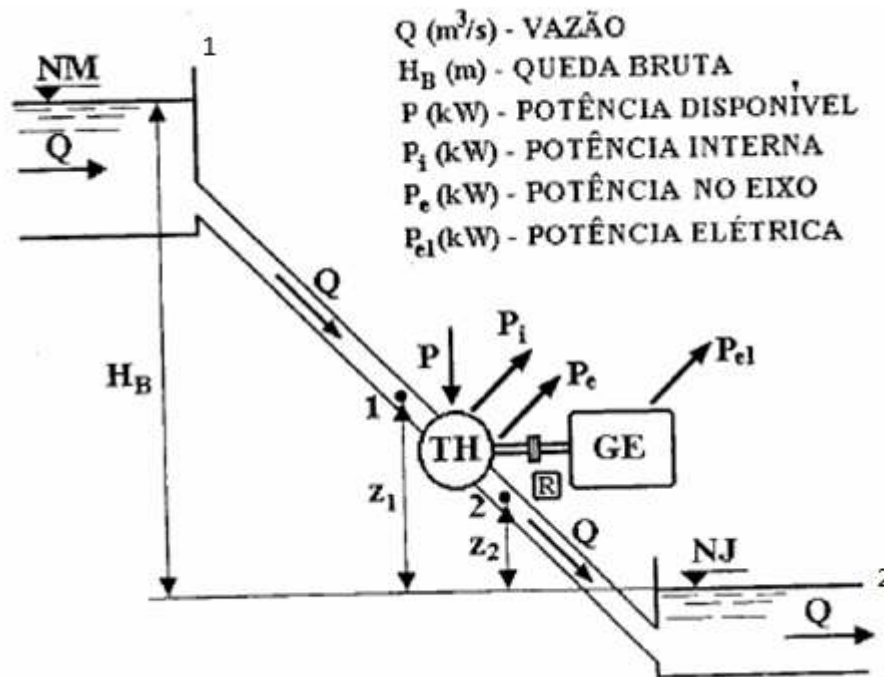


Figura 5 - Esquema para geração hidrelétrica
 Fonte: Souza (1999)

Segundo Souza (1999) define-se a energia hidráulica média disponível, por unidade de massa conforme mostra a Equação 1:

$$E = \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \quad (1)$$

Tal que:

- “ p ”: pressão relativa;
- “ ρ ”: massa específica da água;
- “ v ”: velocidade média da água;
- “ g ”: aceleração da gravidade;
- “ z ”: altitude do nível da água.

Considerando o ponto 1 na entrada do encanamento e o ponto 2 na sua saída, obtém-se o trabalho transformado pela turbina hidráulica (TH):

$$E_1 - E_2 = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \quad (2)$$

Para que esta energia específica seja máxima,

$$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_a}{\rho} ; v_2 = 0 ; z_2 = 0 \quad (3)$$

Onde “ p_a ” é a pressão atmosférica.

Para que estas condições sejam satisfeitas, a saída deve estar o mais próximo do NJ (nível jusante). Para certos tipos de turbinas hidráulicas a saída pode ser prolongada por um tubo tronco-cônico, chamado de tubo de sucção, o que resulta no trabalho específico máximo, denominado de trabalho específico disponível – Y . (SOUZA, 1999)

$$Y = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g \cdot z_1 \quad (4)$$

$$m = \rho \cdot Q \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (5)$$

Tendo em vista a massa de escoamento, equação (5), define-se a potência bruta P_b :

$$P_b = m \cdot g \cdot H_b = \rho \cdot Q \cdot H_b = \rho \cdot Q \cdot Y_b \quad (6)$$

$$\rho = 1000 kg/m^3 \quad (7)$$

Para a água, então a potência bruta em kW será:

$$P_b = Q \cdot Y_b = g \cdot Q \cdot H_b \quad (8)$$

Da mesma forma para a potência disponível:

$$P = Q \cdot Y = g \cdot Q \cdot H \quad (9)$$

2.2.3 Energia Perdida no Sistema de Admissão

Uma vez definidos o arranjo e as características do escoamento através dos componentes da hidrelétrica, torna-se possível determinar a queda e a energia específica perdida no sistema de admissão (SOUZA, 1999).

Aplicando a fórmula de Bernoulli, matemático suíço que viveu no século 16, ao escoamento que ocorre no sistema de admissão da central hidrelétrica, ou seja, desde o nível montante, tem-se que:

$$H_B = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + H_{psa} \quad (10)$$

Ou seja,

$$Y_b = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot z_1 + Y_{psa} \quad (11)$$

Mas

$$Y = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g \cdot z_1 \quad (12)$$

Então:

$$H_{psa} = H_b - H \quad (13)$$

$$Y_{psa} = Y_b - Y \quad (14)$$

Onde H_{psa} é a queda em metros Y_{psa} é a energia específica perdida no sistema de admissão.

Para cálculos preliminares, quando o arranjo ainda não está definido, pode-se fixar um intervalo de valores para a perda de carga desde a barragem até a entrada da turbina, como mostra a Tabela 1:

Tabela 1 - Material utilizado segundo Distância.

<i>Distância entre a tomada d'água e a casa de máquinas</i>	<i>H_{psa} (Em termos de H_b)</i>
Menor ou igual a 80 metros	0,02 * H _b
Entre 80 e 300 metros	0,03 * H _b
Entre 300 e 800 metros	0,04 * H _b
Maior que 800 metros	0,05 * H _b

Fonte: Eletrobrás e DNAEE (1985)

2.2.4 Potências e Rendimentos

Souza (1999) define o rendimento total pela multiplicação do rendimento interno à turbina, do rendimento externo, do gerador e da potência perdida, ou seja:

$$\eta_{ap} = \eta_{sa} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (15)$$

Onde “ η_{sa} ” é a relação entre a potência disponível e a bruta, conforme explicitado anteriormente.

Já as componentes η_i , η_m e η_g referem-se às perdas internas, externas à turbina e do gerador, respectivamente. São determinadas por ensaios mecânicos, e são geradas por atritos dos componentes ou do próprio fluido.

Os valores de η_{ap} variam desde 0,18 até 0,93, sendo que a maior variação deve-se à componente interna a turbina η_i . Seus valores variam conforme a Tabela 2:

Tabela 2 - Material utilizado segundo Rendimento.

<i>Tipo de Turbina</i>	<i>Rendimento Mínimo</i>	<i>Rendimento Máximo</i>
TH Hidro Cinética	0,3	0,6
TH com Rotor Michell	0,5	0,85
TH com Rotor Pelton	0,75	0,97

Fonte: Eletrobrás e DNAEE (1985).

2.2.5 Central Hidrelétrica de Represamento

Tendo em vista os conceitos e considerações apresentados, Souza faz um esquema de uma Central Hidrelétrica de Represamento – CHR. Neste esquema básico constam apenas os níveis de montante nominal e o nível mínimo jusante, porém as distâncias mínimas de afogamento de tubo de sucção e do conduto forçado também devem ser consideradas, estes dados podem ser melhor visualizados na

Figura 6.

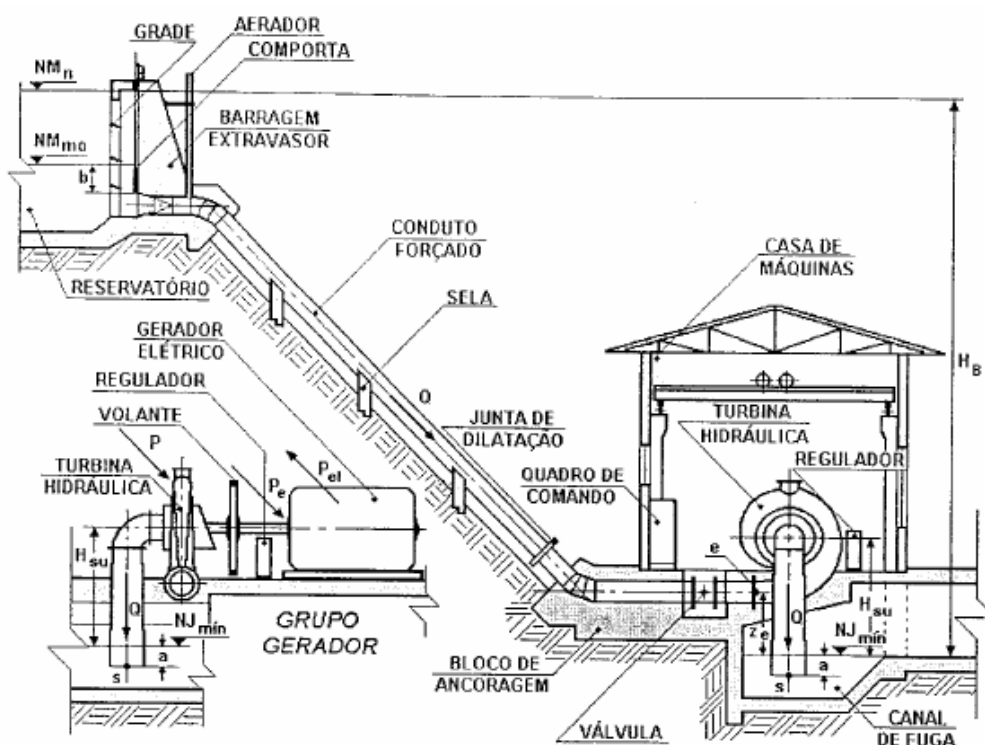


Figura 6 - Esquema de corte longitudinal em CHR

Fonte: Souza (1999)

2.3 CLASSIFICAÇÃO DE USINAS ELÉTRICAS

2.3.1 Arranjos Básicos

Para a classificação de uma central hidrelétrica são considerados diversos fatores, dependentes entre si, são eles: altura da queda d'água, vazão, potência instalada, tipo de turbina, localização, tipo de barragem e reservatório. (ANEEL, 2015).

Dentro da classificação por reservatório, existem as centrais a fio d'água e a de acumulação.

2.3.1.1 Central hidrelétrica a fio d'água

Este tipo de PCH é empregado em situações onde a vazão de estiagem do rio é igual ou maior do que a descarga na turbina necessária para atender à potência demandada máxima prevista. Assim, o volume de reservatório criado pela barragem não é necessário. O sistema de adução deve conduzir a descarga necessária para fornecer a potência que atenda à carga demandada. O aproveitamento energético é parcial, e o vertedouro funcionará quase ininterruptamente, extravasando o excesso de água. (ELETROBRAS, 2015).

Algumas simplificações são notórias neste tipo de projeto, são elas:

Dispensa o estudo de regulamento de vazões, uma vez que a vazão de estiagem do rio já é suficiente para atender a carga.

Dispensa o estudo de sazonalidade da carga, já que a turbina é capaz de gerar energia para atender a demanda máxima instalada;

Facilita estudos da tomada d'água, já que não existem flutuações significativas do nível da água. No projeto isso acarreta na profundidade do canal aberto, que deverá ser a menor possível, pois não existe a necessidade de atender às depleções. No caso de existir a necessidade de instalação de chaminé de equilíbrio, sua altura também será mínima;

- Barragens baixas, já que não existe a necessidade de acúmulo de água, apenas o desvio d'água para o circuito de adução;
- Áreas inundadas pequenas, valores gastos com indenizações reduzidos.

2.3.1.2 Central hidrelétrica de acumulação com regulação diária do reservatório

Segundo a ELETROBRAS, as Centrais Hidrelétricas de Acumulação são empregadas quando a vazão de estiagem é inferior à necessária para suprir a carga instalada máxima da PCH. Então, faz-se necessário o reservatório, que fornecerá o adicional necessário para a vazão. No caso da central hidrelétrica de acumulação com regulação diária são considerados dados de vazão média diariamente para a regulamentação da vazão de água necessária.

2.4 ESTRUTURAS DE MINICENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Para se dimensionar estruturas e equipamentos de uma usina hidrelétrica de pequeno porte, Balarim (1996) deve ser obedecida a uma sequência lógica, conforme o fluxograma da Figura 7:

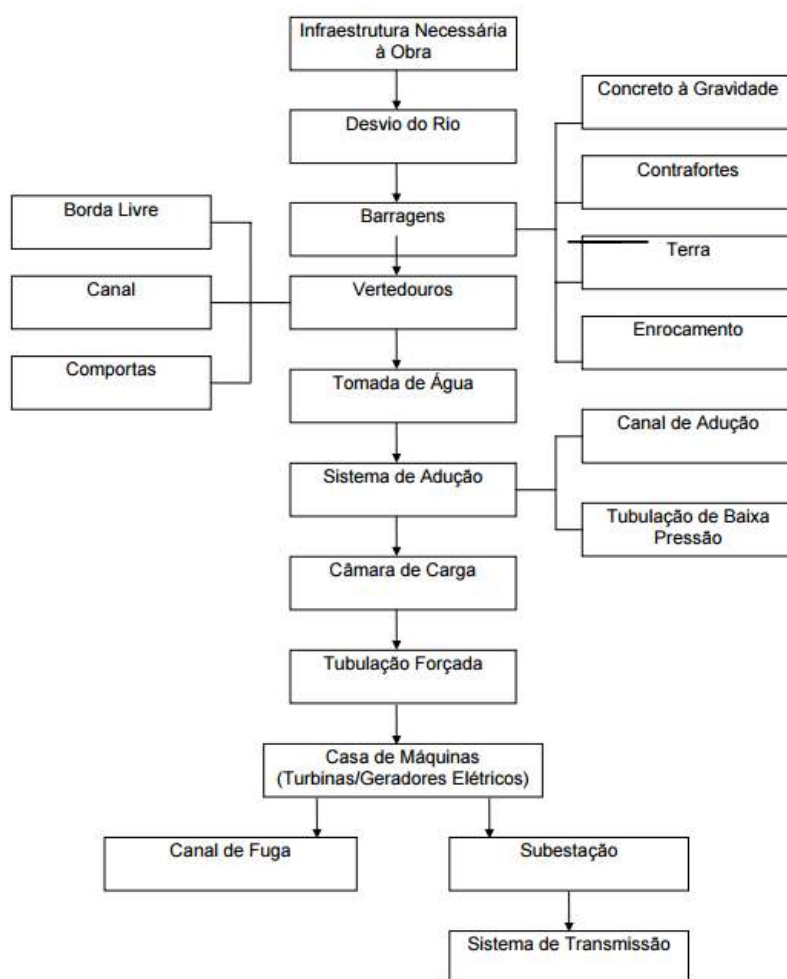


Figura 7 - Estrutura dos componentes para micro e minicentrais hidrelétricas
 Fonte: Balarim (1999)

Segundo BALARIM (1996), o estudo deve ser feito desde o desvio do rio até a especificação da linha de transmissão. Ainda julga como necessário algum dos itens para o início das obras como: a existência de estradas, a assistência médica-odontológica, os alojamentos para os trabalhadores e um sistema de captação de água e de lançamento de detritos. Assim como é importantíssimo obter informações

sobre o acesso ao local, bem como sobre a situação de comunicação com localidades próximas.

2.5 ANÁLISE INICIAL PARA O PROJETO DE MCH

Para o dimensionamento dos itens como: tomada d'água, canal de adução, tubulação de adução em baixa pressão e tubulação forçada e casa de máquinas, segundo a Eletrobrás e DNAEE (1985), é necessário o estudo inicial para o projeto, como os dados básicos referentes à queda bruta do aproveitamento, perfis do terreno, vazões naturais do curso d'água, vazões mínimas e a potência necessária para suprir o centro consumidor.

Segundo a Eletrobrás e DNAEE (1985), para fazer um melhor dimensionamento da casa de máquinas, faz-se necessário o conhecimento das unidades geradoras e da potência a ser instalada.

2.5.1 Desvio do rio

Visando um custo mínimo e diminuir os danos e riscos dos canteiros de obra, o esquema de desvio do rio a ser adotado deve ser analisado para cada usina e para o tipo de curso de água em questão. Sendo muito importante realizar um dimensionamento da vazão e do desvio do rio, para se ter definida a margem de risco de incidentes que possam vir a ocorrer como a inundação da obra, o atraso do cronograma de obras, e principalmente, a segurança das populações ribeirinhas (BALARIM, 1996).

Segundo Eletrobrás e DNAEE (1982), dividem em quatro tipos básicos para desvio de rio em função das condições da região:

- desvio do rio com fundação em solo e descarga de desvio inferior a um metro cúbico por segundo;
- desvio do rio com fundação em solo e descarga de desvio superior a um metro cúbico por segundo;

- desvio do rio com fundação em rocha e desvio pela ombreira;
- desvio do rio pela calha natural, com fundação em rocha.

A maioria das microcentrais hidrelétricas, cuja vazão é até um metro cúbico por segundo, necessita de estruturas bastante simples, que podem ser implantadas mediante a utilização de elementos pré-moldados ou até de estruturas de madeira funcionando em conjunto com pequenas obras de terra (KRAATZ, 1976).

Para vazões maiores, seria necessário um volume crescente de escavações em terra ou em rocha (BALARIM, 1996).

2.5.2 Medição da Vazão

Segundo a Eletrobrás e DNAEE (1985), para a determinação das vazões para utilização no cálculo da potência a ser instalada, a vazão de desvio do rio durante a construção, a vazão de projeto das estruturas extravasadoras, ou cheia de projeto e a relação cota-descarga a jusante da central, devem-se coletar dados como: Mapas diversos, perfis transversais e longitudinais dos rios, dados topográficos, geológico, hidrométricos e o sistema energético existente na região.

Deve-se definir a implantação de um posto fluviométrico, sistema implantado em um local de um curso da água, o qual vai permitir conhecer, neste local, a função lâmina da água em relação à vazão (SOUZA, 2009).

2.5.3 Barragem

Segundo Souza (2009), barragem é uma obra de engenharia que tem por objetivo criar a montante um reservatório de acumulação, que pode ser utilizado para os diversos fins: Geração de energia elétrica, irrigação, regulação para navegação, abastecimento de água pública e industrial, lazer, entre outros, podendo atender a mais de uma finalidade simultaneamente. A barragem deve elevar o nível das águas do rio, permitindo o afogamento da tomada de água.

Segundo ELETROBRÁS (2000), nos estudos geológico-geotécnicos e da otimização que caracterizam os materiais constituintes de cada trecho da barragem, devem ser levados em conta os seguintes itens:

- Balanceamento dos materiais de escavação e aterro, sua origem e destino;
- Fases construtivas das obras da barragem;
- Estabelecimento das cotas da crista e fundações;
- Sistemas de drenagem;
- Tratamento das fundações e metodologia de execução;
- Tratamento de taludes e impermeabilizações;
- Ligações com estruturas de concreto e ombreiras;
- Instrumentação de auscultação;
- Cálculos volumétricos detalhados de cada material que constitui a estrutura da barragem bem como das escavações onde esses materiais serão obtidos;
- Análise de estabilidade dos trechos característicos da barragem e integração barragem/fundação.

Segundo Alves (2007), as barragens devem ser projetadas para resistir a falhas por tensão, deslizamento e rupturas. O projetista usa a estabilidade e margem de segurança como critérios principais na construção de barragens.

As barragens são classificadas segundo o material de construção: barragens de terra; barragens de enrocamento; barragens de alvenaria; barragens de concreto ou barragens do tipo misto (SCHREIBER, 1977).

2.5.3.1 Barragem de terra

A barragem de terra recomendado devido ao volume e qualidade de materiais existentes no local, como o solo argiloso, onde não apresenta blocos de rocha para enrocamento, utiliza o solo escavado no canal de adução e no vertedouro (ELETROBRÁS e DNAEE, 1982).

Segundo a Eletrobrás e DNAEE (1985), deve-se evitar que a água que se infiltra pela barragem tenha altas velocidades, pois pode haver erosão danificando a estrutura da barragem. Este é o maior cuidado com as exigências de permeabilidade do corpo da barragem e das fundações. Este tipo de barragem tem por objetivo criar um desnível hidráulico, não sendo preponderante a acumulação de água no reservatório para regularização da vazão do rio.

Um exemplo deste tipo de barragem é a Barragem de Algodão, figura 8, que em 2009, se rompeu e inundou 50 quilômetros da cidade de Cocal da Estação. A barragem de Algodões fica a 250 km de Teresina, no Piauí.



Figura 8 - Barragem de Algodões antes do rompimento
Fonte: O GLOBO (2009)

2.5.3.2 Barragem de Enrocamento

As barragens de enrocamento são construídas principalmente em locais onde existe rocha adequada sem grande cobrimento e com pouco material argiloso, necessário para construção de uma barragem de terra (SCHREIBER, 1977).

Segundo a Eletrobrás e DNAEE (1985), as principais partes da barragem de enrocamento são constituídas de pedras de maior tamanho e o elemento vedante que é constituído de material mais fino como o solo argiloso.

2.5.3.3 Barragem de Alvenaria de Pedra Argamassada

Segundo a Eletrobrás e DNAEE (1985), em locais de vales relativamente estreitos, onde se necessita de pouca altura, pode ser feita a barragem de alvenaria. Embora seja mais de construção mais demorada do que a Barragem de Concreto, a Barragem de Alvenaria de Pedra Argamassada pode ser mais econômica. Esta barragem pode ser visualizada na Figura 9.

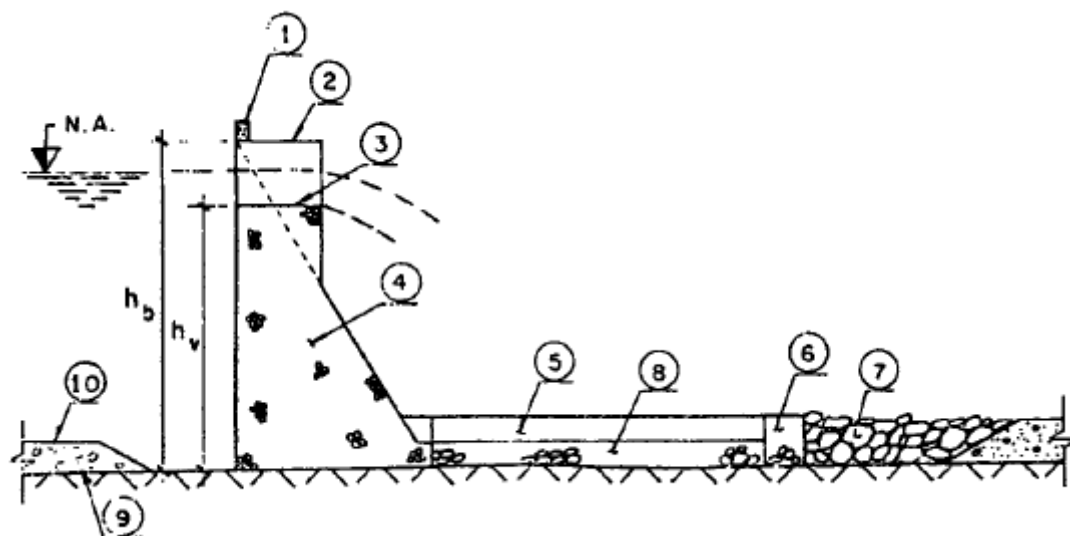


Figura 9 - Barragem de alvenaria de pedra argamassada
Fonte: ELETROBRÁS e DNAEE (1985)

Tal que:

- 1) Mureta de proteção
- 2) Crista da barragem
- 3) Crista do trecho vertedouro
- 4) Corpo da barragem
- 5) Parede lateral da bacia de dissipação
- 6) Parede final da bacia
- 7) Enrocamento de proteção
- 8) Laje da bacia de dissipação (para rocha fraturada)
- 9) Superfície natural da rocha
- 10) Superfície natural do terreno

2.5.3.4 Barragem de Concreto do Tipo Gravidade

Segundo a Eletrobrás e DNAEE (1985), em locais de vales relativamente estreitos, com aproximadamente 100m largura, com represamento de próximo de 3m, com rocha em boas condições. Consiste em um muro, cuja seção transversal se aproxima a de um triângulo retângulo, resiste à pressão da água do reservatório e à subpressão das águas que se infiltram pelas fundações. Possui o vertedouro, de preferência coincidente com a parte central do vale, destinado a permitir extravasar

as águas excedentes. Um exemplo retirado do próprio Manual de Microcentral hidrelétricas é explicitado pela Figura 10.

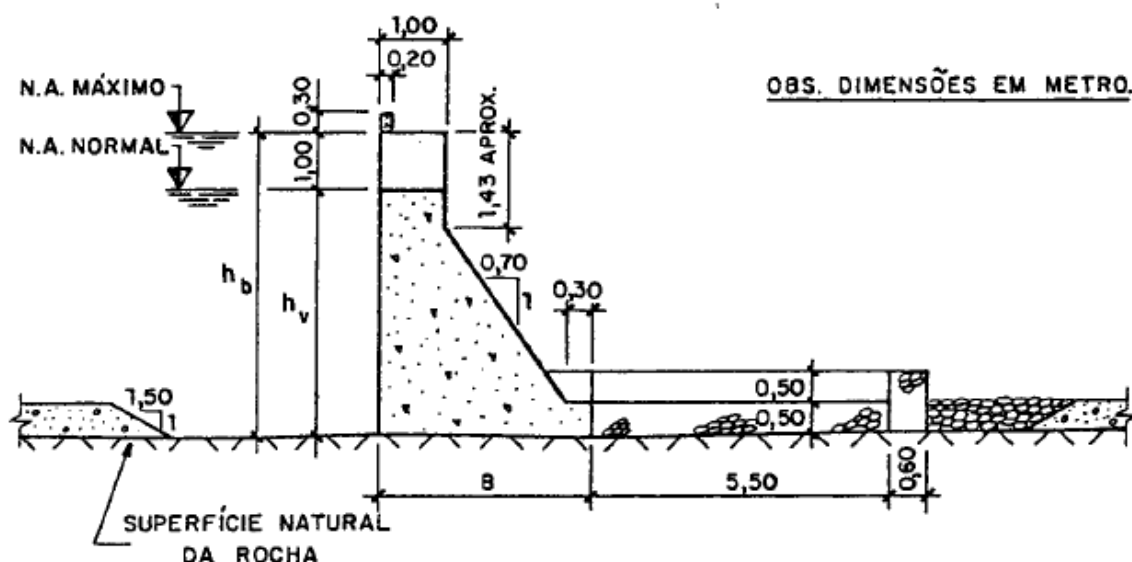


Figura 10 - Barragem de concreto
Fonte: ELETROBRÁS e DNAEE (1985)

2.6 PROJETOS HÍDRICOS

A maioria de projetos hídricos é desenvolvida para produzir energia elétrica para usos próprios privados. Muitos projetos custeados pelo governo tentam servir a diversas finalidades com relação à geração de energia, tais como: controle da inundação de rios; armazenamento e manutenção dos níveis de água da correnteza do rio para necessidades da navegação; armazenamento da água para irrigação; e armazenamento para o abastecimento de água potável. A disposição de projetos de estação hídrica depende dos serviços que a estação deve executar, da topografia ao redor (BERNHARDT e VOPAT, 1996).

Estes fatores por sua vez, junto com as características físicas do local, regulam o tipo e o arranjo das barragens, dos vertedouros, e dos sistemas de adução. Muitos tipos de barragens podem ser encontrados em um projeto, a economia da região em particular determina o tipo escolhido. As barragens elevadas predominam onde o rio cai de uma longa distância, e as represas baixas são

erguidas mais frequentemente na base de quedas concentradas. A casa de máquinas perto da base das cachoeiras custa menos, mas têm frequentemente canalizações mais longas até a casa de força (ALVES, 2007).

A casa de força está geralmente próxima dos aproveitamentos para minimizar custos de escavação. As canalizações longas causam perdas de pressão e aumentam o custo da instalação.

2.6.1 Diâmetro Econômico para o Conduto Forçado

Os condutos forçados das centrais hidrelétricas podem ser de chapas de aço soldadas, aço laminado sem costura, ferro fundido, cimento-amianto, PVC ou madeira, tudo dependendo das condições técnicas e econômicas. Quanto à instalação, podem ser a céu aberto ou enterrados, quando não necessitam de juntas de dilatação (SOUZA, 2009). A Eletrobrás e DNAEE (1985) considera que, para minicentrals hidrelétricas, as tubulações forçadas possuem o mesmo diâmetro ao longo de todo o comprimento.

A Eletrobrás e DNAEE (1985) definem o diâmetro econômico com o melhor benefício/custo. Onde benefício pode ser considerado o valor da energia a ser produzida durante toda a vida útil da central; e custo, a soma dos custos de materiais, montagem, manutenção, juros e amortizações.

O diâmetro calculado, que pode ser considerado sem grandes erros, como econômico, pode ser obtido pela fórmula de Bondschu (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985):

$$D_e = 127 \sqrt[7]{\frac{Q^3}{Ht}} \quad (16)$$

Onde:

$$H_t = H + h_s \quad (17)$$

Sendo:

D_e – diâmetro econômico, em cm

Q – descarga máxima na tubulação, em m³/s

H_t – carga hidráulica total sobre a tubulação, em m

H – queda bruta = carga hidráulica estática sobre a tubulação, em

mh_s – sobrepressão hidráulica devido ao golpe de aríete, em m

Para minicentraís pode-se admitir a simplificação:

$$h_s = 0,2 H \quad (18)$$

Logo:

$$H_t = 1,2 H \quad (19)$$

Resultando na simplificação da equação (1):

$$D_e = 123,7 \sqrt[7]{\frac{Q^3}{H_t}} \quad (20)$$

Calculado o diâmetro econômico e tendo conhecimento da descarga máxima na tubulação, pode-se obter a velocidade de escoamento:

$$v = \frac{4Q}{\pi D_e^2} \quad (21)$$

A velocidade máxima admissível calculada permite saber de qual material a tubulação poderá ser constituída. No caso de minicentraís, são indicados os materiais referentes às velocidades como segue na Tabela 3.

Tabela 3 - Material utilizado segundo Velocidade Máxima

Material	Velocidade máxima admissível (m/s)
Aço	5,0
Concreto	3,0

Fonte: Eletrobrás e DNAEE (1985).

2.6.2 Vertedouro ou Extravasador

Para Souza (2009) o extravasado de reservatório ou de barragem é uma obra projetada e construída com o objetivo de escoar o excesso de água acumulada pelo reservatório, evitando o risco de o nível de água atingir a crista do reservatório ou da barragem.

Alves (2007) alerta que a operação segura do vertedouro é o objetivo principal no projeto, pois a falha do mesmo pode conduzir à falha da barragem levando danos a propriedade e possíveis perdas de vidas, principalmente para barragens do tipo de terra ou enrocamento, que não podem suportar transbordamentos.

Segundo a Eletrobrás e DNAEE (1985), de forma geral, dependendo do porte da obra, podem ser definidos dois tipos básicos de solução para o extravasamento do excesso de água:

- Extravasamento por um canal lateral, com fundo situado em cota mais elevada em relação ao leito natural do rio;
- Extravasamento por sobre o corpo da própria barragem, ao longo de toda a crista ou parte dela.

Também podem ser aventadas hipóteses de soluções mistas, em que exista mais de um órgão responsável pelo extravasamento, como a adoção de um canal lateral, prevendo-se ainda que a água possa verter por sobre a barragem (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

2.6.3 Tomada D'água e Desareando

A tomada da água é destinada a captar a água, conduzir aos órgãos adutores e daí às turbinas hidráulicas. Deve impedir a entrada de corpos flutuantes, que possam danificar as turbinas (SCHREIBER, 1977).

Além da retenção de corpos flutuantes e de material sólido, a tomada da água permite o “ensacamento da tubulação forçada ou canal de adução para a realização de obras de manutenção e eventuais reparos” (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985). A tomada pode ser ligada diretamente à tubulação forçada ou, dependendo da topografia local, pode descarregar a água captada em um canal aberto de adução ou em uma tubulação de baixa pressão que transportará a água até a tubulação forçada (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

Souza (2009) aconselha que a locação a tomada da água considere:

- escoamento, se possível isento de perturbações e de baixa velocidade;
- Mínimo transporte de material sólido;
- Possibilidade de acesso para manutenção;
- Garantia de afogamento do conduto forçado ou do conduto de baixa pressão.

Para a realização de manutenção, vistorias e eventuais reparos, a tomada da água deve ser provida de ranhuras para a descida de uma comporta ou pranchões (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

A Eletrobrás e DNAEE (1985) recomendam que, para evitar a entrada de sedimentos que danifiquem o conduto forçado e as máquinas, seja instalada na frente da tomada da água uma estrutura denominada desareando. Esta estrutura tem por objetivo criar uma zona de escoamento de baixa velocidade a montante da tomada da água, fazendo com que os sedimentos trazidos pela água ali se depositem.

2.6.4 Condutos de Adução da Água

Órgãos adutores, ou adutoras, são todas as construções que ligam a tomada da água às turbinas. Essa ligação pode ser efetuada por: canais ou túneis com lâmina d'água livre, tubulações, túneis sob pressão e poços forçados, verticais ou inclinados. A escolha do tipo de adutora depende do tipo da central e das condições topográficas (SCHREIBER, 1977).

Nos casos em que o aproveitamento ocorre por uma queda natural e a barragem tem o objetivo apenas de garantir o afogamento da boca da estrutura de captação, torna-se geralmente necessária a utilização de um canal de adução ligando a tomada da água até a câmara de carga, ou chaminé de equilíbrio, a qual acopla-se ao conduto forçado (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

A declividade do canal de adução deve ser mínima e constante, pode ser construído em solo natural ou revestido com enrocamento, pedra argamassada, concreto ou outro material (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

O conduto forçado liga a câmara de carga, ou chaminé de equilíbrio, ou a tomada da água às turbinas e está sujeito a pressões internas crescentes, de cima para baixo, até alcançar a altura da queda estática da central, acrescida do eventual golpe de aríete (SCHREIBER, 1977).

2.6.5 Câmaras de Carga

A câmara de carga é a estrutura que interliga o canal com o conduto forçado. Esta deve ser dimensionada de modo a atender duas condições críticas de operação da central: em partida brusca, garantir que não entre ar no conduto forçado, e em parada brusca, garantir estabilidade funcional da câmara de carga e do canal adutor (SOUZA, 2009).

2.6.6 Chaminé de Equilíbrio

A chaminé de equilíbrio é uma estrutura, em concreto ou aço, constituída de um reservatório cilíndrico, de eixo vertical, normalmente 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 e DNAEE, 1985).

Como finalidade a chaminé de equilíbrio amortece as variações de pressão, que se propagam pelo conduto forçado, devido ao golpe de aríete, decorrente do fechamento rápido da turbina, e armazena água para fornecer ao conduto forçado o fluxo inicial provocado pela nova abertura da turbina, até que se estabeleça o regime contínuo.

Se for necessária a instalação, a chaminé de equilíbrio deve ser instalada o mais próximo possível da casa de força, para se ter o comprimento reduzido do conduto forçado e diminuir os efeitos do golpe de aríete.

2.6.7 Golpe de Aríete

Souza (2009) define:

“O transiente hidráulico máximo, positivo e negativo, que ocorre sempre que a velocidade v (m/s) do escoamento varia de seu valor máximo para o mínimo, zero, atuando-se no dispositivo de controle da vazão, denomina-se golpe de aríete.”

Em outras palavras, a pressão normal no interior da tubulação forçada sofre variações quando há mudanças súbitas de descarga. Essas mudanças são resultantes de fechamentos ou aberturas rápidas, parciais ou totais, do dispositivo de fechamento da turbina. As variações podem ser positivas ou negativas, conforme o encolhimento da turbina diminua ou aumente repentinamente (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

Para o projeto da tubulação forçada, devem ser conhecidos os valores da sobrepressão e da depressão, decorrentes do golpe de aríete. O valor de sobrepressão interessa para o dimensionamento da espessura da tubulação e o valor de depressão para verificar se a linha piezométrica, não corta a tubulação, a fim de evitar pressões negativas (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

2.6.8 Casa de Máquinas

A casa de máquinas (CM) “tem a finalidade de alojar as máquinas e os equipamentos, possibilitar sua montagem e eventual desmontagem e sua operação e manutenção” (SCHREIBER, 1977).

A CM encontra-se entre a câmara de carga e o canal de fuga, local onde se devem restituir as águas turbinadas ao rio. Uma vez determinada a localização da CM, deve ser verificado a cota do seu piso, de forma a evitar ser atingido pela cheia do rio (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

Na CM define-se primeiramente a posição da turbina do ponto de vista hidráulico, depois a disposição dos equipamentos eletromecânicos. Então se deve encontrar uma solução compatível de espaço ao redor dos equipamentos para efeito de montagem e futura manutenção (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

Este é o elemento principal da central hidrelétrica, pois nela estão concentrados os indicadores, dispositivos de proteção e quadro de controle e de comando necessários ao bom funcionamento da central (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

2.6.9 Canais de Fuga

O canal de fuga “é a estrutura que faz recondução da água ao rio, após a passagem pela turbina” (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

Souza (2009) explica que o canal de fuga consiste em reduzir a energia cinética da água a valores que evitem erosão em toda a região de descarga.

Na saída da turbina, a água pode apresentar velocidade razoável e para evitar erosões, quer no fundo do canal, quer nas paredes laterais, são recomendados canais de fuga. Há casos em que as turbinas utilizam tubo de sucção, necessário quando se deseja colocar a CM afastada da margem do rio em terreno mais alto, neste caso deve haver a instalação de uma soleira afogadora na saída do tubo de sucção, com objetivo de criar um nível d’água de restituição artificial mais alto que o nível d’água natural do rio.

2.7 TURBINAS HIDRÁULICAS

A NBR 6445 (1987), afirma que:

“Turbina hidráulica é uma máquina rotodinâmica, com a finalidade de transformar a energia hidráulica em energia mecânica”.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) as turbinas hidráulicas são classificadas em 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).

A NBR 9969 (1987) classifica as turbinas hidráulicas:

Quanto a característica de potência no eixo e a vazão as turbinas são classificadas em:

a) Microturbinas hidráulicas: São aquelas onde a potência é igual ou inferior a 100 kW e a vazão até 2 m³/s;

b) Mini turbinas hidráulicas: São aquelas onde a potência é de até 1000 kW e a vazão até 7 m³/s.

c) Pequenas turbinas hidráulicas: São aquelas onde a potência é de até 5000 kW e a vazão até 10 m³/s.

2.7.1 Turbinas Pelton

A NBR 6445 (1987), afirma que:

“Turbina de ação na qual o fluxo de água incide sob a forma de jato sobre o rotor possuindo pás em forma de duas conchas. A direção dos jatos é paralela em relação ao plano do rotor”.

As turbinas Pelton são pouco utilizadas em pequenas centrais no Brasil, devido à pequena quantidade de lugares do 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 500 metros) em potências que variam de 500 a 12.500 kW (GOMES, 2010).

A Turbina Pelton, cujo corte transversal é esquematizado pelas Figura 11 e Figura 12, opera em quedas relativamente altas e pequenas vazões, com eixo horizontal no caso de ter um ou dois jatos injetores e eixo vertical para um número de três a seis jatos (SOUZA, 2009).

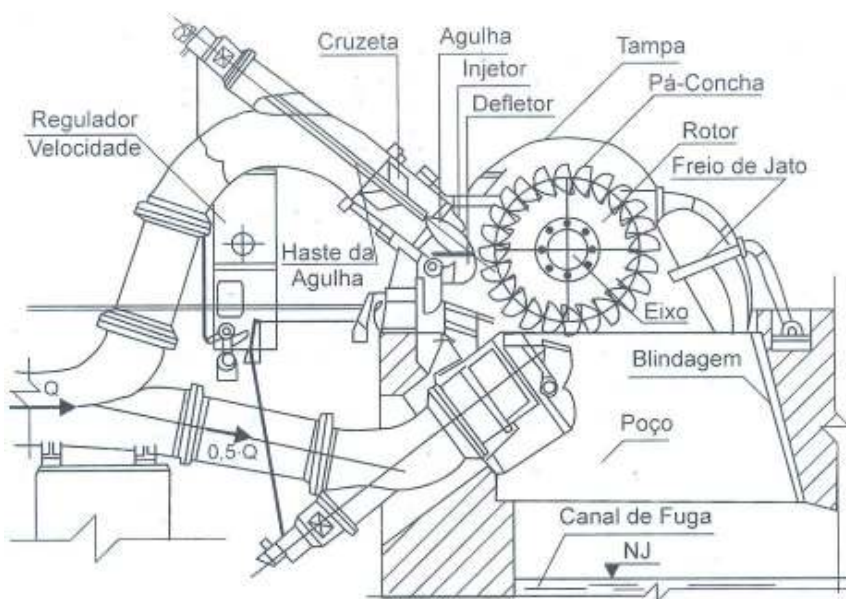


Figura 11 - Corte transversal de Turbina Pelton de 2 jatos e eixo horizontal
Fonte: Souza (2009)

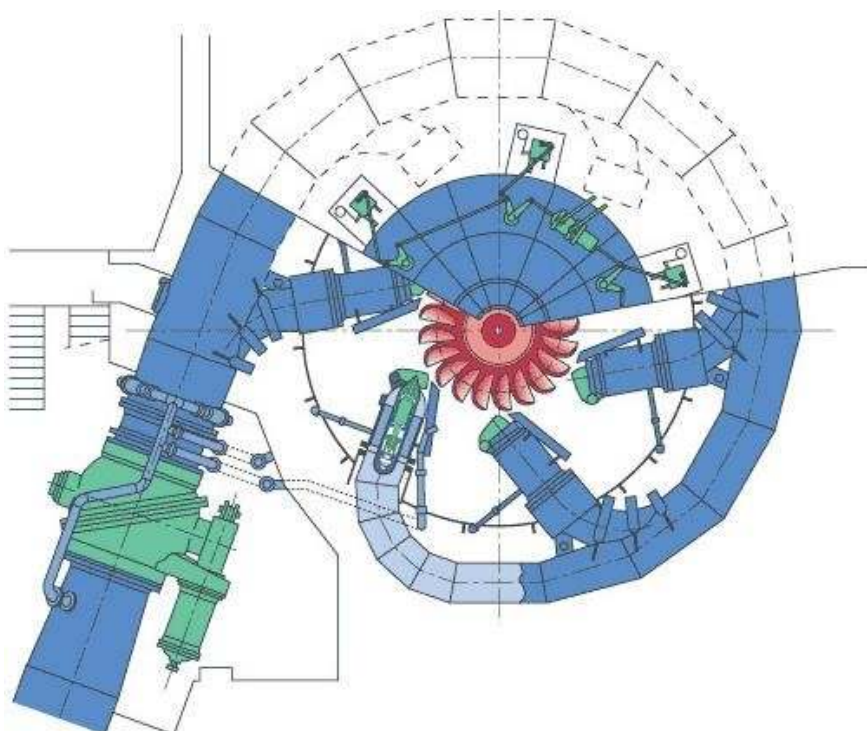


Figura 12 - Corte transversal Turbina Pelton de 6 jatos e eixo vertical
Fonte: Souza (2009)

A Turbina Pelton é basicamente constituída por um rotor, em torno do qual estão fixadas as pás ou conchas, por uma tubulação de adução contendo um ou mais injetores e por blindagens metálicas no caminho da água (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985). A Figura 13 mostra a foto de uma Turbina Pelton de eixo vertical, e a Figura 14 o rotor de uma turbina Pelton, tanto eixo vertical quanto horizontal.



Figura 13 - MCH com Turbina Pelton de eixo vertical
Fonte: Beta hidroturbinas.



Figura 14 - Rotor Turbina Pelton eixo vertical ou horizontal
Fonte: Voith Hydro Power.

2.7.2 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).

Souza (2009) define que este tipo de turbina é normalmente utilizado para quedas entre 8 e 600 m e que, por unidade, alcança potências da ordem de 850 MW.

A turbina de caixa espiral é recomendada para quedas maiores de 10 m é normalmente feita em chapa de aço soldada ou em ferro fundido. Para micro e minicentraís, têm o eixo disposto horizontalmente, devido às facilidades de instalação e manutenção (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985). A Figura 15 mostra o corte transversal de uma turbina Francis com caixa espiral de eixo horizontal.

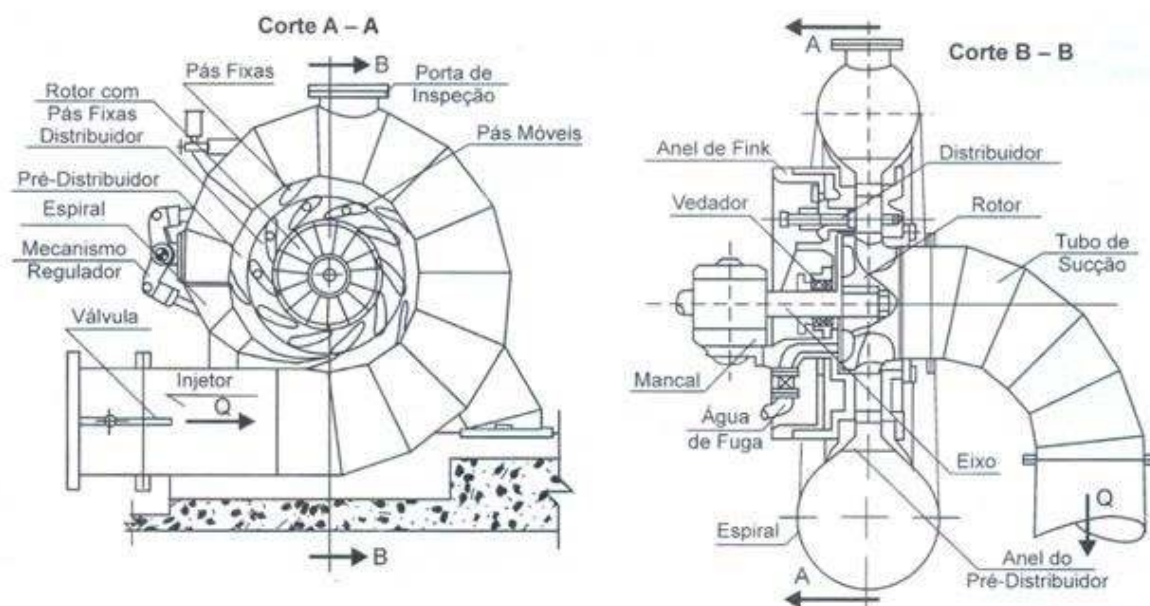


Figura 15 - Corte transversal Turbina Francis caixa espiral de eixo horizontal
Fonte: Souza (2009).

Eletrobrás e DNAEE (1985) definem que, neste tipo de turbina, a variação de potência é obtida através da abertura e fechamento das palhetas do distribuidor. Recomenda-se que turbinas com eixo horizontal, tenham o piso de acesso à turbina cerca de 1,5 metros acima do nível da água mínimo da jusante. A Figura 16 corresponde à foto de uma turbina Francis com caixa espiral de eixo horizontal. Seu rotor é mostrado na Figura 17.



Figura 16 - Turbina Francis caixa espiral de eixo horizontal
Fonte: Voith Hydro Power

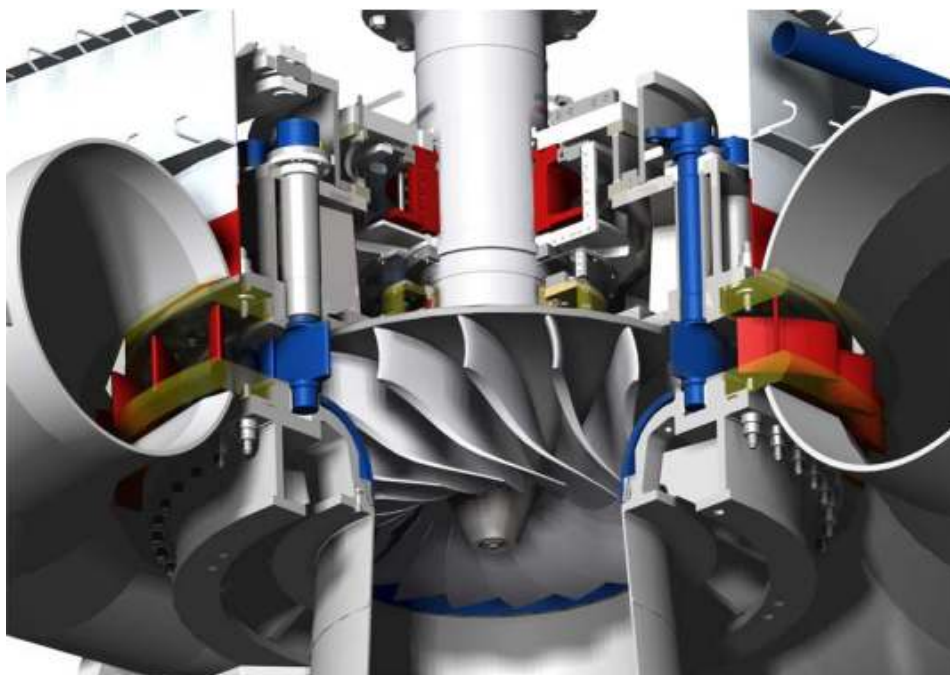


Figura 17 - Rotor Francis caixa espiral de eixo horizontal
Fonte: Voith Hydro Power

2.7.3 Turbinas Axiais – Kaplan e Hélice

Tais turbinas 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 as turbinas Kaplan são aquelas em 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.

Com relação à forma da carcaça e da maioria dos componentes, estas turbinas se assemelham às turbinas Francis, exceto na geometria do rotor, que é composta por um cubo de pás em forma de asa de sustentação, cujo número varia de três a oito. Estas pás podem ser fixadas rigidamente ao cubo, ou as pás podem ter movimento em relação ao cubo (SOUZA, 2009).

As turbinas Hélice são utilizadas com maior frequência em aproveitamentos com quedas menores de 12 metros. Assim como a Turbina Francis, este tipo de turbina pode ser montada em caixa aberta ou com caixa espiral (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

A Figura 18 mostra o corte transversal deste tipo de turbina.

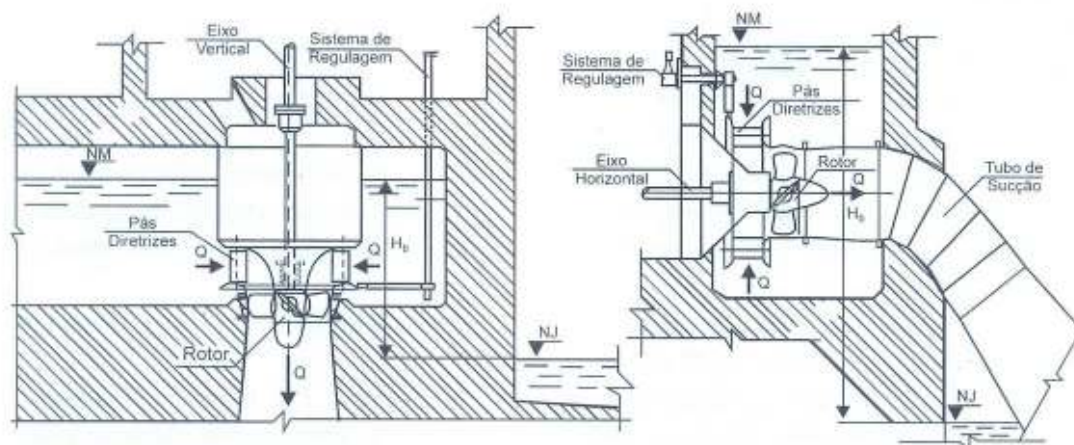


Figura 18 - Corte transversal Turbina hélice em caixa espiral

Fonte: Souza (2009).

Para Turbina Hélice de caixa aberta, mostrada na Figura 19, utilizada em quedas inferiores a 10 metros e para a Turbina Hélice em caixa espiral, para quedas inferiores a 12 metros, valem os mesmos comentários feitos para a Turbina Francis, porém com uma vantagem: a velocidade de rotação é ligeiramente superior, o que leva a uma melhor adaptação para o gerador (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985). O rotor hélice é mostrado na Figura 20 e na Figura 21.



Figura 19 - Corte transversal Turbina Hélice em caixa espiral

Fonte: Alves (2007)



Figura 20 - Rotor Hélice
Fonte: Alves (2007)



Figura 21 - Rotor Hélice
Fonte: Voith Hydro Power

2.8 CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS

Pedroso (1982) orienta que o critério técnico é 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).

Souza (2009) observa que a água muda de fase obedecendo à curva de tensão do vapor, nesta mudança a massa específica da água passa de 1000 kg/m^3 para em torno de 1 kg/m^3 , conseqüentemente aumenta inversamente seu volume específico. Tal fato ocasiona a formação de bolhas de vapor e de gases. A relação da pressão de vapor e a temperatura da água, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Curva do Vapor de Água

Pressão de vapor mca	Temperatura °C
20	0,0234
40	0,0738
60	0,199
80	0,474
100	1,013

Fonte: Pfeleiderer e Petermann (1979)

Há necessidade de as turbinas hidráulicas serem instaladas com uma altura de sucção adequada. A altura de sucção é medida sempre do nível de jusante até o eixo para turbinas de eixo horizontal e até a linha média do distribuidor para o eixo vertical até o centro do rotor para o eixo inclinado (SOUZA, 2009).

Segundo Souza (2009), a equação:

$$H_{max} = 10 - 0,00122 \times Z_a - \sigma \times H \quad (22)$$

Onde:

z_a – *Altitude do nível mínimo no canal de fuga (metros)*

σ_{min} – *Coefficiente de cavitação de Thoma*

H – *Queda líquida (metros)*

2.9 SELEÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS

Souza (2009) determina que a escolha da turbina seja feita levando em consideração a maior rotação possível, e que trabalhe com a cavitação controlada dentro do campo de máximo e mínimo e que o rendimento máximo seja reduzido no máximo em 5% para grandes centrais hidrelétricas e 10% para pequenas centrais hidrelétricas.

A NBR 10208 (1988) sugere que em pequenas centrais hidrelétricas, além dos condicionantes econômicos e outros próprios do local, devem ser considerados os seguintes aspectos:

- Robustez e simplicidade do equipamento;
- Facilidade de operação;
- Facilidade de manutenção;
- Assistência técnica.

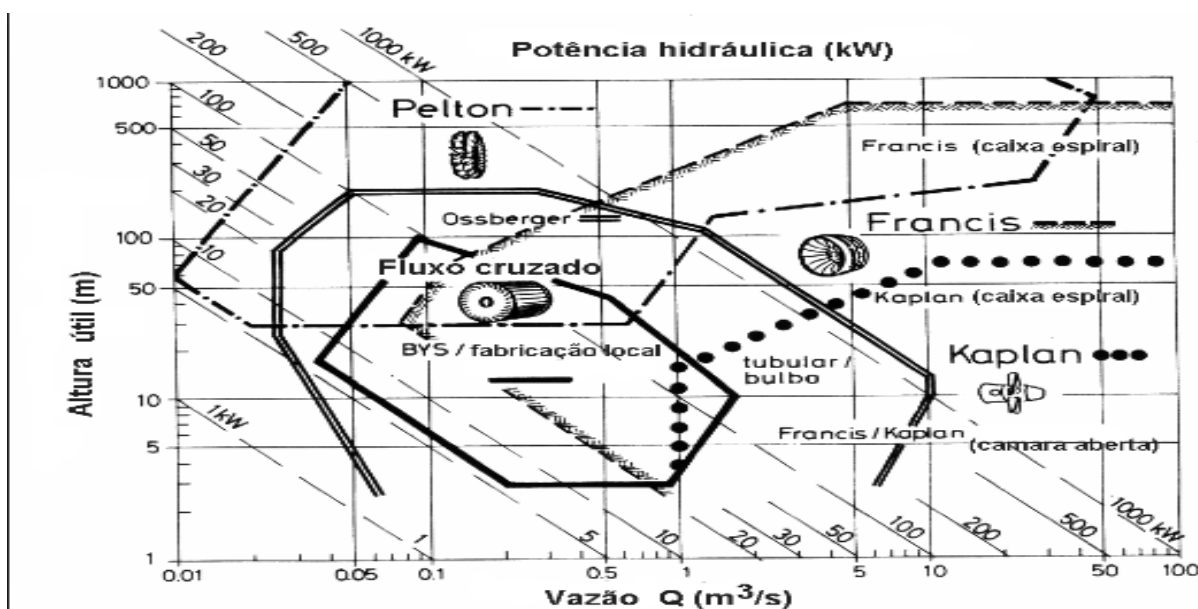


Figura 22 - Campo de aplicação dos tipos de turbinas de acordo com a altura e vazão específica

Fonte: Chapalaz (1992).

Considerando a Figura 22, de acordo com a vazão e a queda verificados, o tipo ideal de turbina a ser instalada na Microcentral de Rio Branco do Sul é a turbina tipo Francis, além de ser a turbina disponível pelo proprietário.

2.10 GERADOR

Conforme Souza (2009) os geradores utilizados em hidrelétricas são máquinas síncronas, que operam com velocidade constante independentemente da carga elétrica que é colocada em seus terminais. São acionadas direta ou indiretamente pelas turbinas hidráulicas.

Em PCH's, geralmente são utilizados geradores síncronos, que operam com velocidade constante independentemente da carga elétrica que é colocada em seus terminais, pode-se considerar para MCH. O dimensionamento do gerador, normalmente solucionado pelo fabricante, considera algumas variáveis como número de polos, 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)

De acordo com a ELETROBRÁS (2015) o gerador é dimensionado em função da potência disponível no eixo da turbina através da equação (23):

$$P_G = P_T \times \frac{n_G}{\cos \varphi} \quad (23)$$

Onde:

P_G – potência do gerador (kVA)

P_T – potência no eixo da turbina (kW)

n_G – rendimento do gerador $\cos \varphi$ –

fator de potência do gerador - $\cos \varphi$

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;

2.11 REGULADORES DE VELOCIDADE

Os reguladores automáticos de velocidade, geralmente empregados nas microcentrais hidrelétricas “são do tipo mecânico, constituídos por um servomecanismo acionado por óleo pressurizado, comandado por um pêndulo centrífugo” (ELETROBRÁS e DNAEE, 1985).

O regulador de velocidade é um sistema automático que interage com o distribuidor da turbina hidráulica (palhetas diretrizes para as turbinas Francis e Kaplan e bico injetor para a turbina Pelton) de forma a manter uma rotação constante, fornecendo ao sistema energia elétrica com frequência de 60 Hz. Para as turbinas Pelton e Kaplan, o regulador de velocidade controla também, respectivamente o defletor e as pás do rotor (MANCINI FILHO, 2004). A ação de controle consiste na regulação da vazão de água que entra no rotor da turbina. Esta regulação é feita através do comando de abertura ou fechamento do distribuidor da turbina (MANCINI FILHO, 2004).

Segundo Souza (2009), existem basicamente dois tipos de reguladores de velocidade e o regulador de carga. Os reguladores isócronos, em regime permanente, mantêm a velocidade de rotação constante e igual à velocidade de referência, no entanto suas características em regime transitório são ruins. Sua aplicação é fortemente indicada para sistemas isolados, para pequenas centrais com potência menor que 100 kW.

2.12 CARACOL OU CAIXA ESPIRAL

A caixa espiral é uma tubulação de forma toroidal que envolve a região do rotor. Esta parte fica integrada à estrutura civil da usina, não sendo possível ser removida ou modificada. O objetivo é distribuir a água igualmente na entrada da turbina.

É normalmente fabricada com chapas de aço carbono soldada em segmentos. A caixa espiral liga-se ao conduto forçado na secção de entrada, e ao pré-distribuidor na secção de saída (ALVES, 2007).

2.13 VOLANTE DE INÉRCIA

A ELETROBRÁS e DNAEE (1985) explicam que nos Grandes Geradores de pequena capacidade frequentemente o momento de inércia das massas girantes é insuficiente para garantir uma regulação estável. Torna-se então necessário recorrer ao emprego de volantes de inércia, que poderão ser fabricados em ferro fundido e aço fundido. Estes volantes são normalmente colocados na extensão do eixo do gerador, sendo sua massa e diâmetro determinados pelo fabricante.

2.14 MEIO AMBIENTE E IMPACTO AMBIENTAL

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 2015.

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, 2015).

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, 2015).

O EIA (Estudo e Relatório de Impacto Ambiental) tem os seguintes objetivos principais: avaliar a viabilidade ambiental do empreendimento e fornecer subsídios para o seu licenciamento prévio (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, 2015).

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).

2.15 OUTORGA DA ÁGUA

O Instituto Águas do Paraná orienta que a outorga é o ato administrativo que expressa os termos e as condições mediante as quais o poder público permite, por prazo determinado, o uso de recursos hídricos. No Estado do Paraná, os atos de autorização de uso de recursos hídricos de domínio estadual são de competência do Instituto das Águas do Paraná.

São listados, pelo instituto das águas, os tipos de usos hídricos que dependem de outorga:

- Derivação ou captação de água superficial (rio, córrego, mina ou nascente) para qualquer finalidade;
- Extração de água subterrânea (poço tubular profundo) para qualquer finalidade;
- Lançamento de corpo em água de esgotos e demais resíduos líquidos com o fim de diluição;
- Uso de recursos hídricos para aproveitamento hidrelétrico;
- Intervenções de macrodrenagem.

3 DADOS E ESTRUTURA DA MICROCENTRAL DE RIO BRANCO DO SUL

3.1 LOCALIZAÇÃO DA MICROCENTRAL: REFERÊNCIAS

O proprietário do terreno onde se encontra a usina, Sr. Pedro Proença, entrou em contato com a UTFPR em outubro de 2013, a fim de realizar um estudo de reativação no potencial hidrelétrico em sua propriedade.

A antiga usina, atualmente em estado inoperante e precário, já esteve em funcionamento – em Outubro de 1959, a Usina Siderúrgica Marumby LTDA (Usimar) foi autorizada pelo Decreto nº 47.015 a lavrar minério. Anos depois, a siderúrgica foi desativada, e a propriedade vendida (DIÁRIO DE LEIS, acesso em Outubro de 2015).

A propriedade localiza-se em Pocinho, distrito e município de Rio Branco do Sul, Estado do Paraná, distante 26 km da capital, Curitiba. Possui área de vinte e quatro hectares, delimitado por um retângulo com um vértice a duzentos e vinte e cinco metros (225 m) no rumo verdadeiro e quarenta e seis graus e dez minutos nordeste ($46^{\circ} 10' NE$), da bifurcação das estradas de rodagem Rio Branco do Sul – Colombo – Bocaiúva do Sul e os lados, divergentes desse vértice, com os seguintes comprimentos e rumos verdadeiros: oitocentos metros (800 m), vinte e um graus e dez minutos nordeste ($21^{\circ} 10' NE$); trezentos metros (300 m), sessenta e oito graus cinquenta minutos sudeste ($68^{\circ} 50' SE$) (DIÁRIO DE LEIS, acesso em Outubro de 2015).



Figura 23 - Localização de Rio Branco do Sul
Fonte: Própria (2016)

As fotos a seguir ilustram o estado da usina atualmente, foram tiradas em Setembro de 2015 pela equipe.



Figura 24 - Queda da água
Fonte: Própria (2015)



Figura 25 - Barragem
Fonte: Própria (2015)



Figura 26 - Casa de máquinas
Fonte: Própria (2015)

3.2 CLASSIFICAÇÃO DA MICROCENTRAL

A Usina de Rio Branco do Sul, por suas características construtivas:

- barragem relativamente baixa;
- área inundada pequena.

É considerada como fio d'água, ou seja, as vazões de estiagem são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista (Eletrobrás, 2000 e DNAEE, 1985).

3.3 ESTUDO HIDROENERGÉTICO INICIAL

O ponto de aproveitamento energético onde se encontra a Usina de Rio Branco do Sul tem uma queda bruta (H_b) de 20,551 m, medido por Coelho e Xavier (2015).

No estudo inicial determina-se a vazão de projeto e o cálculo preliminar da potência a ser instalada, chamada de potência bruta. Após o estudo das características da MCH é possível determinar as perdas de carga e estimar precisamente a potência instalada (SOUZA, 2011).

3.3.1 Métodos Utilizados para Medição de Vazão

Os dados hidro energéticos disponíveis na MCH de Rio Branco do Sul foram medidos em pesquisas no local, sendo a vazão máxima de 0,4378 m/s² e queda bruta de 20,551 m convalidados pelo método do vertedouro (SILVA, JÚNIOR, ORTEGA, 2014).

A vazão da usina foi medida e calculada por Coelho e Xavier (2015) providos de equipamento de medição de alta precisão, de acordo com a norma da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13403: *Medição de*

vazão em efluentes líquidos e corpos receptores – Escoamento livre. Rio de Janeiro, 1995.

A medição da vazão foi realizada através do método do vertedouro e método do flutuador (COELHO E XAVIER, 2015).

3.3.2 Vazão de Projeto

As medições de vazão foram realizadas em um período de tempo relativamente pequeno, conseqüentemente os valores não são representativos para determinação de vazão de projeto, que é obtida por transposição de vazões, calculada por Coelho e Xavier (2015).

A técnica de transposição consiste em obter uma relação entre a vazão num curso d'água através de uma série histórica e a vazão num curso d'água com série conhecida. Este procedimento é válido apenas para o caso de cursos d'água presentes numa mesma bacia hidrográfica (COELHO E XAVIER, 2015).

3.3.3 Análise Inicial da Potência da MCH de Rio Branco do Sul

3.3.3.1 Determinação da potência bruta do aproveitamento

A potência de aproveitamento pode ser realizada através do cálculo da potência bruta, inicialmente calculada sem considerar as perdas de carga. Esta potência pode ser obtida pela Equação 24:

$$P_b = 7,16 \times Q \times H_b \quad (24)$$

$$P_b = 64,450 \text{ kW} \quad (25)$$

Tal que:

- P_b – potência bruta instalada do aproveitamento, em kW
- Q – vazão de projeto = $0,4378 \text{ m}^3/\text{s}$
- H_b – queda bruta de projeto = $20,551 \text{ m}$

3.4 RESERVATÓRIO

A usina tem funcionamento a fio d'água, ou seja, o volume criado pela barragem é desprezado e a vazão de estiagem atende à demanda máxima prevista instalada (COELHO E XAVIER, 2015). A Figura 27 - Reservatório MCH de Rio Branco do Sul, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra a situação da represa da MCH de Rio Branco do Sul. Apesar de o reservatório estar em boas condições, será necessária sua limpeza, devido ao assoreamento do rio, que reduz o potencial hídrico da usina.



Figura 27 - Reservatório MCH de Rio Branco do Sul
Fonte: Própria (2015)

3.5 BARRAGEM

A barragem da Microcentral Hidrelétrica de Rio Branco do Sul é do tipo muro-gravidade de concreto. A Figura 28 - Barragem, vista 1 e a Figura 29 - Barragem, vista 2 mostram seu estado atual.



Figura 28 - Barragem, vista 1
Fonte: Própria (2015)



Figura 29 - Barragem, vista 2
Fonte: Própria (2015)

3.6 VERTEDOURO

O vertedouro e tem a função de extravasar de forma segura a água acumulada em excesso. O vertedouro da usina de Rio Branco do Sul é incorporado pela barragem, localiza-se em um trecho rebaixado da mesma. A Figura 30 - Vertedouro ilustra o vertedouro da MCH.



Figura 30 - Vertedouro
Fonte: Própria (2015)

3.7 TOMADA D'ÁGUA

A tomada da água é feita através de comporta, ilustrada pela Figura 31 - Comporta. Quando aberta, a água é descarregada para o canal de adução, que, por sua vez, conduz a água até a câmara de carga.



Figura 31 - Comporta
Fonte: Própria (2015)

3.8 CONDUTO FORÇADO

O conduto forçado encontra-se completamente destruído devido a um deslizamento de terra, consequência do desmatamento do terreno vizinho. A estrutura era de ferro fundido e canalizava a água da câmara de carga até a casa de

máquinas. A Figura 32 - Conduto forçado mostra os destroços, hoje existentes e completamente inoperantes no terreno.



Figura 32 - Conduto forçado
Fonte: Própria (2015)

3.9 CÂMARA DE CARGA

A câmara de carga que havia, acabou sendo destruída em razão do desmoronamento que houve no local. Por tanto deverá ser reconstruída em um local mais seguro. A câmara de carga tem por objetivo, principalmente, diminuir o impacto do fenômeno golpe de aríete, além de manter o regime contínuo na alimentação da turbina do gerador.

3.10 CASA DE MÁQUINAS

A casa de máquinas foi completamente destruída pela erosão do solo e deverá ser completamente reconstruída. No local da antiga estrutura, o proprietário do terreno pretende construir uma sala de aula para os alunos da UTFPR. A turbina que compunha a usina está sendo reformada e será reutilizada.

3.11 CANAL DE FUGA

O canal de fuga conduz a água turbinada da casa de máquinas até o leito do rio, atualmente é inexistente. Sem o conduto forçado, a água acumulada na barragem é totalmente extravasada, seguindo seu percurso natural.

4 DIMENSIONAMENTOS REFERENTES À MICROCENTRAL

4.1 CONDUTO FORÇADO PARA MICROCENTRAL

Conforme mencionado no Capítulo 3, o conduto forçado existente deverá ser totalmente revitalizado. Para isso, foi realizados cálculos de dimensionamento do diâmetro, velocidade e espessura do conduto forçado.

4.1.1 Diâmetro Econômico do Conduto Forçado

Utilizando o método Eletrobrás através da equação (20), pode-se determinar o diâmetro mais econômico para o conduto forçado (D_e).

$$D_e = 123,7 \times \sqrt[7]{\frac{0,4378^3}{20,551}} = 56,375 \text{ cm} \quad (26)$$

O valor encontrado de mercado mais próximo, e visando facilitar a manutenção das tubulações, para o diâmetro do conduto forçado foi o de 400 mm.

Em relação aos três tipos de materiais (aço, concreto e PVC) para construção do conduto forçado, foi utilizado dois métodos para especificar o diâmetro das tubulações. Devido à característica da topografia, o melhor parâmetro seria revitalizar o conduto forçado com material PVC, utilizando o diâmetro de 400 mm, o que garantiria uma boa velocidade, material de fácil acesso no mercado e diâmetro comercial.

Segundo GOMES (1999), a grande vantagem do PVC é seu baixo peso que torna menor seu custo de transporte e instalação. Outra vantagem é sua resistência à corrosão, sua resistência ao ataque químico de águas impuras e a baixa rugosidade das paredes do tubo.

Após definir o material e diâmetro econômico faz-se necessário obter os seguintes resultados.

Tabela 5 - Cálculo Diâmetro Econômico

Material	D _e (mm)	Q (m ³ /s)	V (m/s)
PVC	400	0,4378	3,484

4.1.2 Velocidade da Água no Conduto Forçado

A velocidade de escoamento do fluido pelo conduto forçado pode ser calculada pela equação (21), utilizando os valores de diâmetro econômico e vazão máxima, como segue:

$$v = \frac{4 \times 0,4378}{\pi \times 0,56375^2} = 1,75 \text{ m/s} \quad (27)$$

A velocidade de escoamento é de 1,75 m/s. Da Tabela 3 - Material utilizado segundo Velocidade Máxima, sabe-se que a velocidade máxima admissível para o conduto, de material de aço, é de 5 m/s. Logo, a velocidade calculada é menor que a máxima admissível e, portanto, aceitável.

4.1.3 Espessura do Conduto Forçado

Para se calcular a espessura do conduto forçado temos a seguinte fórmula de acordo com ELETROBRÁS (2000, p.119):

$$e = \frac{P_i \times D}{2 \times \sigma_f} = 17,2 \text{ mm} \quad (28)$$

Onde:

e - espessura da parede (mm);

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

D - diâmetro interno (mm);

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

4.1.4 Bloco de Apoio

Segundo ELETROBRÁS (2000), as tubulações devem ser apoiadas sobre blocos, ou selas, em concreto, conforme Figura 33 - Bloco de apoio, abaixo:

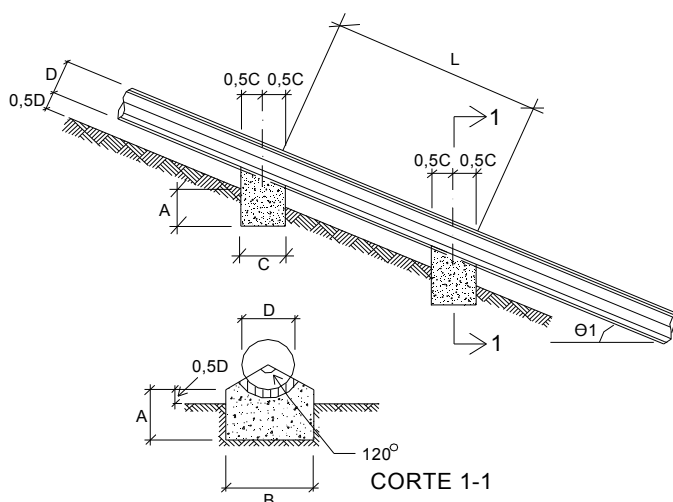


Figura 33 - Bloco de apoio

Fonte: Eletrobrás (2000)

O catálogo da AFLON estima os valores de acordo com tabelas e gráficos que são gerados a partir de testes mecânicos realizados nas tubulações, com isso é possível obter o espaçamento máximo entre os apoios mensurando o diâmetro do conduto e sua faixa de operação térmica.

De acordo com AFLON a distância mínima dos blocos de sustentação dever ser em torno de 270 cm, para um diâmetro de 400 mm.

Calculando o valor de L , a máxima distância entre suportes, comprimento entre deve estar na faixa de: $2,7 \text{ m} \leq L \leq 3,25 \text{ m}$.

4.2 CONDUITO FORÇADO COM MULTÍPLAS SAÍDAS

A seguir serão demonstrados os cálculos realizados para o dimensionamento do conduto forçado com múltiplas saídas, à realização dos cálculos foi de acordo com a norma da ABNT NBR 10132 - Cálculos de Conduitos Forçados, e os livros de resistências dos materiais de Beer, Johnston Jr., DeWolf e Hibbeler. Conforme a Figura 34 – Distância entre Câmara de carga e casa de máquinas, pode-se retirar os seguintes dados:



Figura 34 – Distância entre Câmara de carga e casa de máquinas
 Fonte: (COELHO E XAVIER, 2015)

Diâmetro interno $\rightarrow = 400 \text{ mm}$;

Material do conduto $\rightarrow \text{PVC}$;

Tensão de escoamento $\rightarrow e = 44,8 \text{ Mpa}$;

Tensão de ruptura $r = 51,7 \text{ Mpa}$;

Coefficiente de segurança para conduto livre $S_g = 1,7$;

Densidade da água $\rho_a = 1000$;

Vazão nominal $Q = 0,4378 \text{ m}^3/\text{s}$;

Queda bruta $\Delta H = 20,551 \text{ m}$;

Comprimento do conduto $c = 34,700 \text{ m}$;

Espessura mínima do conduto $\rightarrow = 17,2 \text{ mm}$;

Aceleração da gravidade $= \rightarrow = 9,812 \text{ m/s}^2$;

Altura da tomada d'água $\rightarrow = 0,95$ m;
Velocidade de escoamento da água $\rightarrow V$;
Área da secção do conduto $\rightarrow A$;
Peso específico da água $\rightarrow \rho$;
Pressão da água na tomada d'água $\rightarrow Z$;
Tensão devido à pressão $\rightarrow \gamma$.

A Figura 35 – Câmara de Carga e Conduto Forçado, mostra o desenho projetado pelo *software SolidWorks* em 3D para o conduto forçado, a unidade de medida utilizada nos desenhos foi milímetro:



Figura 35 – Câmara de Carga e Conduto Forçado
Fonte: COELHO E XAVIER (2015)

4.3 CÂMARA DE CARGA

A câmara de carga que será construída terá o mesmo dimensionamento que a anterior. Segundo Coelho e Xavier (2015), as dimensões eram: comprimento (5 m); largura (2,4 m) e altura (1,9 m), conforme a Figura 36 - Câmara de carga, além de que a câmara de carga deverá ser construída a um nível que seja 0.3 m acima do nível do reservatório.

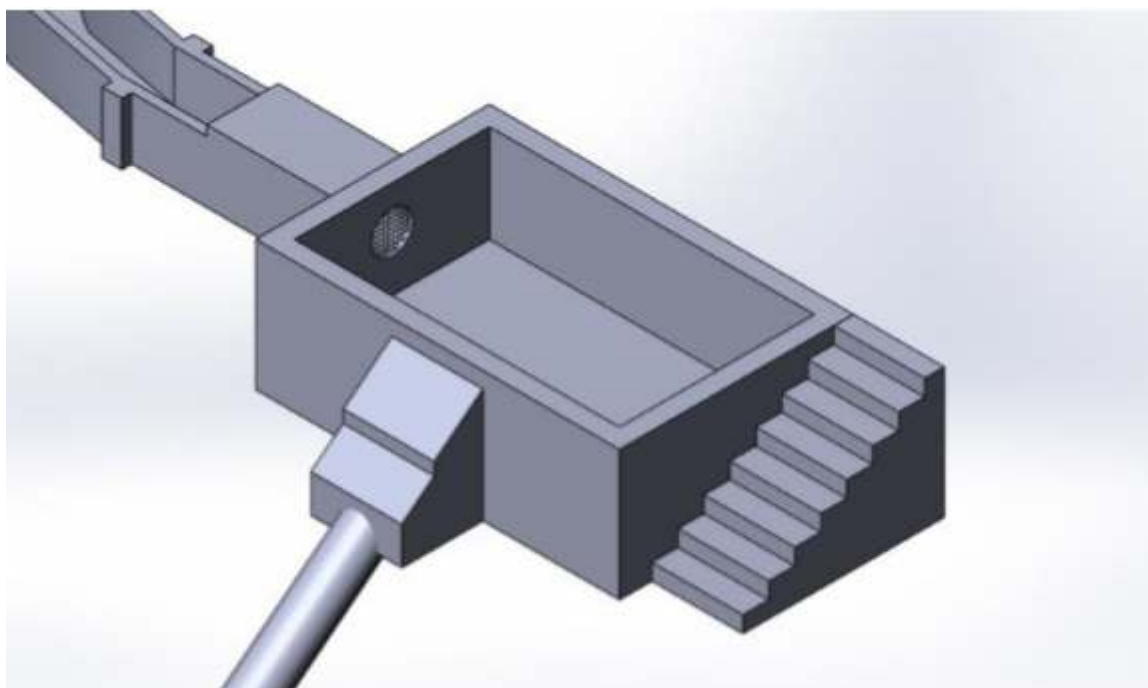


Figura 36 - Câmara de carga
Fonte: COELHO E XAVIER (2015)

4.4 DETERMINAÇÃO FINAL DA QUEDA LÍQUIDA E POTÊNCIA A SER INSTALADA

A potência líquida de projeto, aproveitável, deve considerar as perdas de carga inicial, nas grades da tomada d'água e na tubulação forçada (ELETROBRÁS E DNAEE, 1985). No presente projeto desconsideram-se as perdas na tubulação de baixa pressão, pois o conduto forçado é conectado diretamente da tomada d'água à casa de máquinas.

4.4.1 Determinação das Perdas de Carga

Utilizando a fórmula de Manning, uma das mais comuns e utilizadas, para praticamente todos os tipos de condutos. A sua expressão geral é:

$$J = \frac{64 \times n^2 \times Q^2}{\pi^2 \times D^5} \quad (29)$$

Onde:

j → Perda de carga unitária;

n → Coeficiente de Manning;

V → Velocidade;

D → Diâmetro interno da tubulação (m).

Tabela 6 - Coeficiente de atrito de Manning

Material da Tubulação	n
Polietileno	0,007 - 0,009
PVC	0,008 - 0,010
Aço	0,009 - 0,012
Ferro Fundido	0,012 - 0,017
Ferro Fundido Revestido de Argamassa	0,011 - 0,014
Cimento-amianto	0,010 - 0,012
Concreto	0,011 - 0,014

$$J = \frac{64 \times 0,010^2 \times 0,4378^2}{\pi^2 \times 0,400^5} = 0,01214 \text{ m} \quad (30)$$

4.4.2 Determinação da Queda Líquida e Potência Líquida

A queda líquida do aproveitamento foi calculada através da equação (31).

$$H_l = H_b - J \quad (31)$$

$$H_l = 20,551 - 0,01214 = 20,539 \text{ m} \quad (32)$$

Sendo:

H_l = queda líquida de projeto, em m

H_b = queda bruta de projeto, em m

J = perda de carga no conduto forçado, em m

O valor de 0,01214 m corresponde a 0,06% da queda bruta, este é inferior ao valor de 5% de perdas determinado pelo Manual de Micro centrais da Eletrobrás

(1985). Encontrado o valor da queda líquida, estima-se a potência líquida de projeto, aquela que considera as perdas do sistema, através da equação (33).

$$P = 7,16 \times Q \times H_l \quad (33)$$

$$P = 7,16 \times 0,4378 \times 20,539 = 64,382 \text{ kW} \quad (34)$$

Sendo:

P—potência líquida instalada do aproveitamento, em kW

Q—vazão de projeto, em m³/s

H_l—queda líquida, em m

O valor de potência líquida de 64,382 kW

4.5 CASA DE MÁQUINAS

Antes de iniciar o dimensionamento da casa de máquinas, é necessário iniciar com o pré-dimensionamento das turbinas, através do diâmetro do rotor da mesma, pois todos os demais dimensionamentos derivam diretamente destes cálculos.

4.5.1 Turbinas

Para definir qual o tipo de turbina adequado para a MCH de Rio Branco do Sul, analisa-se a classificação, a potência, a velocidade da turbina.

4.5.1.1 Cálculo da Potência das Turbinas

Segundo Alves (2007) A potência hidráulica é fornecida pela equação (35) e de acordo com as condições hidrológicas do aproveitamento os quais são: Altura da queda líquida e vazão máxima.

$$P_h = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{Liq} \cdot n_t}{75} \quad (35)$$

Onde:

P_h - potência hidráulica.

Q - vazão, em m^3/s .

γ - peso específico da água = $1000 \text{ kg}/m^3$.

H_{Liq} - altura da queda líquida.

n_t - rendimento da turbina.

Os melhores tipos de turbina que se enquadram para a localização da casa de máquinas, considerando as quedas e vazão encontrada na MCH de Rio Branco do Sul são as turbinas Francis Horizontal e Michell-Banki.

A Tabela 7 nos traz o rendimento dos dois tipos de turbinas selecionadas.

Tabela 7 - Rendimento das turbinas

Turbina	Rendimento
Francis	70 - 85
Banki	65 - 82

Fonte: Alves (2007)

Por tanto a potência resulta, conforme a tabela 8, considerando o valor de $1CV = 736 \text{ W}$:

Tabela 8 - Potencia hidráulica das turbinas

Turbina	Potência CV	Potência kW
Francis	99,95	73,56
Banki	96,42	70,97

Fonte: Alves (2007)

Com os valores da altura das quedas líquidas, vazão, rendimento das turbinas e o peso específico da água, utilizando a equação (35), pode-se calcular a potência hidráulica das turbinas para cada localização da casa de máquinas. Os resultados das potências demonstrado na Tabela 8 considerou-se o rendimento máximo das turbinas destacadas na Tabela 7. A potência hidráulica está representada em CV e kW.

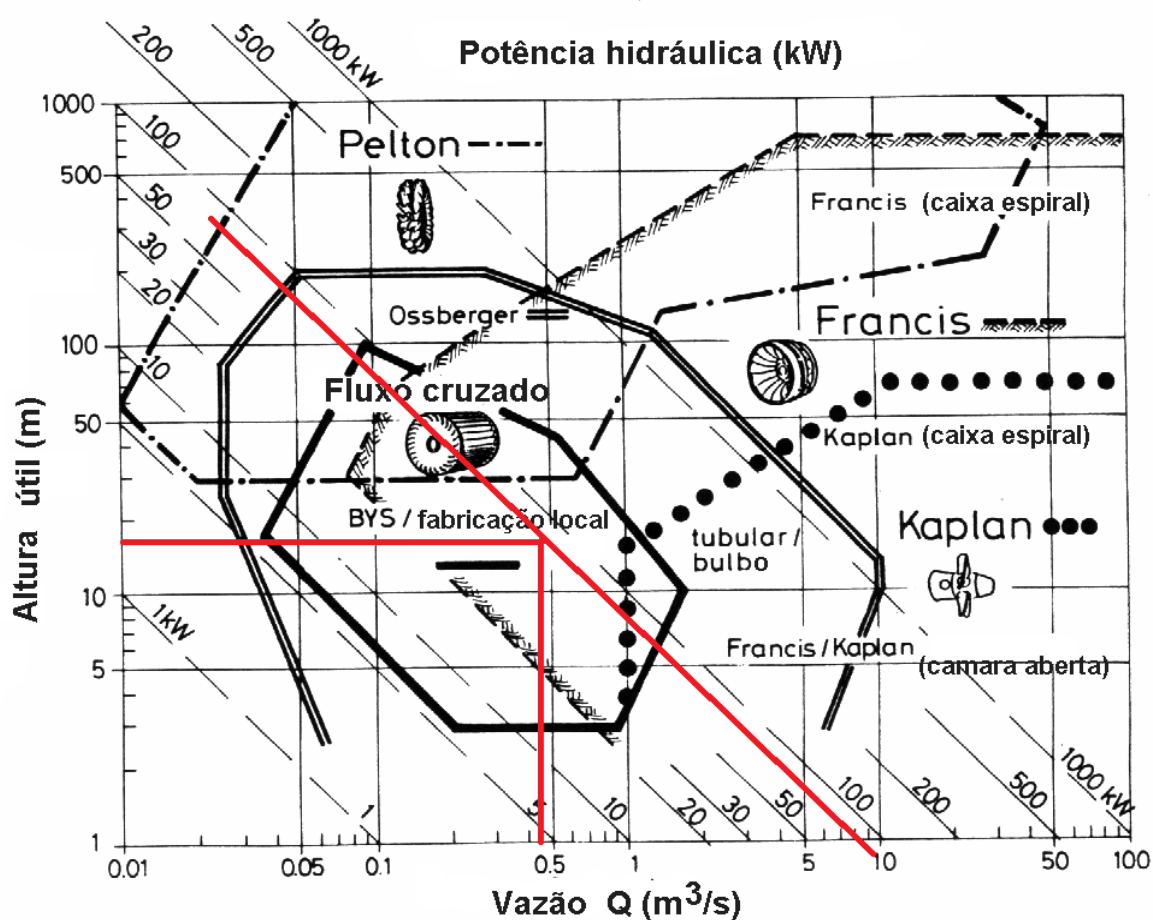


Figura 37 - Campo de aplicação dos tipos de turbinas de de acordo com a altura e vazão específica
Fonte: Própria

4.5.1.2 Dimensionamento Turbina Banki

A turbina hidráulica Michell-Banki escolhida para o projeto foi a modelo Betta 3040, fornecida pela fabricante BETTA HIDROTURBINAS que está no ramo de projetos, fabricação e comercialização de MCHs desde 1984. A empresa tem capital e tecnologia totalmente brasileira, dirigida por um corpo técnico com experiência no setor, firmou-se no mercado nacional e estrangeiro.

As características técnicas do projeto foram determinadas a partir das instalações da MCH de Rio Branco do Sul e com base nos dados do trabalho realizado por Coelho e Xavier (2015) demonstrados na Tabela 10.

Tabela 9 - Características técnicas do projeto material PVC

Dados da Turbina	Valores Encontrados
Potência máxima prevista	70,97 kW
Queda líquida considerada	20,51 m
Diâmetro considerado	400 mm
Comprimento	33 m
Material utilizado	PVC
Diâmetro da entrada da turbina	430 mm

Fonte: Autoria própria

4.5.1.3 Dimensionamento Turbina Francis Horizontal

Como ferramenta para seleção da turbina utilizou-se o catálogo de turbinas Francis horizontais da empresa Voith. Esse fabricante possui mais de 100 anos de experiência em fabricação de turbinas hidráulicas. O catálogo possui diferentes tamanhos de turbinas subdivididos em letras de A a H e diferentes rotações de acordo com a cor selecionada.

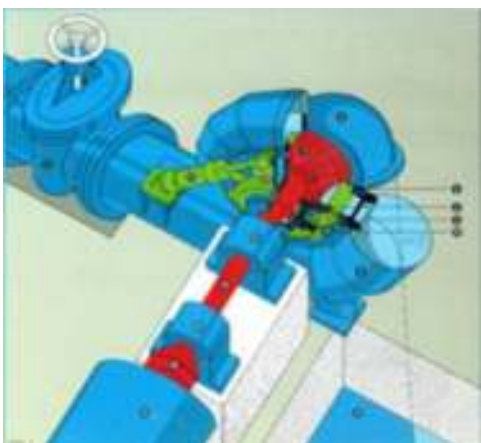


Figura 38 - Catálogo Voith de Francis horizontal
Fonte: VOITH HYDRO S.A.

Através do gráfico da Figura 39 - Seleção do tipo da turbina Francis Horizontal pode-se então procurar a turbina que melhor se enquadra para queda líquida e vazão de projeto.

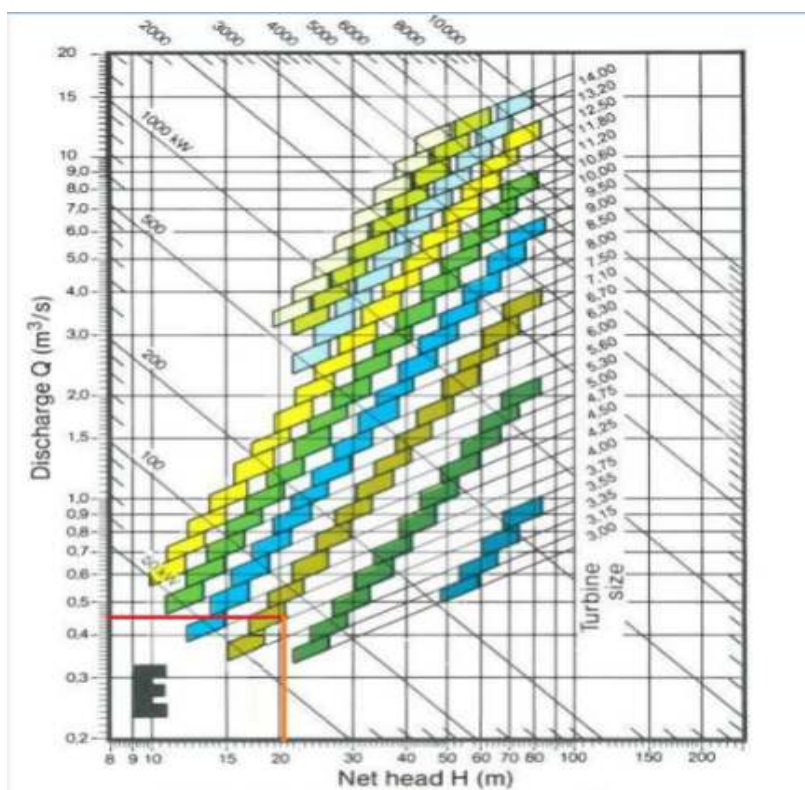


Figura 39 - Seleção do tipo da turbina Francis Horizontal
Fonte: VOITH HYDRO S.A.

O modelo selecionado para turbina Francis horizontal foi a do tipo E de tamanho 3.55 e potência nominal de 70kW, para a localização, com quedas líquidas respectivamente nominal de 20,54 m, com a vazão de 0,43 m³/s. A turbina terá uma rotação síncrona de 900 rpm de acordo com a Gráfico da Figura 39 - Seleção do tipo da turbina Francis Horizontal.

A velocidade síncrona para frequência de rotação de 60 Hz é subdividida conforme cores apresentadas na Figura 40 - Rotações síncronas de referência para as turbinas



Figura 40 - Rotações síncronas de referência para as turbinas
Fonte: VOITH HYDRO S.A.

A rotação da turbina que se enquadra nas especificações do projeto, tem velocidade síncrona de 900 rpm.

O catálogo também fornece as dimensões principais da caixa espiral, tubo de sucção, altura de sucção da turbina e tamanho do eixo até o volante de inércia. Os valores estão mostrados na Figura 41 - Dimensões principais Turbina Francis Horizontal

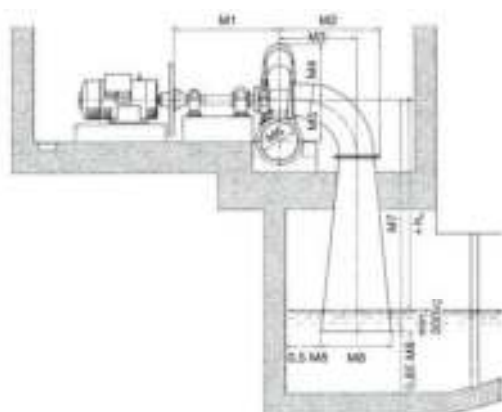


Table of dimensions (mm)

Dimension	M1		M2		M3		M4		M5		M6				M7				M8			
	A-H	A-F	G-H	A-F	G-H	A-F	G-H	A-F	G-H	A-D	E-F	G	H	A-D	E-F	G	H	A-D	E-F	G	H	
3.80	1000	1050	320	750	710	520	420	420	370	400	350	350	350	1900	1700	1020	1000	420	350	350	440	
3.55	1000	1070	320	740	740	540	430	440	380	420	380	370	370	1900	1820	1050	1000	470	410	350	510	
3.25	1110	1070	340	730	740	560	450	470	410	450	400	390	390	2000	1920	1080	1000	520	470	350	510	
3.00	1170	1070	350	740	710	570	460	480	420	470	420	410	410	2000	1920	1100	1000	550	490	400	510	
2.75	1230	1170	360	750	740	580	470	490	430	480	430	420	420	2000	1920	1120	1000	580	530	400	510	

Figura 41 - Dimensões principais Turbina Francis Horizontal
Fonte: VOITH HYDRO S.A.

O valor da rotação específica (N_s) para a turbina selecionada pode ser calculado através da Equação (36).

$$N_s = 900 \times \sqrt{\frac{70}{20,51^{1,25}}} = 172,51 \text{ rpm} \quad (36)$$

Resultando em um valor de N_s de aproximadamente 172, O valor da velocidade específica da turbina é uma característica que define o tipo da turbina como lenta, normal ou rápida, de acordo com a tabela 10.

Tabela 10 - Características das Turbinas

Velocidade Específica	Tipo
60 – 150	Lenta
151 – 250	Normal
251 - 400	Rápida

Fonte: Eletrobrás (2000)

Com os resultados das velocidades específicas das turbinas nas três localizações, segundo Eletrobrás (2000), o tipo de turbina a ser instalada é a normal.

4.5.2 Gerador

Segundo a ELETROBRAS (1985) no caso de MCH o normal é que os grupos geradores tenham o eixo na horizontal, sendo comum o uso de multiplicadores de velocidade por correias ou com caixas de engrenagens. No caso da MCH Rio Branco do Sul serão utilizados geradores síncrono GTA252AIII de 4 polos, 3 fases, tensão de 220 / 380V, 1800 rpm com grau de proteção IP21.

Tabela 11 - Características do gerador síncrono GTA252AIII

Gerador	Dados
Frequência (Hz)	60 Hz
Potência de saída do gerador	65 kW
Rotação nominal	1800 rpm
Número de fases	3
Tensão de saída	220 / 380 V
Polaridade	4
Classe de isolamento	H
Refrigeração	Autoventilado
Norma	IEC
Tipo de excitação	Brushless
Grau de proteção	IP21
Sentido de rotação	Ambos

Fonte: Betta Hidroturbinas (2016)



Figura 42 - Gerador Síncrono WEG GTA252AIII
 Fonte: BETTAHIDROTURBINAS (2016).

4.5.3 Regulador de Velocidade

Os dimensionamentos e parâmetros operacionais do regulador de velocidade, como: faixa morta do regulador, tempo de inércia, tempo de regulação para correção de frequência, entre outros parâmetros devem ser informados pelo fabricante da turbina. Segundo a Betta Hidroturbinas (2016), fabricante de turbinas pesquisado para este estudo, os parâmetros de regulador de velocidade para turbinas Banki, que podem ser, de maneira geral, aproximados para as demais turbinas com potência de aproximadamente 40 kVA são:

- Faixa morta do regulador —dead band II – ajustável a partir de 0,4% da frequência nominal;
- Tempo de inércia utilizado para o cálculo do volante de inércia – 6 s;
- Tempo de regulação para correção da frequência em operação normal – 1 a 2,5 s;
- Tempo máximo de recuperação da frequência na rejeição de carga (desligamento elétrico do Gerador estando o conjunto à plena potência - 10 s).

4.5.4 Volante de Inércia

De acordo com LIMA (2009), em unidades geradoras de pequeno porte podem ocorrer que os efeitos da inércia das massas girantes sejam insuficientes para garantir uma regulação de velocidade estável. Segundo o Manual de Microcentrais Hidrelétricas, ELETROBRÁS E DNAEE (1985), os volantes de inércia são normalmente colocados na extensão do eixo do gerador, sendo sua massa e diâmetro determinados pelo fabricante da turbina em função das características da máquina oferecida. A BETTA HIDROTURBINAS (2014), fornece alguns parâmetros para o volante de inércia para o caso de turbina com potência próxima a 40 kVA:

- Volante de Inércia com tempo de inércia de 6 segundos;
- Diâmetro 850 mm e espessura 95 mm.

4.5.5 Canal de Fuga

Segundo ALVES (2007), a soleira garante o afogamento do tubo de sucção e do canal de fuga, no interior da casa de máquinas. Deve ter uma profundidade tal que permita o escoamento da água sem prejuízos ao fundo do canal. A profundidade mínima de afogamento do tubo de sucção é dada pelo fabricante.

O canal de fuga foi dimensionado com base no tubo de sucção da turbina Francis, após os cálculos se obteve a profundidade de 0,9 m, a cota entre nível da jusante e o canal de fuga e de 0,60 m, uma largura de 2,320 m e comprimento de 3 m. A parte inferior do canal de fuga deve ter revestimento de pedra para evitar erosão no solo. O tubo de sucção deve ter o comprimento maior que o conduto de entrada no bocal da turbina Francis, para converter a velocidade de saída do fluxo do rotor do rotor em pressão para diminuir as perdas de saída.

5 MEDIDAS E MUDANÇAS NECESSÁRIAS À MICROCENTRAL

Com a realização do estudo foram levantados todos os dados referentes a MCH Rio Branco do Sul, verifica-se a necessidade de mudanças e melhorias para que seja possível a sua reativação. Dentro deste capítulo serão apresentadas as medidas necessárias para sua implantação.



Figura 43 - Câmara de carga e conduto forçado - MCH de Rio Branco do Sul
Fonte: Coelho e Xavier, 2015

5.1 RESERVATÓRIO, BARRAGEM E VERTEDOURO

Verificou-se que o reservatório está assoreado devido ao acúmulo de material junto à barragem, o solo desprendido das margens por conta das erosões também colabora para o assoreamento junto com a diminuição da mata ciliar ao longo do leito do rio, será necessário realizar a dragagem do reservatório da MCH.

A barragem encontra-se em bom estado de conservação juntamente com o vertedouro, estrutura que também se apresenta em boas condições de uso.

5.2 CONDUTO FORÇADO

O conduto forçado não se encontra em condições de uso, pois devido as intempéries climáticas houve a deterioração do mesmo, sendo necessário a reconstrução de toda a estrutura a tubulação forçada até a casa de máquinas tem o comprimento de aproximadamente 34,7 m e diâmetro de 400 mm.

5.3 CASA DE MÁQUINAS

A nova proposta da casa de máquinas da MCH de Rio Branco do Sul foi definida de acordo com a quantidade de turbinas a serem instaladas e suas dimensões, serão instaladas duas turbinas.

Para fins de estimativa do tamanho da casa de máquinas, as dimensões da turbina Banki que se pretende instalar na MCH de Rio Branco do Sul serão de acordo com a norma NBR 12591 – Dimensões Principais de Turbinas Hidráulicas para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). Essas dimensões estão apresentadas nas Figura 44 - Principais dimensões da turbina Francis Horizontal e Figura 45 - Principais dimensões da turbina Michell-Banki.

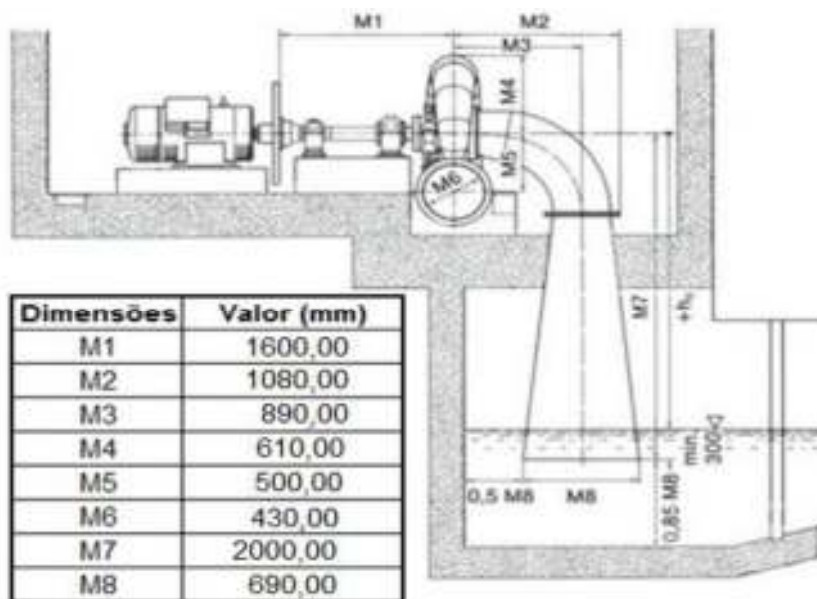


Figura 44 - Principais dimensões da turbina Francis Horizontal
Fonte: VOITH S.A.

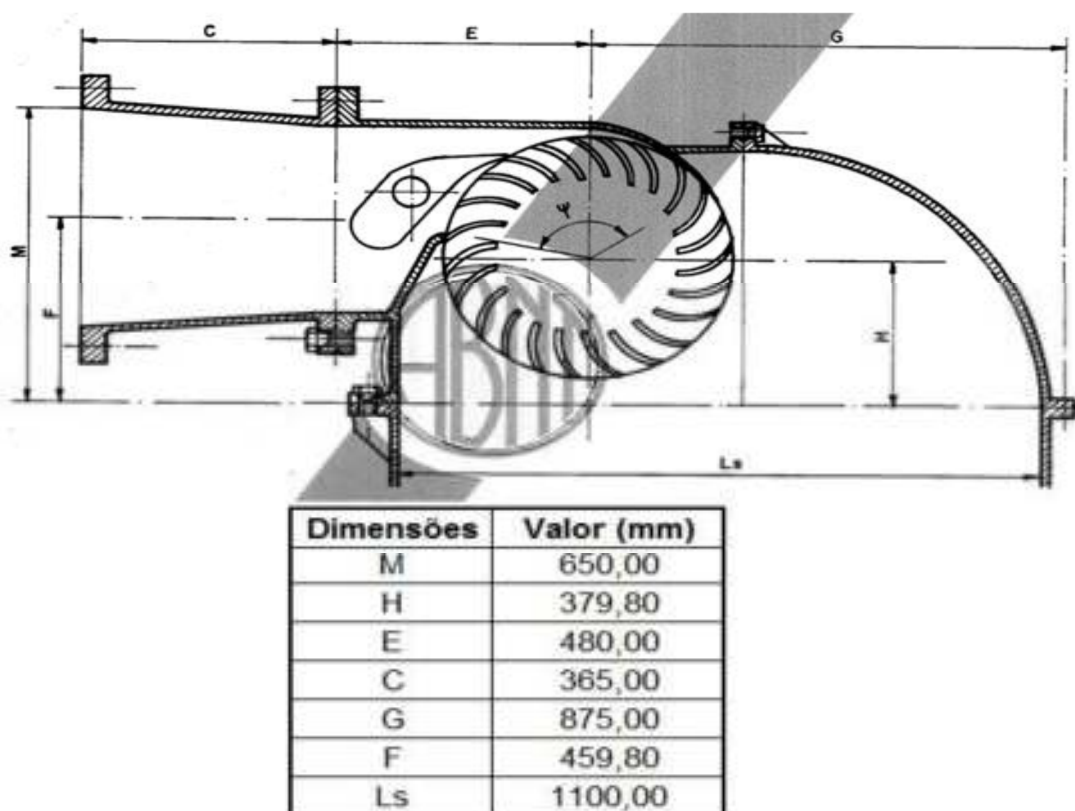


Figura 45 - Principais dimensões da turbina Michell-Banki
Fonte: NBR 12591 (1992).

O dimensionamento do tamanho da casa de máquinas da MCH de Rio Branco do Sul será feito da seguinte maneira: deve-se primeiramente calcular o

diâmetro do rotor da turbina, segundo Alves (2007), pois os demais equipamentos dependem do dimensionamento do diâmetro do rotor da turbina, conforme a equação 37.

$$Dn = 0,3 \times H_{Liq}^{\frac{1}{8}} \times Q^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{H_{Liq}} \quad (37)$$

Onde :

Dn = diâmetro interno na saída do rotor da turbina [m];

H_{Liq} = queda líquida nominal [m];

Q = descarga nominal [m^3/s]

Calculando:

$$Dn = 0,3 \times 20,539^{\frac{1}{8}} \times 0,4378^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{20,539} = 0,338 \text{ ms} \quad (38)$$

O comprimento da casa de máquinas é dada pela equação (39).

$$C = 6,3 \times D_n + G_1 + 2,4 \quad (39)$$

Onde:

C = comprimento da casa de máquinas, em m;

D_n = diâmetro interno na saída do rotor da turbina, em m;

G_1 = dimensão do gerador, fornecido pela Tabela 12 - Potência X Dimensão do gerador

Tabela 12 - Potência X Dimensão do gerador

Potência (KW)	G1 (m)	Potência (KW)	G1 (m)
2,4	0,53	16,0	0,83
3,2	0,53	20,0	0,83
4,0	0,57	24,0	0,90
5,2	0,57	32,0	0,90
6,0	0,57	40,0	0,90
7,2	0,61	58,0	1,07
8,0	0,61	64,0	1,07
10,0	0,80	80,0	1,07
13,0	0,83	100,0	1,20

Fonte: Alves (2007)

Utilizando a tabela 12, podemos obter o tamanho do gerador através da potência.

$$C = 6,3 \times 0,338 + 1,07 + 2,4 = 5,5931 \text{ m} \quad (40)$$

Como serão utilizadas duas turbinas, devemos dobrar o comprimento, pois as turbinas serão instaladas uma do lado da outra.

$$C = 6,3 \times 2 = 11,1862 \text{ m} \quad (41)$$

A largura da casa de máquinas é dada pela Equação (42):

$$L = 3,4 \times D_n + 4,7 \quad (42)$$

Onde:

L = largura da casa de máquinas, em m;

D_n = diâmetro interno na saída do rotor da turbina, em m;

$$L = 3,4 \times 0,337 + 4,7 = 5,84 \text{ m} \quad (43)$$

A área interior total da casa de máquinas será de 65,32 m².

O modelo 3D da casa de força foi realizado com auxílio de um software de modelagem de sólidos. As máquinas foram posicionadas em um ângulo de 60° em relação ao eixo do conduto. Foram estudados diferentes layouts até chegar nessa proposta, resultando em uma área menor para a casa de força com essa quantidade de máquinas. A turbina Francis Horizontal foi instalada no trecho final do conduto devido ela necessitar maior distância lateral entre os eixos do conduto de adução. A Figura 46 - Arranjo 3D da casa de máquinas, mostra o modelo 3D casa de força e a Figura 47 - Vista em planta da casa de máquinas, mostra a planta da casa de força.

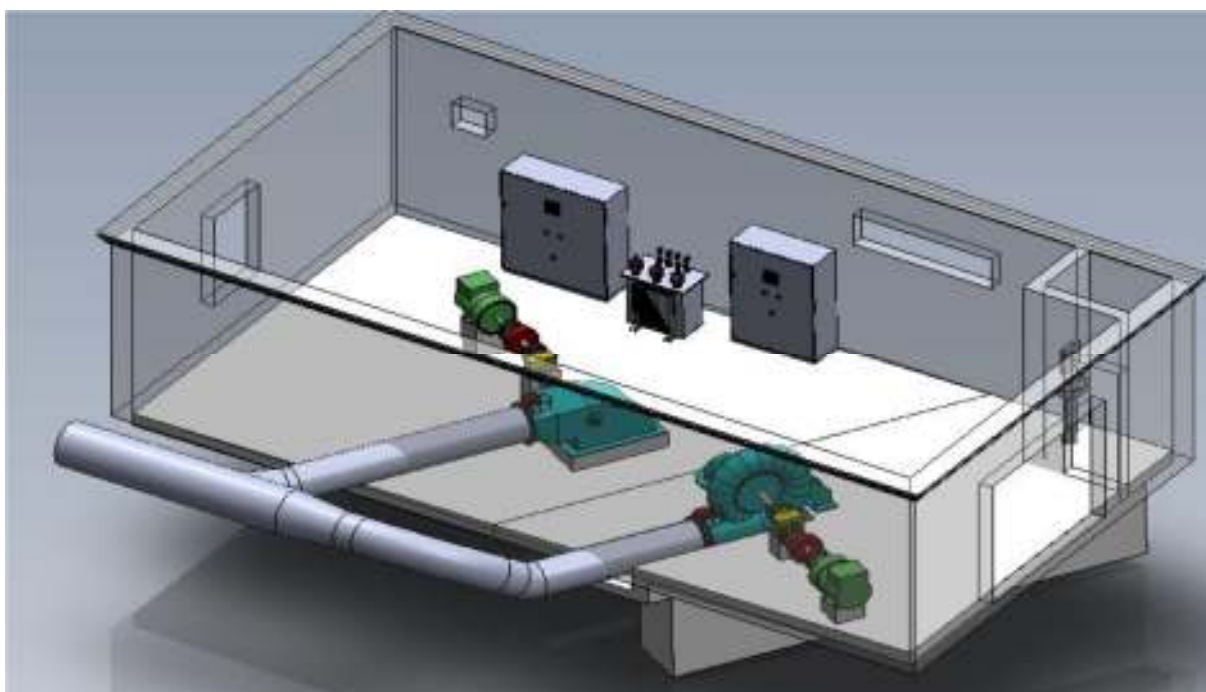


Figura 46 - Arranjo 3D da casa de máquinas
Fonte: Coelho e Xavier (2015)

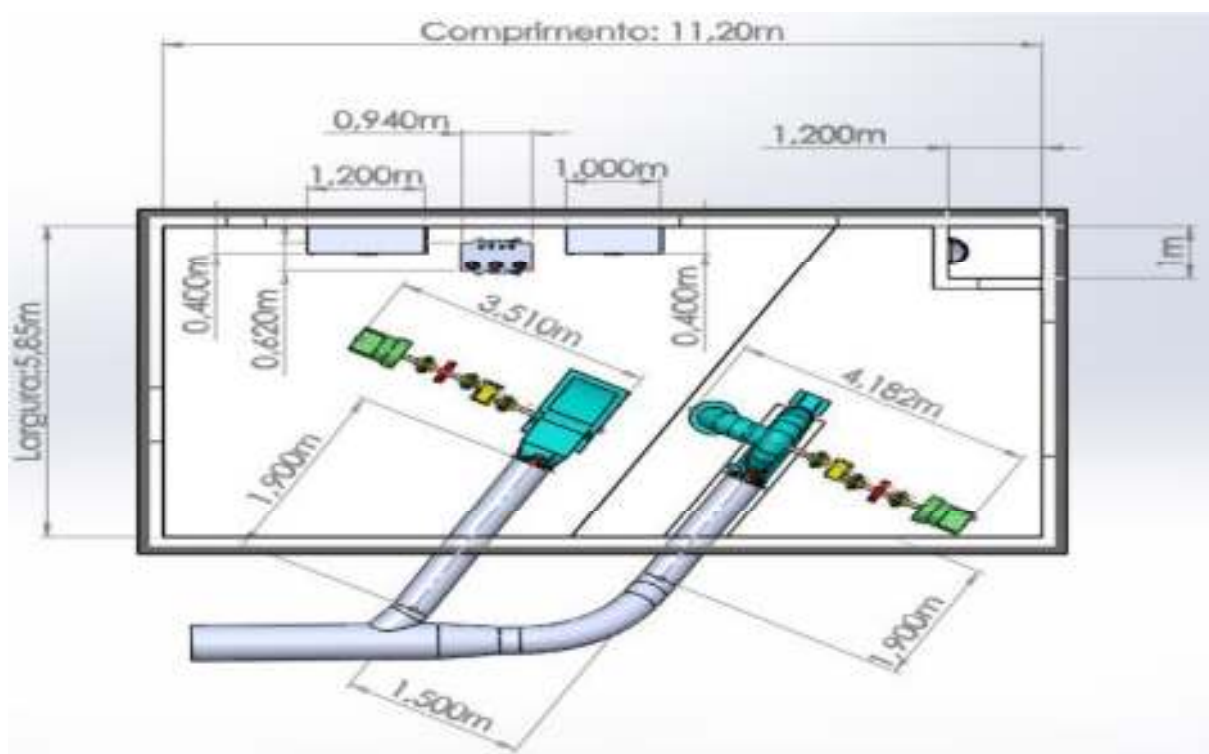


Figura 47 - Vista em planta da casa de máquinas
Fonte: Coelho e Xavier (2015)

6 CONCLUSÕES

Levando-se em consideração a evolução de tecnologia, a importância do estudo de centrais hidrelétricas é reconhecida. Com este trabalho, espera-se contribuir para o conhecimento desta forma de geração de energia, tendo em vista seu papel no desenvolvimento sustentável. Além disso, conclui-se o estudo inicial de um empreendimento que não acarretará em impactos ambientais, já que as estruturas que causa impacto já estão construídas e aproveitará o potencial energético atualmente desperdiçado.

As estruturas que estão em condições de uso e serão reaproveitadas são: barragem, vertedouro, canal de adução, reservatório e tomada d'água.

Após um estudo em campo e do levantamento de trabalhos anteriores, verificou-se a depreciação da antiga usina. Algumas mudanças nas estruturas serão fundamentais para sua reativação, como a reconstrução total do conduto forçado e da casa de máquinas. Um estudo para a construção da casa de máquinas foi realizado através do dimensionamento das turbinas, porém somente após a obtenção da verba necessária para a concretização da implantação será feita a escolha dos fabricantes para delinear a estrutura final da casa de máquinas.

Segundo os estudos realizados, a MCH apresenta uma vazão de 0,4378 m³/s entregue a turbina e uma queda bruta de 20,551 m. Através dos cálculos de perdas no sistema de adução, foi obtido um valor de potência aproximada de 64 kW. Para esta vazão e queda, observou-se que a melhor turbina a ser utilizada no empreendimento seria a turbina Francis Horizontal ou a Michell-Banki. Serão utilizadas duas turbinas na usina, uma Francis e uma Banki, porém elas não funcionarão simultaneamente.

A usina revitalizada possuirá uma sala de apoio exclusiva para alunos da UTFPR, que poderão realizar visitas técnicas no local, a fim de observar os detalhes de uma Microcentral, e fazer a relação da prática com a teoria vista em sala de aula.

7 REFERENCIAS

AFLON – Plásticos Industriais Ltda. **Tubos e Conexões de PEAD, PP e PVDF**. Catálogo Técnico. Cabreúva, 2015.

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.

ALQUÉRES, José Luiz. **Energia para gerações**. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.shell.com/home/content/bra/aboutshell/media_centre/annual_reports_and_publications/book_energy/> Acesso em: 26/05/ 2014.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Aspectos Socioeconômicos**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/11%C2%ADAspectos_socioe.pdf> 19 set. 2005. Acesso em: 28 maio de 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12296**: Dimensionamento de Condutos Forçados para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). Rio de Janeiro, 1991.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2014: Ano base 2013/Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2014.

BALARIM, Carlos Roberto. **Estimativa de custo das estruturas e equipamentos de micro centrais hidrelétricas**. Tese (doutorado em Agronomia). UNESP-Botucatu, SP, 1996.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS - ELETROBRAS. **Sistema de informação do potencial hidrelétrico brasileiro**. Rio de Janeiro, abr. 2003.

CHAPALLAZ, J.M., EICHENGERICHENBERGER P. E FISCHER G. **Manual on Pumps Used as Turbines. Vol. 11.** Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft (GTZ) GmbH. Alemanha. (1992a).

COELHO, Felipe D., XAVIER, Jorge. **Revitalização da Câmara de Carga e do Conduto Forçado da Usina Hidrelétrica de Rio Branco do Sul.** 2015.121 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CONFERÊNCIA MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, **Relatório Brundtland.** Noruega: Comissão Mundial da ONU, 1987.

ELETROBRÁS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de microcentrais hidrelétricas.** Rio de Janeiro: 1985.

ELETROBRÁS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE AGUAS E ENERGIAELETRICA. **Manual de pequenas centrais elétricas.** Rio de Janeiro, 1982.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas,** 2000.

IDER. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis. **Energias Renováveis.** Disponível em <<http://www.ider.org.br/energiasrenovaveis/energias-renovaveis>>. Acesso em 27/05/2015.

LEVIN, L. **FormulairedêsConduitesForcéesOléoducset Conduits D' Aération.** 1 ed. Paris: Dunos, 1968.

NOGUEIRA, Fabio José Horta. **Microcentrais hidrelétricas.**Fábio José Horta Nogueira e; organizado por Geraldo Lúcio Tiago Filho; revisão de Ângelo Stano Júnior e Adriana Barbosa ; colaboração Camila RochaGalhardo ; editoração e arte-final de Adriano Silva Bastos. Itajubá, MG: FAPEPE, 2007.

NOVÁK, Pavel. **Hydraulic Structures.** 3 ed. New York: Taylor & Francis, 2004.

O GLOBO. **Barragem de Algodões se rompe e água atinge 20 metros de altura em cidade do Piauí**

Disponível em:

<http://oglobo.globo.com/brasil/barragem-de-algodoes-se-rompe-agua-atinge-20-metros-de-altura-em-cidade-do-piaui-3123058#ixzz3sXm5fZPX>

Acesso em 20/11/2015.

OKUNO, Emico, CALDAS, Ibere Luiz; CHOW, Cecil. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas**. Sao Paulo: Harbra, 1986.

PORTAL BRASILEIRO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Energias Renováveis**.

Disponível

em

http://energiarenovavel.org/index.php?option=com_content&task=view&id=50&Itemid=142>. Acesso em 27/05/2015.

SANTOS, Afonso H.M.; HÓRTA, Fábio.; BATISTA, Thiago R. **Discussão sobre o número de máquinas em PCH's**. Itajubá, fev. 2010. Disponível em: <<http://www.ixconsult.com.br/artigos/2010-2.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2013.

SCHREIBER, Gerhard Paul. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher; Rio de Janeiro, ENGEVIX, 1977.

SILVA, Alex M. L. da; JUNIOR, Anibal C.; ORTEGA, Luis A. **MEDIÇÃO DA VAZÃO DO RIO RANCHARIA E ESTUDO DO MELHOR APROVEITAMENTO POTENCIAL HIDRELÉTRICO DA USINA**. 2014. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

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

SOUZA, Zulcy de; SANTOS, Afonso H. M.; BORTONI, Edson C. **Centrais hidrelétricas: estudos para implantação**. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 1999.

SMIL, Vaclav. *The Energy Question, Again*. CurrentHistory, 2000