

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

ALEX QUADROS DE CARVALHO
CAIO AUGUSTO MOREIRA

**PROJETO DA CASA DE MÁQUINAS DA USINA HIDRELÉTRICA DE
RIO BRANCO DO SUL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2015

ALEX QUADROS DE CARVALHO
CAIO AUGUSTO MOREIRA

**PROJETO DA CASA DE MÁQUINAS DA USINA HIDRELÉTRICA DE
RIO BRANCO DO SUL**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Elétrica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Manoel Alves

CURITIBA
2015

**Alex Quadros de Carvalho
Caio Augusto Moreira**

Projeto da Casa de Máquinas da Usina 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, 16 de Julho de 2015.

Prof. Paulo Sergio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

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

ORIENTAÇÃO

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gilberto Manoel Alves
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Me. Eloi Rufato Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Ivan Azevedo Cardoso
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

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

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e todos os colaboradores que ajudaram com conhecimento técnico, incentivo e apoio durante a realização do trabalho.

À fabricante de turbinas Betta Hidroturbinas por fornecer a cotação e especificação técnica da turbina Michell-Banki.

À todos os membros que fizeram parte das nossas bancas, Prof. Eloi Rufato Junior e Prof. Ivan Azevedo Cardoso, que tiveram a paciência de ler e sugerir melhorias ao nosso trabalho que com certeza contribuíram significativamente para a conclusão do mesmo.

Ao Sr. Pedro Proença, proprietário das terras onde situa-se a Usina de Rio Branco do Sul pelo apoio e hospitalidade na visita realizada à MCH.

A todos os familiares, amigos e aos que contribuíram direta ou indiretamente durante o desenvolvimento deste trabalho, sempre me motivando para que fosse alcançado o objetivo, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

CARVALHO, Alex Q.; MOREIRA, Caio A.; PROJETO DA CASA DE MÁQUINAS DA MICRO CENTRAL HIDRELÉTRICA DE RIO BRANCO DO SUL. 2015. XX f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e o proprietário das terras onde se situa uma MCH em estado de deterioração, em parceria, estão revitalizando a Micro Central Hidroelétrica – MCH de Rio Branco do Sul para geração de energia elétrica para comercialização. Este trabalho estuda apenas a revitalização da casa de máquinas, o projeto foi desenvolvido com base em normas nacionais, internacionais, livros e manuais de usinas hidrelétricas, comumente utilizadas por projetistas da área. Dentre os principais parâmetros analisados estão: a melhor localização para a construção da casa de máquinas visando qual terá a melhor viabilidade técnica, o dimensionamento do grupo de turbinas, geradores, transformador e instalações auxiliares, assim como um esboço 3D do layout da casa de força com duas máquinas diferentes instaladas.

Palavra-chave: Micro central Hidrelétrica. Casa de Máquina. Casa de força. Rio Branco do Sul. Turbina Francis Horizontal. Turbina Banki.

ABSTRACT

CARVALHO, Alex Q.; MOREIRA, Caio A.; POWER HOUSE PROJECT OF RIO BRANCO DO SUL MICRO POWER PLANT. 2015. XX f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

The Technological Federal University of Paraná (UTFPR) in partnership with the landowner of deteriorated micro power plant (MCH) sites are revitalizing it, in order to generate and commercialize electricity.

This paperwork studies only the revitalization of the power plant power house. The project was developed under the national and international rules basis as well as power plants books and manuals widely used by technical designers.

Among the main parameters are: the best construction place of the power house under the best technical viability aspects, the designing of the turbines group, generators, transformers and auxiliary installations as well as a 3D layout draft of the power house with two different machines installed.

Keywords: Micro power plant. Power house. Machine house. Rio Branco do Sul. Francis turbine in horizontal axis. Banki turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragem da micro central hidrelétrica de Rio Branco	19
Figura 2 – Barragem a gravidade, com bacia de dissipação no trecho do vertedouro	31
Figura 3 – Seção transversal de uma barragem de concreto a gravidade	31
Figura 4 – Canal de adução	35
Figura 5 – Estrutura de tomada d'água	39
Figura 6 – Tomada de água	39
Figura 7 - Arranjo de grupo gerador de pequena potência com turbina do tipo turbilhão	41
Figura 8 - Arranjo de grupo gerador de pequena potência com roda Pelton.....	42
Figura 9 – Arranjos típicos de casas de máquinas para μ CH e mCH	43
Figura 10 - Rotor Pelton	50
Figura 11 – Desenho esquemático de uma turbina Pelton.....	51
Figura 12 – Aspecto de uma turbina Francis para microcentrais	52
Figura 13 – Turbina Francis	52
Figura 14 – Turbina axial.....	53
Figura 15 - Sistema utilizando turbina axial.....	54
Figura 16 – Esquema de uma turbina uma turbina Michel Banki e passagem de água pelo rotor	55
Figura 17 - Aspecto de um grupo gerador com turbina Michell Banki	55
Figura 18 – Válvula borboleta.....	57
Figura 19 – Forma adequada para o tubo de sucção. (a) escoamento livre, sem tubo de sucção. (b) tubo de sucção cilíndrico. (c) Tubo de sucção tronco-cônico	59
Figura 20 – Canal de Fuga.....	66
Figura 21 - Dimensões básicas do canal de fuga.....	68
Figura 22 – Canal de fuga em degraus	69
Figura 23 - Localização da Usina Rancharia.....	69
Figura 24 - Instalações da Usina Rancharia.....	70
Figura 26 – Catálogo Voith de Francis horizontal.....	74
Figura 26 – Rotações síncronas de referência para as turbinas	76

Figura 27 – Dimensões principais Turbina Francis Horizontal Localização 1 e 2.....	76
Figura 28 – Turbina Banki acoplada com gerador.....	79
Figura 29 – Catálogo para seleção da válvula borboleta	79
Figura 30 – Painel do Regulador Automático de Velocidade	81
Figura 31 – Gerador Síncrono WEG GTA252AIII.....	83
Figura 32 – Sistema de proteção - Usina não assistida - Gerador até 2MVA	86
Figura 33 - Dimensões do transformador	87
Figura 34 – Dimensões do transformador	88
Figura 35 – Principais dimensões da turbina Francis Horizontal.....	89
Figura 36 – Principais dimensões da turbina Michell-Banki	89
Figura 37 – Arranjo 3D da casa de máquinas	92
Figura 38 – Vista em planta da casa de máquinas.....	92
Figura 39 – Vista frontal do canal de fuga	94
Figura 40 – Vista Inferior do canal de adução	95
Figura 41 – Primeira localização da casa de máquinas	96
Figura 42 – Canal de fuga existente.....	98
Figura 43 – Segunda Localização da casa de máquinas.	98
Figura 44 - Segunda localização para a construção da casa de máquinas	100
Figura 45 - Terceira localização da casa de máquinas	100
Figura 46 - Terceira localização para a construção da casa de máquinas.....	102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte	16
Gráfico 2 – Diâmetro econômico do conduto forçado	38
Gráfico 3 – Campo de aplicação das turbinas de ação para pico, micro e mini centrais hidrelétricas	46
Gráfico 4 - Campo de aplicação das turbinas de reação para pico, micro e mini centrais hidrelétricas	47
Gráfico 5 – Verificação preliminar do tipo de turbina.....	72
Gráfico 6 – Seleção do tipo da turbina Francis Horizontal	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das PCHs em diversos países (kW).....	18
Tabela 2 – Classificação de centrais hidrelétricas quanto à queda.....	18
Tabela 3 - Velocidade de rotação para turbinas hidráulicas.....	48
Tabela 4 – Curva do vapor de água.....	58
Tabela 5 – Valores das quedas líquidas.....	71
Tabela 6 - Rendimento das turbinas.....	73
Tabela 7 – Potência hidráulica turbina Francis.....	74
Tabela 8 – Potência hidráulica turbina Banki.....	74
Tabela 9 – Características das Turbinas.....	77
Tabela 10 – Características técnicas do projeto material pvc.....	78
Tabela 11 – Especificações técnicas da turbina.....	78
Tabela 12 – Potência de saída dos geradores.....	82
Tabela 13 – Características do gerador síncrono GTA252AIII.....	83
Tabela 14 – Potência X Dimensão do gerador.....	90
Tabela 15 – Dimensões do canal de fuga.....	93
Tabela 16 - Medidas da antiga localização da casa de máquina.....	97
Tabela 17 - Potencia gerada Localização 1.....	97
Tabela 18 - Medidas da segunda localização da casa de máquina.....	99
Tabela 19 - Potencia gerada Localização 2.....	99
Tabela 20 – Medidas da segunda localização da casa de máquinas.....	101
Tabela 21 – Potência gerada localização 3.....	101

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CHESF	Companhia Hidro Elétrica de São Francisco
CHBQ	Centrais Hidrelétricas de Baixa Queda
CHR	Centrais Hidrelétrica de Represamento
$\cos \phi$	Fator de potência do gerador
D_n	Diâmetro interno na saída do rotor da turbina
ELETOBRAS	Centrais Elétricas Brasileira
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil
ELETROSUL	Centrais Elétricas do Sul do Brasil
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESCELSA	Espírito Santo Centrais Elétricas S.A.
f	Frequência da rede em Hertz
GWh	Giga Watt hora
H_{liq}	Queda líquida
MCHs	Microcentrais Hidrelétricas
n	Velocidade de rotação síncrona em rpm
N_s	Velocidade Específica
N_{qr}	Velocidade específica da turbina
n_t	Rendimento da turbina
rpm	Rotação por minuto
RV	Regulador de Velocidade
OLADE	Organização Latino Americano de Energia
p	nº de pólos do gerador
P_G	Potência na saída do gerador
P_h	Potência hidráulica
P_n	Potência nominal da turbina
P_T	Potência no eixo da turbina
Q	Vazão
Q_r	Vazão garantida ou nominal

TC	Transformador de Corrente
TH	Turbina Hidráulica
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 TEMA	17
1.1.1 Delimitação do Tema	19
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	20
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 Objetivo Geral	21
1.3.2 Objetivos Específicos	21
1.4 JUSTIFICATIVA	21
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1 HISTÓRIA DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	24
2.2 LEGISLAÇÃO	26
2.3 CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	27
2.3.1 Centrais Quanto à Capacidade de Regularização	27
2.4 ESTRUTURAS DA MCH	28
2.4.1 Barragem	29
2.4.2 Vertedouros	32
2.4.3 Canal de Adução	34
2.4.4 Câmara de Carga	35
2.4.5 Conduto Forçado	37
2.4.6 Tomada d'Água	38
2.4.7 Casa de Máquinas	40
2.4.8 Canal de Fuga	66
2.5 LOCALIZAÇÃO DA USINA RANCHARIA	69
2.5.1 Instalações Existentes no Local	70
3 RESULTADOS	71
3.1 DIMENSIONAMENTO DAS TURBINAS	71
3.1.1 Cálculo da Potência das Turbinas	72
3.1.2 Dimensionamento Turbina Francis Horizontal	74
3.1.3 Dimensionamento Turbina Michell-Banki	77
3.2 DIMENSIONAMENTO DA VÁLVULA BORBOLETA	79
3.3 UNIDADE ELETRÔNICA DO REGULADOR DE VELOCIDADE	80
3.4 MULTIPLICAÇÃO DE VELOCIDADE	81
3.5 DIMENSIONAMENTO DA POTÊNCIA DO GERADOR	82
3.5.1 Características do Equipamento	82
3.6 SISTEMA DE PROTEÇÃO	83
3.6.1 Proteção contra motorização (32)	85
3.6.2 Relé de Sobrecorrente com restrição por tensão (51V)	85
Utilizado para melhorar a sensibilidade do disjuntor devido aos baixos valores de corrente durante curtos-circuitos na rede de distribuição distantes da usina.	85
3.6.3 Proteção contra falta para terra no estator (51GN) ou (59GN)	85
3.6.4 Proteção contra sobrecarga (49)	85
3.7 TRANSFORMADOR ELEVADOR	86
3.8 DIMENSIONAMENTO DA CASA DE MÁQUINAS	88
3.9 MATERIAL UTILIZADO NA CASA DE MÁQUINAS	93
3.10 DIMENSIONAMENTO DO CANAL DE FUGA	93
3.11 ESTUDO DAS POSSÍVEIS LOCALIZAÇÕES DA CASA DE MÁQUINAS	96

3.11.1	Primeira Localização Da Casa De Máquinas.....	96
3.11.2	Segunda Localização da Casa de Máquinas	98
3.11.3	Terceira Localização da Casa de Máquinas.	100
4	CONCLUSÃO	103

1 INTRODUÇÃO

O mundo está inserido em um contexto de consumo crescente de energia, o que demanda, cada vez mais, centrais produtoras. Por outro lado, procura-se cada vez mais alcançar o conceito de desenvolvimento sustentável, o qual vai na contramão das centrais geradoras térmicas convencionais (óleo, carvão mineral e gás), extremamente poluidoras. Por isso buscam-se alternativas para tais unidades geradoras, além de uma maior diversificação das matrizes energéticas globais, o que sempre foi desejável. (GUITARRARA, GABRIEL, 2012).

O Brasil é o país que mais constrói barragens no mundo, e sua produção energética está altamente dependente de centrais hidrelétricas. Além de ser um fator histórico de desenvolvimento da economia, a energia hidrelétrica desempenha papel importante na integração e no desenvolvimento de regiões distantes dos grandes centros urbanos e industriais. (ALVES, 2007).

A hidroeletricidade é usada no Brasil, devido à facilidade das características naturais, o que torna apropriado o investimento em hidrelétricas, uma vez que o relevo brasileiro é composto predominantemente por montanhas e planaltos, contribui então para a formação de rios com queda d'água, o clima brasileiro com exceção do Nordeste, é bastante chuvoso, o que permite que haja um grande fluxo de água nos rios nacionais. (SOUZA,2008).

Segundo o Portal Brasileiro de Energias renováveis, as fontes de energia renovável são aquelas em que os recursos naturais utilizados são capazes de se regenerar, ou seja, são considerados inesgotáveis, diferente de fontes não renováveis como o petróleo.

Os principais recursos naturais utilizados na obtenção de energia limpa são:

- O Sol: energia solar;
- O vento: energia eólica;
- Os rios e correntes de água doce: energia hidráulica;
- As marés e oceanos: energia maremotriz e energia das ondas;
- A matéria orgânica: biomassa;
- O calor da Terra: energia geotérmica.

No cenário da oferta de energia elétrica no Brasil, há um domínio muito grande das hidrelétricas, fornecendo praticamente 71% da energia elétrica utilizada no país, conforme é mostrado no Gráfico 1 (BEN, 2014).

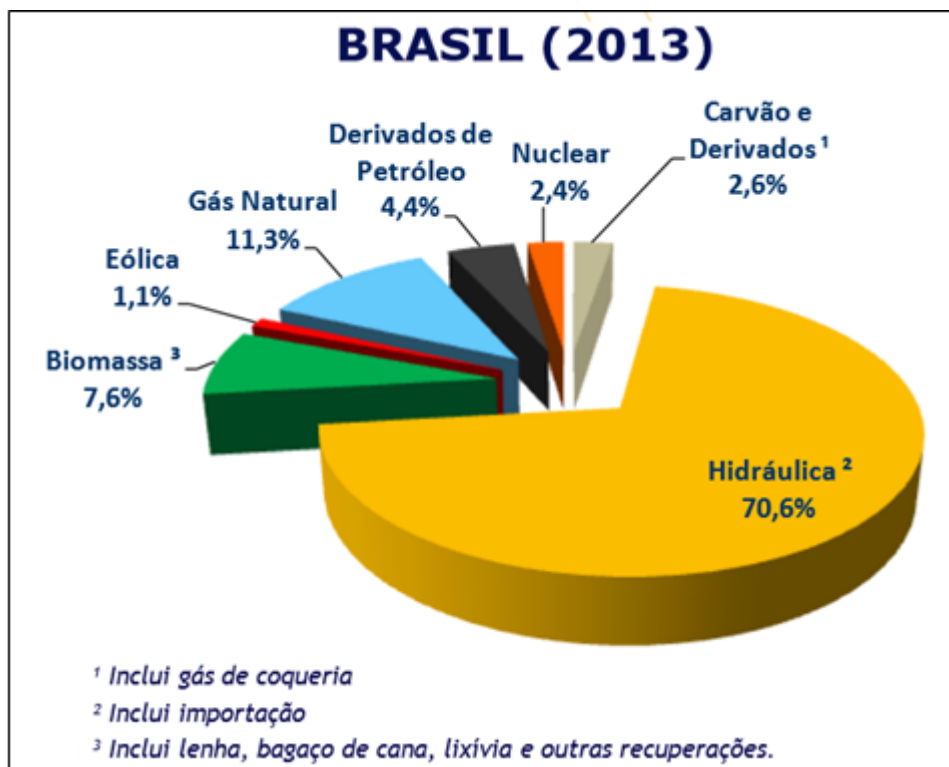


Gráfico 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte
Fonte: Balanço Energético Nacional (2014) Ano Base (2013).

De acordo com dados do Portal Brasileiro de Energias Renováveis, mesmo com o aumento de outras fontes alternativas de energia, devido a restrições econômicas e ambientais sobre usinas hidrelétricas, existe a indicação de que a energia de hidrelétricas continuará sendo a principal fonte geradora de energia elétrica do país. (PORTAL BRASILEIRO, 2011).

Além disso, a hidroeletricidade é uma fonte de energia que não tem variação de preços e nem interrupções de fornecimento, como é o caso do petróleo que é um combustível fóssil que em um futuro próximo irá acabar. O Brasil tem vasta experiência no planejamento e construção de centrais hidrelétricas e de sistema de transmissão, o que permite que o país tenha uma autonomia tecnológica para a produção de hidroeletricidade, de acordo com dados do governo. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2010).

Apesar do Brasil ser o terceiro maior potencial hidráulico do mundo (atrás apenas de Rússia e China), o Brasil importa parte da energia hidrelétrica que

consome. Isso porque a maior hidrelétrica das Américas e segunda maior do mundo, a Usina de Itaipu, não é totalmente brasileira. Por se encontrar na divisa do país com o Paraguai, 50% da produção da usina pertence ao país vizinho que, na incapacidade de consumir esse montante, vende o excedente para os brasileiros. Além do mais, o Brasil também compra energia produzida pelas hidrelétricas argentinas de Garabi e Yaceritá. (PENA, RODOLFO. F.ALVES,2014).

Observando o crescimento demográfico e econômico mundial, prevê-se um crescente aumento na demanda de energia elétrica. Por outro lado, os recursos naturais necessários a essa geração de energia vêm se esgotando constantemente, gerando preocupações relacionadas a possíveis restrições no fornecimento de energia. (ALQUÉRES, 2003).

O consumo de energia elétrica no Brasil alcançou 41.403 giga watt-hora (GWh) em fevereiro de 2014, representando aumento de 8,6% sobre o mesmo mês de 2013, segundo levantamento da Empresa de Pesquisa Energética – EPE. (OLIVEIRA, NIELMAR DE, 2014).

Uma maneira para aumentar a produção de energia elétrica e conseguir atender a demanda do consumo é a utilização de Micro Centrais Hidrelétricas (MCH's). Geralmente as MCH são construídas em propriedades rurais que utilizam as quedas d'água para a produção de energia. Essas tem a habilidade de produzir energia suficiente para atender as necessidades básicas de um domicílio rural mesmo em pequenos potenciais hidráulicos. (ALVES, 2007).

1.1 TEMA

As MCH's (Micro Centrais Hidrelétricas) são potencialmente importantes para a geração de energia elétrica, especialmente para sistemas isolados e “na perspectiva de universalização do acesso à energia no país ou para o atendimento de unidades agrícolas e industriais. (...). Estima-se que haja mais de mil minis e micro centrais com potência média de 300 kW”. (VIANA, 2005).

Os diferentes países classificam de modo diferente as micros, minis e pequenas centrais. Isso decorre do estágio industrial do momento em um determinado período (BALARIM, 1999). A

Tabela 1 indica algumas das diferentes classificações das centrais hidrelétricas de pequeno porte de acordo com seus países.

Tabela 1 – Classificação das PCHs em diversos países (kW).

PAÍS	MICRO	MINI	PEQUENA
Brasil	100	101 – 1.000	1001 – 10.000
Bolívia	100	101 – 1.000	
China	100	101 – 500	501 – 25.000
Equador	50	51 – 500	501 – 5.000
Estados Unidos	500	501 – 2.000	2.002 – 15.000
Peru	5-50	51 – 500	501 – 5.000
Polônia	100	101 – 1.000	1.001 – 15.000

Fonte: Adaptado de JIANDONG (1994).

A classificação das micros centrais utilizadas no Brasil é baseada em sua potência instalada, sendo apresentada de forma diversa pelo Manual da OLADE e pelo Manual de Centrais Hidrelétricas Brasileiras S.A. da Eletrobrás (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação de centrais hidrelétricas quanto à queda

CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS	POTÊNCIA MÁXIMA (kW)	QUEDA DE PROJETO – Hd (m)		
		BAIXA	MÉDIA	ALTA
Micro centrais	P<100	Hd < 15	15 < Hd < 50	Hd > 50
Minicentrais	100<P<1000	Hd < 20	20 < Hd < 100	Hd > 100
Pequenas centrais	1000<P<30000	Hd < 25	25 < HD < 130	Hd > 130

Fonte: ELETROBRÁS (1985).

De acordo com o Manual de Mini centrais Hidrelétricas editado pela ELETROBRÁS (1985), micro central hidrelétrica é aquela capaz de gerar potência inferior a 100kW. Os outros critérios usados na classificação são basicamente indistintos para os dois tipos citados e são classificados segundo a sua potência instalada, a altura da queda, forma de captação de água e a forma de utilizar vazões naturais.

Na cidade de Rio Branco do Sul, cidade de aproximadamente 32.000 habitantes, há uma usina hidrelétrica desativada em situações precárias. O senhor Pedro Proença, proprietário das terras onde se situa a usina, em posse da liberação do aproveitamento de potencial hidrelétrico pelo Águas Paraná – Instituto de Águas do Paraná, demonstrou interesse em revitalizar a usina em parceria com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).



Figura 1 – Barragem da micro central hidrelétrica de Rio Branco
Fonte: Autoria Própria.

1.1.1 Delimitação do Tema

Para implantação de uma central hidrelétrica, diversas etapas precisam ser cumpridas. Tais etapas podem ser divididas em estudos gerais, projeto e especificações. A etapa de estudos gerais compreende, dentre outros itens, os estudos para determinar a melhor posição dos equipamentos da casa de máquinas em relação à câmara de cargas e ao canal de fuga. (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009).

Casa de máquinas é definida como “edificação que abriga os grupos geradores destinados à produção de energia elétrica, bem como os equipamentos auxiliares necessários ao funcionamento da central hidrelétrica” (ELETROBRÁS; DNAEE, 1985). Seu posicionamento deve ser também levado em consideração devido aos custos relacionados, bem como deve ser observada com atenção a cota do seu piso para que a cheia do rio não a alcance.

De um modo geral, a casa de máquinas pode fazer parte integrante da estrutura da barragem ou estar isolada. O primeiro caso ocorre na maioria das Centrais Hidrelétricas de Represamento (CHR) e nas Centrais Hidrelétricas de Baixa

Queda (CHBQ), enquanto nas Centrais Hidrelétricas de Desvio (CHD) as casas de máquinas são isoladas e a céu aberto. (SOUZA, SANTOS, BORTONI, 1999).

Uma vez estudada e acertada a disposição física em planta e em elevação, deve-se então procurar uma solução compatível de espaço ao redor dos equipamentos, para efeito de montagem e possibilidade de futuras manutenções (Possíveis desmontagens dos equipamentos), o que então definirá o espaço útil interno da casa de máquinas.

O trabalho de pesquisa em questão estudará a revitalização da casa de máquinas da Micro Central Hidrelétrica de Rio Branco do Sul/PR definindo a localização da mesma e a dos equipamentos eletromecânicos.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

O suprimento de energia elétrica tem-se tornado fator indispensável ao bem-estar social e ao crescimento econômico do Brasil. Contudo, esse suprimento ainda é muito deficitário em várias regiões devido à dificuldade de acesso ou pelo atendimento precário em algumas regiões. (ANEEL, 2005)

Geralmente as comunidades rurais são as regiões mais afetada devido a falta de fornecimento de energia elétrica. Muitas vezes estes problemas ocorrem devido ao fato de que os consumidores rurais em geral apresentam baixo consumo de energia elétrica, o que inviabiliza financeiramente o atendimento por parte das concessionárias e impossibilitaria, portanto, a aquisição de bens de consumo que dependem de eletricidade. (ALVES, 2007)

Em Rio Branco do Sul existe uma MCH que se encontra em estado de deterioração tanto em sua estrutura quanto em seus equipamentos. Essa MCH pertence ao Sr. Pedro Proença dos Santos, foi criada uma parceria entre o proprietário e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná por intermédio de seus alunos para revitalização da Usina.

A MCH de Rio Branco do Sul é uma usina tipo fio d'água que não armazena água em um reservatório, a água segue seu ciclo passando pela barragem. A estrutura da usina contém: barragem, tomada d'água, conduto forçado, canal de fuga, casa de máquinas, equipamentos eletromecânicos, uma subestação, entre outras partes.

Este trabalho segue como objetivo projetar a casa de máquinas da usina. Este projeto não é uma tarefa simples pois necessita saber se a localização escolhida será fácil de acesso para a construção.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Projetar a casa de máquinas da usina de Rio Branco do Sul.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, é necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- Projetar a casa de máquinas.
- Estudar três possíveis locais para a construção da casa de máquinas.
- Estudar o número, o tipo e a disposição do grupo turbina-gerador.
- Material apropriado para a construção da casa de máquinas.
- Projetar instalações auxiliares da casa de máquinas.
- Projetar o canal de fuga.

1.4 JUSTIFICATIVA

O setor elétrico sempre teve um papel estratégico e fundamental no desenvolvimento econômico dos países, pois a energia elétrica é um insumo básico para indústrias em seus processos de produção, para atividades comerciais e para conforto e comodidade das famílias (ALVES, 2007).

Apesar desta importância, percebe-se que no Brasil o fornecimento de energia elétrica ainda é precário, principalmente quando se trata de áreas afastadas de grandes centros consumidores. Estima-se que três milhões de propriedades rurais com cinco milhões de famílias não possuem acesso à energia elétrica (ALVES, 2007).

A utilização de energia elétrica no meio rural representa um dos processos mais importantes a serem incentivados no Brasil, pois é fato que a eletrificação rural é fundamental para levar adiante programas de desenvolvimento de uma região. Dessa forma, ela deve ser vista não só como um fator capaz de aumentar a produtividade no campo, permitindo a melhoria das condições de trabalho, mas também elevando as condições de vida do homem no meio rural.

Uma maneira que vem sendo estudada para minimizar o problema de falta de fornecimento de energia elétrica e a criação de sistemas de produção de energia através de micro centrais hidrelétricas (MCH's) são as alternativas para comunidades rurais desprovidas ou com baixa oferta de energia elétrica. Por serem os empreendedores de (MCH's) produtores independentes, cujo negócio principal não está voltado à geração de energia, por conseguinte, não dispõe de quadro de pessoal especializado capaz de criar um projeto nesta área. Com isso, há a necessidade de um trabalho que envolva a implantação de (MCH's) nessas comunidades, enfocando a potencialidade do local, viabilidade técnica do projeto de engenharia, estudos ambientais e viabilidade econômica (BARBIERI,2005).

Este trabalho segue com o objetivo de projetar a casa de máquinas para a reativação da usina de Rio Branco do Sul. Como já existe toda a estrutura da MCH, o meio ambiente não sofrerá grandes impactos ambientais, pois não haverá necessidade de construção de barragens e de toda uma estrutura de MCH.

Com as justificativas apresentadas acredita - se que este projeto tenha uma grande viabilidade econômica, além de trazer benéficos energéticos para a região este projeto acarretará novos conhecimentos na área acadêmica e profissional para os alunos envolvidos e também para as pessoas que irão estudar este trabalho.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.

O trabalho será realizado primeiramente com uma visita até a MCH de Rio Branco do Sul para analisar a situação da usina, com as informações obtidas na visita e junto com os objetivos proposto que servirão de roteiro para o desenvolvimento do projeto.

O tema abordado será projetar a casa de máquinas da MCH, com estudos e análises para obter o melhor potencial energético. Com estes fatores será possível projetar a posição da casa de máquinas e com isso se obter uma melhor viabilidade técnica.

A pesquisa do projeto será feita através de fontes bibliográficas, tais como: livros, monografias, teses, legislação, normas regulamentadoras e internet. Também serão utilizadas fórmulas matemáticas e simulações para comprovação de que os resultados obtidos serão verdadeiros e compatíveis com a realidade da usina.

Após todo o período de estudos bibliográficos e simulações matemáticas, serão documentados os resultados finais do projeto da casa de máquinas. Mostrando a eficiência e a viabilidade do projeto da casa de máquinas da usina de Rio Branco do Sul.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRIA DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A primeira utilização da energia gerada mecanicamente no Brasil foi em 1879. No mesmo momento que Thomas Edson divulgava a invenção da lâmpada em Nova York, D. Pedro II inaugurava no Rio de Janeiro a iluminação elétrica, com seis lâmpadas, na estação D. Pedro II, que na época era denominada estação da Corte. (MULLER, 1995).

Em 24 de junho de 1883, o imperador inaugurou a usina termelétrica de Campos, no Rio de Janeiro, com potência de 52 kW. Foi a primeira cidade da América Latina e do Brasil a contar com iluminação elétrica pública. A primeira usina hidrelétrica, situada na bacia do Jequitinhonha, no município de Diamantina, então na província de Minas Gerais, recebeu o nome de Ribeirão do Inferno; foi pioneira e uma das maiores do mundo naquela época, com desnível de 5 metros (MULLER, 1995, p. 6).

A usina de Marmelos, construída em Juiz de Fora – MG, é a primeira usina hidrelétrica do serviço público do Brasil, ela foi inaugurada em 7 de setembro de 1889, mas durou somente até 1896. A partir de 1899, algumas empresas estrangeiras começaram a ingressar e operar no Brasil, como a The São Paulo Railway e a Light and Power Company Limited. Desde 1931 a União requereu o poder de conceder direitos ao uso de quedas de águas que, em 1934, culminou com a assinatura do Código de Águas, atuante até os dias atuais.

Segundo Nascimento, Amaral e Pontes (1997, p. 25), o Código de Águas era “centralizador, socialista e com grandes restrições àquela liberdade que a iniciativa privada tinha no regime anterior”. Em 1943, houve a criação de diversas companhias estaduais e federais e em 1960 foi criado o Ministério de Minas e Energia (ESCELSA, 2011). Em abril de 1961 foi criada a ELETROBRÁS, denominada Centrais Elétricas Brasileiras S. A., para responder à crise da década de 50 em consequência da falta de continuidade de investimentos por parte das empresas estrangeiras. As empresas Light foram compradas pela ELETROBRÁS em 1979

. Outras empresas foram criadas, como as Centrais Elétricas do Sul do Brasil (ELETROSUL), em 1968; as Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE), em 1972 (ALVES, 2007). Na década de 70, ocorreram mudanças

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

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

Segundo Muller (1995), na década de 90, a Eletrobrás limitou a atuação das empresas regionais, ou seja, ELETRONORTE, ELETROSUL, CHESF e Furnas junto com a Light e a ESCELSA tornaram-se responsáveis pela distribuição. As outras empresas estaduais e locais, caso os governos detenham a maior parte do capital social, tornaram-se coligadas à Eletrobrás. Em 1996, surge a Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica), criada com os objetivos de: regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização da energia elétrica; atender a reclamações de agentes e consumidores; mediar os conflitos de interesses entre os agentes do setor elétrico e entre estes e os consumidores; conceder, permitir e autorizar instalações e serviços de energia; garantir tarifas justas e zelar pela qualidade do serviço; exigir investimentos; estimular a competição entre os geradores e assegurar a universalização dos serviços (ALVES, 2007).

Na década de 90, o Plano Decenal de Expansão (1995-2004), coordenado pela ELETROBRÁS, considerava a urgente necessidade de investimentos em energia elétrica da ordem de US\$ 6 bilhões por ano até 2004, mas o Governo não realizou os investimentos esperados (ALVES, 2007). Goldemberg (2005, p. 218) refere que “a geração de eletricidade no Brasil cresceu a uma taxa média anual de 4,2% entre 1980 e 2002, e sempre a energia hidráulica foi dominante”. Em 2001, a população recebeu do Governo Federal o comunicado de que “os reservatórios

destinados ao abastecimento de energia elétrica no país estavam com seus volumes de água reduzidos a níveis extremamente baixos”.

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

2.2 LEGISLAÇÃO

Foi criada e instituída pela Lei 9.427/96 e o Decreto 2.335/97 a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica assim como também foi criado nesse mesmo ano através do Decreto 2003/96 a figura dos Produtores Independentes e Autoprodutores.

Segundo análise do panorama regulatório nacional elaborado por Ferrari (2006, p.33), dependem de concessão para uso de bem público: a) aproveitamento de potencial hidráulico de potência superior a 1000 kW, por produtor independente; b) aproveitamento de potencial hidráulico de potência superior a 10000 kW, por autoprodutor. As concessões relativas aos aproveitamentos hidráulicos terão prazo de 35 anos. Já as autorizações prazo de 30 anos. A autorização será concedida por ato autorizativo do poder concedente.

A Lei 10.848 de 15 de março de 2004 estabelece a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica que permite a comercialização de energia elétrica entre concessionários, permissionários e autorizados de serviços e instalações de energia elétrica, bem como destes com seus consumidores, no Sistema Interligado Nacional. Isso se dará mediante contratação regulada ou livre, e passa a ser regulada nos termos desta Lei e do seu regulamento.

Segundo Decreto 5.163 de 30 de julho de 2004 – Regulamentação da Comercialização de Energia Elétrica expõe o conceito: Ambiente de Contratação livre – é o segmento de mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica, objeto de contratos bilaterais livremente negociados, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos.

2.3 CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

A geração da eletricidade através de centrais hidrelétricas se dá da através do aproveitamento de um desnível existente em um curso d'água, ou criando ou aumentando este desnível através da construção de barragens. A água é captada no ponto mais alto e flui por tubulações que as fazem passar por “turbinas hidráulicas”, que convertem a energia hidráulica em energia mecânica (Souza, 1999).

A energia mecânica assim obtida, que pode ser traduzida como o torque de um eixo, é então convertida pelos geradores em energia elétrica, que por sua vez é transportada por cabos elétricos até os locais onde será utilizada para atender as demandas das indústrias, do comércio, das residências, da iluminação pública, das áreas rurais e de várias outras aplicações (VIANNA, 2000).

2.3.1 Centrais Quanto à Capacidade de Regularização

Os tipos de PCH, quanto à capacidade de regularização do reservatório, são:

- A Fio d'Água;
- De Acumulação, com Regularização Diária do Reservatório;
- De Acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório.

2.3.1.1 PCH a fio d'água

Esse tipo de PCH é empregado quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista (STANO JÚNIOR, 2008).

Nesse caso, despreza-se o volume do reservatório criado pela barragem. O sistema de adução deverá ser projetado para conduzir a descarga necessária para fornecer a potência que atenda à demanda máxima. O aproveitamento energético local será parcial e o vertedouro funcionará na quase totalidade do tempo, extravasando o excesso de água (SOUZA, 1999).

Esse tipo de PCH apresenta, dentre outras, as seguintes simplificações dispensa estudos de regularização de vazões; dispensa estudos de sazonalidade da

carga elétrica do consumidor; e facilita os estudos e a concepção da tomada d'água (ZULCY, 1983).

No projeto não havendo flutuações significativas do NA do reservatório, não é necessário que a tomada d'água seja projetada para atender a depleções do NA; do mesmo modo, quando a adução primária é projetada através de canal aberto, a profundidade do mesmo deverá ser a menor possível, pois não haverá a necessidade de atender às depleções; pelo mesmo motivo, no caso de haver necessidade de instalação de chaminé de equilíbrio, a sua altura será mínima, pois o valor da depleção do reservatório, o qual entra no cálculo dessa altura, é desprezível; as barragens serão, normalmente, baixas, pois têm a função apenas de desviar a água para o circuito de adução; como as áreas inundadas são pequenas, os valores despendidos com indenizações serão reduzidos (STANO JÚNIOR, 2008).

2.3.1.2 PCH de acumulação, com regularização diária do reservatório

Empregado em casos onde as vazões de estiagem do rio são inferiores à vazão necessária para o fornecimento de potência para suprir a demanda máxima do mercado consumidor. Nessa situação um aditivo será fornecido pelo reservatório para que atenda a demanda desejada (ZULCY, 1983).

2.3.1.3 PCH de acumulação, com regularização mensal do reservatório

Quando o projeto de uma PCH considera dados de vazões médias mensais no seu dimensionamento energético, analisando as vazões de estiagem médias mensais, pressupõe-se uma regularização mensal das vazões médias diárias, promovida pelo reservatório (ZULCY, 1983).

2.4 ESTRUTURAS DA MCH

A importância das estruturas hidráulicas para os pequenos aproveitamentos hidroelétricos reside no fato de que elas são à base da estrutura da central, desempenhando papel fundamental no seu arranjo. Elas estão presentes em todas as partes da central, tais como na captação, que é o conjunto de obras que coleta a água a ser aduzida até a casa de máquinas, composta pela barragem e

pelo reservatório, na adução, que é a responsável pela condução da água desde o ponto de captação até a casa de máquinas, composta pela tomada d'água, por canais e/ou tubos e, por fim, na casa de máquinas, que é o local onde se encontram instalados os equipamentos responsáveis por transformar a energia hidráulica em energia elétrica, terminando no canal de fuga (AZEVEDO NETTO, 1995).

2.4.1 Barragem

As barragens são “obras transversais aos álveos dos rios, bloqueando a passagem da água”. (SOUZA, FUCHS; SANTOS, 1983, p. 16). Têm como funções o represamento das águas para que seja possibilitada sua captação para desvio; a elevação do nível das águas, para que ocorra o desnível coerente com um aproveitamento hidrelétrico; e o represamento do rio para que se formem.

Segundo Skrotzki (1996), as barragens funcionam de duas maneiras: uma criando queda e outra direcionando a água para o armazenamento, ou ambas, podem ser desempenhadas por uma barragem. É claro, para criar uma queda, a água deve ser direcionada, mas em quantidades pequenas não são suficientes para armazenagem.

O projetista usa a estabilidade e margem de segurança como critérios principais na construção de barragens. Estas devem ser projetadas para resistir a falhas por tensão, deslizamento e rupturas. Isto pode ser feito com o próprio peso como nas barragens de gravidade e por ancoragem como nas barragens em arco. A margem de estabilidade depende dos materiais da estrutura impermeável; projeto adequado e sondagem geológica da formação do terreno em torno da barragem em todas as direções, reservatórios regularizadores de vazões, possibilitando diversos tipos de aproveitamento (ALVES, 2007).

A classificação de material mais comumente utilizada para a discussão de procedimentos de projeto é baseada nos materiais usados para construir a estrutura. Esta classificação também reconhece geralmente o tipo básico de projeto, por exemplo, a barragem de gravidade de concreto ou a barragem de arco de concreto. Consideram-se aqui os tipos mais comuns de barragens construídas hoje: de terra, de enrocamento e de concreto (SCHREIBER, 1978).

2.4.1.1 Barragem de concreto de gravidade

As barragens de concreto adotam cinco tipos de soluções básicas barragens de concreto a gravidade, a gravidade aliviada, arco-gravidade, em arco e em contrafortes. Nas barragens de concreto a gravidade, grosseiramente, as ações geradas pelo reservatório têm como fator estabilizante o peso próprio da estrutura, utilizando como critério de resistência as envoltórias de Mohr-Coulomb em modelos cujo comportamento predominante pode ser caracterizado grosseiramente pela seção transversal em balanço (MARQUES FILHO, 2012).

As barragens são estruturas assimétricas e tridimensionais, construídas a partir de materiais complexos com propriedades físicas não uniformes e anisotrópicas. Isto reflete na interação da barragem com a sua base e na resposta aos esforços estruturais (NOVAK, 2004).

As barragens à gravidade têm sua estabilidade garantida principalmente pelos esforços de gravidade, ou seja, seu peso próprio (TUCCI, 1997).

Sendo assim o perfil de uma barragem à gravidade conforme a figura 2 e 3, é essencialmente triangular, para assegurar a estabilidade e a fim de evitar a sobrecarga da barragem ou a sua fundação. Algumas barragens de gravidade são suavemente curvas no plano por razões estéticas ou por necessidades hidráulicas ou econômicas, e sem colocar qualquer desconfiança em sua estabilidade (NOVAK, 2004).

Com isso, sabendo de sua complexidade e multidisciplinaridade, o perfil transversal deverá satisfazer a duas principais condições: as tensões atuantes devem estar dentro de limites pré-estabelecidos e proporcionar estabilidade para o corpo da barragem, suportando o deslizamento na fundação, paralelamente à essas observações deve - se buscar uma seção ótima para garantir a estabilidade e um menor gasto de concreto possível (GUTSTEIN, 2011).

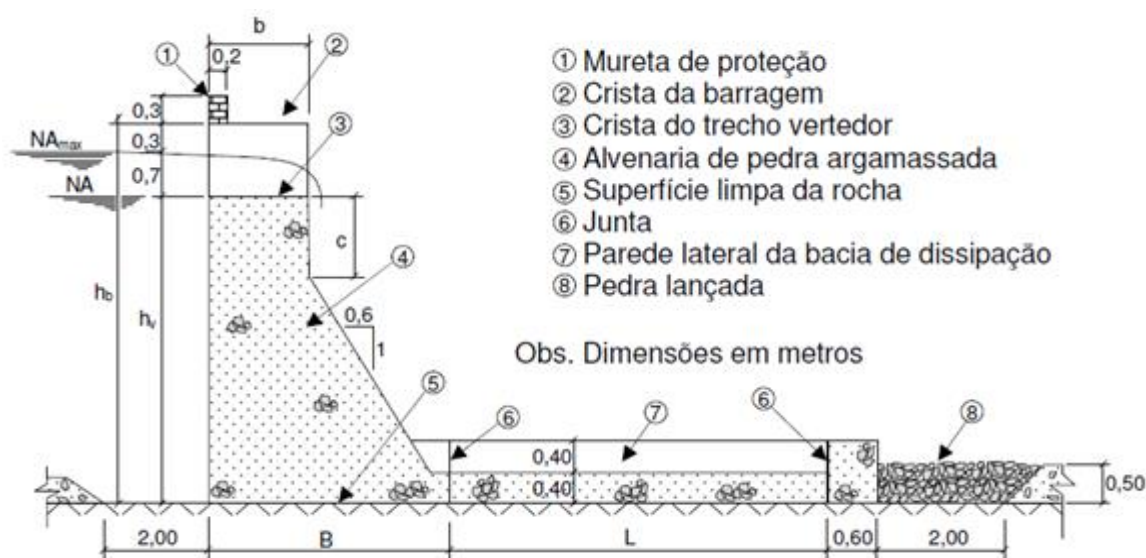


Figura 2 – Barragem a gravidade, com bacia de dissipação no trecho do vertedouro
 Fonte: Manual MCH DNAEE/Eletróbrás (1985).

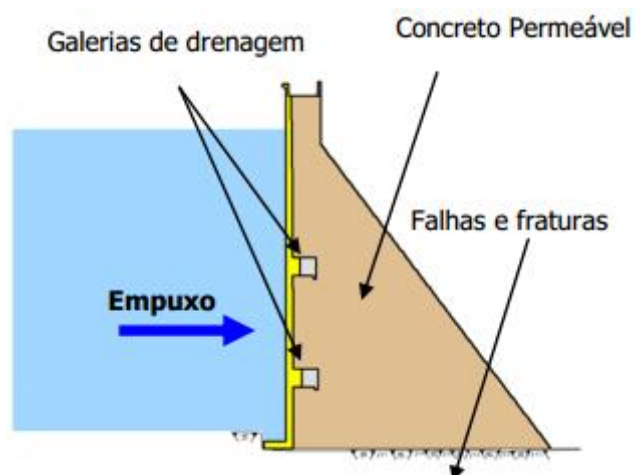


Figura 3 – Seção transversal de uma barragem de concreto a gravidade
 Fonte: Marques Filho (2012).

Algumas características das obras civis de barragens são bem importantes de serem apresentadas. Há interação permanente entre projeto e métodos construtivos, devendo ser utilizado com muito cuidado os equipamentos e materiais, assim como o clima também interfere bastante na construção e planejamento (STANO JÚNIOR, 2008).

A estrutura de uma barragem é maciça, sendo assim o peso próprio e a termogênese do concreto são bastante importantes no projeto. Pelos grandes volumes existentes, há uma dificuldade de execução, bem como devem ser tomados cuidados com as reações deletérias (ZULCY, 1983).

O controle de qualidade precisa ser muito rigoroso, pois, além de prazos apertados correlacionados com custo altíssimos, deve-se focar na segurança do processo. Tal controle também é fundamental, pois em barragens de concreto os modelos são complexos, as normas para edificações com difícil aplicação, as análises de segurança são bastante sofisticadas assim como a geologia do local interfere com as formas (MARQUES FILHO, 2012).

Assim, uma extensa campanha de sondagens e investigações geotécnicas é fundamental na fase de projeto. Devem ser executados furos, trincheiras, galerias e investigações geofísicas, de modo a caracterizar o mais amplamente possível o subsolo e as ombreiras. As estruturas devem ser sempre assentadas em rochas com adequadas características mecânicas para suportar a carga vertical e conferir estabilidade contra esforços de cisalhamento e deslizamento (TUCCI, 1997).

2.4.2 Vertedouros

Hwang (1984, p. 211) define que “qualquer obstrução em um leito onde se processa o escoamento de água pode ser chamada de vertedouro ou vertedor”. Os vertedouros são construídos geralmente em cursos de água de escoamento com superfície livre, e o escoamento sobre o vertedouro é regido pelas forças de gravidade.

De forma geral, dependendo do porte da obra, nos projetos de centrais hidroelétricas podem ser definidos três tipos básicos de solução para o extravasamento do excesso de água afluente ao local do aproveitamento: por um canal lateral, em cota elevada em relação ao leito natural do rio, com soleira vertedoura a jusante; por sobre o próprio corpo da barragem, ao longo de toda a extensão da crista ou parte dela; através da combinação dos tipos acima citados. A melhor solução dependerá das condições topográficas e geológico-geotécnicas de cada local, as quais condicionam a definição do arranjo geral das obras e da vazão de projeto do vertedouro (STANO JÚNIOR, 2008).

Segundo Roberson (1985), um vertedouro é quase sempre exigido para passar o fluxo por uma represa. No caso de reservatório ou nas barragens hidrelétricas, onde os grandes fluxos passam através das turbinas hidráulicas, os vertedouros podem ser usados raramente para liberação de enchentes. Para

barragens de desvio, onde o desvio representa uma pequena parcela do fluxo total, o vertedouro pode operar continuamente.

A operação segura dos vertedouros é o objetivo principal no projeto. A falha do vertedouro ao executar sua função do projeto pode conduzir à falha da barragem com danos a propriedade e possíveis perdas de vida (BALARIM, 1999).

A determinação dos fluxos da inundação do projeto é crítica, particularmente para as barragens tipo de terra e de enroscamento, que não podem suportar transbordamento. Porque as barragens elevam o nível de água em um córrego, os vertedouros geralmente devem ser projetados para o fluxo de alta velocidade, desde que esta energia potencial adicional seja transformada em energia cinética (BALARIM, 1999).

Não somente o vertedouro deve ser projetado para suportar estas velocidades, mas também a estrutura terminal, ou o dissipador, que deve liberar o fluxo em uma velocidade pequena suficiente e produzir condições de modo que a barragem não seja colocada em perigo pela erosão da correnteza excessiva (ALVES, 2007).

2.4.2.1 Vertedouro de canal

Os vertedouros de canal são utilizados quando as condições topográficas do sítio impedem que se faça outro tipo de arranjo para esta estrutura de escoamento. Normalmente, são encaixados entre uma encosta e a lateral da barragem, podendo, ainda, se projetar para dentro do reservatório, formando um canal de descarga com saída pela frente da barragem (TUCCI, 1997).

Este tipo de vertedouro somente é recomendado em situações muito específicas, pois o custo das obras de descarga é de tal ordem que onera significativamente o preço final da usina (BALARIM, 1999).

2.4.2.2 Vertedouro de borda livre

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

superfície de escoamento. Procura-se dar à curva de sua superfície um formato de ogiva (BALARIM, 1999).

O vertedouro funciona automaticamente, descarregando toda água que não for engolida pelas máquinas. A desvantagem deste tipo de vertedouro é que não se consegue regular o nível do reservatório, o que limita a lâmina máxima sobre a soleira. Para o projeto de usinas hidrelétricas de pequeno porte, ELETROBRÁS & DNAEE (1985) recomendam o valor máximo de 1 metro para a lâmina de água sobre a soleira do vertedouro.

2.4.2.3 Vertedouro com comportas

Os vertedouros com comportas são os que apresentam as melhores características técnicas no que diz respeito ao extravasamento das vazões de cheia (BALARIM, 1999). Entretanto, estes vertedouros têm elevado custo de instalação, operação e manutenção, o que muitas vezes faz com que se opte por uma das alternativas anteriores.

Os dispositivos de dissipação de energia devem ser utilizados para a proteção do pé dos vertedouros contra a ação destruidora do fluxo da água que, vindo em alta velocidade, se choca contra o fundo do mesmo. Normalmente, no final dos vertedouros existe a formação de um salto hidráulico, responsável pela criação de uma bacia de dissipação - elemento de proteção ao pé do vertedouro (ZULCY, 1983).

A quantidade de energia dissipada nos vertedouros por ocasião das cheias é, com frequência, superior à energia gerada na usina durante o mesmo período de tempo. Isto acontece devido ao fato de a vazão de cheia ser, não raro, superior à vazão de projeto da pequena central hidrelétrica (PCH) (BALARIM, 1999).

2.4.3 Canal de Adução

O canal de adução ilustrado na figura 4, é o elemento responsável por conduzir a água desde a tomada d'água até a câmara de carga, que deve ser localizada o mais próximo possível da casa de máquinas (ZULCY, 1983).

A escolha do canal de adução dependerá das condições topográficas e geológico-geotécnicas do local de implantação. Ele pode ser de terra, revestido de

solo-cimento ou de concreto, e deverá ser construído acompanhado a curva de nível do terreno, evitando as curvas fechadas, com raios curtos (STANO JÚNIOR, 2008).

Os canais sem revestimentos, em solos argilosos impermeáveis, devem ter sua superfície escavada compactada. A compactação deverá ser realizada com um mínimo de 6 passadas de rolo compactador (BALARIM, 1999).



Figura 4 – Canal de adução
Fonte: STANO JÚNIOR, (2008).

Os canais revestidos deverão ser construídos com base na experiência adquirida em obras dessa natureza, embora todo canal deva ser construído com uma declividade mínima e constante de 0,4 m a cada 1.000 m (declividade = 0,0004) (STANO JÚNIOR, 2008).

Determinadas as dimensões do canal, deve-se verificar se a velocidade de escoamento da água está compatível com a máxima admitida. Esta velocidade é dada em função do material onde o canal foi escavado, ou do tipo do revestimento, caso o canal seja revestido (STANO JÚNIOR, 2008).

2.4.4 Câmara de Carga

Segundo (MARQUES FILHO, 2012) a câmara de carga é a estrutura, posicionada entre o canal de adução e a tomada d'água propriamente dita, destinada a:

- Promover a transição entre o escoamento a superfície livre, no canal de adução, e o escoamento sob pressão no conduto forçado;
- Aliviar o golpe de aríete que se processa no conduto forçado quando ocorre o fechamento brusco do dispositivo de controle de vazões turbinadas; e
- Fornecer água ao conduto forçado quando ocorre uma abertura brusca desse mesmo dispositivo, até que se estabeleça, no canal de adução, o regime permanente de escoamento.

Dessa forma, seu volume deve ser adequadamente dimensionado.

Para alturas de queda até 10 m, a câmara de carga não precisa ter volume significativo.

Para alturas compreendidas entre 10 e 25 m, haverá a necessidade de prever-se, por exemplo, um alargamento na transição entre o canal de adução e a tomada d'água.

Deve-se prever, na câmara de carga, um sangradouro lateral visando-se evitar que as variações bruscas da descarga no conduto forçado produzam flutuações no nível d'água que se propaguem para montante, pelo canal de adução.

Para alturas de queda maiores que 25 m, a câmara de carga, como estimativa preliminar, deverá ter um volume de água suficiente para atender ao funcionamento pleno de uma turbina, com vazão de projeto, durante 60 segundos, aproximadamente. Esse período de tempo é o considerado necessário para que a inércia da massa d'água no interior do canal entre em regime de escoamento normal.

Destaca-se que o dimensionamento final da câmara de carga, para quedas elevadas, maiores que 25 m, deverá ser elaborado por engenheiros hidráulicos e mecânicos, em conjunto, levando em consideração, evidentemente, as características da turbina definidas pelo fabricante.

No projeto da câmara de carga, devem ser observados os seguintes aspectos:

- Visando-se manter o escoamento tranquilo, deve-se evitar, sempre que possível, mudanças bruscas de direção na transição canal de adução/câmara de carga e câmara de carga/tomada d'água;

- As “zonas mortas” e zonas de turbulência devem ser evitadas e/ou minimizadas.

2.4.5 Conduto Forçado

Os condutos forçados são tubulações de grandes diâmetros, geralmente de aço ou concreto, utilizados para conduzir a água de um reservatório ou de um sistema adutor para a casa de força. Eles são geralmente projetados para resistir altas tensões devido a pressão estática da coluna d’água e devido ao golpe de aríete criada por mudanças bruscas no fluxo d’água (fechamentos e aberturas bruscas de válvulas e/ou distribuidor da turbina) (NOVAK, 2004, p.496-499).

O critério de projeto para as tensões atuantes na tubulação é dado pela fórmula 1.

$$\sigma = \frac{P.D}{2.e.\eta} \quad (1)$$

Onde:

σ = Tensão atuante na tubulação;

D = Diâmetro da tubulação;

e = Espessura da tubulação;

η = Eficiência da junção (0,9 a 1,0 para juntas soldadas).

A energia do fluxo é inevitavelmente reduzida devido as perdas por atrito na tubulação forçada. Entretanto as perdas podem ser reduzidas com o aumento do diâmetro da tubulação e um melhor perfil hidrodinâmico do circuito de geração. Um diâmetro econômico pode ser estimado comparando os custos anuais da instalação com a perda de receita devido às perdas de carga, a figura do ponto ideal do diâmetro econômico é onde as duas funções de cruzam conforme no Gráfico 2. (BALARIM, 1999).

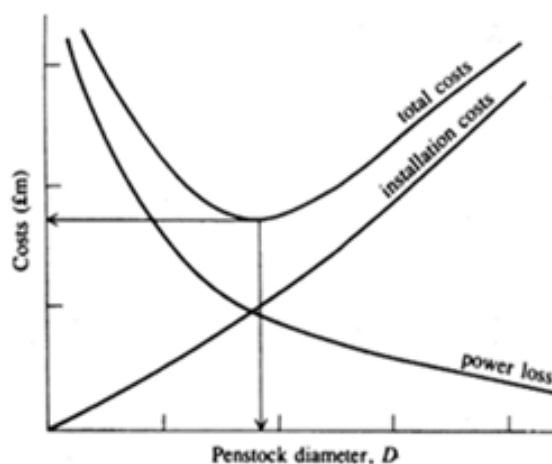


Gráfico 2 – Diâmetro econômico do conduto forçado

Fonte: Hydraulic Structures (Novák, Pavel).

2.4.6 Tomada d'Água

A função da Tomada d'água é conduzir a água de uma fonte como um rio ou reservatório para dentro do conduto forçado que é a tubulação que a conduz sob pressão à turbina. São projetados para proporcionar uma eficiência hidráulica máxima (TUCCI, 1997).

A função da grade de proteção é evitar a entrada de detritos, folhas e lixo para evitar danos nas turbinas. Normalmente contém uma tela composta por várias barras de aço paralelas, preferencialmente na vertical, localizada na entrada da tomada d'água (SOUZA, 1999).

A limpa grade tem a função de remover os detritos que se acumulam na grade de proteção. Os detritos acumulados provocam perda de carga. Os dispositivos variam em tamanho para acomodar a variedade de tamanho dos detritos e variam também no nível de automação do mecanismo, manual, semiautomáticos e automáticos (SOUZA, 1999).

Estruturas da tomada d'água estão demonstradas nas figuras 6 e 7. São normalmente construídas na própria estrutura da barragem imediatamente adjacentes ao conduto forçado. Outro projeto comum é na forma de torres de entrada, que são estruturas separadas no reservatório, normalmente construídas em concreto reforçado. (ALVES, 2007, p 60)

Normalmente as estruturas comportam: grades de proteção que previnem a entrada de detritos e gelo; comportas e válvulas para controlar o fluxo de água para permitir operações de manutenção (ALVES, 2007).

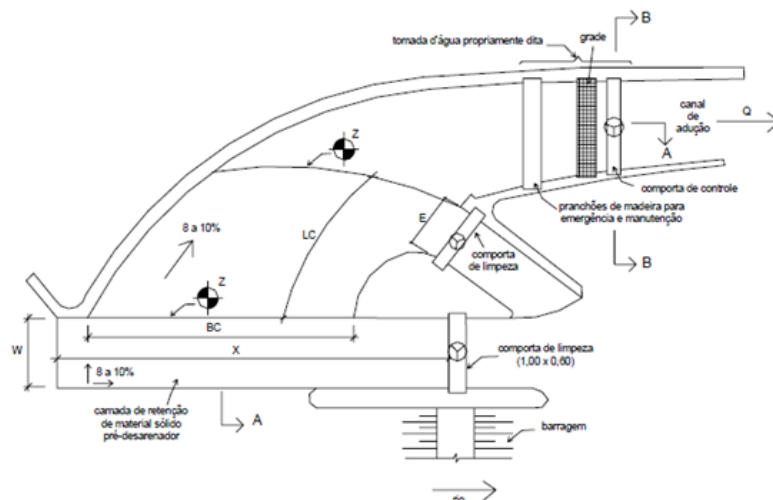


Figura 5 – Estrutura de tomada d'água
Fonte: ELETROBRÁS (1985).

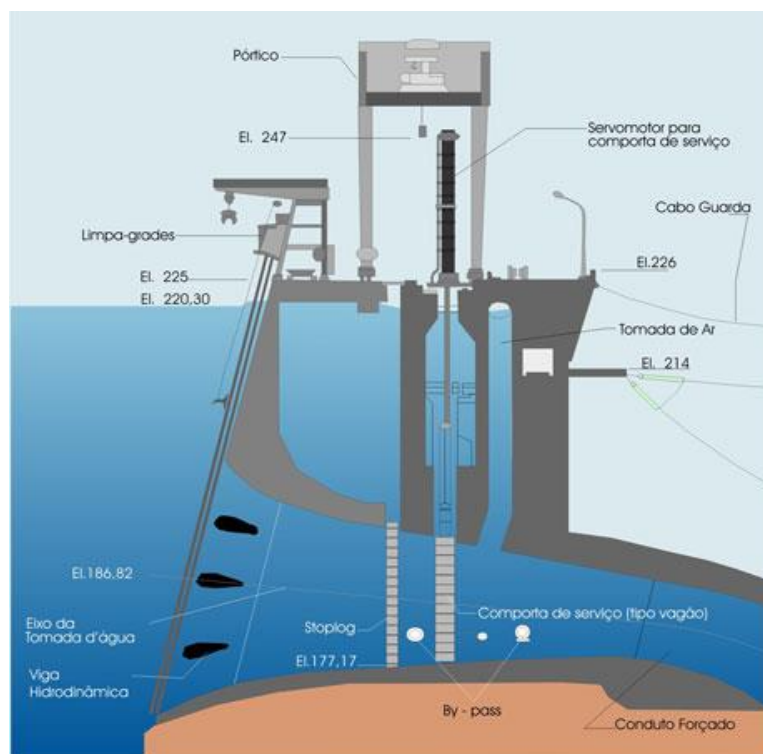


Figura 6 – Tomada de água
Fonte: ITAIPU (2012).

2.4.7 Casa de Máquinas

A casa de máquinas tem a finalidade de alojar as máquinas e os equipamentos, possibilitar sua montagem ou eventual desmontagem e a sua operação e manutenção (BALARIM 1999).

Todo o projeto deve visar, por isso, a futura operação com o fim de facilitá-la e simplificá-la. Durante qualquer conserto, a máquina fica parada e deixa de produzir energia que poderia ser vendida. Isso significa perda de renda. Por esse motivo deve ser previsto, já no projeto, tudo o que possa acelerar o conserto. Nessas condições, a forma da casa de força está completamente definida, cada aumento de volume, que não seja absolutamente indispensável, representa acréscimo desnecessário do custo (SCHREIBER, 1978, p 177).

É importante realizar análise a respeito da posição da casa de máquinas em relação à câmara de carga ao canal de fuga e à distância do consumidor, especialmente por abranger altos custos. A casa de máquinas é um local devido às condições do terreno levando em consideração a otimização da queda útil da usina (ALVES, 2007 p 65).

Segundo SCHREIBER (1978), as casas de máquinas para μ CH e mCH podem assumir diferentes concepções, tais como:

- a **céu aberto** com pórticos móveis, para movimentação das cargas;
- do **tipo fechado** com superestrutura que suporte o teto e as vigas para os trilhos das pontes rolantes;
- do tipo **semi-aberto**, sem superestrutura, com guindaste-pórtico em lugar das pontes rolantes.

A maioria dessas estruturas é construída em concreto armado, com o emprego de alvenaria de tijolos ou blocos de rocha com argamassa de cimento em suas bases. No caso de μ CHs as casas de máquinas têm sido construídas com os mais diversos materiais, sendo comum o uso de alvenaria, de estrutura de concreto e a construção em madeira (SOUZA, 1999, p 404).

2.4.7.1 Arranjos de casa de máquinas

Os arranjos das casas de máquinas decorrem do número, do tipo e da disposição dos grupos geradores que serão utilizados. Normalmente, para centrais

de pequenas potências, os grupos geradores são de eixo horizontal. Entretanto, nada impede o uso de máquinas com eixo vertical, além de outras variações, tais como os axiais do tipo bulbo, onde o gerador, muitas vezes, fica no sentido longitudinal à turbina (STANO JÚNIOR, 2008, p 9.13).

Em centrais cujas potências são muito pequenas, inferiores a 15 kW, o ideal é se construir apenas o canal de fuga e sobre ele instalar o grupo gerador. Para tanto, costuma-se especificar o grupo gerador montado em uma única estrutura monobloco, composta pela válvula de entrada da turbina, pela turbina, pelo gerador, pelo regulador e pelo multiplicador de velocidade, se houver (STANO JÚNIOR, 2008, p 9.14).

Para proteção contra intempéries instala-se uma cobertura que pode ser feita em madeira cercada de uma tela com malha metálica, ou uma caixa de fibra de vidro removível, conforme mostrado na Figura 7 a seguir. Pode também ser construída uma casa de alvenaria, desde que haja passagem para os equipamentos. Outras opções para este caso estão mostradas na Figura 8.

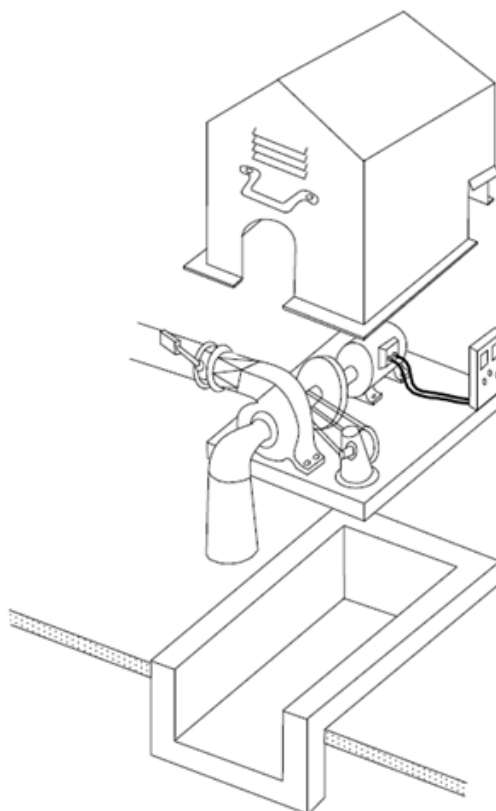


Figura 7 - Arranjo de grupo gerador de pequena potência com turbina do tipo turbilhão
Fonte: STANO JÚNIOR, (2008).

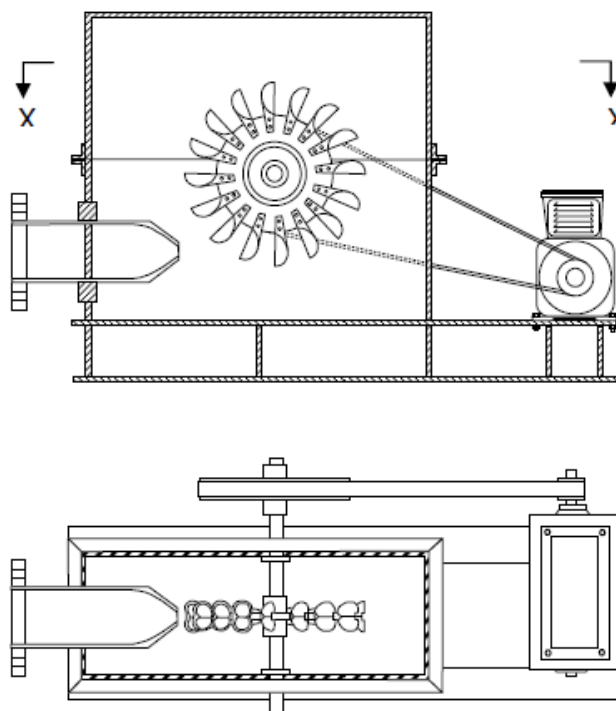


Figura 8 - Arranjo de grupo gerador de pequena potência com roda Pelton
 Fonte: STANO JÚNIOR, (2008).

2.4.7.2 Arranjos de casa de máquinas para μ CH e mCH

Nos arranjos das casas de máquinas é fundamental se conhecer, entre outros, o tipo, a quantidade, as dimensões e a posição do eixo dos grupos geradores a serem utilizados, além de informações sobre o tipo do regulador de velocidade e dos multiplicadores de velocidade, caso houver (ZULCY, 1983).

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. Em centrais de pequenas quedas, muitas vezes, é recomendável o uso de turbinas hidráulicas com eixos verticais. Nesse caso as dimensões da casa de máquinas tornam-se muito mais compactas. A posição da edificação da casa de máquinas deve estar adequada com o traçado da tubulação forçada.

- Se na casa de máquinas houver apenas um grupo gerador o recomendável é instalar a tubulação de modo que sua entrada na casa de máquinas se faça diretamente em direção à entrada da turbina, conforme mostra a Figura 9 (A).

- Se houver dois ou mais grupos geradores e apenas uma tubulação forçada atendendo às máquinas, o recomendável é esse tubo passar lateralmente à casa de máquinas e utilizar derivações para cada turbina, conforme mostra a Figura 9 (B).

- Se houver dois ou mais grupos geradores e a distância entre a tomada d'água do tubo e a casa de máquinas for pequena, as vezes é mais econômico colocar um tubo para cada turbina, seguindo, nesse caso, a primeira sugestão, conforme mostra a Figura 9 (C).

- Se as turbinas forem do tipo caixa espiral, normalmente os geradores são arrumados ortogonalmente à entrada da tubulação, conforme mostram as figuras a seguir.

- Se as turbinas forem axiais, do tipo tubular, o normal é que os geradores sejam instalados na direção longitudinal às turbinas.

- Se houver correias multiplicadoras ou caixas de engrenagens, deve-se prever espaço para o dispositivo, sendo que, nestes casos, o normal é que os geradores sejam de pequenas dimensões.

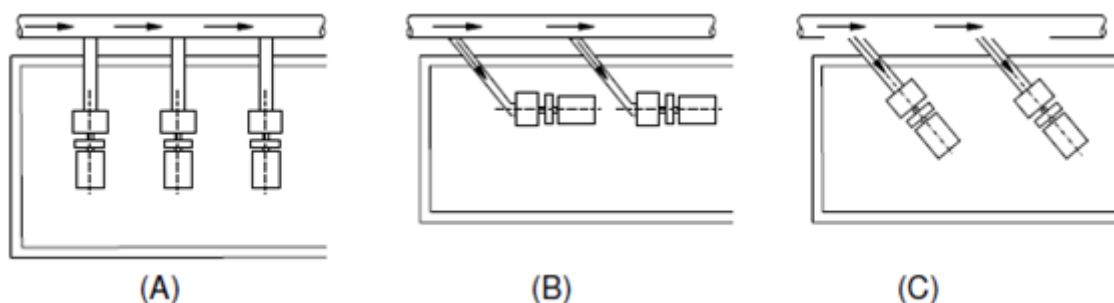


Figura 9 – Arranjos típicos de casas de máquinas para μ CH e mCH
 Fonte: ELETROBRÁS, 1985.

2.4.7.3 Estimativa das dimensões da casa de máquinas

Na casa de máquinas deve haver espaços para que seja possível ter acesso a todos os seus componentes, tais como os reguladores de velocidade e quadros de comando e de controle e para a passagem das bandejas dos cabos elétricos (ZULCY, 1983).

As dimensões da casa de máquinas dependem das dimensões dos grupos geradores, dos arranjos dos demais componentes e dos espaços necessários à movimentação de pessoas e cargas. As dimensões dos componentes

dos grupos geradores devem ser fornecidas pelos fornecedores dos equipamentos principais. Por sua vez, o arranjo físico da casa de máquinas está condicionado ao tipo, potência, quantidade e dimensões da turbina e do gerador (STANO JÚNIOR, 2008, p 9.16).

Devem-se prever ainda áreas destinadas aos equipamentos elétricos e mecânicos auxiliares definidos em cada projeto, e analisar a necessidade de área específica para montagem dos equipamentos (ALVES, 2007).

A elevação do piso da casa de máquinas é definida em função do nível d'água à jusante, no canal de fuga, e do nível de submergência da turbina. (altura de sucção). Evidentemente o piso do gerador e dos transformadores deve estar a salvo de inundações, ou seja, acima dos níveis da água por ocasião dos períodos das cheias (STANO JÚNIOR, 2008, p 9.16).

Uma vez definida a posição e a altura do tubo de sucção da turbina definem-se as cotas das fundações da casa de máquinas e dos grupos geradores, a disposição das galerias de drenagem e as cotas dos pisos dos transformadores e dos demais componentes da central (STANO JÚNIOR, 2008, p 9.17)

Em aproveitamentos de baixas quedas nem sempre é possível construir em um nível a salvo de inundações. Neste caso recomenda-se construir uma casa de máquinas estanque, com acesso pela parte superior. Normalmente, nesses casos, as turbinas são do tipo afogadas, ou seja, a linha de centro das mesmas encontra-se abaixo no nível normal da água de jusante (ZULCY, 1983).

A casa de máquinas deve ter um pé-direito adequado de forma a permitir a movimentação da ponte rolante, ou do pórtico, conforme for o caso, com a carga prevista. O dimensionamento da parede de jusante da casa de máquinas deverá, em alguns casos, considerar o apoio da estrutura de saída da linha de transmissão (BALARIM, 1999).

2.4.7.4 Turbinas

A turbina hidráulica é o equipamento responsável pela primeira conversão de energia que ocorre em uma central hidrelétrica, que é a conversão da energia hidráulica em energia mecânica (ZULCY, 1983). Os tipos de turbinas existentes são divididos em dois grandes grupos, que são as turbinas de ação e as de reação.

As turbinas de ação operam em pressões atmosféricas e transforma a energia cinética do fluido em rotação de eixo através da força aplicada as pás, algumas turbinas que frequentemente utilizam esse princípio são as turbinas Pelton e Michell-Banki (SCHREIBER, 1977).

As turbinas de reação operam com o rotor submerso, ou seja, com diferença de pressões e com energia cinética, podendo ter até pressões negativas no tubo de sucção. Para as turbinas Francis a forma do tubo de sucção é muito importante para que a recuperação da energia cinética remanescente suceda com o mínimo de perdas (SCHREIBER, 1977).

No caso de micro centrais procura-se utilizar máquinas mais simples e de menor custo o que faz com que sejam bastante utilizadas as turbinas de fluxo cruzado (Michel Banki), as bombas funcionando como turbinas (BFTs), e turbinas do tipo turbilhão, sem distribuidor (SCHREIBER, 1978, p 178).

Cada um dos diversos tipos de turbina existentes possui características que o tornam mais adequado a uma determinada condição de altura de queda, vazão e rotação. Desta forma a escolha da turbina mais adequada a um determinado aproveitamento hidráulico será função das características desse mesmo local (ZULCY, 1983).

Além disso, as turbinas hidráulicas utilizadas nas centrais hidrelétricas de pequeno porte devem ser selecionadas de modo a se obter facilidade de operação e manutenção, dando-se grande importância à sua robustez. Para selecionar o tipo de turbina, deve-se analisar a queda líquida e a vazão, levando em consideração todas as perdas envolvidas (SOUZA, 1999).

Através destes dois parâmetros e com base no gráfico indicativo do campo de aplicação de turbina, é possível identificar qual o tipo de turbina que melhor se adapta ao projeto. Definido o tipo de turbina, e com base em especificações dos fabricantes, é possível então efetuar a especificação (STANO JÚNIOR, 2008, p 8.14).

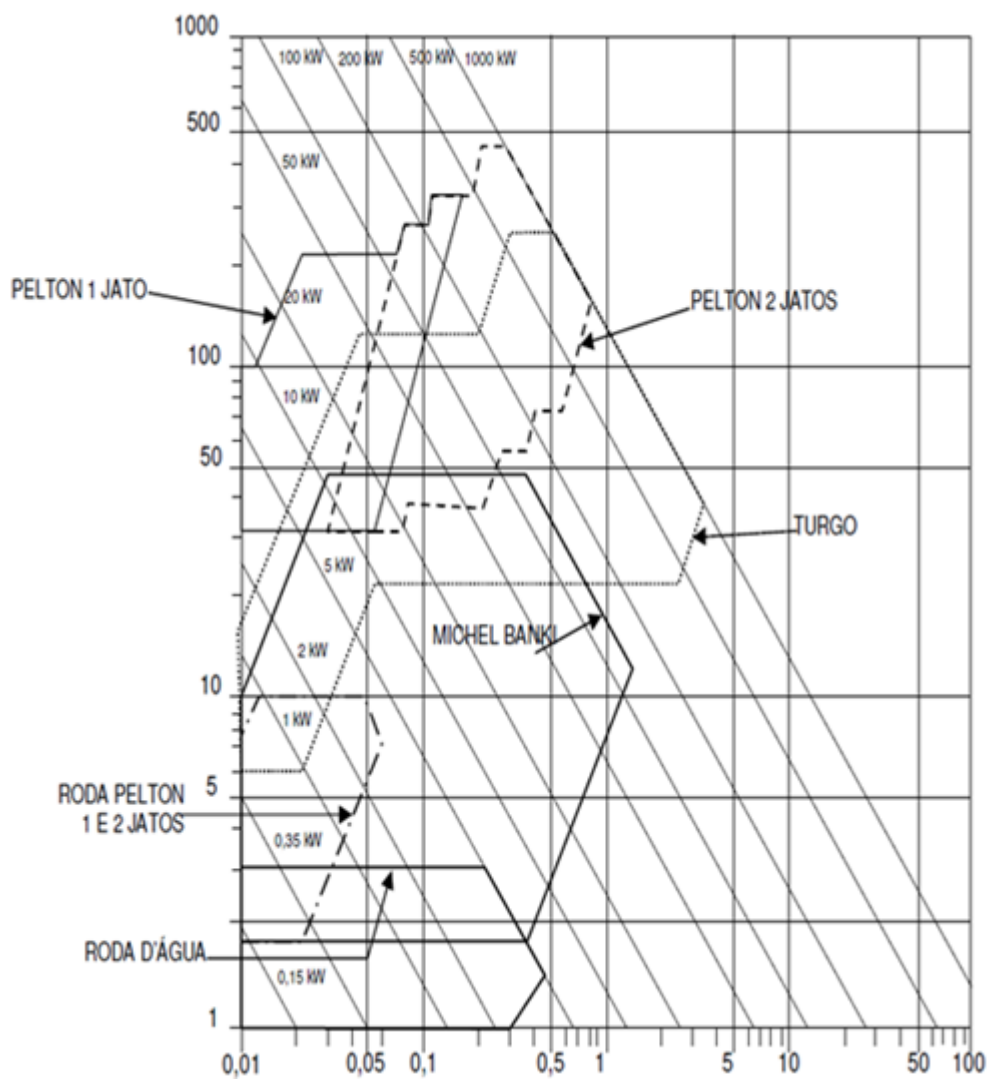


Gráfico 3 – Campo de aplicação das turbinas de ação para pico, micro e mini centrais hidrelétricas
 Fonte: STANO JÚNIOR, (2008).

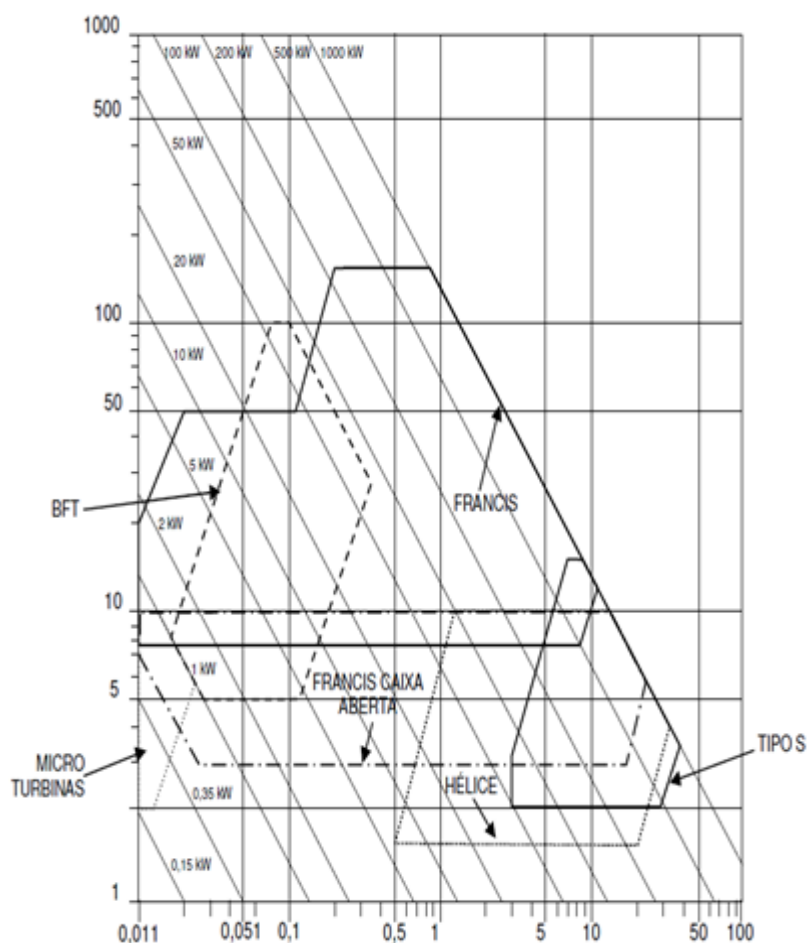


Gráfico 4 - Campo de aplicação das turbinas de reação para pico, micro e mini centrais hidrelétricas
 Fonte: STANO JÚNIOR, (2008).

Já para escolher a velocidade de rotação da turbina, outros fatores são considerados como potência nominal, altura da queda, tipo de turbina e gerador. Sendo que este último é o que mais influência na escolha da velocidade de rotação.

Os tipos geradores são assíncronos, síncrono com ou sem multiplicador de velocidade. A velocidade de rotação, para gerador assíncrono e síncrono sem multiplicador, é considerada a mesma para turbina e gerador sendo que se deve procurar uma velocidade síncrona mais próxima da calculada que é encontrada pela Equação 2 (BALARIM, 1999).

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

Onde:

n = velocidade de rotação síncrona em rpm;

f = frequência da rede em Hertz;

p = nº de pólos do gerador.

A Tabela 3 apresenta os valores de velocidade de rotação correspondente ao número de pólos, geralmente utilizados na frequência de 60 Hz.

Tabela 3 - Velocidade de rotação para turbinas hidráulicas

<i>Nº de Polos</i>	<i>Rotação (rpm)</i>
4	1.800
6	1.200
8	900
10	720
12	600
14	514,3
16	450
18	400
20	360
24	300
28	257,1
30	240
32	225
36	200

Fonte: ELETROBRÁS (1985).

Com esses dados é possível determinar a velocidade específica da turbina a partir da Equação 3, utilizando a potência nominal da turbina. Ou calcula-se a partir da Norma NBR 12591 a partir da vazão nominal da turbina pela Equação 4. (STANO JÚNIOR, 2008).

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

Onde:

n_s = velocidade específica da turbina;

n = velocidade de rotação da turbina (rpm);

P_n = potência nominal da turbina (kW);

H_{liq} = queda líquida (m).

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

Onde:

N_{qr} = velocidade específica da turbina;

n = velocidade de rotação da turbina (rpm);

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

H_r = altura de queda nominal (m).

A potência de saída do gerador e considerando um rendimento de 85% para o gerador e turbina, tem-se a Equação 5 (ELETROBRÁS, 2000):

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

Onde:

P_G = potência na saída do gerador (kW);

Q = vazão da turbina (m³/s);

H_{liq} = queda líquida (m);

η_T = rendimento da turbina;

η_G = rendimento do gerador.

2.4.7.4.1 Turbina Pelton

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

São classificadas como turbinas de ação por possuírem a característica de transformarem a energia potencial da queda em energia cinética no jato injetor, que é posteriormente transformada em energia mecânica no rotor. 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 (SCHREIBER, 1978, p 178).

O uso é adequado para locais onde hajam altas quedas e pequenas vazões. É o tipo de turbina que apresenta a melhor curva característica de rendimento em função da carga, podendo ser operada com bom rendimento na faixa de 10 a 100% de sua potência máxima. Nas figuras a seguir apresenta-se o esquema de uma turbina Pelton. (SCHREIBER, 1978, p 180).



Figura 10 - Rotor Pelton
Fonte: MELLO, (2011).

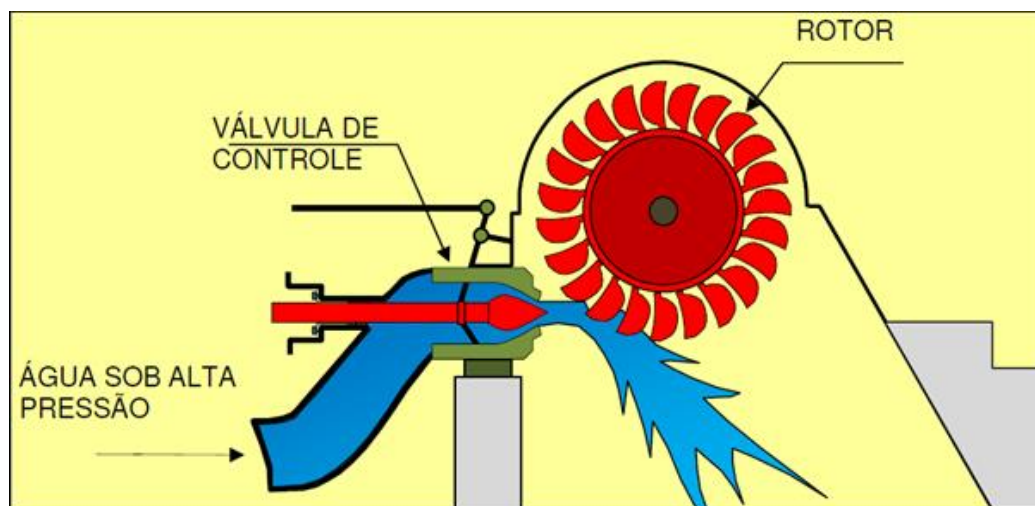


Figura 11 – Desenho esquemático de uma turbina Pelton
 Fonte: MELLO, (2011).

2.4.7.4.2 Turbina 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 (ALVES, 2007).

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 (ALVES, 2007).

É a turbina de maior uso em quedas e vazões médias. Apresenta um alto rendimento, tanto mais alto quanto maior for a potência. Para baixa potência o rendimento situa-se em torno de 77%. A aplicação dessas turbinas se dá em quedas úteis de 15 a 250 metros e uma potência entre 500 e 15.000 kW, além de serem de fácil adaptação para diferentes quedas e vazões (GOMES, 2010).



Figura 12 – Aspecto de uma turbina Francis para microcentrais
Fonte: GOMES (2010).

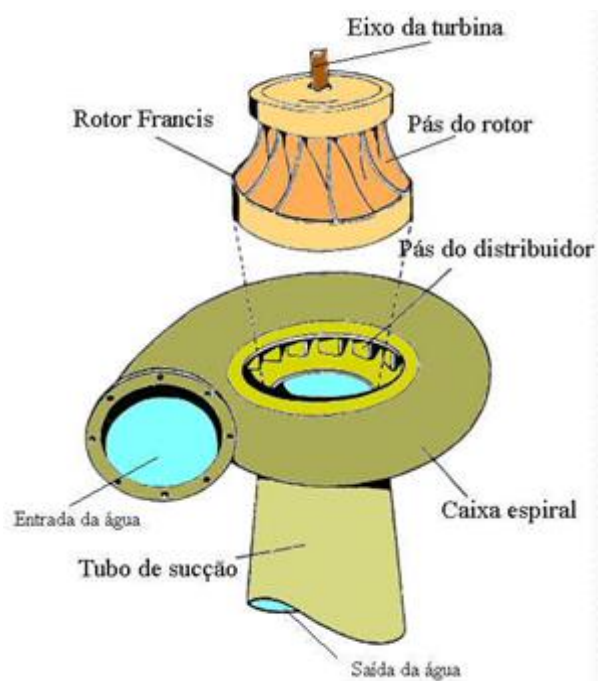


Figura 13 – Turbina Francis
Fonte: Mello (2011).

2.4.7.4.3 Turbina Kaplan e Hélice

Ambas são turbinas de reação e utilizadas para grandes vazões e baixas quedas. As turbinas Kaplan e Hélice geralmente têm eixo vertical, porém é possível encontrar com eixo horizontal que são designadas turbinas Bulbo (BALARIM, 1999).

São constituídas por um distribuidor, por uma roda com quatro ou cinco pás no formato de hélices e por uma câmara de entrada que pode ser fechada ou aberta. As turbinas Hélices são as turbinas que apresentam estas pás fixas. Já a Kaplan são as que as pás são móveis o que torna possível variar o ângulo de ataque por meio de um mecanismo de orientação que o regulador da turbina tem a função de controlar (ZULCY, 1983).

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.

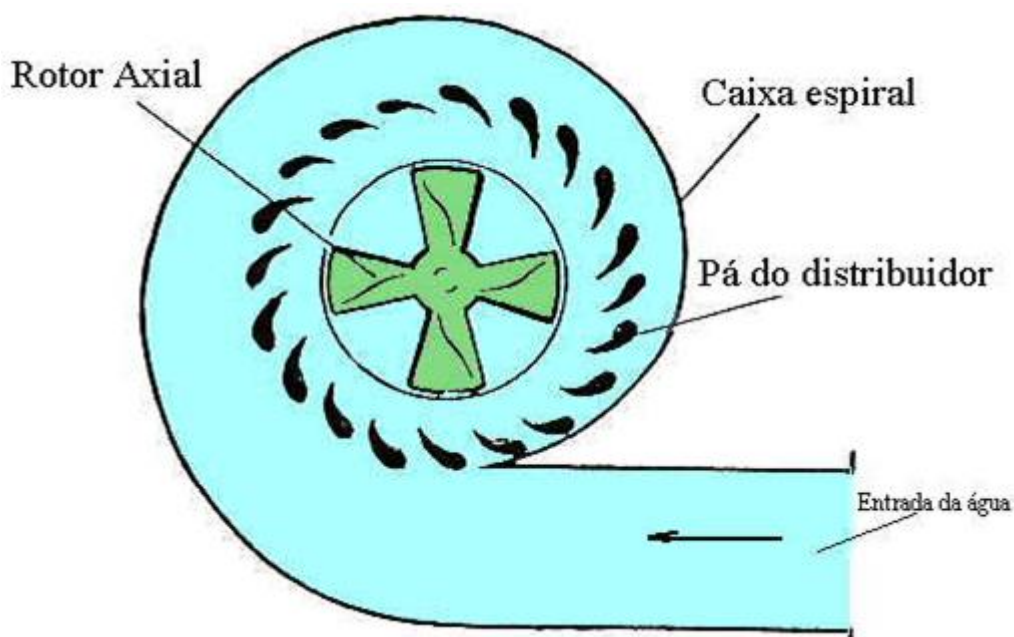


Figura 14 – Turbina axial
Fonte: Mello (2011).

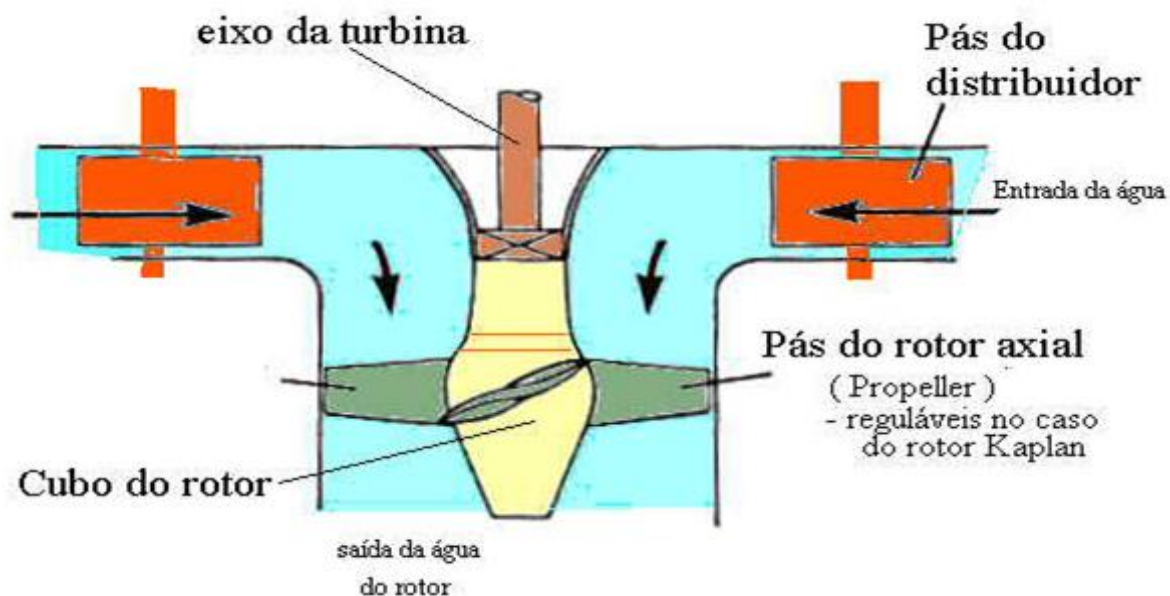


Figura 15 - Sistema utilizando turbina axial
Fonte: Mello (2011).

2.4.7.4.4 Turbina Michell-Banki

É uma turbina de uso bastante difundido no mundo, sendo altamente indicada para uso em áreas rurais, particularmente em centrais de pequeno porte. Sua tecnologia é bastante simples requer poucos equipamentos para a sua fabricação e manutenção, permitindo sua construção em oficinas pouco sofisticadas. O seu campo de aplicação atende quedas de 3 a 100 metros, vazões de 0,02 a 2,0 m³/s e potências de 1 a 100 kW. Devido à sua facilidade de padronização pode apresentar rotações específicas entre 40 e 200 rpm (FURCHI, 2000).

Nas figuras 16 e 17 apresenta-se o desenho esquemático de uma turbina Michel Banki ou de fluxo cruzado, mostrando a passagem de água pelo rotor, e o aspecto de uma turbina real (GOMES, 2010).

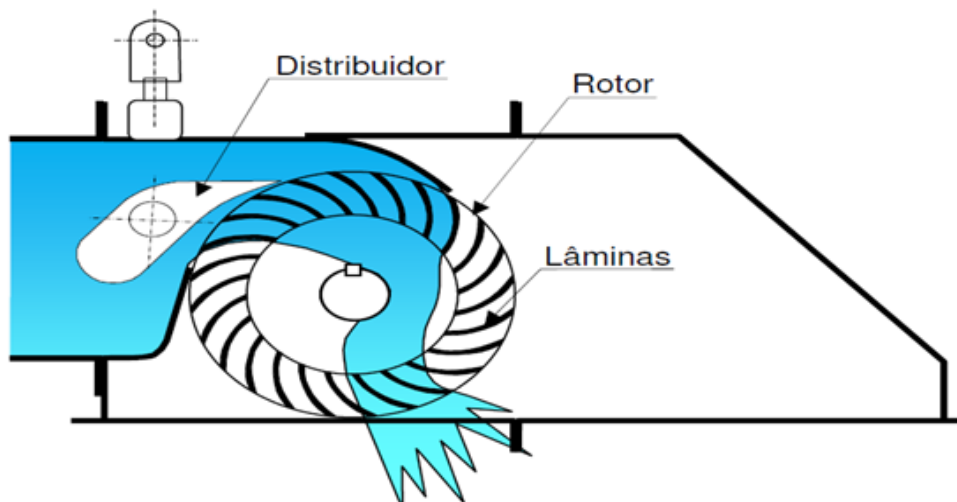


Figura 16 – Esquema de uma turbina uma turbina Michel Banki e passagem de água pelo rotor
Fonte: GOMES (2010).



Figura 17 - Aspecto de um grupo gerador com turbina Michell Banki
Fonte: GOMES, (2010).

2.4.7.5 Regulador de Velocidade

O Regulador de Velocidade (RV) tem como função manter o Grupo Gerador (GG) em “rotação constante a fim de que a frequência da tensão gerada seja mantida em seu valor nominal, atuando, para tanto, sobre a vazão da Turbina Hidráulica (TH)” (ALVES, 2007).

Além disso, controla a potência ativa, de modo especial quando o GG opera paralelamente à rede ou a outra máquina (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 1999).

Os reguladores automáticos de velocidade, geralmente empregados nas micros centrais hidrelétricas “são do tipo mecânico, constituídos por um servomecanismo acionado por óleo pressurizado, comandado por um pêndulo centrífugo”. (ELETROBRÁS, 1985, p. 240).

O regulador de velocidade é um servomecanismo que realiza o papel de operar o sistema diretor da turbina, abrindo-o para que a vazão se eleve até ser restabelecida a rotação de trabalho se a demanda aumenta e fechando-se ela cai. Consegue-se esta operação por meio da haste do pistão diferencial do circuito hidráulico do regulador, acionado por pêndulo centrífugo sensível as variações de rotação. (GUIMARÃES, 1983).

O regulador de velocidade (RV) para micros centrais hidrelétricas pode ser de tipo mecânico e formado por um servomecanismo acionado por óleo pressurizado, direcionado por um pêndulo centrífugo. Este capta qualquer variação de rotação da unidade geradora e coloca em funcionamento o servomecanismo de acionamento do distribuidor da turbina. O distribuidor dispõe o fluxo de água por meio da turbina e controla a sua variação de potência, conforme a variação da carga na unidade geradora.

Segundo Souza, Santos e Bortoni (1999), dois são os tipos de reguladores de velocidade, o RV isócrono e o RV com estatismo permanente. A escolha do tipo de RV adequado depende do regime de operação concernente à mini ou micro central hidrelétrica. No caso de operação isolada, utiliza-se o RV isócrono, invariavelmente.

Souza, Fuchs e Santos (1983), os RV isócronos são aqueles que conseguem manter a velocidade constante independente da variação de carga.

2.4.7.6 Válvula Borboleta

A válvula borboleta apresentada na Figura 18 tem a função de proteger a turbina caso houver uma falha do distribuidor ou em necessidades de manutenção sem que haja necessidade de esgotar o conduto.

No cálculo de perda de carga em uma válvula borboleta tem-se o interesse somente para o caso do obturador 100% aberto, pois a válvula não servirá para controlar vazão e em operação normal da turbina ela estará totalmente aberta.

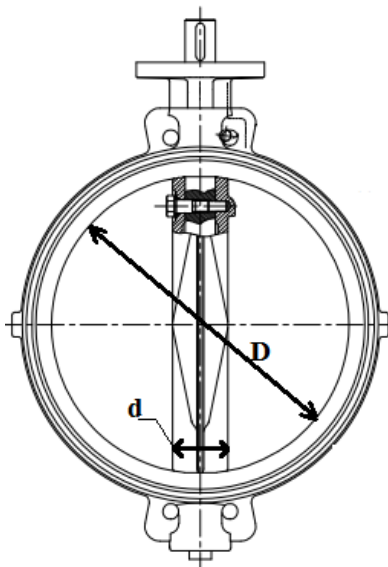


Figura 18 – Válvula borboleta
Fonte: STAHLHOEFER, (2013).

2.4.7.7 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. Nesse caso, o regulador não terá capacidade para controlar as variações bruscas de carga na unidade geradora, dentro das condições de regulação estabelecidas. Torna-se, assim, necessário o acréscimo de material, que resulte em aumento do efeito de inércia.

Então, são previstos discos de aço ou de ferro fundido, ligados diretamente ao eixo do gerador e denominados volantes de inércia. Em caso de rejeição de carga total ou parcial, o volante de inércia servirá para manter a sobrevelocidade da unidade e a sobrepressão no conduto a montante do distribuidor da turbina, dentro de limites preestabelecidos no projeto da usina (LIMA, 2009).

2.4.7.8 Acoplamentos Flexíveis

Os acoplamentos flexíveis de engrenagens são encontrados entre o eixo da turbina e o eixo de entrada do multiplicador de rotação, entre o eixo de saída do

multiplicador de rotação e o eixo do volante de inércia e entre o eixo do volante de inércia e o eixo do gerador (BETTA HIDROTURBINAS, 2015).

2.4.7.9 Cavitação em turbinas Hidráulicas

Henn (2006) define cavitação como a formação e subsequente colapso, no seio de um líquido em movimento, de bolhas ou cavidades preenchidas, em grande parte, por vapor líquido.

Souza (1999) observou que a água muda de fase obedecendo à curva de tensão do vapor, nesta mudança a massa específica da água passa de 1000kg/m^3 para em torno de 1kg/m^3 , conseqüentemente aumenta inversamente seu volume específico. Tal fato ocasiona a formação de bolhas de vapor e de gases.

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: PFLEIDERER e PETERMANN (1979).

A formação de cavidades macroscópicas em um líquido ocorre a partir de núcleos gasosos microscópicos. O crescimento destes núcleos microscópicos acontece por vaporização sempre que a pressão em um ponto qualquer do escoamento tem valores iguais ou inferiores à pressão de vaporização do líquido na temperatura em que ele se encontra, até o local em que a pressão torna-se novamente superior à pressão de vaporização da água. Neste ponto, o vapor contido no interior das bolhas condensa-se bruscamente, deixando um espaço vazio, preenchido rapidamente pela água circundante, causando o que se denomina implosão das bolhas (HENN, 2006).

Segundo HENN (2006) as superfícies metálicas próximas as zonas de colapso das bolhas são atingidas por golpes altamente concentrados e repetidos que acabam por descarregar partículas de material por fadiga, formando pequenas crateras que caracterizam a erosão por cavitação. Souza (2009) informa que este

fenômeno causa efeitos destrutivos e de queda de potência ativa, além da redução da vida útil de toda a instalação.

Há necessidade das 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 (SOUZA, 1999).

2.4.7.10 Tubo de Sucção

O tubo de sucção permite que a água que sai do receptor alcance o poço de escoamento ou o canal de fuga, escoando-se de forma constante em vez de ser descarregada livremente na atmosfera. Possibilita que a pressão à saída do rotor seja inferior à pressão atmosférica. (ALVES, 2007).

O tubo de sucção pode ser construído de diferentes maneiras conforme mostra a Figura 19: em (a) se não for utilizado o fluxo de água segue para a atmosfera, então a pressão na saída do rotor é atmosférica e a altura que corresponde ao desnível deste ponto até o nível de água se perca. Em (b), exemplo de um tubo de sucção cilíndrico, o desnível (h) é recuperado, pois se tornam iguais as velocidades à saída do rotor e do tubo. Em (c), exemplo de um tubo de sucção tronco-cônico, o desnível (h) é recuperado e a pressão na saída do rotor é inferior à pressão atmosférica.

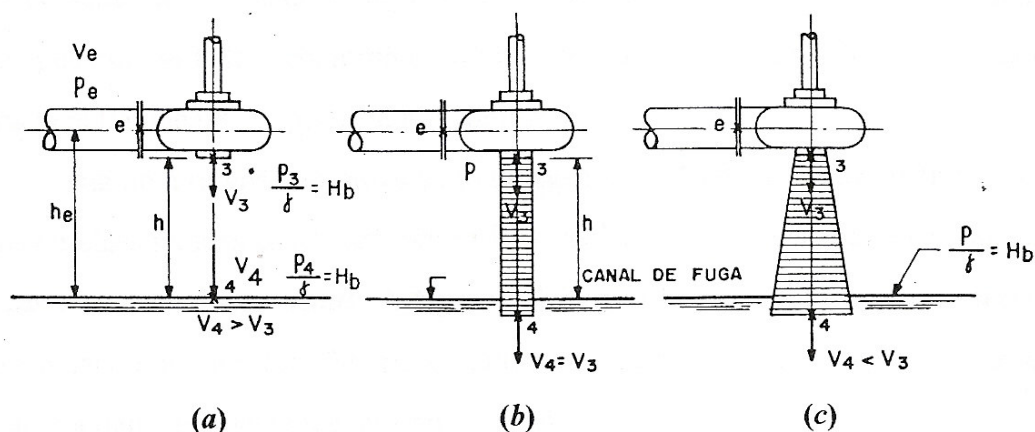


Figura 19 – Forma adequada para o tubo de sucção. (a) Escoamento livre, sem tubo de sucção. (b) tubo de sucção cilíndrico. (c) Tubo de sucção tronco-cônico
Fonte: ALVES (2007).

No que se refere ao tubo de sucção, cilíndrico ou cônico, Varlet (1958) faz três observações: Se a turbina, por razões de exploração, por exemplo, está

instalada abaixo do nível do canal de fuga, o tubo de sucção permite recuperar essa perda de altura. Não é necessário que seja cilíndrico; O difusor permite recuperar parte da energia cinética ($v^2/2g$) que possui a água, devido à velocidade residual, na saída do rotor. O difusor, por cumprir esta missão; uma turbina que não possui aspiração é uma turbina a escoamento livre.

Como explicam Viejo, Manuel e Palacios (1977), as principais funções do tubo de sucção são as seguintes:

- a) evitar que a água saia diretamente para a atmosfera, regular a saída e permitir instalar a turbina em um nível mais alto que da água abaixo;
- b) permitir obter uma pressão menor que a atmosfera (uma pressão negativa);
- c) possibilitar o descarregamento da água que sai do rotor, em direção ao canal abaixo da instalação;
- d) permitir recuperar em parte a energia cinética ($v^2/2g$) que possui a água, devido à velocidade residual, na saída do rotor. Neste caso o tubo de aspiração está afogado.

No tubo cônico (c), definida por Beluco (1994) como melhor alternativa, dá-se um movimento retardado, pois a velocidade na saída do tubo é menor que a velocidade na saída do rotor, o que se deve à seção crescente do tubo, e haverá recuperação da energia que corresponde à diferença de velocidades, menos as perdas por atrito. O tubo de sucção tem a função de recuperar a energia cinética da massa líquida e manter sua continuidade, a partir do rotor até o nível de água no poço de escapamento.

2.4.7.11 Gerador

O gerador é o equipamento responsável pela segunda conversão de energia que ocorre em uma central hidrelétrica, que é a conversão da energia mecânica fornecida pela turbina em energia elétrica (ALVES, 2007).

Segundo BALARIM (1999) os geradores síncronos são sempre utilizados em PCH's e MCH's em geral devidos ao fato, que eles sempre operam em velocidade constante independente da carga elétrica utilizada em seus terminais. O fabricante geralmente é responsável pelo dimensionamento do gerador, o

dimensionamento é considerado os números de pólos, potência, tensão, fator de potência, rendimento, sistemas de excitação e aterramento.

A potência do gerador é determinada após o cálculo da potência disponível no eixo da turbina, através da equação 6 seguir (ELETROBRÁS, 2000, p 182).

$$P_G = P_T \left(\frac{\eta_G}{\cos \phi} \right) \quad (6)$$

Onde:

P_G = potência do gerador (kVA);

P_T = potência no eixo da turbina (kW);

η_G = rendimento do gerador;

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

Segundo BALARIM (1999) o rendimento do gerador deve ser obtido junto ao fabricante do equipamento. Na falta de informações, podem ser utilizados os seguintes valores:

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

O fator de potência deve ser definido em função das necessidades do sistema elétrico ao qual o gerador será ligado. Não é economicamente vantajoso, no caso de sistemas isolados, utilizar geradores com fator de potência nominal abaixo de 0,80. Para o caso de geradores que operem interligados ao sistema elétrico, um fator de potência nominal de 0,90 a 0,95 é adequado (BALARIM 1999).

A rotação nominal do gerador fica definida quando se estabelece a velocidade nominal síncrona da turbina, para a frequência de 60 Hz.

Quando o acionamento direto do gerador resultar antieconômico, adota-se o acionamento indireto do gerador através de um multiplicador de velocidade. Neste caso, usualmente utilizam-se geradores de 4, 6 ou 8 pólos (ELETROBRÁS, 2000, p 182).

2.4.7.12 Resfriamento do Gerador

Segundo a norma regulamentadora da ABNT NBR 5110, as formas de refrigeração dos geradores abrigados na casa de força são:

- IC 01 - O gerador é do tipo autoventilado, grau de proteção IP23 e o ar ambiente da Casa de Força circulam pelo gerador através de aberturas de ventilação;

- IC 21 - O gerador é do tipo autoventilado, grau de proteção IP23 e o ar ambiente da Casa de Força é admitido através de aberturas de ventilação e expelido para fora da Casa de Força por um duto de exaustão;

- IC W87 A81 – O gerador é do tipo autoventilado, grau de proteção IP44. O sistema de resfriamento é totalmente fechado, com o ar circulando através de um trocador de calor ar- água montado diretamente no gerador.

Os dutos de exaustão devem ser providos de tela ou venezianas basculantes para impedir a entrada de pequenos animais.

Nos sistemas IC 01 e IC 21, o ar aspirado contém pó e pequenos insetos que se depositam nos canais de ventilação e nos enrolamentos do gerador, diminuindo a eficiência da ventilação, o que implica necessidade de limpeza periódica. Nos locais próximos a indústrias, que produzem alto índice de poluição, devem ser utilizados filtros nas entradas de ar.

Segundo a ELETROBRÁS (2000) que para a estimativa da ventilação da casa de força pode-se considerar que a vazão de ar requerida para o gerador é de, aproximadamente, 2,3 a 2,8 m³ por minuto para cada kW de perda do gerador, para uma velocidade do ar de 2,5 m/s. Os geradores contêm trocadores de calor ar – água, o ar fresco circula internamente através do gerador e o ar quente é forçado através de serpentinas, tubos ou placas onde é resfriado e retorna ao gerador. Neste caso, como o sistema é totalmente fechado, não está sujeito à entrada de animais e depósitos de poeira, além do fato que a variação de temperatura da água é menor e mais lenta do que a do ar, resultando numa operação termicamente mais estável do gerador, e proporcionando uma vida útil maior.

2.4.7.13 Proteção contra Sobretensões

Os geradores devem ser protegidos contra sobretensões originadas por descargas atmosféricas e surtos de manobras (VIANNA, 2000).

Seu equipamento que fará a proteção do gerador consiste em uma combinação de capacitores especiais e para-raios do tipo estação, ligados próximos o mais possível aos terminais do gerador. A função do conjunto é limitar a amplitude da onda de impulso e diminuir a inclinação da frente de onda que atinge os enrolamentos do gerador (ELETROBRÁS, 2000, p 184).

Devido às características de isolamento do gerador, a sua resistência a impulso é, aproximadamente, igual à resistência à frequência industrial, de maneira que deve-se procurar limitar a tensão de impulso ao valor de pico da tensão de ensaio à frequência industrial estabelecida segundo a norma da ABNT NBR 5117.

2.4.7.14 Transformadores Elevadores

Na casa de máquinas deverá conter um transformador elevador, e sua potência nominal igual ou superior à potência máxima do gerador. Recomenda-se procurar especificar um valor de potência padronizado, o que possibilita um prazo de entrega mais rápido, menor custo de aquisição e mais facilidade de eventual reposição (ZULCY, 1985).

Para potências nominais acima de 5 MVA, a utilização de transformadores com sistema de ventilação forçada começa a se tornar uma alternativa atraente (STANO JÚNIOR, 2008).

Recomenda-se a instalação dos transformadores elevadores o mais próximo possível da casa de força, de modo a utilizar um comprimento mínimo de cabos de interligação, o que possibilita obter uma redução nos custos de aquisição e instalação dos cabos e menores perdas (ELETROBRÁS, 2000, p 185).

Recomenda-se que, devido à importância do transformador elevador para a usina, os mesmos sejam especificados para os valores superiores de tensão suportável nominal de impulso atmosférico constantes da Norma ABNT NBR 5356.

2.4.7.15 Sistema de Proteção

A escolha de um sistema de proteção para os equipamentos elétricos constituintes de uma PCH envolve aspectos operacionais, econômicos, de segurança física e pessoal, que devem ser analisados caso a caso (STANO JÚNIOR, 2008).

Recomendações para proteção de unidades geradoras são geralmente encontradas em publicações editadas por fabricantes de relés. Estas recomendações podem ser utilizadas como um ponto de partida para a definição do esquema de proteção desejado (ALVES, 2007).

Segundo a ELETROBRÁS (2000) um fator importante a ser analisado na definição do grau de proteção desejado é a forma como a usina será operada, se assistida por operadores ou automaticamente. Nas usinas assistidas por operadores, algumas condições anormais de operação podem apenas acionar um alarme, permitindo que o operador decida se conserva a máquina em operação ou não.

No caso de usinas automáticas ou semi-automáticas a inexistência de operadores torna necessário prover desligamento para a maioria das condições anormais de operação que impliquem em risco para a integridade da máquina, mesmo que a longo prazo, como no caso de sobrecarga (ZULCY 1983).

O sistema de proteção deve constituir um sistema independente do sistema de controle digital e as proteções devem atuar diretamente, através de seus contatos de saída, sobre os disjuntores ou dispositivos de parada, de modo a garantir a parada da máquina sem necessidade do sistema de controle digital (ALVES, 2007).

2.4.7.16 Instalações Auxiliares

Tanto em μ CHs como em mCHs deve-se prever um espaço para o operador, um almoxarifado e um espaço para pequenos reparos. Um banheiro com pia, vaso sanitário e chuveiro, uma pia de cozinha, água potável e tomadas para eletrodomésticos são também recomendáveis. Se a central for do tipo desassistida, alguns desses espaços podem não existir ou ser de dimensões mais compactas (BALARIM 1999).

2.4.7.17 Sistema de Comunicação

Deve-se prever uma linha telefônica ou um sistema de rádio para comunicação com o responsável pela operação da usina e com a casa do barrageiro.

Barrageiro é o profissional responsável pela limpeza das grades e operação dos órgãos de segurança da barragem e casa de máquinas. No caso de centrais desassistidas deve haver um sistema de comunicação com a central de operação, que também pode ser via telefone ou via satélite. (STANO JÚNIOR, 2008 p 9.22).

2.4.8 Canal de Fuga

O canal de fuga tem a função de reconduzir a água turbinada ao curso original do rio. Ele é localizado à jusante do tubo de sucção, entre a casa de máquinas e o rio. A Figura 20 ilustra um canal de fuga (STANO JÚNIOR, 2008).



Figura 20 – Canal de Fuga.
Fonte: STANO JÚNIOR, (2008).

Este elemento é, na maioria das vezes, construído em concreto, alvenaria de pedra e, mais raramente, tem seu fundo e margens em solos ou rochas expostas à ação erosiva das águas. As laterais, quando em solos, são normalmente contidas por muros de concreto ou pedra argamassada (ZULCY, 1983).

O dimensionamento do canal de fuga será sempre condicionado pelo tipo e dimensões da casa de máquinas e pela distância entre esta e o rio. Quando esse canal for escavado em rocha, seu dimensionamento hidráulico deverá ser realizado procurando-se reduzir sua escavação, sem, no entanto, provocar aumento das perdas de carga (STANO JÚNIOR, 2008).

Para as turbinas do tipo de reação, como as Francis, hélice ou Kaplan, é recomendável a colocação do tubo de sucção com a saída inserida em um canal de fuga, com soleira afogada (GOMES, 2010).

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. Já o valor de profundidade do canal de fuga é encontrado pela equação 7:

$$S_3 = S_1 + S_2 \quad (7)$$

Onde:

S_1 = fornecido pelo fabricante (0,30 m) [m]

$S_2 = 0,85 * 0,690$ [m]

S_3 = profundidade [m]

O valor de S_2 é projetado de acordo com a Figura 21, seguindo a relação de 85% do valor do diâmetro final do tubo de sucção, que é de 0,690 m.

A largura do canal de fuga, em caso de tubos cônicos, pode ser estimado pela equação 8:

$$S_4 = 0,05 \cdot Q + 2,30 \quad (8)$$

Onde:

S_4 = largura do canal de fuga [m]

Q = vazão nominal [m³/s]

Segundo ALVES (2007), com o valor da profundidade mínima de afogamento do tubo de sucção fornecida pelo fabricante, pode-se obter a cota entre o nível de jusante e o fundo do canal de fuga pela equação 9:

$$S_2 = S_4 - S_1 \quad (9)$$

Onde:

S_2 = cota entre o nível de jusante e o nível do canal de fuga.

S_1 = fornecido pelo fabricante.

No caso de turbinas do tipo ação, Pelton ou Banki, quando não é utilizado tubo de sucção, o nível da soleira afogada no canal de fuga deverá garantir um colchão de água com profundidade suficiente para proteção do fundo do canal contra erosão. Neste caso a diferença entre a cota da linha de centro do rotor da turbina e a cota do nível d'água no canal de fuga deve ser descontada da altura de queda da central (GOMES, 2010).

As dimensões do canal de fuga devem-se levar em conta que as dimensões mínimas mostradas na Figura 21 devem ser atendidas. (ZULCY, 1983)

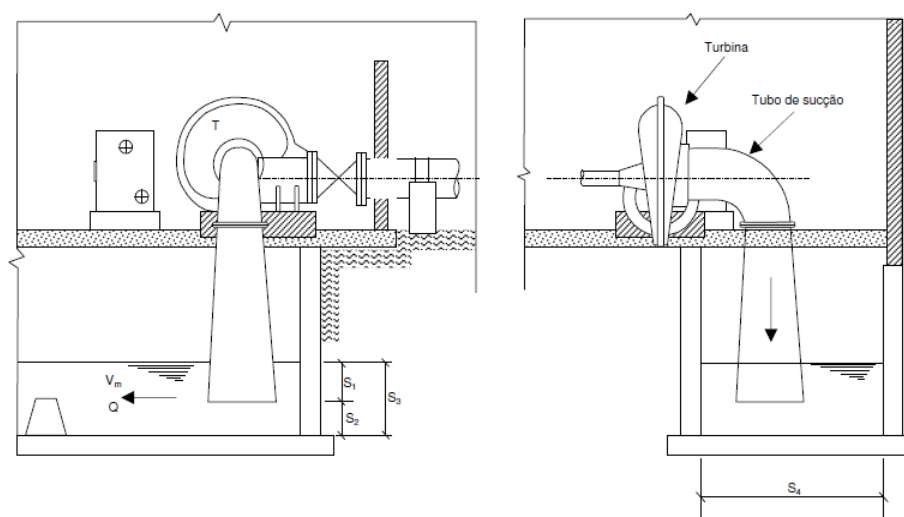


Figura 21 - Dimensões básicas do canal de fuga
Fonte: ZULCY (1983).

Segundo Zulcy (1983), em centrais onde, por algum motivo justificável, o nível do canal de fuga esteja muito acima do rio, e a inclinação do canal seja muito grande, o ideal é fazer o canal em forma de degraus, de acordo com a Figura 22, de forma a dissipar a energia da água.

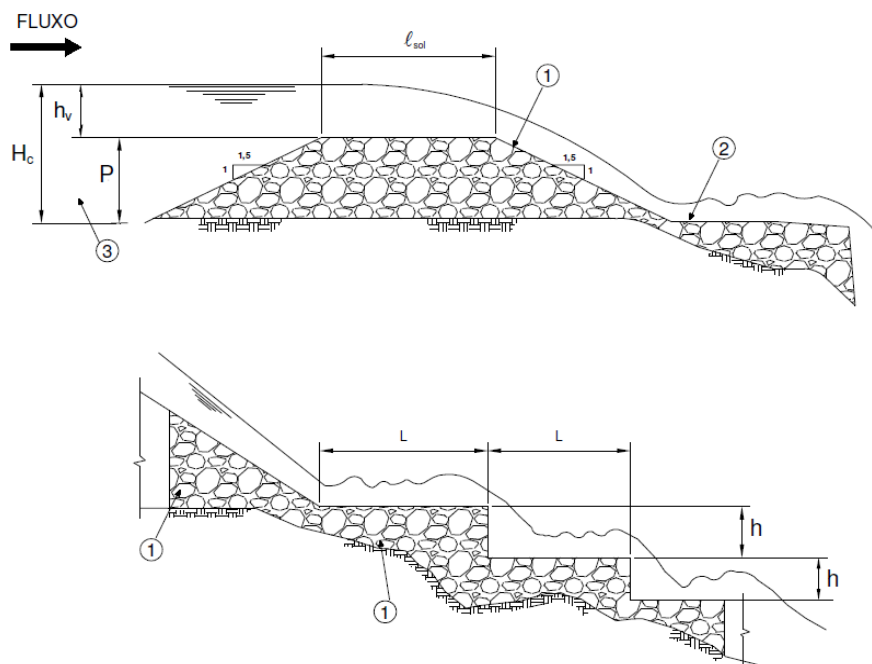


Figura 22 – Canal de fuga em degraus
Fonte: ZULCY (1983).

2.5 LOCALIZAÇÃO DA USINA RANCHARIA

A Usina Rancharia está localizada no município de Rio Branco do Sul localizado na Região Metropolitana Norte de Curitiba ao Leste do Estado do Paraná. Suas coordenadas na barragem são em UTM igual a 7.214.112N e 670.953E (fuso 22J). A Figura 23 mostra uma vista aérea da usina com o local de seu reservatório e da casa de máquinas.



Figura 23 - Localização da Usina Rancharia
Fonte: SILVA, JUNIOR E ORTEGA (2015).

A usina situa-se no curso d'água Rio Rancharia que pertence à sub-bacia do Rio Açungui, que por sua vez é afluente do Rio Ribeira, este um dos principais rios da região e da Bacia Hidrográfica do Ribeira.

2.5.1 Instalações Existentes no Local

A Usina Rancharia foi desativada há mais de 50 anos e grande parte das instalações existentes na época de seu funcionamento hoje está deteriorada pela ação do tempo e/ou por atos de vandalismo. A Figura 24 mostra o local da casa de máquinas, a parte inferior da casa de máquinas, o canal de adução e a tomada d'água, respectivamente.



Figura 24 - Instalações da Usina Rancharia
Fonte: Autoria própria.

3 RESULTADOS

3.1 DIMENSIONAMENTO DAS TURBINAS

Cada um dos diversos tipos de turbina existentes possui características que o tornam mais adequado a uma determinada condição de altura de queda, vazão e rotação. Desta forma a escolha da turbina mais adequada a um determinado aproveitamento hidráulico será função das características desse mesmo local.

Além disso, as turbinas hidráulicas utilizadas nas centrais hidrelétricas de pequeno porte devem ser selecionadas de modo a se obter facilidade de operação e manutenção, dando-se grande importância à sua robustez. Para selecionar o tipo de turbina, deve-se analisar a queda líquida e a vazão, levando em consideração todas as perdas envolvidas (ELETROBRÁS, 2010).

Através destes dois parâmetros e com base no gráfico Gráfico 5, é possível identificar qual o tipo de turbina que melhor se adapta ao projeto. Definido o tipo de turbina, e com base em especificações dos fabricantes, é possível então efetuar a especificação do gerador.

Um dos objetivos é analisar as três possíveis localizações para a casa de máquinas, então teremos três diferentes valores da altura da queda líquida H_{liq} a ser analisado. A vazão permanece a mesma para as três localizações. Segundo Silva, Junior e Ortega (2015) a vazão máxima considerando as perdas é igual a $Q = 0,430 \text{ m}^3/\text{s}$.

Em visita ao local da implementação da usina, Coelho e Xavier (2015) providos de equipamento de medição de alta precisão, efetuou as medições das três possíveis localizações obtendo os seguintes valores para as quedas líquidas conforme a tabela 5:

Tabela 5 – Valores das quedas líquidas

<i>Localização</i>	H_{Liq} (m)
1	18,408
2	20,551
3	19,470

Fonte: COELHO E XAVIER (2015).

Com os valores citados na Gráfico 5 e o valor da vazão adquirida, obtém-se preliminarmente a escolha da turbina que se enquadra na casa de máquinas.

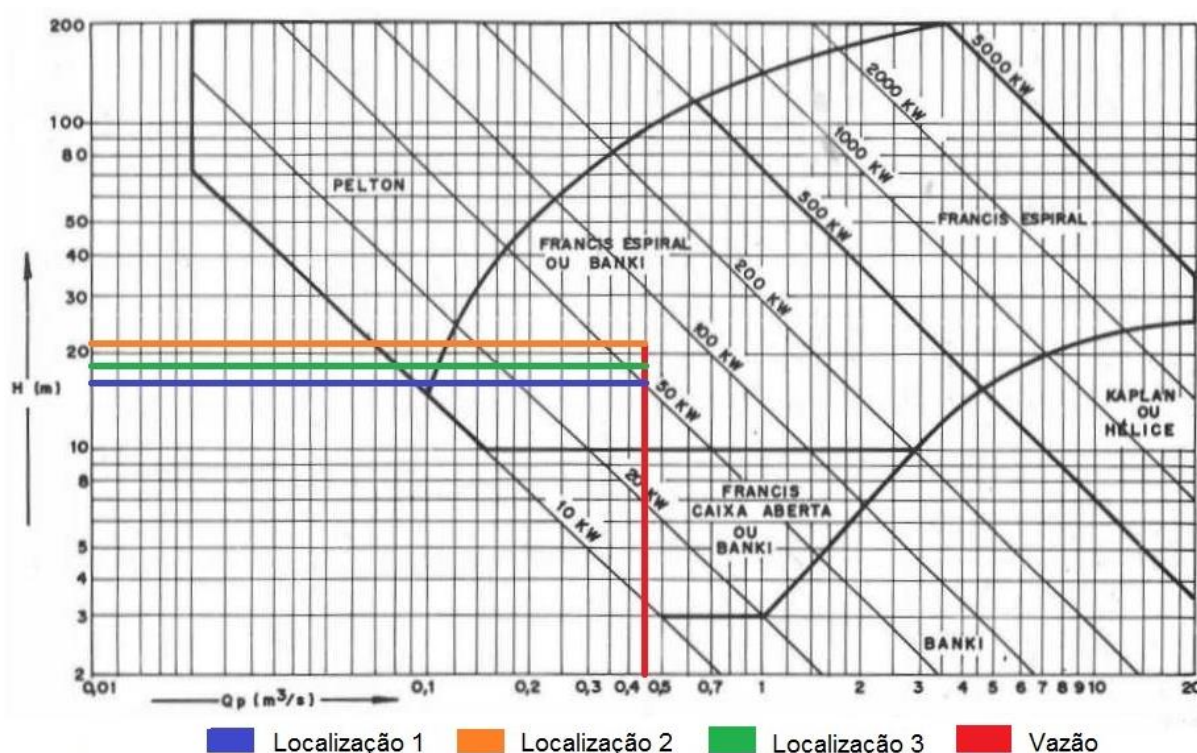


Gráfico 5 – Verificação preliminar do tipo de turbina

Fonte: SOUZA (1999).

Conforme mostra o Gráfico 5, os melhores tipos de turbina que se enquadram para as três localizações 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.

O projeto será feito com base nas duas turbinas, mas não irão operar ao mesmo tempo. O objetivo do estudo com duas turbinas é em uma eventual manutenção ou uma inesperada quebra, uma turbina irá substituir a outra.

3.1.1 Cálculo da Potência das Turbinas

Segundo Alves (2007) A potência hidráulica P_h é fornecida pela Equação 10 e de acordo com as condições hidrológicas do aproveitamento os quais são: Altura da queda líquida e vazão máxima.

$$P_h = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{liq} \cdot n_t}{75} \quad (10)$$

Onde:

P_h - potência hidráulica.

Q – vazão, em m^3/s .

γ – peso específico da água = 1000 kg/m^3 .

H_{Liq} – altura da queda líquida.

n_t – rendimento da turbina.

Cada tipo de turbina possui uma característica específica de rendimento em relação a variação da vazão, dessa forma no projeto deve-se levar em conta a operação da turbina para que seja definido seus limites de funcionamento. (ALVES 2007).

A Tabela 6 nos traz o rendimento dos dois tipos de turbinas selecionadas.

Tabela 6 - Rendimento das turbinas

Turbina	Rendimento
Francis	70 – 85
Banki	65 – 82

Fonte: ALVES (2007).

Com os valores da altura das quedas líquidas, vazão, rendimento das turbinas e o peso específico da água, utilizando a Equação 10, pode-se calcular a potência hidráulica das turbinas para cada localização da casa de máquinas. Os resultados das potências demonstrados nas Tabelas 7 e 8, considerou-se o rendimento máximo das turbinas destacadas na Tabela 6.

A potência hidráulica está representada em CV e kW. Considerando o valor de $1\text{CV} = 736\text{W}$.

Tabela 7 – Potência hidráulica turbina Francis

<i>Localização</i>	Potência hidráulica (CV)	Potência hidráulica (kW)
1	90,06	66,28
2	99,95	73,56
3	94,88	69,83

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Potência hidráulica turbina Banki

<i>Localização</i>	Potência hidráulica (CV)	Potência hidráulica (kW)
1	86,88	63,94
2	96,42	70,97
3	91,53	67,40

Fonte: Autoria própria.

3.1.2 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.

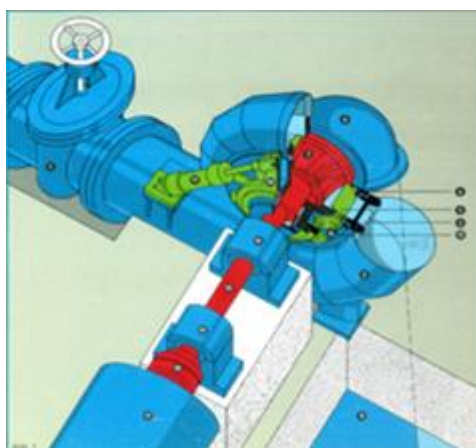


Figura 25 – Catálogo Voith de Francis horizontal
 Fonte: VOITH HYDRO S.A.

Através do gráfico 6, Pode-se então procurar a turbina que melhor se enquadra para queda líquida e vazão de projeto.

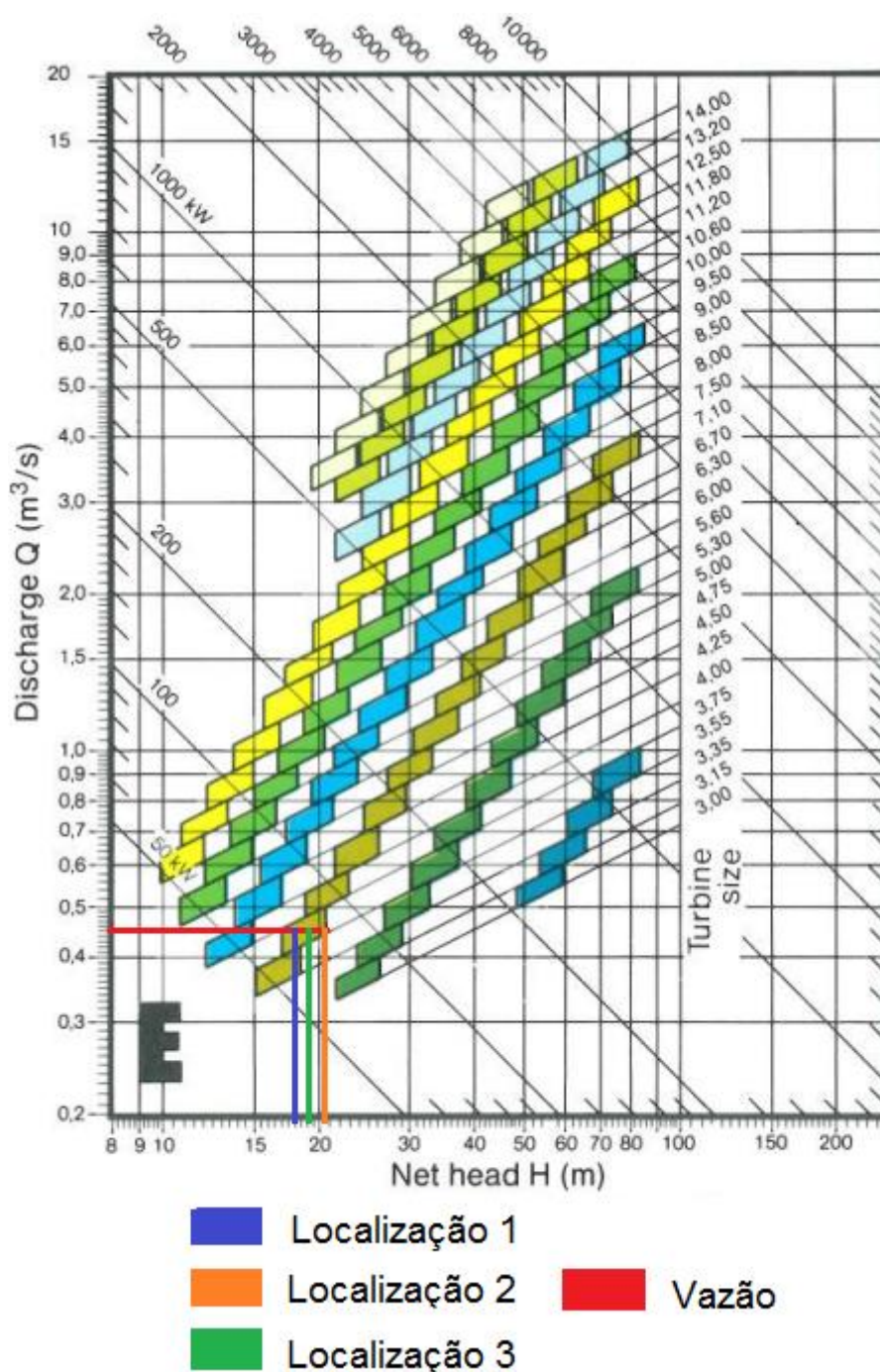


Gráfico 6 – Seleção do tipo da turbina Francis Horizontal
Fonte: VOITH HYDRO S.A.

O modelo selecionado para turbina Francis horizontal foi a do tipo E de tamanho 3.55 e potência nominal de 70kW, para as três localizações, com quedas líquidas respectivamente nominal de 18,408 m, 17,551 m e 16,470 m, com a vazão

de 0,43 m³/s. A turbina terá uma rotação síncrona de 900 rpm de acordo com a Gráfico 6.

A velocidade síncrona para frequência de rotação de 60 Hz é subdividida conforme cores apresentadas na Figura 26.

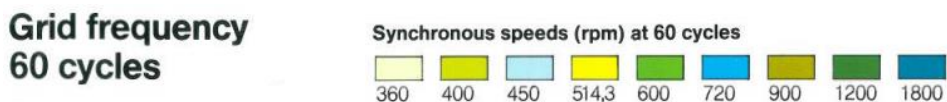


Figura 26 – Rotações síncronas de referência para as turbinas
Fonte: VOITH HYDRO S.A.

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 27.

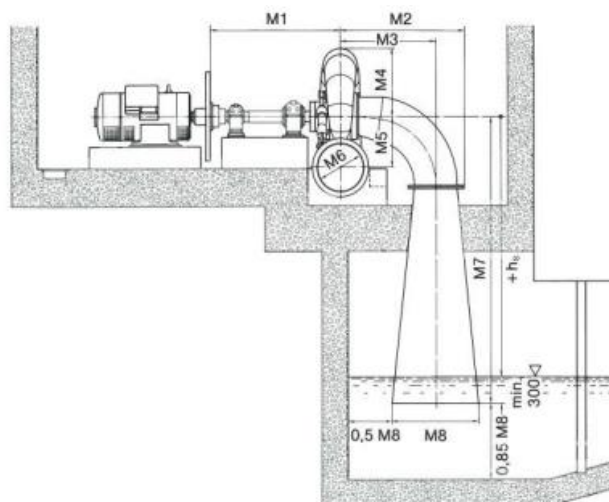


Table of dimensions (mm)

Dimen. specific speed	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-F	G,H	A-D	E,F	G	H	A-D	E,F	G	H	A-D	E,F	G	H		
3,00	1600	1000	930	750	710	520	430	420	370	400	360	300	260	1850	1700	1500	1350	630	580	530	480				
3,15		1050	970	790	740	540	450	440	390	420	380	320	270	1950	1800	1550	1400	670	610	550	510				
3,35		1110	1030	840	790	580	480	470	410	450	400	340	290	2050	1900	1650	1500	710	650	590	540				
3,55		1170	1080	890	840	610	510	500	430	470	430	360	300	2200	2000	1750	1600	750	690	620	570				
3,75		1240	1140	940	890	650	540	530	460	500	450	380	320	2300	2100	1850	1700	790	730	660	600				

Figura 27 – Dimensões principais Turbina Francis Horizontal Localização 1 e 2
Fonte: VOITH HYDRO S.A.

O valor da rotação específica (Ns) nas localizações 1 e 2 para a turbina selecionada pode ser calculado através da Equação 3.

Localização 1:

$$N_s = 900 \cdot \sqrt[2]{70}/18,408^{1,25}$$

$$N_s = 197,48$$

Localização 2:

$$N_s = 900 \cdot \sqrt[2]{70}/20,51^{1,25}$$

$$N_s = 172,51$$

Localização 3:

$$N_s = 900 \cdot \sqrt[2]{70}/19,470^{1,25}$$

$$N_s = 184,11$$

Resultando em um valor de N_s de aproximadamente 197,48 para a localização 1, 172,51 para a localização 2 e 184,11 para a localização 3.

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 9.

Tabela 9 – Características das Turbinas

VELOCIDADE ESPECIFICA N_s	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.

3.1.3 Dimensionamento Turbina Michell-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 10 – Características técnicas do projeto material pvc

	Localização 1	Localização 2	Localização 3
Potência máxima prevista:	63,70 kW	70,97 kW	67,40 kW
Queda líquida considerada:	18,408 m	20,51 m	19,470 m
Tubulação de adução para a turbina			
<i>Diâmetro considerado:</i>	<i>400 mm</i>	<i>400 mm</i>	<i>400 mm</i>
Comprimento:	49,531 m	33,003 m	31,167 m
Material empregado:	PVC	PVC	PVC
Diâmetro da entrada da turbina:	430 mm	430 mm	430 mm

Fonte: Autoria própria.

3.1.3.1 Especificações Técnicas do Modelo Betta 3040

Tabela 11 – Especificações técnicas da turbina

<i>Queda líquida no eixo da turbina:</i>	<i>20,51 m</i>
Vazão máxima turbinada:	474 litros/segundo
Potência no eixo da turbina hidráulica:	95 CV.
Potência no eixo da turbina em kW:	69,20 kW
Rotação nominal da turbina:	562 rpm
Rendimento turbina:	82%

Fonte: BETTA HIDROTURBINAS (2015).

Devido os valores de H_{Liq} serem próximos uns dos outros, pode-se considerar o dimensionamento da mesma turbina Michell-Banki para as três localizações da casa de máquinas (BETTA HIDROTURBINAS, 2015).

A Figura 28 representa o modelo turbina Michell-Banki acoplada ao sistema de geração.

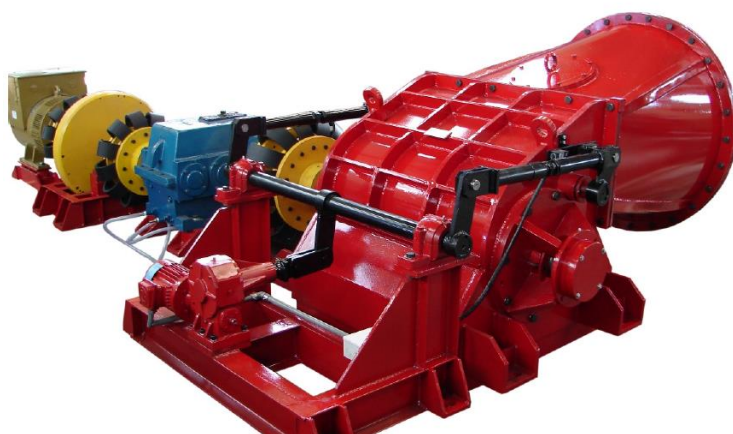


Figura 28 – Turbina Banki acoplada com gerador
Fonte: BETTAHIDROTURBINAS, (2015).

3.2 DIMENSIONAMENTO DA VÁLVULA BORBOLETA

O sistema de proteção utilizado nas turbinas será válvulas borboleta de operação manual. Esse tipo de válvula suporta com segurança a carga hidrostática da MCH. É um tipo mais barato, pois possui um menor peso que outros tipos, tais como válvulas esféricas e válvulas gaveta (UNO, 2012).

A seleção do diâmetro da válvula é baseada no diâmetro de entrada da caixa espiral da turbina. Com isso selecionamos a válvula de menor diâmetro possível. Conforme mostra a Figura 29, os diâmetros de entrada da caixa espiral das turbinas são de 430 mm. Esse será o valor buscado no catálogo do fabricante de válvulas borboleta.

O catálogo do fabricante com as válvulas oferecidas e a válvula selecionada esta mostrada na Figura 29.

Dimensões (in)

Valve Size		A	B	C	D	E	F	Mounting Flange Drig.			G	H	KEY SIZE	K	Lug Bolting Data		
ins	mm							BC	No. Holes	Hole Dia.					BC	No. Holes	Threads UNC-2B
14	350	16.94	3.00	13.25	15.28	13.62	5.91	4.92	4	.56	1.38	2.00	.39x.39	13.04	18.75	12	1-8
16	400	19.06	4.00	15.25	17.41	14.75	5.91	4.92	4	.56	1.38	2.00	.39x.39	14.85	21.25	16	1-8
18	450	21.12	4.25	17.25	19.47	16.00	8.27	6.50	4	.81	1.97	2.50	.39x.47	16.85	22.75	16	11/8-7
20	500	23.25	5.00	19.25	21.59	17.25	8.27	6.50	4	.81	1.97	2.50	.39x.47	18.73	25.00	20	11/8-7
24	600	33.00	5.94	23.25	25.75	19.50	8.27	6.50	4	.81	2.50	4.00	.62x.62	22.69	29.50	20	11/4-7

Figura 29 – Catálogo para seleção da válvula borboleta
Fonte: BRAY INTERNATIONAL INC.

3.3 UNIDADE ELETRÔNICA DO REGULADOR DE VELOCIDADE

A unidade eletrônica do regulador e o sistema de comando são montados em gabinete metálico com porta frontal, provido de proteção contra pó e respingos d'água, próprio para instalação abrigada, basicamente composta por:

- 01 (um) multimedidor;
- 03 (três) TC's para alentar o multimedidor com informações de corrente;
- Barramento de cobre para instalação dos três TC's;
- Chave liga / desliga do painel;
- Chave liga / desliga do motor elétrico;
- 02 (dois) contatores para inversão do sentido de rotação do motor elétrico trifásico CA;
- 02 (dois) contatores para acionar o motor CC de fechamento de emergência;
- Regulador de velocidade tipo PLC;
- Placa eletrônica transdutora da frequência do gerador para 0–5 que fornece informações ao PLC;
- Placa eletrônica operando como retificador/carregador automático de baterias tipo *flyback*;
- 02 (duas) baterias de lítio 12 e 25 A;
- Disjuntor termomagnético para desligar a excitação do gerador na partida da turbina;
- Disjuntor termomagnético de linha.

A seguir, na Figura 30, é possível verificar o painel do regulador de velocidade com os equipamentos instalados:

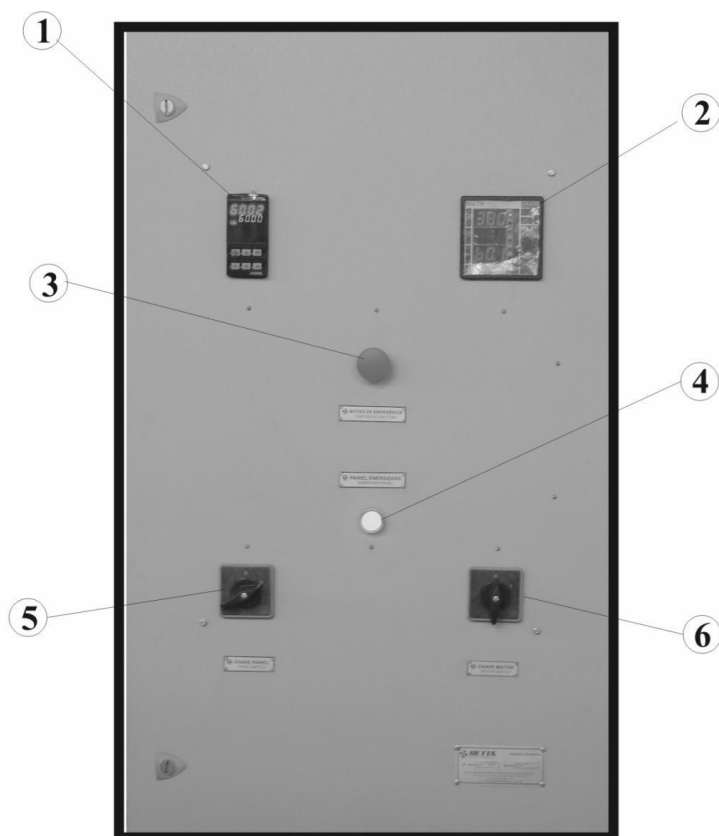


Figura 30 – Painel do Regulador Automático de Velocidade
Fonte: BETTA HIDROTURBINAS (2015).

Onde:

- 1 – CLP (Controlador Lógico Programável);
- 2 – Multímetro;
- 3 – Botão de emergência;
- 4 – Luz de aviso;
- 5 – Chave painel;
- 6 – Chave motor.

3.4 MULTIPLICAÇÃO DE VELOCIDADE

A velocidade de rotação corresponde ao número de polos do gerador, se a unidade possui multiplicador de velocidade, a velocidade de rotação calculada para a turbina deve ser mantida. O multiplicador de rotação faz a correção para a velocidade síncrona a ser utilizada pelo gerador, que aumentará seu valor, normalmente, para 900 rpm, 1200 rpm ou 1800 rpm (ELETROBRÁS, 2000).

A multiplicação é realizada para ambas as turbinas por engrenagens montadas em caixa com lubrificação a óleo e tem as seguintes características técnicas:

- Relação de multiplicação 4:1 para turbina Banki;
- Relação de multiplicação 2:1 para turbina Francis;
- Refrigeração e lubrificação forçada.

3.5 DIMENSIONAMENTO DA POTÊNCIA DO GERADOR

A potência de saída do gerador, considerando o seu rendimento de 88%, fator de potência 0,8 (BETTA HIDROTURBINAS, 2015) e turbinas com rendimento máximo, foi calculada utilizando a equação 5 demonstrada nos capítulos anteriores. A Tabela 12 mostra a potência de saída do gerador obtida para as três localizações.

Tabela 12 – Potência de saída dos geradores

Localizações	Potência de saída do gerador utilizando turbina Francis (kW)	Potência de saída do gerador utilizando turbina Banki (kW)
1	58,32	56,27
2	64,73	62,45
3	61,45	59,21

Fonte: Aatoria Própria.

Segundo BETTA HIDROTURBINAS (2015), o gerador que se enquadra com os valores das potências obtidas para a unidade geradora em conjunto com ambas as turbinas para as três localizações é o gerador WEG modelo GTA252AIII de potência nominal na saída de 65 kW do tipo industrial.

3.5.1 Características do Equipamento

A Tabela 13, apresentada a seguir, demonstra as características do gerador síncrono GTA252AIII:

Tabela 13 – Características do gerador síncrono GTA252AIII

Frequência (Hz)	60
Potência de saída do gerador	65 kW – (81,25 kVA)
Rotação nominal no eixo do gerador	1800 rpm
Nº de fases	3
Tensão de saída	220 / 380 V
Polaridade	04 polos
Classe de isolamento	H
Refrigeração	Autoventilado
Norma	IEC
Tipo de excitação	Brushless
Grau de proteção	IP21
Sentido de rotação	Ambos

Fonte: BETTA HIDROTURBINAS (2015).

A Figura 31 representa o modelo do gerador síncrono GTA252AIII.



Figura 31 – Gerador Síncrono WEG GTA252AIII
 Fonte: BETTAHIDROTURBINAS (2015).

3.6 SISTEMA DE PROTEÇÃO

A escolha do sistema de proteção da MCH de Rio Branco do Sul segue de acordo as normas e as especificações do livro “Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidroelétricas” (ELETROBRÁS, 2000).

A MCH de Rio Branco do Sul será operada de forma não assistida, isto é, ela será operada de forma automática sem nenhum operador na casa de força.

No caso de usinas automáticas ou semi-automáticas a inexistência de operadores torna necessário prover desligamento para a maioria das condições anormais de operação que impliquem em risco para a integridade da máquina, mesmo que em longo prazo, como no caso de sobrecarga (ELETROBRÁS, 2000).

O sistema de proteção deve constituir um sistema independente do sistema de controle digital e as proteções devem atuar diretamente, através de seus contatos de saída, sobre os disjuntores ou dispositivos de parada, de modo a garantir a parada da máquina sem necessidade do sistema de controle digital (ELETROBRÁS, 2000).

Caso ocorram defeitos de origem elétrica devem atuar sobre um relé auxiliar eletromecânico de bloqueio, função 86E, não permitindo que a máquina seja repostada em operação antes de ter sido inspecionada. Este relé deve efetuar a parada total da máquina com abertura imediata dos disjuntores geral e de campo (KINDERMANN,1999).

Os relés digitais possibilitam a utilização de transformadores de corrente com secundário de 5A ou 1A. Como o consumo desses relés é extremamente pequeno, a maior parcela de carga imposta aos transformadores de corrente é representada pelos cabos de interligação entre os transformadores de corrente e o relé. Sendo a carga imposta pelos cabos diretamente proporcional ao quadrado da corrente, fica evidente que a utilização de transformadores de corrente com secundário para 1A conduz os transformadores de corrente com menor potência, mais baratos (ELETROBRÁS, 2000).

Alguns relés digitais permitem o controle de abertura e fechamento de disjuntor, interfaces de entrada e saída com outros equipamentos, assim como personalização através de alteração na lógica de programação, possibilitando a implementação de comandos externos e intertravamentos para subestações simples, como as que ocorrem nas PCH (KINDERMANN,1999):

Para a proteção de geradores existem disponíveis relés multifunção, para máquinas de pequeno e grande porte. Para máquinas de médio porte, adota-se como solução a utilização de um relé multifunção básico, complementado por relés individuais para funções adicionais.

A seguir estão relacionadas às principais funções disponíveis nos relés de proteção digital para geradores que serão utilizados na MCH de Rio Branco do Sul (ELETROBRÁS, 2000).

3.6.1 Proteção contra motorização (32)

A tentativa de funcionar como motor pode ocorrer, por exemplo, quando há bloqueio da tomada d'água do gerador. Nestas ocasiões, o baixo fluxo de água na turbina pode ocasionar cavitação e conseqüentes danos. A utilização de proteção contra motorização é dada por meio de relé de reversão de potência e recomendável no caso de usinas não atendidas.

3.6.2 Relé de Sobrecorrente com restrição por tensão (51V)

Utilizado para melhorar a sensibilidade do disjuntor devido aos baixos valores de corrente durante curtos-circuitos na rede de distribuição distantes da usina.

3.6.3 Proteção contra falta para terra no estator (51GN) ou (59GN)

Proteção contra faltas para terra no estator está diretamente relacionada com o método de aterramento do neutro adotado. Para aterramento de baixa resistência com resistor no neutro a proteção é feita por relé de sobrecorrente (51GN). Para aterramento de alta resistência com resistor no neutro ou aterramento de alta impedância com transformador de distribuição a proteção é feita por relé de sobretensão (59GN).

3.6.4 Proteção contra sobrecarga (49)

A proteção contra sobrecarga pode ser realizada por meio de relés que estimam o comportamento térmico do gerador pela medição da corrente de carga (*imagem térmica*) ou por meio de detectores resistivos de temperatura embutidos nos pontos críticos do gerador.

Foram apresentados e recomendados vários tipos de relés de proteção tanto dos grupos turbina/gerador como de todo o sistema que se enquadra no projeto, a configuração adotada de proteção da MCH de Rio Branco do Sul é apresentada na Figura 32.

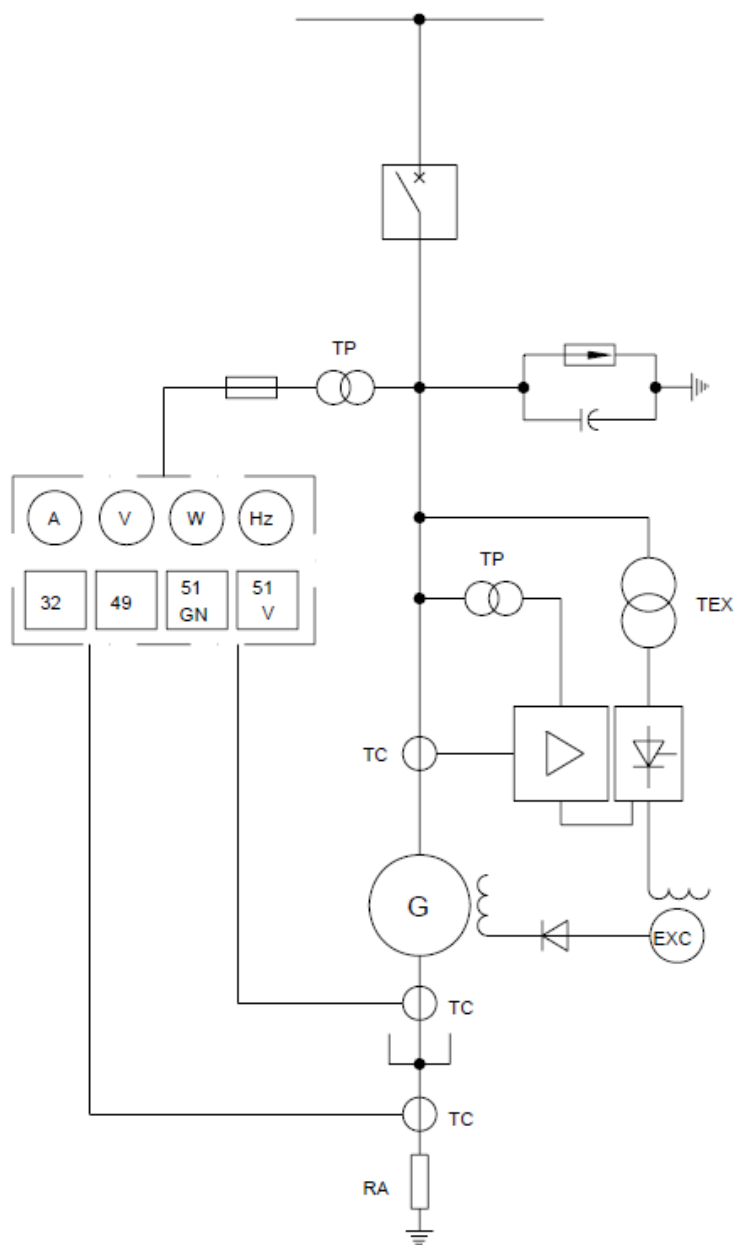


Figura 32 – Sistema de proteção - Usina não assistida - Gerador até 2MVA
Fonte: ELETROBRÁS (2000).

3.7 TRANSFORMADOR ELEVADOR

O dimensionamento do transformador será de acordo com o livro “Procedimentos para dimensionamento básico de micro e minicentrals hidrelétricas” (STANO JÚNIOR, 2008). No caso da MCH de Rio Branco do Sul, como a potência gerada não chegará a atingir 100 kW.

Segundo a NTC 905200 não se faz necessário à utilização de transformador elevador para conexão na rede, a conexão poderá ser feita através da baixa tensão devido à potência da usina ser inferior a 100 kW.

Faz-se por necessário a atualização de um transformador auxiliar, a tensão de alimentação dos auxiliares em corrente alternada deve ser compatível com o tamanho da usina e a potência das cargas a serem alimentadas.

O transformador auxiliar terá os seguintes valores de tensão de alimentação: 220/127 V 60 Hz e 75 kVA, sistema trifásico a quatro fios com neutro solidamente aterrado (STANO JÚNIOR, 2008).

Como o transformador auxiliar será instalado dentro da casa de força, deverá ser do tipo a seco, com isolamento sólido. Neste caso, deve ser utilizado transformador de boa procedência (STANO JÚNIOR, 2008).

O transformador tem 0,94 m de comprimento uma largura de 0,62 m e uma altura de 1,050 m.

As Figura 33 e 34 representam as dimensões do transformador elevador.

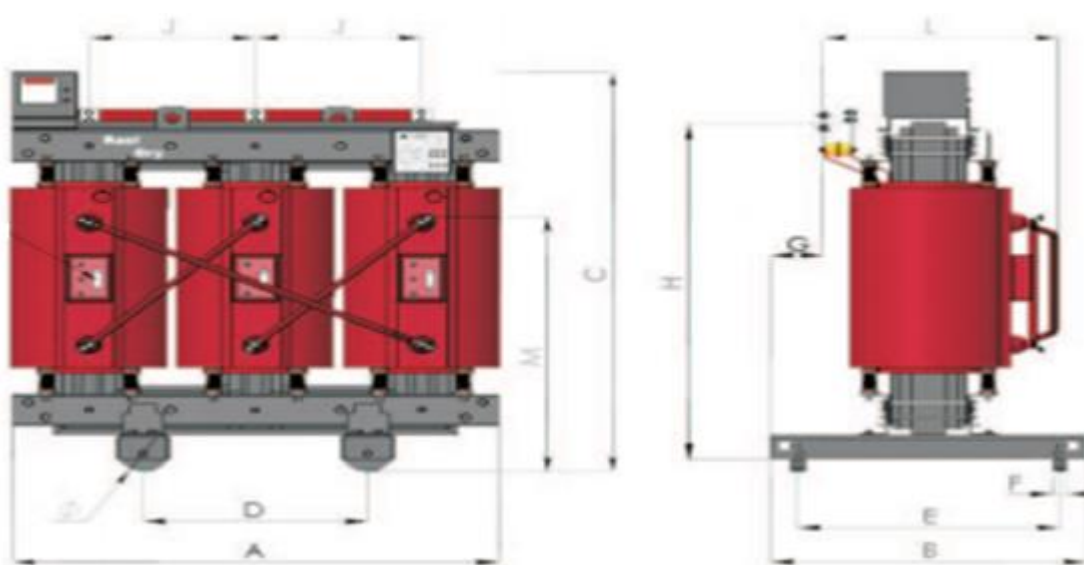


Figura 33 - Dimensões do transformador
Fonte: INDUSUL TRANSFORMADORES (2015).

Potência Nominal (kVA)		75	112,5	150	225	300	500	750	1000	1250	1500	2000	2500	3000
Dimensões (mm)	A máx	940	1000	1060	1150	1200	1350	1600	1650	1700	1800	1900	2000	2300
	B máx	620	620	620	620	760	760	1000	1000	1000	1150	1150	1150	1150
	C máx	1050	1150	1170	1350	1400	1450	1850	1900	1900	1950	2200	2450	2600
	D	520	520	520	520	520	670	670	670	870	870	1070	1070	1070
	E	520	520	520	520	620	620	800	800	800	970	970	970	970
	G	80	150	150	140	130	210	190	170	250	250	240	280	370
	H	855	930	940	1110	1200	1240	1400	1580	1680	1750	1930	2170	2300
	J	315	330	350	380	400	440	490	510	540	560	600	650	720
	L máx	480	540	560	580	590	620	670	700	700	740	770	800	900
	M	640	730	750	900	940	960	1050	1250	1320	1370	1550	1740	1900
	Ø x F	90x40	90x40	90x40	90x40	125x50	125x50	125x50	125x50	125x50	125x50	160x70	160x70	160x70
Massas (kg)		400	480	650	850	1000	1400	2100	2600	3100	4100	4700	5600	7300

Figura 34 – Dimensões do transformador
Fonte: INDUSUL TRANSFORMADORES (2015).

3.8 DIMENSIONAMENTO DA 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 35 e 36.

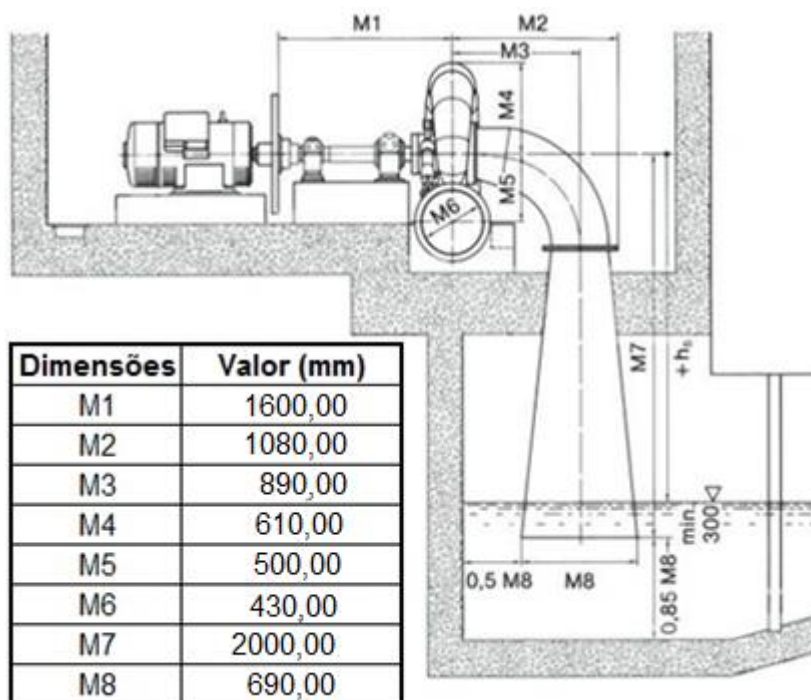


Figura 35 – Principais dimensões da turbina Francis Horizontal
Fonte: VOITH S.A.

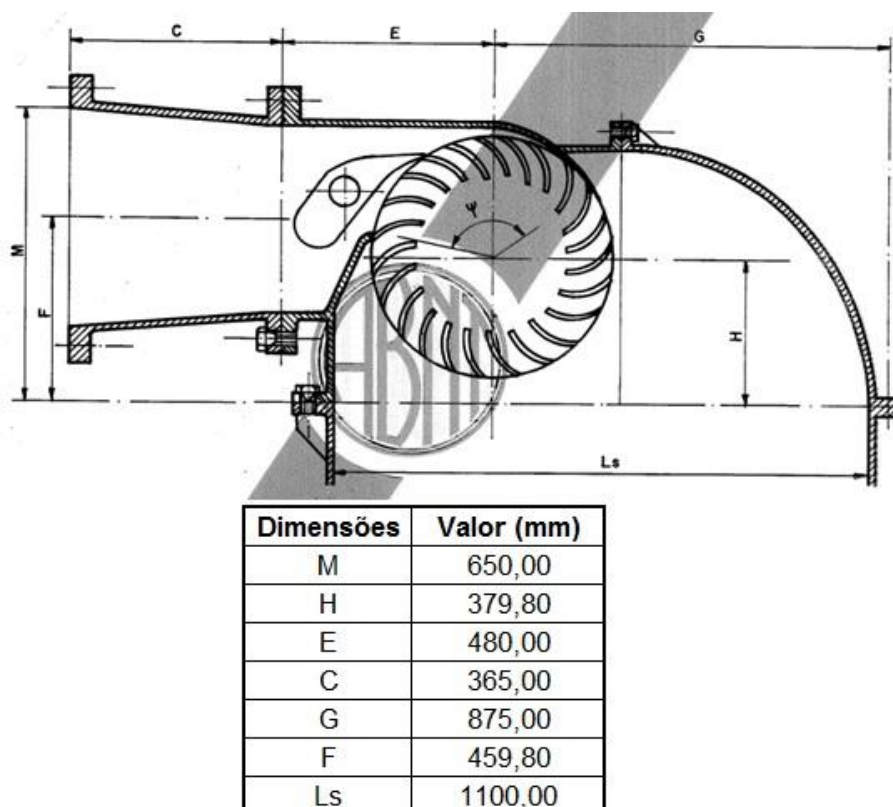


Figura 36 – Principais dimensões da turbina Michell-Banki
Fonte: NBR 12591 (1992).

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 11.

$$Dn = 0,3 \cdot H_{Liq}^{1/8} \cdot Q^{1/2} + \frac{1}{H_{Liq}} \quad (11)$$

Onde :

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

H_{Liq} = queda líquida nominal [m];

Q = descarga nominal [m^3/s]

Calculando :

$$Dn = 0,3 \cdot 18,4^{1/8} \cdot 0,430^{1/2} + \frac{1}{18,40}$$

$$Dn = 0,337 \text{ m}$$

O comprimento da casa de máquinas é dada pela equação (12).

$$C = 6,3 \cdot Dn + G_1 + 2,40 \quad (12)$$

Onde:

C = comprimento da casa de máquinas, em m;

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

G_1 = dimensão do gerador, fornecido pela Tabela 14

Tabela 14 – 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 14, podemos obter o tamanho do gerador através da potência.

$$C = 6,30,337 + 1,07 + 2,40$$

$$C = 5,5931 \text{ m}$$

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

$$C = 5,5931 * 2$$

$$C = 11,1862 \text{ m}$$

A largura da casa de máquinas é dada pela Equação

$$L = 3,40 \cdot D_n + 4,70$$

Onde:

L = largura da casa de máquinas, em m;

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

$$L = 3,40 \cdot 0,337 + 4,70$$

$$L = 5,84 \text{ m}$$

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 37 mostra o modelo 3D casa de força e a Figura 38 mostra a planta da casa de força.

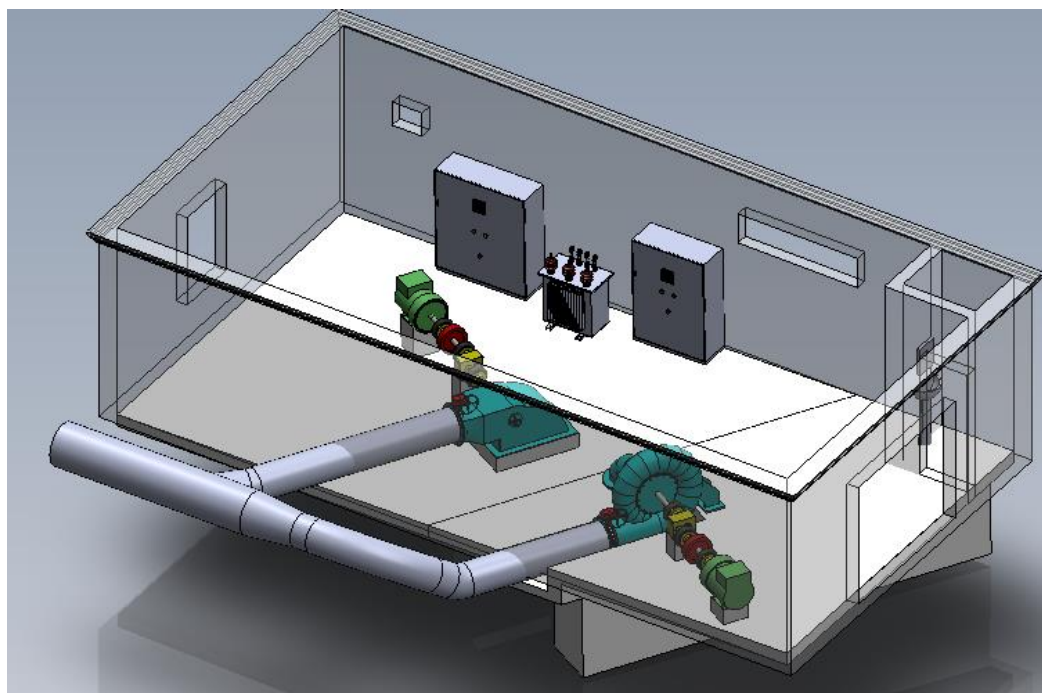


Figura 37 – Arranjo 3D da casa de máquinas
Fonte: Autoria Própria.

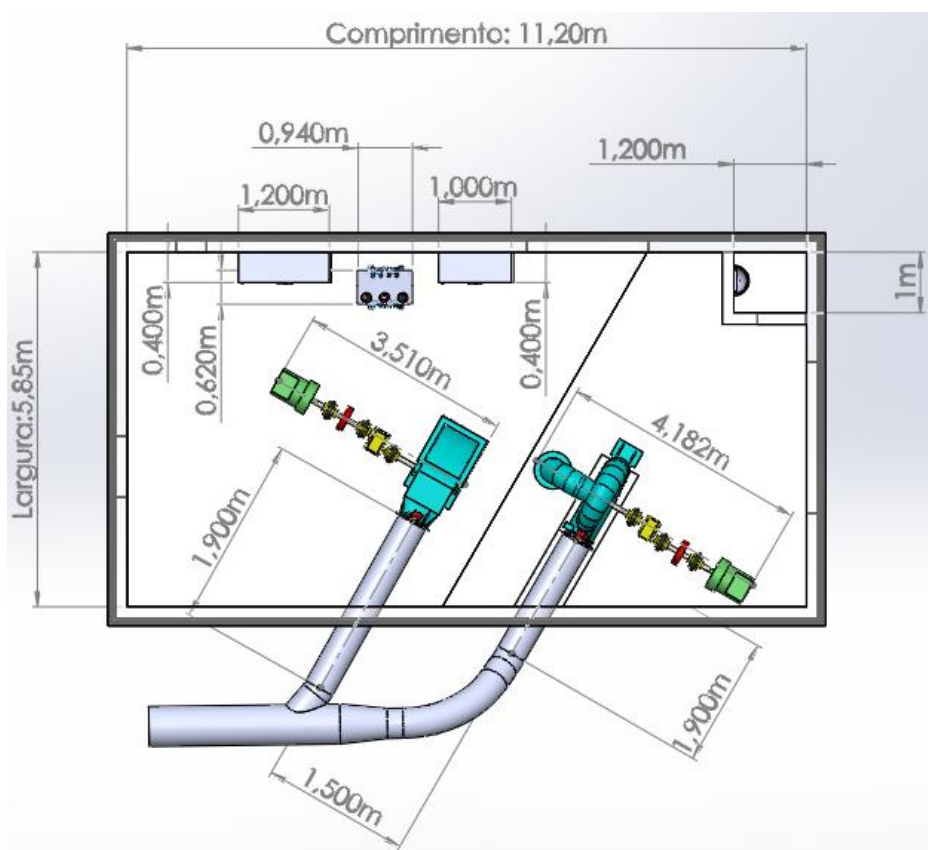


Figura 38 – Vista em planta da casa de máquinas
Fonte: Autoria Própria.

3.9 MATERIAL UTILIZADO NA CASA DE MÁQUINAS

Na construção da casa de máquinas da MCH de Rio Branco do Sul será construída de alvenaria de tijolos de acordo com o livro “Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidroelétricas” (Eletrobrás, 2000).

Nas fundações das máquinas deve-se utilizar o concreto, ao quais as máquinas como turbina, gerador e regulador de velocidade devem ser fixadas através de chumbadores (ALVES, 2007).

Não se faz necessária a construção de forro. O telhado será feito com telhas de barro devido ao fato de isolamento térmico (ALVES, 2007).

As janelas devem ser envidraçadas e permitir boa ventilação. As portas e janelas podem ser de madeira ou aço está escolha fica de acordo com o proprietário (STANO JÚNIOR, 2008, p 9.22).

É recomendável colocar telas de malhas adequadas nas portas, janelas, na abertura do canal de fuga para impedir a entrada de pássaros, morcegos e outros animais. O piso pode ser de cimento desempenado ou queimado, ou recoberto com cerâmica ou azulejos (STANO JÚNIOR, 2008, p 9.22).

3.10 DIMENSIONAMENTO DO CANAL DE FUGA.

Para o dimensionamento do canal de fuga da MCH de Rio Branco do Sul, levou-se em consideração as dimensões do tubo de sucção da turbina Francis. Segundo GOMES (2010), a turbina Banki, não é necessário utilizar tubo de sucção, porem o nível da soleira deve garantir um colchão de água com profundidade suficiente para sua proteção do fundo do canal contra erosão.

As dimensões do canal de fuga foram calculadas pelas Equações 7, 8 e 9. Os resultados estão representados na Tabela 15. Lembrando que o valor de S1 é fornecido pelo fabricante da turbina.

Tabela 15 – Dimensões do canal de fuga

S1	0,300 m
S2	0,600 m
S3	0,900 m
S4	2,320 m

Fonte: Aatoria própria.

Onde:

S1 – Valor mínimo de afogamento do tubo de sucção fornecido pelo fabricante.

S2 – Cota entre o nível de jusante e o nível do canal de fuga.

S3 – Profundidade.

S4 – Largura do canal de fuga.

As Figura 39 e 40 representam respectivamente a vista frontal e inferior do canal de fuga. O comprimento levou-se em consideração as dimensões das duas turbinas, chegando no resultado de 3 metros.

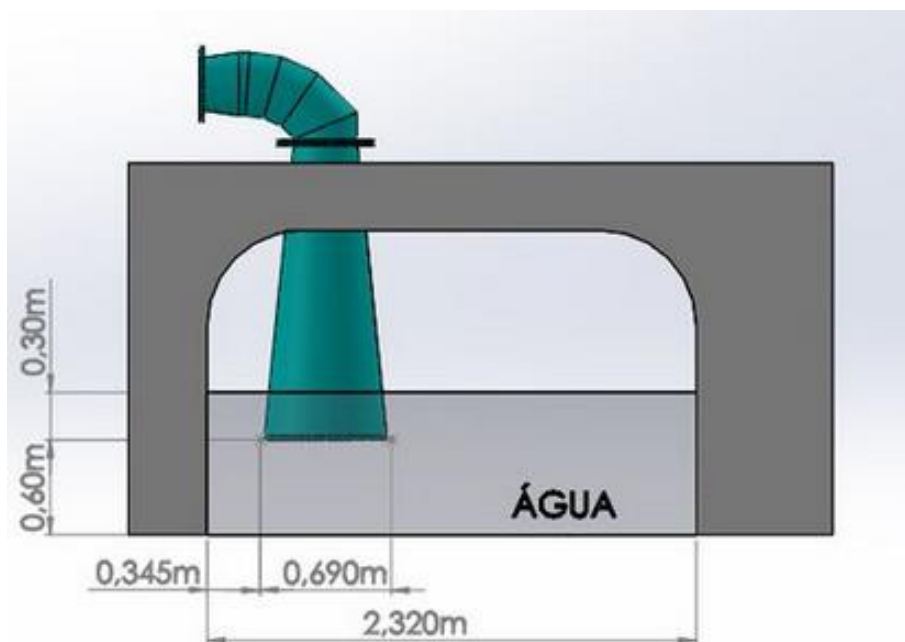


Figura 39 – Vista frontal do canal de fuga

Fonte: Autoria Própria.

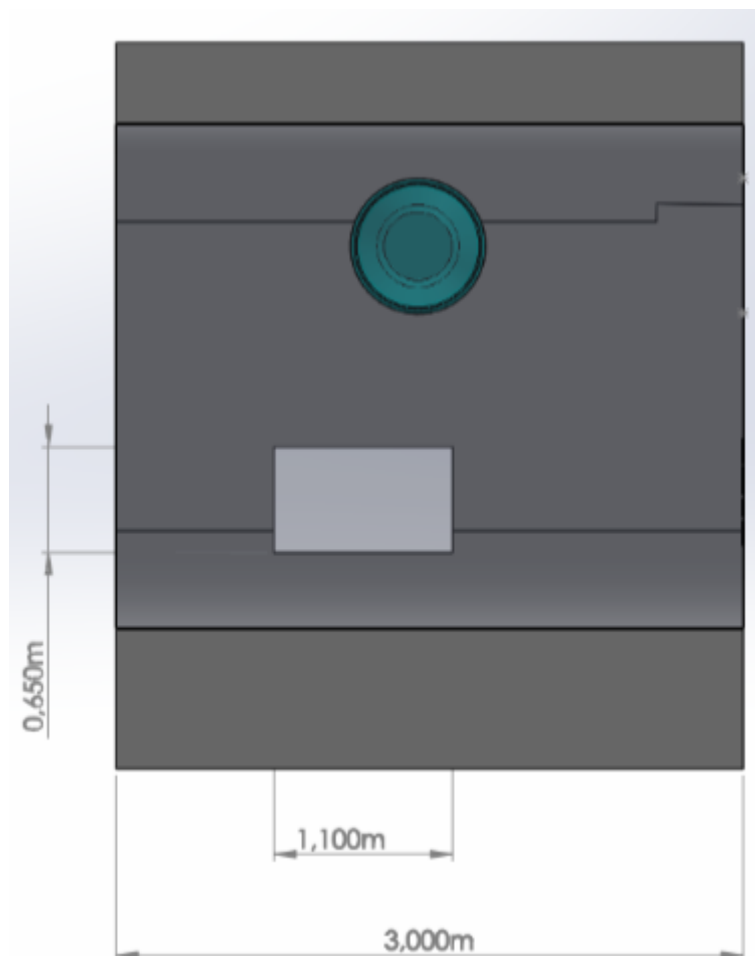


Figura 40 – Vista Inferior do canal de adução
Fonte: Autoria Propria.

Com a finalidade de evitar erosão tanto no fundo do canal quanto nas paredes laterais, devido à velocidade que a água pode apresentar na saída da turbina é e recomendado que as pedras de revestimento devam ser rejuntadas com argamassa de cimento e areia, na proporção 1:3 (ELETROBRÁS, 2000).

A manutenção dos níveis de água na saída do tubo de sucção pode requerer a colocação de uma soleira afogadora no final do canal de fuga. Para tanto, Alves (2007) recomenda que para pequenas quedas o canal de fuga seja o mais curto possível, assim serão menores os custos e os inconvenientes de limpeza; para quedas mais altas a soleira deve localizar-se na parte mais larga do canal de fuga e dispor-se de modo a proteger o canal de fuga contra a entrada de material sólido.

3.11 ESTUDO DAS POSSÍVEIS LOCALIZAÇÕES DA CASA DE MÁQUINAS

Analisando as características topográficas da MCH de Rio Branco do Sul fornecidas pelo trabalho realizado por Coelho e Xavier (2015), foi possível realizar o estudo de campo de três localizações para a implantação da casa de máquinas, no intuito de comparar qual das três localizações proporcionará melhor potência e viabilidade técnica.

Com as três posições definidas, foram realizados os cálculos das potências geradas para determinar quais dispositivos eletromecânicos melhor se adaptam para estudo.

3.11.1 Primeira Localização Da Casa De Máquinas

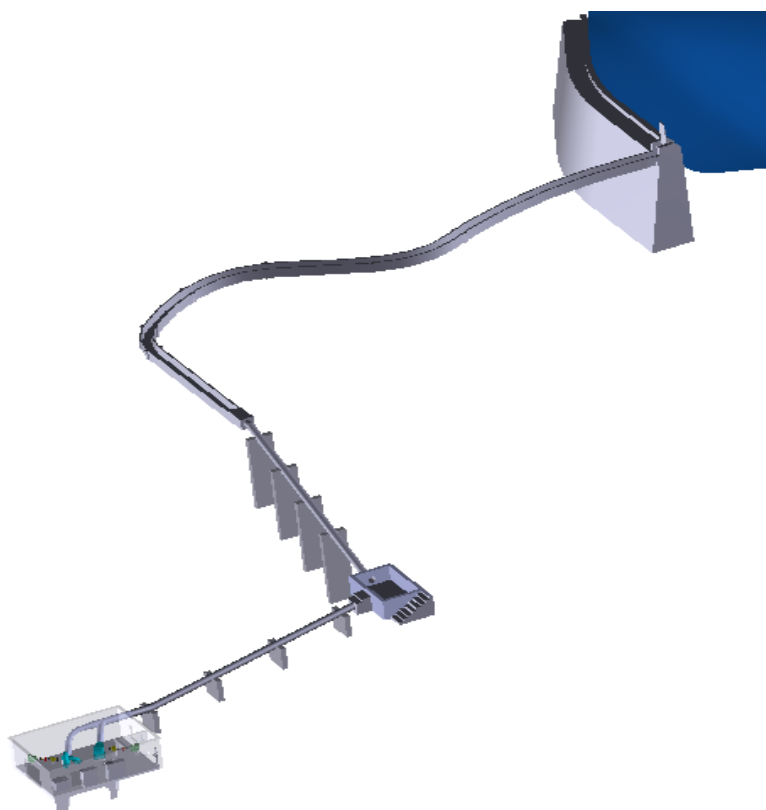


Figura 41 – Primeira localização da casa de máquinas
Fonte: Autoria Própria (2015).

A Figura 41, demonstra a antiga localização da casa de máquinas. A câmara de carga encontra-se no barranco interligada com o canal de adução por

uma tubulação de baixa pressão. Os valores referentes a distância da câmara de carga até a casa de máquinas estão representadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Medidas da antiga localização da casa de máquina

Distancia Horizontal	46,612 m
Distancia Vertical	18,480 m
Inclinação	49,531 m
A	19,761°

Fonte: COELHO E XAVIER (2015).

Com as dimensões citadas na Tabela 16, foi calculado a potência gerada na saída do gerador para a localização 1 demonstrado na Tabela 17.

Tabela 17 - Potencia gerada Localização 1

Potência de saída do gerador utilizando turbina Francis (kW)	Potência de saída do gerador utilizando turbina Banki (kW)
58,32	56,27

Fonte: Aatoria própria.

A vantagem da construção da casa de máquinas nesta posição é o reaproveitamento da construção do canal de fuga já existente demonstrado na Figura 42. A desvantagem é o local onde situa-se a câmara de carga, além de difícil acesso para a construção, o solo está sofrendo erosões constantes e conseqüentemente pode causar o desmoronamento da câmara de carga.



Figura 42 – Canal de fuga existente.
Fonte: Autoria própria.

3.11.2 Segunda Localização da Casa de Máquinas

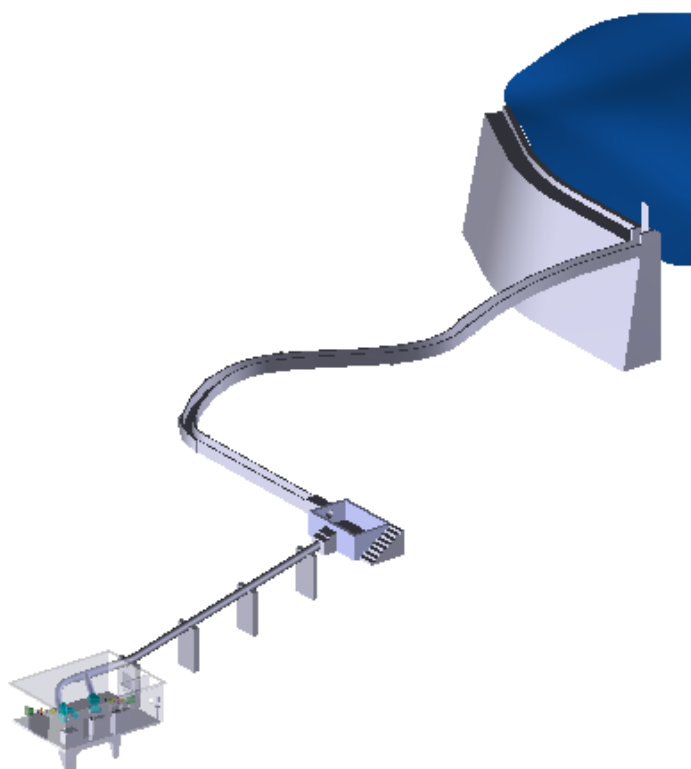


Figura 43 – Segunda Localização da casa de máquinas.
Fonte: Autoria Própria

A Figura 43 representa à segunda localização da casa de máquinas, nesta situação a câmara de carga está localizada no fim do canal de adução sem a necessidade de construção de uma tubulação de baixa pressão, e em uma área plana. Os valores referentes a distância da câmara de carga até a casa de máquinas estão representas na Tabela 18 - Medidas da segunda localização da casa de máquina..

Tabela 18 - Medidas da segunda localização da casa de máquina.

Distancia Horizontal	27,960 m
Distancia Vertical	20,51 m
Inclinação	33,033 m
A	29,485°

Fonte: COELHO E XAVIER (2015)

Com as dimensões mencionadas na Tabela 18, calculou-se a potência gerada na saída do gerador para a localização 2 demonstrado na Tabela 19.

Tabela 19 - Potencia gerada Localização 2

Potência de saída do gerador utilizando turbina Francis (kW)	Potência de saída do gerador utilizando turbina Banki (kW)
64,73	65,42

Fonte: Autoria própria.

As desvantagens desta localização para a construção da casa de máquinas é que serão necessários o preparo do terreno para fundação e o difícil acesso para a construção da câmara de carga. A vantagem é que o local é de fácil acesso para os veículos utilizados na construção. A Figura 44 demonstra a situação do local para a implantação. Nesta localização será necessário o rebaixamento do rio para obter o valor da queda líquida citada na tabela 5



Figura 44 - Segunda localização para a construção da casa de máquinas
Fonte: Autoria Própria.

3.11.3 Terceira Localização da Casa de Máquinas.

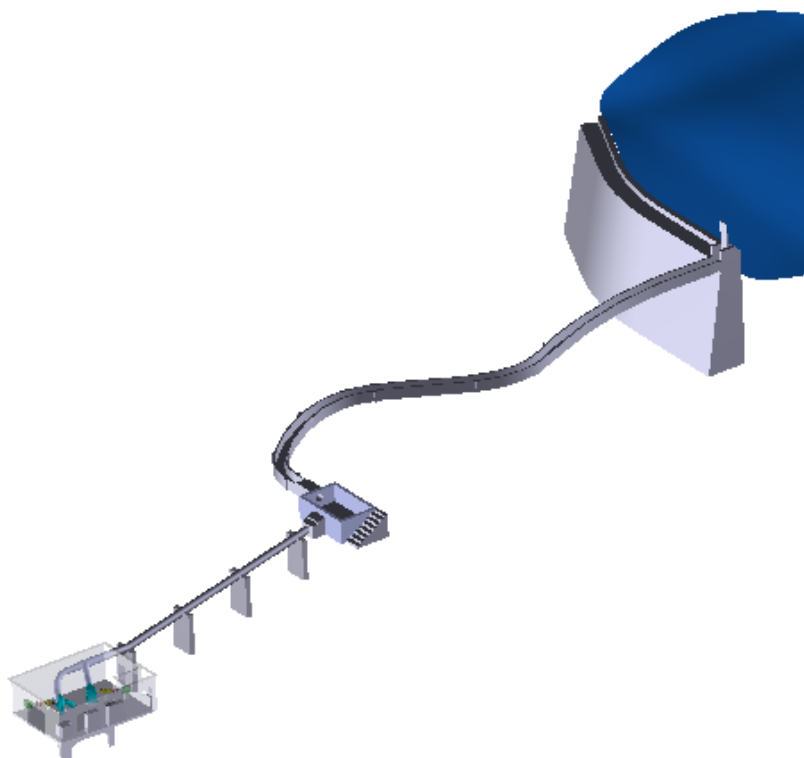


Figura 45 - Terceira localização da casa de máquinas
Fonte: Autoria Própria (2015).

A Figura 45 retrata a terceira localização da casa de máquinas. A câmara de carga está situada em uma área plana, em que se encontra o canal de adução já destruído por erosão do barranco acima. Os valores referentes a distância da câmara de carga até a casa de máquinas estão representas na Tabela 20.

Tabela 20 – Medidas da segunda localização da casa de máquinas

Distancia Horizontal	26,460 m
Distancia Vertical	19,470 m
Inclinação	31,167 m
A	31,901°

Fonte: COELHO E XAVIER (2015).

Com as dimensões mencionadas na Tabela 20, calculou-se a potência gerada na saída do gerador para a terceira localização, conforme demonstrado na Tabela 21.

Tabela 21 – Potência gerada localização 3

Potência de saída do gerador utilizando turbina Francis (kW)	Potência de saída do gerador utilizando turbina Banki (kW)
61,45	59,29

Fonte: Aatoria própria.

As desvantagens desta localização para a construção da casa de máquinas é que serão necessários o preparo do terreno para fundação. Nesta localização será necessário o rebaixamento do rio para obter o valor da queda líquida citada na tabela 5. A vantagem é que o local é de fácil acesso para os veículos utilizados em construção. A Figura 46 demonstra a situação do local para a implantação.



Figura 46 - Terceira localização para a construção da casa de máquinas
Fonte: Autoria Própria.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho contribuiu para fixar e realizar em um projeto real os conhecimentos obtidos durante o curso de graduação. Seguiu-se como objetivo estudar a melhor localização da casa de máquinas da MCH de Rio Branco do Sul.

Os objetivos propostos foram alcançados. A princípio foi definido que serão utilizadas duas turbinas, uma delas Banki de potência nominal 69,20 kW e a outra Francis de potências nominal 70 kW. As turbinas foram escolhidas preliminarmente com análise da curva entre a queda líquida e a vazão máxima, porém não irão operar ao mesmo tempo. A partir da escolha das turbinas e das suas respectivas potências hidráulica, foi possível adotar o gerador com potência nominal de 65 kW e o transformador elevador de 75 kVA.

Com o conjunto turbina gerador devidamente dimensionado, definiu-se que a área da casa de máquinas será de 65 m². O material escolhido para a construção é alvenaria com telhado utilizando telhas de barro devido ao isolamento térmico.

Após obter todos estes dados, realizamos o estudo para a melhor localização da casa de máquinas. A melhor localização para implantação da casa de máquinas é a segunda, pois obteve uma grande viabilidade técnica devido ao fato de não ser necessário a utilização de tubos de baixa pressão para transportar a água do canal de adução até a câmara de carga. Esta localização obteve o maior potencial energético. Na saída do conjunto turbina - gerador Banki com vazão máxima obteve uma potência de 62,45 kW, e a saída do conjunto turbina - gerador Francis com vazão máxima obteve uma potência de 64,74 kW.

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.

Como sugestão de trabalhos futuros recomendasse fazer o estudo sobre a viabilidade econômica de implantação da MCH de Rio Branco do Sul e também fazer um estudo sobre a capacidade econômica da comercialização da energia elétrica desta MCH, dando continuidade a informações obtidas deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5110**: Máquinas Elétricas Girantes – Classificação dos Métodos de Resfriamento. Rio de Janeiro, 1977.

_____. **NBR 12591**: Dimensões Principais de Turbinas Hidráulicas para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH). Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5117**: Máquinas Síncronas – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5356**: Transformador de Potência – Especificação.. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NTC 905200**: Acesso de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema da Copel - Especificação..Curitiba, Agosto de 2014.

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: 28/05/2014.

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.

ANEEL. Agencia Nacional de Energia Eletrica. Resolucao n.º 395, de 04 de dezembro de 1998.Disponivel em:<<http://www.aeel.gov.br/cedoc/RES1998395.PDF>> Acesso em 26 junho 2014.

AZEVEDO NETTO, J. M. Manual de hidráulica, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo.COZ, F.; Sanches, T.; e outros; **Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas** – Uma Guia para el Desarrollo de Proyectos; Intermediate Technology Development Group – ITDG, Peru, 1995.

BARBIERI, Alex. **Projeto de uma Micro Central Hidrelétrica para uma Propriedade Rural**. 109 f. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC (Bacharelado em Engenharia Agrícola). Curso de Engenharia Agrícola, Centro Universitário Luterano de Palmas, CEULP/ULBRA, 2005.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2013: Ano base 2012/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, 1999.

BELUCO, Alexandre. **Viabilidade de microcentrais hidrelétricas baseadas no emprego de equipamentos de mercado**. Tese (Mestrado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

BETTA HIDROTURBINAS INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **Micro Central Hidrelétrica Betta: Um Destino Inteligente para a Água que Corre em sua Propriedade**. Catálogo de equipamentos. Franca, 2015.

BRAY INTERNATIONAL INC. Disponível em: <<http://www.bray.com.br/arquivos/pdf/140-serie-31h-e-36h.pdf>>. Acesso em: 10 de Maio de 2015.

COELHO, Felipe D; XAVIER, Jorge A. **Revitalização da Camara de Carga e do Conduto Forçado da Usina Hidrelétrica de Rio Branco do Sul**. 2015. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

ELETROBRÁS, **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**, Ministério das Minas e Energia, Brasília, DF, 2000.

ELETROBRÁS - DNAEE, **Manual de Microcentrais Hidrelétricas**, Ministério das Minas e Energia, Brasília, DF, 1985.

ESCELSA. **História da Energia Elétrica no Brasil**. Disponível em <http://www.edpescelsa.com.br/aescelsa/historia-ee-brasil.asp>> Acesso em 15/01/2015.

FERRARI, Jason T. **Análise do panorama regulatório nacional visando a inserção das mini e microcentrais hidrelétricas no mercado de energia**. 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Programa de Mestrado em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

FURCHI, Sérgio Augusto L. **Metodologia para avaliação de custos de implantação de uma microcentral hidrelétrica. Mestrado (Energia na agricultura)** - UNESP - Botucatu, Botucatu, 2000.

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

GUIMARÃES. L. B.; ROCHA. J. P. C de A. **Sistemática de cálculo para a determinação do custo do kW instalado dos componentes hidromecânicos e elétricos de micro usinas hidrelétricas.** Curitiba, 1983.

GUITARRARA, Gabriel Bozzola. **Estimativa de vazão para a implantação de micro-centrais hidrelétricas com utilização do SIG.** 37p. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC (Bacharelado em Engenharia Elétrica). Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação, Universidade de São Paulo. 2012.

GUTSTEIN, D. **Projeto de Estruturas de Barragens de Gravidade de Concreto por meio de Métodos Computacionais: Visão Geral e Metodologia.** 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

HENN, Érico A. L. **Máquinas de fluídos** - 2^oed. Santa Maria: UFSM, 2006.

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

INDUSUL TRANSFORMADORES. Disponível em:
<<http://www.indusul.com/transformadores>> Acesso em: 04 de Junho de 2015.

ITAIPU. **Nossa História.** Disponível em <<http://www.itaipu.gov.br/nossahistoria>> Acesso em 11/01/2015.

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.** 1^o volumes. Editora UFSC, 1999.

LIMA, B. W. F. Trabalho de Conclusão de Curso. **Centrais Hidrelétricas de Pequeno Porte e o Programa Brasileiro de PCHs.** UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. Engenharia de Controle e Automação. Campinas – SP, Brasil, 2009.

MARQUES FILHO, J. **Patologia em Barragens**. São Paulo. Aula proferida para o curso de pós-graduação do instituto IDD. 2012.

MELLO, Antônio. **CAPÍTULO 3 - Tipos de turbinas hidráulicas aplicadas às pequenas, mini e microcentrais hidráulicas**. Disponível em <http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas%20Hidr%E1ulicas/CAP%C3%94TULO%203REV.htm> > Acesso em 27/01/2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, Eletrobrás. **Plano Nacional de Energia Elétrica 1987-2010 (PNEE, 2010)** Eletrobrás, Rio de Janeiro. 2010.

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

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

NOVAK P.; MOFFAT, A.I.B.; NALLURI C.; NARAYANAN R. **Hydraulic Structures**. 3rd. ed. London: Spon Press, 2004.

ROBERSON. John A. **Hydraulic engineering**. New York: J. Wiley & Sons, p. 404-405. 1985.

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**. 2015. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SCHREIBER, Gerhard P. **Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Edgard Blücher, 1977.

SKROTZKI. Bernhardt G. A.; VOPAT. William A. **Power Station engineering and economy**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1996. p. 511-512.

SOUZA, Antonio Carlos Caetano. **Assessment and Statistic of Brazilian Hydroelectric Power Plants: dam áreas versus installed and firm power Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2008. 12, 1843 – 1863.

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, Z.; Santos, A.H.M.; Bortoni; E.C.; “**Centrais Hidrelétricas – Estudos para implantação**”. Editora da Eletrobrás, 1999.

STAHLHOEFER, Marcelo. **Estudo Econômico para Reopontencialização da Micro Central Hidrelétrica de Roncador**. 2013. 100f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

STANO, Ângelo; VIANA, Augusto Nelson Carvalho. **CursoPCHs**. Campinas: AGRENER, 2002.

STANO JÚNIOR, A. et al. **Procedimentos para dimensionamento básico de micro e minicentrais hidrelétricas**. Brasília: CERPCH, 2008.

TUCCI, C. E. M.; **Hidrologia: Ciência e Aplicação, Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, Porto Alegre, 1997.

UNO, Victor H.A.B. **Estudo para implantação de turbina de fluxo cruzado tipo Michel-Banki na Micro Central Hidrelétrica Roncador**. 2012. 84f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

VARLET. Henri. **Aménagement utilisation et prix de revient: des usines hydrauliques**. Paris: Éditions Eyrolles, 1958.

VIANNA, A., Vieira, L. S. R., Nascimento, M. V. G., **Manual de aplicação de sistemas descentralizados de geração de energia elétrica para projetos de eletrificação rural – pequenas centrais hidrelétricas – PCHs**, 2000.

VIANA, Fabiana Gama. **Microcentrais Hidrelétricas: Alternativa às comunidades rurais isoladas**. São Paulo, 02 set. 2004. Disponível em: <
<http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CBPE2004/Artigos/MICROCENTR>

AIS%20HIDREL%20CENTRICAS%20-
%20ALTERNATIVA%20%20COS%20COMUNIDADES%20RU.pdf>. Acesso em: 30
jun. 2014.

VIEJO, Zubicaray; MANUEL, Alonso; PALACIOS, Pedro. **Energía hidroeléctrica:**
turbinas y plantas generadoras. México: Editorial Limusa, 1977. p. 222.

VOITH HYDRO S.A. Disponível em: < <http://www.voith.com/br/o-grupo/organizacao/divisoas-do-grupo/voith-hydro-106.html> >. Acesso em: 30 de Abril de 2015.