

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

GUILHERME PAWLAK MUNHOZ
THIAGO MARQUES

**ESTUDO DE TURBINA PARA IMPLANTAÇÃO EM UMA CENTRAL
HIDRELÉTRICA.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2015

GUILHERME PAWLAK MUNHOZ
THIAGO MARQUES

**ESTUDO DE TURBINA PARA IMPLANTAÇÃO EM UMA CENTRAL
HIDRELÉTRICA.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado 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 obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Manoel Alves

CURITIBA
2015

GUILHERME PAWLAK MUNHOZ
THIAGO MARQUES

ESTUDO DE TURBINA PARA IMPLANTAÇÃO EM UMA CENTRAL HIDRELÉTRICA

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 Industrial Elétrica ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 12 de fevereiro de 2015.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Industrial Elétrica ênfase Eletrotécnica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Ma.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Industrial Elétrica ênfase Eletrotécnica do DAELT

ORIENTAÇÃO

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

BANCA EXAMINADORA

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Ma.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

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

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradecemos ao professor Doutor Gilberto Manoel Alves pela orientação e apoio na realização dos estudos deste trabalho.

Agradecemos também à todos os professores e funcionários da UTFPR que, com seu profissionalismo e esforço, nos proporcionaram uma educação e conhecimentos satisfatórios para idealização deste projeto.

Em especial, dedicamos aos nossos familiares e colegas que contribuíram com apoio e foram compreensíveis nos nossos momentos de ausência e sempre incentivaram para que atingíssemos nossos objetivos.

Por fim, à todos que indiretamente colaboraram com a elaboração desse trabalho e principalmente a Nosso Criador Deus, que sem ele, nada disso seria possível.

RESUMO

MARQUES, Thiago; MUNHOZ, Guilherme P. **ESTUDO DE TURBINA PARA IMPLANTAÇÃO EM UMA CENTRAL HIDRELÉTRICA**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

Em outubro de 2013, O proprietário da área onde existia a antiga Usina Siderúrgia Marumby Ltda – Usimar, no Município de Rio Branco do Sul/PR, mostrou interesse em revitalizar a usina hidrelétrica localizada em sua propriedade. De posse da liberação do aproveitamento de potencial hidroelétrico pelo Águas Paraná – Instituto das Águas do Paraná, o proprietário procurou um grupo de alunos para avaliar a viabilidade de gerar energia com a antiga usina, localizada no rio Rancharia. O trabalho apresentado trata dos estudos sobre as turbinas hidráulicas que serão aplicadas na hidrelétrica: Francis, Pelton, Kaplan e Banki. Será exposto o histórico das turbinas, suas funcionalidades de forma objetiva e as capacidades de geração de energia elétrica baseada em dados hidrológicos levantados em estudos prévios. Esse estudo, além do benefício didático à UTFPR e seus alunos, por poderem aliar prática e teoria, proverá à região da hidrelétrica de Rio Branco do Sul revitalização e desenvolvimento, haja vista que está completamente abandonada e sem proveito. Foi verificado que todas as turbinas podem ser utilizadas na implantação da Usina Hidrelétrica Rancharia. Porém, pela baixa vazão de projeto encontrada, possivelmente será inviável a reativação da usina.

Palavras-Chave: Rio Branco do Sul. Hidrelétrica. Turbinas. Usina Didática.

ABSTRACT

MARQUES, Thiago; MUNHOZ, Guilherme P. **STUDY OF TURBINE FOR IMPLEMENTATION AT A HYDROELECTRIC POWER PLANT.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

In October 2013, The owner of the area where there was the old Steel Plant Marumby Ltda - Usimar in City-Rio Branco do Sul/PR, demonstrated interest in revitalizing the hydroelectric plant located on his property. Having the release of potential hydroelectric use by the Águas Paraná – Instituto das Águas do Paraná, the owner sought a group of students to assess the feasibility of generating energy on the old mill located on the river Rancharia. The presented work deals with the study of water turbines that will be applied in hydropower: Francis, Pelton, Kaplan and Banki. Will be exposed the history of turbines, their functionality objectively and capabilities of power generation based on hydrological data collected in previous studies. This study, while the educational benefit to UTFPR and his students because they can combine theory and practice, will provide the region of Rio Branco do Sul hydroelectric revitalization and development , given that it is completely abandoned and unprofitable. It was found that all the turbines can be used in the implementation of the hydroelectric plant Ranchi. However, the low flow design found possibly be unfeasible to reactivate the plant.

Keywords: Rio Branco do Sul. Hydroelectric Plant. Turbines. Didactic power plant.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Velocidade de rotação da turbina	43
Equação 2 – Número de cavitação de Thoma.....	47
Equação 3 – Equação de Graeser	47
Equação 4 – Intervalo considerando a altura bruta e líquida	48
Equação 5 – Vazão Média Turbinada para as Permanências P0 e P1.....	54
Equação 6 – Vazão Média Turbinada para as Permanências P0 e P2 (A).....	55
Equação 7 – Acréscimo de Área Sob a Curva e a Área Anterior.....	55
Equação 8 – Vazão Média Turbinada para as Permanências P0 e P2 (B).....	56
Equação 9 – Vazão Média Turbinada – Equação Genérica (A).....	56
Equação 10 – Vazão Média Turbinada – Equação Genérica (B).....	57
Equação 11 – Potência bruta.....	61
Equação 12 – Potência absorvida.....	61
Equação 13 – Rendimento da turbina.....	62
Equação 14 – Potência entregue pelo eixo da turbina.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	13
Figura 2 – Circuito hidráulico.....	22
Figura 3 – Turbina Francis convencional.....	32
Figura 4 – Turbina Pelton.....	36
Figura 5 – Patente Original Pelton.....	36
Figura 6 – Tipos de Turbinas Kaplan "S".....	38
Figura 7 – Turbina tipo Bulbo.....	39
Figura 8 – Turbina de Fluxo Cruzado.....	41
Figura 9 – Localização Geográfica do Município de Rio Branco do Sul.....	49
Figura 10 – Canal de adução Usina Rancharia.....	50
Figura 11 – Barragem da Usina Rancharia.....	51
Figura 12 – Fluviograma do Rio Rancharia.....	52
Figura 13 – Curva de Permanência da Usina do rio Rancharia.....	53
Figura 14 – Curva de permanência exemplo de construção da curva de energia..	54
Figura 15 – Curva de Energia da Usina do Rio Rancharia.....	59
Figura 16 – Volume aproveitável conforme vazão de projeto.....	60
Figura 17 – Rendimento de turbinas com variação da vazão turbinada em relação à nominal mantendo queda líquida constante.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Campo típico de aplicação de turbinas hidráulicas.....	45
Gráfico 2 – Potência máxima entregue pelo eixo.....	66
Gráfico 3 – 80 % da potência máxima entregue pelo eixo.....	66
Gráfico 4 – 50 % da potência máxima entregue pelo eixo.....	67
Gráfico 5 – 30 % da potência máxima entregue pelo eixo.....	67

LISTA DE SÍMBOLOS

N_s	Velocidade de Rotação Síncrona.
f	Frequência da Rede.
p	Número de Polos do Gerador.
σ	Coefficiente empírico que depende da velocidade específica do rotor.
Hs	Altura de aspiração.
Hb	Altura topográfica do aproveitamento de reação.
HI	Altura física do tubo de aspiração.
B	Altura de coluna de água.
Q	Vazão.
QT1	Vazão média turbinada referente às permanências P0 e P1.
QT2	Vazão média turbinada referente às permanências P0 e P2.
QTn	Vazão média turbinada referente às permanências P0 e Pn.
QT(n-1)	Vazão média turbinada referente às permanências P0 e P(n-1).
QL0	Vazão instalada com a permanência P0.
QL1	Vazão instalada com a permanência P1.
QL2	Vazão instalada com a permanência P2.
QLn	Vazão instalada com a permanência Pn.
QL(n-1)	Vazão instalada com a permanência P(n-1).
P0	Permanência da vazão anterior.
P1	Permanência da vazão QL1.
P2	Permanência da vazão QL2.
Pn	Permanência da vazão QLn.
P(n-1)	Permanência da vazão QL(n-1).
Phb	Potência bruta.
ρ	Massa específica da água.
g	Aceleração da gravidade.
Hb	Altura de queda bruta.
Phl	Potência absorvida.
HI	Altura de queda útil ou líquida
Pe	Potência de eixo.
η_t	Rendimento da turbina.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características e Limites das Centrais Hidrelétricas PCHs.....	19
Tabela 2 – Classificação das PCH quanto à potência e quanto à queda de projeto.....	20
Tabela 3 – Relação do número de polos e a rotação.....	43
Tabela 4 – Eficiência dos equipamentos.....	44
Tabela 5 – Relação entre pressão e temperatura.....	46
Tabela 6 – Cota Topográfica e Metros de Coluna de Água Correspondente.....	47
Tabela 7 – Valores relacionados da curva de permanência da Usina Rancharia.....	58
Tabela 8 – Valores de vazão média turbinada da Usina do Rio Rancharia	58
Tabela 9 – Rendimento das turbinas de acordo com a vazão turbinada.....	64
Tabela 10 – Potência entregue pelo eixo das turbinas para a vazão do Instituto das Águas	65
Tabela 11 – Potência entregue pelo eixo das turbinas para a vazão média.....	65
Tabela 12 – Potência entregue pelo eixo das turbinas para a vazão ótima.....	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. TEMA	12
1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA	14
1.3. PROBLEMAS E PREMISSAS	15
1.4. OBJETIVOS	15
1.4.1. OBJETIVO GERAL	15
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.5. JUSTIFICATIVA	16
1.6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.7. ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. ENERGIA HIDROELÉTRICA	18
2.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE MICRO, MINI E PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	18
2.2.1. Generalidades	18
2.2.2. Características e classificação	19
2.3. VAZÃO	21
2.4. COMPONENTES DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	22
2.4.1. ARRANJO BÁSICO	22
2.4.2. BARRAGENS	23
2.4.3. VERTEDOURO	24
2.4.4. TOMADA DE ÁGUA	25
2.4.5. SISTEMA DE ADUÇÃO	25
2.4.6. CÂMARA DE CARGA	26
2.4.7. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	27
2.4.8. CASA DE MÁQUINAS	27
2.4.9. UNIDADE GERADORA	28
2.4.9.1. Gerador síncrono	28
2.4.9.2. Sistema de regulação	28
3. TURBINAS HIDRÁULICAS	30
3.1. TIPOS DE TURBINA	31
3.1.1. TURBINA FRANCIS	31
3.1.1.1. Turbina Francis com Caixa Espiral	32
3.1.1.2. Turbina Francis Caixa Aberta	33
3.1.1.3. Turbina Francis Dupla	34
3.1.2. TURBINA PELTON	35
3.1.3. TURBINA KAPLAN	37
3.1.4. TURBINA BANKI	39
3.2. SELEÇÃO TÉCNICA DAS TURBINAS	42
3.3. CAVITAÇÃO	46
4. ANÁLISES TÉCNICAS	49
4.1. USINA RANCHARIA	49
4.1.1. Localização	49
4.1.2. Atual Situação	50

4.2. ESTUDO HIDROENERGÉTICO	52
4.3. ANÁLISE DAS POTÊNCIAS DA USINA DO RIO RANCHARIA	61
5. CONCLUSÕES.....	69
REFERÊNCIAS.....	71
ANEXO 1	74
ANEXO 2	75

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA

A energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência da espécie humana. Em termos de suprimento energético, a eletricidade se tornou uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, passando a ser recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países e regiões (ANEEL, 2005).

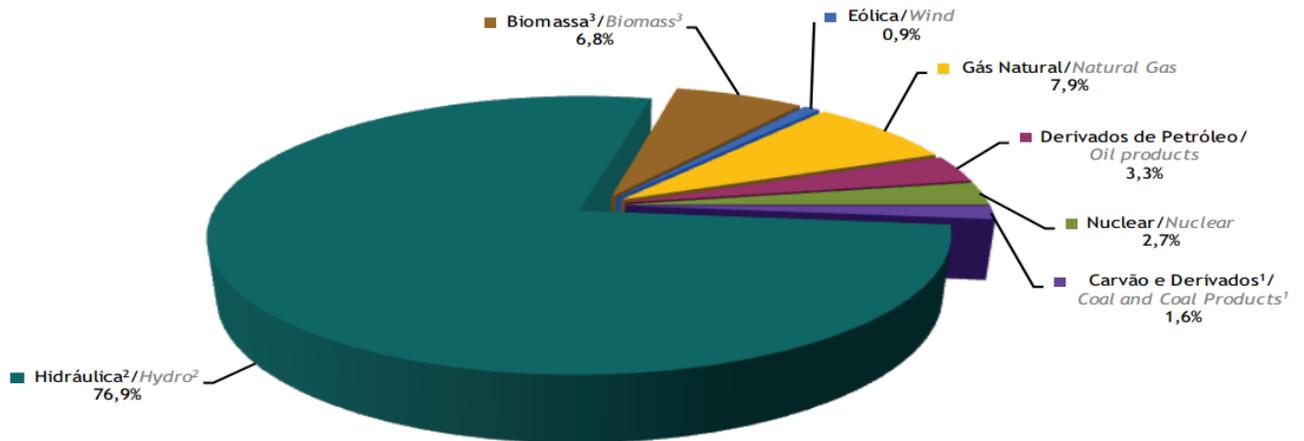
Ao mesmo tempo em que se busca ampliar a oferta e reduzir os custos, crescem as preocupações com a sustentabilidade e o meio ambiente. É nesse contexto que as energias renováveis surgem e ganham destaque, tendo apoio de diversos grupos e organizações para a sua ampliação (IDER, 2014).

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 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.

Pode-se observar na Figura 1, que o Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, sendo que a geração interna hidráulica responde por 76,9 % da oferta (BEN, 2013).



Notas

¹ Inclui gás de coqueria

² Inclui importação de eletricidade

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixo e outras recuperações

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.
Fonte: Balanço Energético Nacional, 2013.

Para implantação de uma central hidrelétrica, diversas etapas precisam ser cumpridas. Tais etapas podem ser divididas em estudos geológicos, energético e ambientais, medição de vazão, determinação das perdas e dimensionamento da turbina (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p.25).

Se faz necessário realizar um estudo para determinar qual turbina aproveitará o máximo potencial hidroelétrico, para que o projeto se torne viável. Segundo Quantz, qualquer motor hidráulico moderno deve preencher os seguintes requisitos técnicos básicos:

1^o) possibilitar o aproveitamento de uma grande gama de saltos, cobrindo ampla faixa de alturas e vazões disponíveis;

2^o) o aproveitamento deve efetuar-se com bons valores de rendimento e com boas características hidrodinâmicas, permitindo o acoplamento do motor hidráulico às máquinas geradoras ainda que sejam variáveis as condições do salto (altura e vazão), de modo que a instalação seja rentável;

3º) o eixo/árvore poderá dispor-se horizontal, inclinado ou verticalmente, segundo o exija o acoplamento às máquinas geradoras;

4º) a velocidade angular deve ser a mais elevada possível para que se consiga, dessa forma, acoplamentos diretos ou transmissões com poucas multiplicações;

5º) deve apresentar boa regulagem, a fim de que sejam tão adequados quanto outros tipos de máquinas (turbinas a vapor e a gás, motores diesel) para o serviço nas centrais elétricas;

6º) todos os elementos importantes, especialmente os órgãos de regulagem e mancais, devem ser de fácil manutenção.

As modernas turbinas hidráulicas dos tipos Pelton, Francis, Kaplan e Bulbo cumprem bem todas essas condições, superando largamente outros tipos de motores hidráulicos e competindo economicamente com outras máquinas motoras, como os já citados motores diesel, turbinas a vapor e a gás.

1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA

Em outubro de 2013, O Sr. Pedro Proença dos Santos mostrou interesse em revitalizar a usina hidrelétrica localizada em sua propriedade, no rio Rancharia no município de Rio Branco do Sul, região metropolitana de Curitiba.

O proprietário da área onde existia a antiga Usina Siderúrgica Marumby Ltda – Usimar, em posse da liberação do aproveitamento de potencial hidroelétrico pelo Águas Paraná – Instituto das Águas do Paraná, procurou um grupo de alunos para avaliar a viabilidade de gerar energia com a antiga usina.

O presente trabalho fará o estudo da turbina que será implantada na usina, fazendo um comparativo entre as turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Banki, em função da vazão e da queda d'água. A partir dos resultados, será feita uma análise para a escolha da turbina mais adequada e através de cálculos obter o valor da potência elétrica gerada.

1.3. PROBLEMAS E PREMISSAS

O foco da pesquisa é realizar o estudo de viabilidade da implantação de um sistema em uma usina hidrelétrica com as turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Banki, levando em consideração as dificuldades de obter dados de fornecedores e levantar informações de usinas que já as utilizam.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo Geral

Analisar e comparar os aspectos técnicos para implantação das turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Banki na Usina, para o melhor aproveitamento do potencial hidroelétrico.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Pesquisar literatura pertinente a instalação de micro, mini e pequenas Centrais Hidrelétricas.
- Estudar as tecnologias e os equipamentos existentes para a geração de energia elétrica por meio de turbinas hidráulicas.
- Analisar e montar um comparativo de das potências fornecidas entre as turbinas em estudos devido às características: altura da queda, vazão, potência, rotação específica e rendimento.
- Estudo de caso para aplicação das turbinas mencionadas na hidrelétrica.

1.5. JUSTIFICATIVA

As micro e mini centrais hidrelétricas fazem o aproveitamento de pequenos reservatórios. Aliado a este fator tais proprietários encontram alguma dificuldade nas questões de licenciamentos ambientais e de recursos elevados para apresentação de proposta de uso. Alguns estudos são feitos com informações incompletas ou imprecisas.

Evitar ou mitigar os riscos, quando da escolha adequada das turbinas contribui para novas pesquisas e desenvolvimento da fonte de recurso para ser explorada, visando aprimorar as técnicas construtivas tais como:

- Turbina que possa evitar vibrações nos mancais do conjunto turbina-gerador.
- Turbinas que reduzem as oscilações nos eixos.
- Com as tecnologia existentes no mercado explorar aplicações de turbinas próprias para cada queda e vazão proposta no local da instalação.
- Propor que o equipamento seja adequado e que facilite os reparos e manutenção no local ou que seja de fácil remoção.
- Dimensionamento construtivo das turbinas de acordo com o porte da usina sendo de micro ou mini usinas.

As grandezas de implicações geralmente não estão disponíveis junto aos fabricantes e requerem uma pesquisa de campo presente em centrais hidrelétricas, tais estudos complementares serão apresentados conforme a topologia da turbina aplicada.

Provavelmente junto a isso, as condições geográficas dos locais onde estão instaladas as usinas hidráulicas são determinantes para comprovar a potência estimada de produção. No entanto, a apresentação das curvas características das turbinas, que são fornecidas pelo fabricante (PCH's), necessitam de correções para adequações das novas condições em relação a potência instalada.

1.6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho foi realizado por meio de pesquisa aplicada, com registro das informações obtidas. Dentre os tipos de pesquisa serão realizados estudos de mercado das turbinas a fim de avaliar a dificuldade de se encontrar as turbinas em estudo no mercado nacional. Fazendo uma pesquisa bibliográfica de normas técnicas, trabalhos e teses afins, manuais e catálogos de fabricantes, entre outros para aprofundamento do conhecimento técnico.

O estudo da turbina para à Usina Hidrelétrica, localizada no município de Rio Branco do Sul, no estado do Paraná, será fundamentado em dados coletados na pesquisa bibliográfica, relacionando-os sempre à realidade do projeto.

1.7. ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1, é feita a Introdução ao tema e proposta de estudo, onde serão apresentados os objetivos, as motivações e a justificativa para a realização do trabalho.

O capítulo 2, apresenta uma revisão bibliográfica, para mostrar a fundamentação necessária à compreensão dos termos e explicitará os conceitos por trás de uma central hidrelétrica.

No capítulo 3, mostra apresentados os tipos de turbinas hidráulicas, apresentando o histórico das turbinas estudadas, seus funcionamentos e aplicabilidades.

O capítulo 4, foram feitas as análises técnicas, compilando os dados gerais sobre as características técnicas das turbinas, para assim, poder fazer um comparativo.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do presente.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ENERGIA HIDROELÉTRICA

Apesar da situação hidrológica desfavorável nos últimos dois anos, a produção de energia elétrica via fonte hidráulica ainda é muito atraente, pelos altos níveis de eficiência, pelo baixo custo de geração e também por se tratar de uma fonte renovável. Principalmente com a instalação das Centrais Hidrelétricas, pois é um empreendimento que não necessita de uma grande infraestrutura e tem um tempo de execução de projeto relativamente pequeno. Além do que, em questões ambientais são a melhor opção, pois os impactos ambientais são pequenos comparados com as grandes usinas, que demandam uma grande área de reservatório, podendo ser instaladas a fio d'água em pequenos riachos próximas aos grandes centros, e assim diminuir os custos e perdas com a transmissão.

2.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE MICRO, MINI E PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

2.2.1.1. Generalidades

As centrais hidrelétricas são um conjunto de obras destinadas ao aproveitamento do potencial hidráulico de determinado local. Utiliza-se o desnível do rio ou cria-se um através da construção de uma barragem, para que a água seja captada e conduzida à turbina e assim ocorra a geração de energia elétrica.

A potência de uma central está relacionada com o valor da queda bruta, entre os níveis jusante e montante, e a vazão hidráulica do curso do rio.

2.2.1.2. Características e classificação

A Eletrobrás, Centrais Elétricas Brasileiras S.A., em convênio com o DNAEE, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, hoje ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica, publicou em 1982, a primeira versão do Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas, e em 1985 os Manuais de Mini e Micro Centrais Hidrelétricas. Nestes Manuais foram determinados os limites e as características de cada tipo de usina, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Características e Limites das Centrais Hidrelétricas.

Características	Micro	Mini	Pequenas
Potência Máxima (kW)	100	1.000	10.000
Altura Máxima da Barragem (m)	3	5	10
Vazão Máxima da Central (m ³ /s)	2	15	20
Número Mínimo de Grupos Geradores para a Vazão Máxima	1	2	2
Potência Máxima do Grupo Gerador (kW)	100	1.000	5.000
Período de Recorrência para Obras de Desvio - Vazão de Cheias (anos)	-	5 a 10	10
Período de Recorrência para Obras Permanentes - Extravadores - Cheia Máxima (anos)	-	500 - 1.000	500 - 1.000
Período Máximo para Implantação (meses)	6	12 a 24	18 a 36
Regularização	Q ₉₅ ou no máximo regularização diária		

Fonte: ELETROBRÁS/DNAEE (1985).

Em 1998 a ANEEL - Agência de Energia Elétrica, na resolução nº394, determina que toda usina com até 30 MW de potência instalada e uma área de até 3 km² de reservatório é uma PCH. Esta resolução, altera os limites de geração de uma PCH de 10 MW para 30 MW.

A Eletrobrás (2012) divide as pequenas centrais hidrelétricas quanto as seguintes características:

- **Centrais Quanto a Capacidade de Regularização:**

Podem ser classificadas quanto a capacidade de regularização do reservatório, nos seguintes tipos:

- **Centrais a fio d'água:** são centrais que não possuem um reservatório significativo, em rios onde a vazão é maior ou igual a vazão necessária para a geração de energia;
- **acumulação, com regularização diária do reservatório:** este tipo de PCH é empregado quando a vazão de estiagem do rio não é a suficiente para a geração. Há então uma compensação com o volume do reservatório; e
- **acumulação, com regularização mensal do reservatório:** quando são considerados dados de vazão mensais e pressupõe a regularização mensal pelo reservatório.

- **Centrais Quanto ao Sistema de Adução:**

As centrais quanto ao sistema de adução, são divididas em dois tipos:

- com sistema de adução em baixa pressão, com escoamento em canais ou galerias de superfície livre;
- com sistema de adução em baixa pressão por meio de tubulação.

- **Centrais quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto:**

A Eletrobrás (2012) propõe uma subdivisão das usinas de pequeno porte, em: micro, mini e pequenas centrais. Na Tabela 2, podemos ver a classificação das centrais quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto.

Tabela 2 - Classificação das PCH quanto à potência e quanto à queda de projeto.

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

Fonte: ELETROBRÁS (2012).

2.3. VAZÃO

Os estudos hidrológicos a serem realizados para implantação de uma central, determinam o regime fluviométrico do rio com determinação da vazão para utilização no cálculo da potência instalada; a vazão de projeto das estruturas extravasoras; e a relação cota-descarga a jusante da central (ELETROBRÁS/DNAEE, 1985).

Siqueira (2006) ressalta a importância que os rios assumem na geração de energia em uma usina, e que opta-se por utilizar a curva de permanência como indicativo do desempenho hidrológico deste. A curva de permanência relaciona a vazão e a duração no tempo.

Quando possível usa-se os dados de vazão das estações de medição, para fazer a curva de permanência e ter um embasamento para os estudos, as estações têm dados de longos períodos, o que dá mais confiabilidade na determinação das vazões. Em contra partida, quando não tem dados o suficiente ou até mesmo nenhum dado, pode ser feito medições de vazão, determinando uma curva que conseqüentemente será menos confiável.

Souza (1983) cita que a potencialidade do rio, é em geral tomada igual à potência disponível para vazões entre 90% e 100% do tempo.

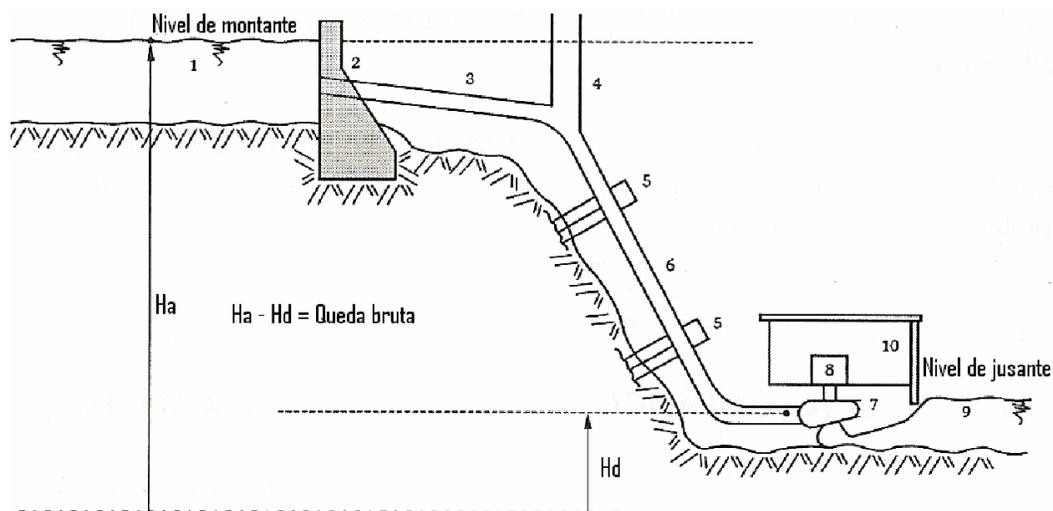
O grande problema no dimensionamento das turbinas se dá pela variação de vazão durante um período de tempo, dificultando o projeto adequado de um aproveitamento hidráulico. Se for projetada uma turbina para vazões iguais as mínimas, grandes quantidades de energia não seriam aproveitadas. Entretanto, turbinas dimensionadas para vazões maiores ficariam sem produzir sua capacidade durante longos períodos (SOUZA, 1983). A fim de minimizar essas variações é feita a regularização das vazões. Isso é possível por conta dos reservatórios, fazendo um controle para manter as vazões dentro dos limites aceitáveis de produção de energia.

2.4. COMPONENTES DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

O aproveitamento da hidroeletricidade se dá em função de uma vazão e de uma queda d'água. Logo o projeto de uma central, deve levar em consideração as características topográficas do local no qual vai ser instalada. Obras civis são quase sempre necessárias para aumentar o desnível e poder captar a água que será conduzida à turbina, para que assim haja um melhor aproveitamento do potencial energético.

2.4.1. ARRANJO BÁSICO

O arranjo básico de uma central hidrelétrica pode ser visto na Figura 2, que mostra o circuito hidrológico, a barragem que dá origem ao reservatório, o canal de adução que leve a água à turbina e a casa de máquinas.



- | | |
|--------------------------|------------------------|
| 1: Reservatório Superior | 6: Tubulação Forçada |
| 2: Barragem | 7: Tubulação de Reação |
| 3: Tubulação de Pressão | 8: Gerador |
| 4: Chaminé de Equilíbrio | 9: Canal de Fuga |
| 5: Blocos de Ancoragem | 10: Casa das Máquinas |

Figura 2 – Circuito hidráulico.
Fonte: SIMONE (2000, p.39).

Cada central hidrelétrica tem suas individualidades, pois encontramos em um mesmo local várias formas se fazer um projeto, visando sempre escolher a melhor configuração para obter o melhor aproveitamento.

2.4.2. BARRAGENS

Souza (1983) define as barragens como sendo obras transversais aos álveos dos rios, bloqueando a passagem de água.

São projetadas para criar um desnível hidráulico localizado entre dois reservatórios. Suas funções são a concentração de água do rio para aumentar o desnível e assim produzir uma queda; elevar o nível do rio para permitir a captação de água pela tomada d'água; e criar um reservatório capaz de regularizar a vazão do rio (SCHREIBER, 1978).

Para a produção de energia, a barragem pode exercer as três funções citadas ou somente uma delas, dependendo do tipo de central e barragem.

Para que haja um melhor aproveitamento do potencial hidráulico, a escolha do tipo de barragem é feita de acordo com disponibilidades locais de material de construção e pelas características das fundações (CREAGER et al, 1944).

De acordo com o manual das micro e minicentrals hidrelétricas ELETROBRÁS/DNAEE (1985), os limites de alturas para as barragens das micro e minicentrals são respectivamente 3 e 5 metros.

As barragens podem ser classificadas nos seguintes tipos:

- Barragens de concreto a gravidade – são aquelas em que a estabilidade é garantida principalmente pelos esforços de gravidade (SCHREIBER 1978). São recomendadas para locais que tenham vales estreitos e boas condições de fundação.
- Barragens de concreto em arco – são instaladas em locais onde as características do rio se faz possível, uma estrutura de uma ou mais peças em formato de arco, que se apoia nas rochas do próprio leito do rio,

transmitindo as forças decorrentes do empuxo hidrostático para as margens e ao fundo do rio (SOUZA, 1983). Sendo assim é necessário ter as condições favoráveis a instalação deste tipo de barragem, pois precisa ter uma estrutura propícia tanto da margem como do fundo do rio para receber esse tipo de configuração.

- Barragens de terra – é um dos tipos de barragens mais utilizados, pois tem sua matéria prima quase sempre abundância, quando para a construção das demais estruturas se faz necessário realizar escavações esse tipo de barragem é recomendado, pelo reaproveitamento da terra. Souza (1999), lembra que neste tipo de barragem a água não pode ultrapassar a sua crista pelo fato de existir risco de erosão.
- Barragens de enrocamento – são barragens em que se utiliza pedras de vários diâmetros a fim de formar uma estrutura. Estas barragens possuem uma membrana impermeabilizante, geralmente no paramento ou talude de montante, ligada a um diafragma colocado nas fundações (SOUZA, SANTOS e BORTONI, 2009).

2.4.3. VERTEDOURO

O vertedouro, segundo Mendes:

Consiste em um canal construído artificialmente, com a finalidade de conduzir a água de forma segura através de uma barreira, servido como sistema de escape, impedindo a passagem da água por cima da barragem quando ocorrem chuvas ou aumento da vazão (Mendes; de Freitas Mário, técnico em hidrométrica do Departamento de Águas e Energia Elétrica).

Sendo assim, o vertedouro funciona como um dispositivo de segurança da barragem, que atua quando ocorrem vazões máximas, fazendo com que a água não ultrapasse o limite da barragem, evitando danos não só aos componentes como as pessoas e as estruturas. Logo, a determinação da capacidade de escoamento

de um vertedouro é de grande importância para a segurança, e o bom funcionamento, da central hidrelétrica.

Normalmente são utilizados somente em períodos de cheias e como a água que flui pelo vertedouro é uma água de descarte, não passa pela turbina e logo não produz energia. Quando temos uma vazão vertida temos um desperdício na geração.

2.4.4. TOMADA DE ÁGUA

Segundo Souza, Santos e Bortoni (1999), a tomada de água é a obra destinada a captar a água necessária ao funcionamento das turbinas hidráulicas. É considerado o ponto de partida da condução de água para as turbinas.

Schreiber (1978) cita que a tomada d'água tem três finalidades: captar e conduzir a água aos órgãos adutores, impedir a entrada de corpos flutuantes e fechar a entrada d'água quando for necessário.

A tomada de água é formada por três componentes: grade de proteção, para reter as partículas sólidas transportados pela água e evitar danos a turbina; a comporta, que faz o controle do fluxo de água nos condutos; e o tubo de aeração, evita a formação de depressões no interior das tubulações (SOUZA, 1983).

2.4.5. SISTEMA DE ADUÇÃO

A função do sistema de adução é conduzir a água da barragem à turbina. Podendo ser construído de várias formas, inclusive utilizando o próprio terreno.

São considerados dois grupos:

- Conduitos de baixa pressão: caracterizam-se por apresentar baixas declividades, logo baixas velocidades de escoamento, o que permite, a

substituição das tubulações por canais de superfície livre. A escolha de qual tipo de sistema de baixa pressão será instalado, é definido pelas características locais e pela restrição financeira (BALARIM, 1996).

- Conduitos forçados: São conduitos que tem o diâmetro homogêneo ao longo de toda a sua extensão, que fazem o escoamento a pressões crescentes de montante para jusante, estando sua parte inferior submetida a pressão máxima do aproveitamento (SOUZA, 1983). Ligam o sistema de baixa pressão às máquinas hidráulicas, tem a função de centralizar e conduzir o fluxo de água até a turbina.

Quando o sistema de baixa pressão for a céu aberto, é necessário a construção de uma estrutura de segurança, entre o canal e o conduto forçado, para que em uma possível e rápida parada na produção de energia, não venha causar danos a central por conta do golpe de aríete.

O golpe de aríete ocorre quando há o fechamento das turbinas e cria-se uma onda nos órgãos adutores que se propaga com grande velocidade para montante, até ser refletida e voltar no sentido contrário, percorrendo o sistema para jusante (SCHREIBER, 1978).

2.4.6. CÂMARA DE CARGA

Em centrais que utilizam o sistema de adução a céu aberto, se faz necessário a implantação de uma estrutura para interligar o sistema de baixa pressão ao conduto forçado.

BALARIM (1996) lembra que quando o sistema de adução for feito em tubulação, a câmara de carga será apenas uma conexão à tubulação forçada, não sendo necessário equipá-la com comporta e desarenador.

Seu dimensionamento é baseado no volume de água e características locais, respeitando o Manual de Micro e Minicentraís Hidrelétricas (ELETROBRÁS/DNAEE, 1985).

Segundo Souza, Santos e Bortoni (1999), suas funções são as seguintes:

- Proporcionar um espelho-d'água para a reflexão das ondas do golpe de aríete, reduzindo sua intensidade.
- Proporcionar um volume de água de reserva capaz de atender rapidamente ao aumento da vazão requerido pelas turbinas em casos de aumentos bruscos de carga elétrica nos geradores.
- Receber o excesso de água rejeitado pelas turbinas em caso de fechamento brusco e também do canal adutor até que este reaja, reduzindo a velocidade de escoamento sob influência do aumento do nível de água a jusante na câmara.

2.4.7. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

A chaminé de equilíbrio é um reservatório de eixo vertical, que faz a junção do sistema de baixa pressão com o conduto forçado. Tem as seguintes finalidades: amortecer as variações de pressão, o golpe de aríete, causado pelo fechamento rápido da turbina; e armazenar água para fornecer ao conduto forçado o fluxo inicial provocado pela nova abertura da turbina, até que se estabeleça o regime contínuo (ELETROBRÁS, 2012).

Com a instalação da chaminé de equilíbrio próximo a da casa de força, diminuem os condutos forçados, o que reduz os efeitos do golpe de aríete.

2.4.8. CASA DE MÁQUINAS

A casa de máquinas é a edificação que abriga a unidade geradora, deve ser dimensionada para atender a necessidade de movimentação para uma possível manutenção ou modificação dos equipamentos.

O manual da ELETROBRÁS (2012) determina os espaços mínimos para circulação e manobra dos equipamentos.

2.4.9. UNIDADE GERADORA

A unidade geradora é composta pelos equipamentos eletromecânicos, que são as turbinas hidráulicas e os geradores elétricos, juntamente com os componentes auxiliares principais, regulador de velocidade, válvula, quadro de comando e volante de inércia.

2.4.9.1. Gerador síncrono

O gerador elétrico síncrono é uma máquina síncrona que converte a energia mecânica rotacional, produzida pela turbina em energia elétrica. Normalmente a produção de energia elétrica é em corrente alternada trifásica com a frequência definida pela rotação do gerador, no Brasil usamos a frequência definida em 60 Hz.

O dimensionamento do gerador é em função da potência disponível no eixo da turbina, como determina a Eletrobrás (2012).

2.4.9.2. Sistema de regulação

O sistema de regulação tem como função manter o sincronismo do grupo gerador dentro dos limites considerados aceitáveis. Isso pode ser feito com o regulador de velocidade, que mantém a rotação constante para que a frequência da

tensão gerada seja mantida em seu valor nominal (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 1999).

O regulador atua no fluxo de água que entra na turbina, controlando deste modo a variação da potência da mesma, de acordo com a variação da carga na unidade geradora (ELETROBRÁS/DNAEE, 1985).

Em unidades geradoras de pequena capacidade, o regulador de velocidade atuando sozinho pode ser insuficiente para garantir uma regulação estável, sendo necessário a utilização do volante de inércia.

3. TURBINAS HIDRÁULICAS

Uma instalação elétrica tem nos equipamentos eletromecânicos sua parte principal. Eles possibilitam a transformação da energia hidráulica em mecânica e, mais tarde, em energia elétrica. Fazem parte dos eletromecânicos os grupos geradores (turbinas e geradores elétricos) e os outros equipamentos necessários para o bom funcionamento da usina. (ELETROBRÁS, 2012)

Segundo BRAN e SOUZA (1969), turbina hidráulica se define como:

máquina com a finalidade de transformar a maior parte da energia de escoamento contínuo da água que a atravessa em trabalho mecânico. Consiste, basicamente, de um sistema fixo hidráulico e de um sistema rotativo hidromecânico destinados, respectivamente, à orientação da águas em escoamento e à transformação em trabalho mecânico.

De um modo geral, as turbinas são constituídas por cinco elementos principais:

- 1) Rotor da turbina - Local aonde ocorre a conversão de energia hídrica em potência de eixo.
- 2) Caixa espiral - Tubulação em forma de toróide, responsável por distribuir igualmente a água na turbina. É encontrada em volta da região do rotor. Esse elemento não pode ser removido por estar integrado a parte civil da usina. A caixa espiral está disposta conectada ao conduto forçado e ao pré-distribuidor, nas secções de entrada e saída, respectivamente.
- 3) Pré-distribuidor - Elemento responsável por direcionar a água para o distribuidor, sendo composto por um conjunto de palhetas montadas em dois anéis dispostos na parte superior, que podem variar de 18 a 24 unidades. É responsável por atenuar a turbulência do escoamento.
- 4) Distribuidor - Assim como o pré-distribuidor, o distribuidor também é composto por um conjunto de 18 a 24 palhetas, estas móveis, que são

acionadas hidráulicamente. O movimento das palhetas é conjugado de forma a controlar a potência da turbina, por meio da regulação da vazão.

5) Tubo de sucção - Duto pelo qual a água sai, desacelerando o fluxo da água, após sua passagem pela turbina.

3.1. TIPOS DE TURBINAS

Segundo Fuchs, Santos e Souza (1983, p. 149), as turbinas hidráulicas são classificadas como:

- Turbinas de ação: aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). As turbinas hidráulicas de ação são do tipo Pelton; podendo ser: de eixo vertical ou horizontal; com um ou mais rotores; com um ou mais injetores.
- Turbinas de reação: aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). As turbinas hidráulicas de reação são do tipo Francis e hélice (Kaplan), podendo ser: de eixo horizontal, vertical ou inclinado; com um ou mais rotores; em caixa aberta ou fechada; com tudo de sucção cônico reto ou cônico em cotovelo.

3.1.1. TURBINA FRANCIS

A Turbina Francis é uma turbina de reação, criada no ano de 1849, levando o nome de seu inventor, na qual o rotor recebe a água sob pressão na direção radial e a descarrega em direção preponderantemente axial, havendo transformação de energia cinética em trabalho.

O rotor tipo Francis é constituído por um certo número de pás com perfis de curvatura especiais, fixas e estruturadas entre as coroas interna e externa. Neste tipo de turbina, o fluxo d'água é orientado e distribuído igualmente na direção radial, por toda a periferia da entrada do rotor, saindo na sua direção axial (SCHREIBER, 1978).

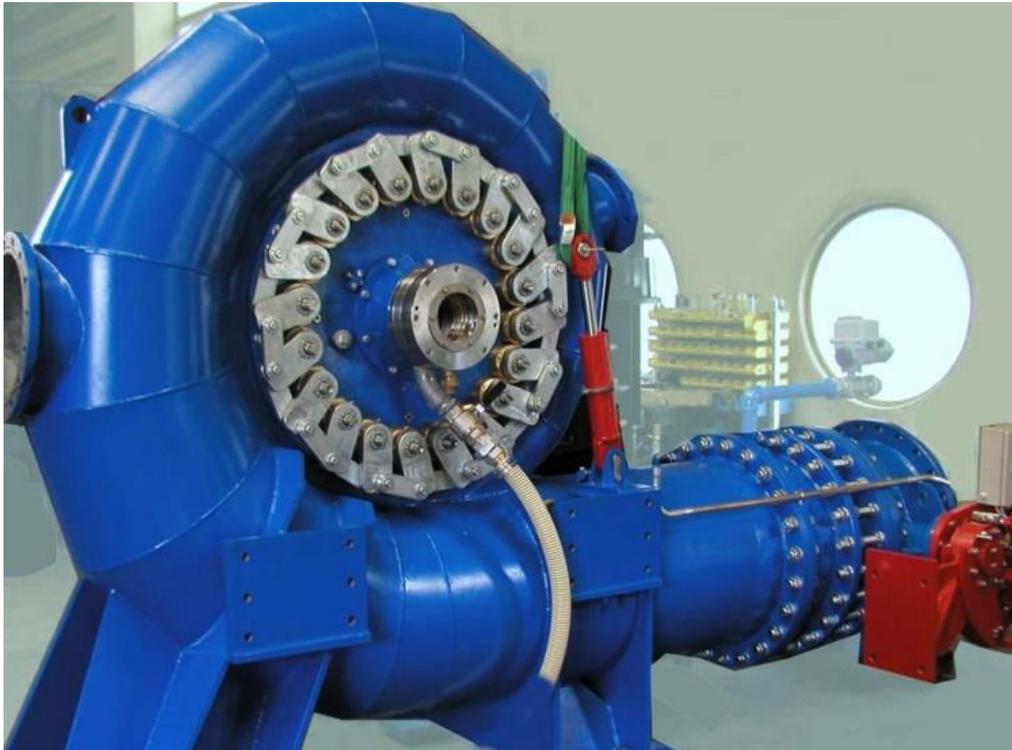


Figura 3 - Turbina Francis convencional.
Fonte: Global Hydro , 2010.

3.1.1.1. Turbina Francis com Caixa Espiral

Segundo o manual Diretrizes de uma PCH-Eletróbrás, a Turbina Francis com caixa espiral possui uma faixa de aplicabilidade que se estende às quedas de 15 a 250m, com potências que variam de 500 a 15.000 kW.

O desempenho apresentado diante do funcionamento sob cargas parciais de até 70% é bastante satisfatório. Funciona, ainda, muito bem com cargas entre 70 e

50% da carga, mas com perda significativa de rendimento. Em uma faixa abaixo de 50% da vazão nominal da turbina Francis com caixa espiral, seu uso já não é indicado, muito embora existam soluções que podem atenuar a queda de rendimento, que torna viável sua utilização. Para facilitar os trabalhos de inspeção e manutenção escolhesse uma velocidade de rotação que permita que o rotor da turbina disponha-se acima do nível de água de jusante. A turbina Francis com caixa espiral define-se como uma turbina de reação.

Segundo o Manual de diretrizes para estudos e projeto de pequenas centrais hidrelétricas, ELETROBRÁS (2012):

A turbina Francis com caixa espiral, classificada como uma turbina de reação, que tem por característica a transformação da energia potencial e queda em energia mecânica no rotor da turbina.

Possui uma caixa espiral em aço ligada em seu lado montante em um conduto forçado. Na periferia interna da caixa espiral, um anel rígido suporta as pás fixas do pré-distribuidor. A variação da potência fornecida pela turbina é obtida com a abertura ou fechamento das palhetas diretrizes situadas na periferia interna do pré-distribuidor em um conjunto chamado distribuidor.

3.1.1.2. Turbina Francis Caixa Aberta

Segundo o manual de Diretrizes de uma PCH-Eletróbrás, a turbina Francis Caixa Aberta é bastante utilizada e possui grande viabilidade para baixas quedas, de até 10m, e potências de 500 a 1800kW, muito embora exista o empecilho da necessidade da utilização com reservas, pelo fato de que o rendimento alcançado é baixo.

O custo deste equipamento é mais baixo que as demais turbinas pelo fato da ausência do conduto forçado e da caixa espiral que simplificam a concepção.

Segundo o Manual de diretrizes para estudos e projeto de pequenas centrais hidrelétricas, ELETROBRÁS (2012):

A turbina Francis caixa aberta tem o rotor, o distribuidor e, eventualmente, o tubo de sucção situados dentro de uma câmara em comunicação direta com a tomada d'água, dispensando a existência de conduto e caixa espiral. A câmara é normalmente construída em concreto e o tubo de sucção em chapas de aço em forma de cone.

O arranjo pode ser com eixo vertical ou horizontal, sendo o controle da vazão é feito por meio de um distribuidor semelhante ao utilizado na turbina Francis Espiral.

Com o eixo vertical, duas soluções são viáveis: o distribuidor da turbina apoiado na laje inferior ou, então, apoiado na laje superior. Nesse segundo caso, como no caso de eixo horizontal, torna-se necessário prever uma tampa estanque entre a câmara da turbina e o recinto onde se localiza o gerador.

3.1.1.3. Turbina Francis Dupla

Tem-se como uma variante das turbinas Francis, acima mencionadas. A característica que difere a Francis dupla é o fato desta possuir o rotor concebido de forma diferenciada.

Segundo o Manual de diretrizes para estudos e projeto de pequenas centrais hidrelétricas, ELETROBRÁS (2012):

A Francis Dupla tem por característica o rotor duplo, ou seja, uma peça com uma única coroa, duas cintas e dois conjuntos de pás, dividindo a vazão afluyente em duas partes. Conseqüentemente, são necessários dois tubos de sucção separados.

Nesse caso, o eixo se estende até um único gerador que poderá ter uma velocidade síncrona maior, já que turbina é calculada considerando a metade da vazão para cada banda do motor, o que conduz a uma velocidade de rotação maior, mantida a mesma velocidade específica.

3.1.2. TURBINA PELTON

A turbina Pelton foi idealizada no ano de 1880 pelo americano Lester Allan Pelton, de onde se originou o seu nome.

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

Segundo o manual Diretrizes de uma PCH-Eletróbás, a turbina Pelton atende satisfatoriamente a quedas que variam de 100 a 500 m e potências de 500 a 1.2500 kW, em casos dispare a queda pode chegar a 1000m.

Seu desempenho sob cargas parciais é bastante satisfatória, funcionando suavemente e praticamente sem cavitação até 20% da carga nominal, mas quando utilizados vários jatos o valor pode ser abaixo de 20%. Geralmente é utilizado o eixo horizontal para a instalação da turbina, com um ou dois jatos. Quanto maior for a vazão ou a necessidade de velocidades elevadas de rotação, o arranjo faz-se com 3 ou mais jatos.

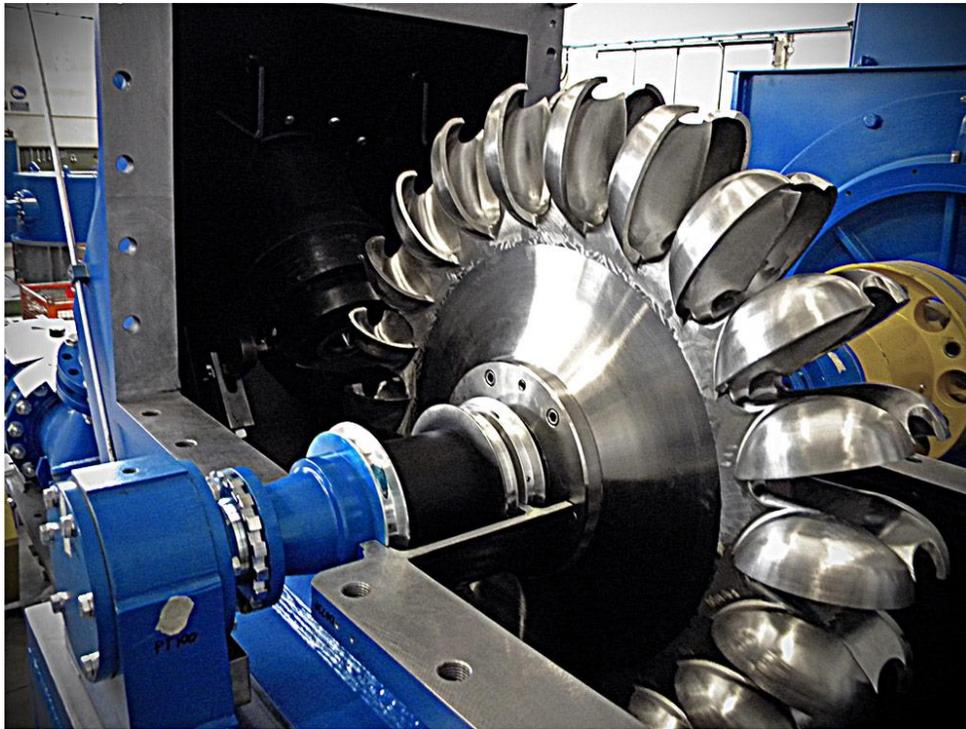


Figura 4 - Turbina Pelton
Fonte: Zeco, 2012.

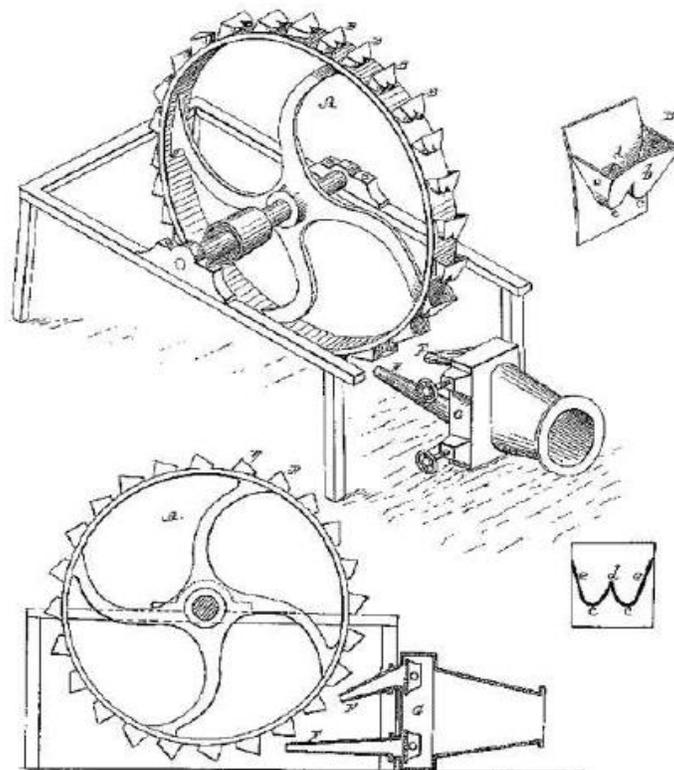


Figura 5 - Patente Original Pelton
Fonte: CERPCH (1980)

Segundo o Manual de diretrizes para estudos e projeto de pequenas centrais hidrelétricas, ELETROBRÁS (2012):

A turbina Pelton, classificada como turbina de ação, tem por característica a transformação da energia potencial de queda em energia cinética no jato injetor, para em seguida ser convertida em energia mecânica no rotor da turbina.

A Pelton se caracteriza por um rotor com pás ou conchas na periferia e por uma tubulação de adução alimentando um ou mais injetores. Além disso, é aconselhável utilizar um defletor de água, colocado a frente de cada jato, que poderá ser do tipo aberto/fechado ou do tipo de regulação contínua, esse último caso necessário em casos de rede isolada.

3.1.3. TURBINA KAPLAN

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

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

Um fato que promove a grande aplicabilidade da turbina Kaplan, também chamada de turbina tubular “S” em pequenas centrais hidrelétricas é que como característica principal a dada turbina pode atender quedas de 4 a 25m e as potências podem ser de 500 a 5000kW, isso para vazões de até 22,5 m³/s.

Segundo o Manual de diretrizes para estudos e projeto de pequenas centrais hidrelétricas, ELETROBRÁS (2012):

Possui ótimas características de operação, mesmo a cargas parciais, desde que utilizado o rotor Kaplan de pás reguláveis. Se, adicionalmente, o distribuidor também for regulável, caracterizando uma turbina de dupla regulação, a faixa de operação irá de 100% até 20% da carga nominal. Caso o distribuidor seja fixo, o limite inferior de operação se limita a 40% da carga nominal. A utilização de rotor de pás fixas só é considerada se a variação de carga for pequena (entre 100% e 80% da carga nominal). Deve ser feita uma

comparação econômica entre o custo da dupla regulação e seu benefício de ganho de produção de energia elétrica, considerando a flexibilidade de operação nesse caso.

Ilustra-se na Figura 6 a turbina tipo “S”, conforme layouts de um determinado fabricante.

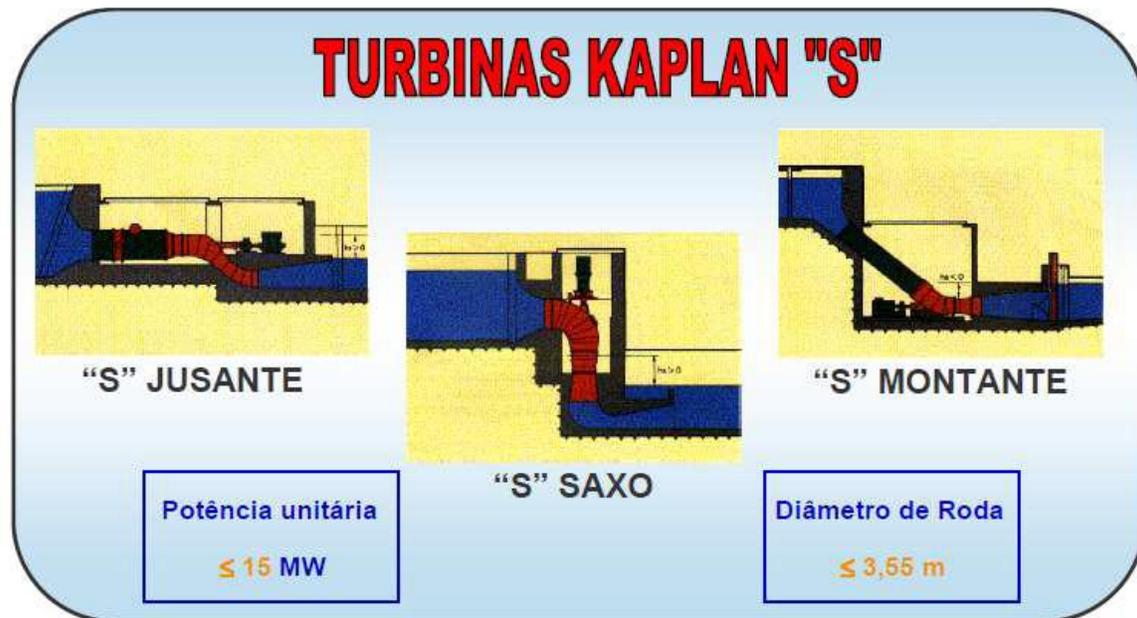


Figura 6 - Tipos de Turbinas Kaplan "S"
Fonte: Alston, (2007).

A turbina bulbo é uma turbina Kaplan conectada diretamente pelo eixo a um gerador, que é envolto por uma cápsula hermética. O conjunto fica imerso no fluxo d'água.

Tal como a turbina tubular tipo “S”, a turbina Bulbo com Multiplicador atende a uma faixa de queda satisfatória, quando se trata de PCH, que se estende desde 4 a 12m, e a potência de até 1700W.

A Turbina Bulbo com multiplicador, Segundo o Manual de diretrizes para estudos e projeto de pequenas centrais hidrelétricas, ELETROBRÁS (2012:

É usada como alternativa à turbina tubular “S”, incluindo o multiplicador de velocidade com engrenagens cônicas, permitindo que o gerador fique com o eixo a 90° do eixo da turbina, normalmente em posição vertical. É própria para operação com grandes variações de vazão, trabalhando satisfatoriamente sob cargas parciais de até 10% a 20% da carga nominal. A limitação na potência está mais ligada ao multiplicador de velocidade do que à turbina.

A seguir a ilustração de uma turbina do tipo bulbo (Figura 7):



Figura 7 - Turbina tipo Bulbo
Fonte: Hydrotu, 2011.

3.1.4. TURBINA BANKI

Inicialmente patenteada na Inglaterra, em 1903, por A G. Michell, engenheiro australiano, mais tarde, entre os anos de 1917 e 1919, pesquisada e divulgada pelo professor húngaro Banki, esta turbina foi extensivamente comercializada pela empresa alemã Ossberger Turbinen Fabrik que associou-se a Michell por volta de 1923. Nos últimos 65 anos esta empresa foi responsável pela entrega de mais de 7.000 unidades em todo o mundo. Atualmente, o número de fabricante, deste tipo de turbina supera uma centena (CERPCH, 2011).

As turbinas Michell-Banki são conhecidas como turbinas de fluxo cruzado, Michell ou Ossberger, constituídas por um rotor tipo tambor dotado de pás estampadas em forma de lâminas e um perfil hidráulico regulador de vazão. O fluxo de água controlado e direcionado pelo perfil hidráulico encontra as pás do rotor,

impulsionando-o. Esse tipo de turbina é utilizado em aproveitamentos hidráulicos com menores quedas e maiores volume de água, situação que geralmente ocorre em regiões mais planas (BETTA, 2011).

Devido às suas características específicas, estas turbinas cobrem o campo das turbinas tipo Pelton dois jatos até a Francis normal. Sendo classificada como uma máquina de ação ela apresenta características de reação na primeira passagem. O seu campo de aplicação atende quedas de 1 a 100 m, vazões de 0,02 a 7,0 (m³/s) e potências de 1 a 1.000 kW Devido à sua facilidade de padronização pode apresentar rotações específicas entre 40 a 200 (CERPCH, 2011).

Devido à sua simplicidade construtiva e as peculiaridades quanto ao seu funcionamento, esta turbina mostra-se altamente indicada para ser usada em MCH's. De acordo com a CERPCH, destacam-se as seguintes vantagens:

- Construção simples, poucas peças móveis, facilitando a manutenção;
- Fácil instalação, diminuindo os custos de obras civis;
- Custos iniciais inferiores aos dos outros tipos de turbinas usadas em centrais de baixa queda;
- Trabalha sob condições ideais de funcionamento, mesmo se funcionando a cargas parciais;
- Pode trabalhar em várias situações de queda e vazão, permitindo a sua padronização, conseqüentemente diminuindo os custos de fabricação;
- Componentes, como o disco do rotor, a tampa e as pás podem ser fabricados a partir de uma chapa de aço carbono;
- Pás são apenas calandradas;
- Adapta-se a tubos de sucção.

A instalação do tubo de sucção numa turbina faz com que aumente a energia absorvida pelo rotor e, conseqüentemente, também aumente a potência gerada. O objetivo do tubo de sucção é gerar uma pressão negativa na saída do rotor, variando a pressão entre a entrada e a saída do rotor, que é aproveitada para se ter um aumento na potência gerada pela turbina

A turbina Michell-Banki convencional é uma máquina de ação, portanto a altura manométrica H_{pr} , do rotor é igual a zero. Ao instalar um tubo de sucção

aparece um grau de reação, isto é, a altura manométrica do rotor será diferente de zero.

A Figura 8 apresentada, a seguir, é um demonstrativo do funcionamento de uma turbina de fluxo cruzado (HYDRAULIC WATER TURBINES, 2011):

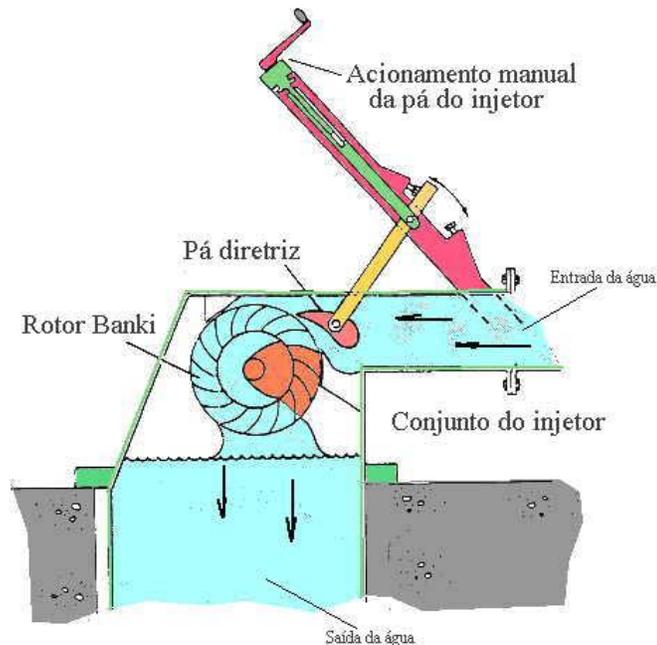


Figura 8 - Turbina de Fluxo Cruzado
Fonte: Hydraulic Water Turbines (2011)

A principal característica da turbina de fluxo cruzado é que o jato d'água que passa pelo rotor, chega em cada pá duas vezes, uma a cada fluxo de água. Primeiro a água flui de fora para dentro e, em seguida, de dentro para fora, sendo assim, uma turbina com dois estágios de velocidade, enchendo apenas uma parte do rotor em cada estágio.

De acordo com Camus e Eusébio (2006), as turbinas de fluxo cruzado apresentam depósitos horizontais e uma velocidade de rotação pequena, sendo normal a necessidade de utilização de multiplicadores de velocidade entre elas e os geradores. Em máquinas mais sofisticadas é possível alcançar eficiências na ordem de 85% e nas máquinas mais simples, na ordem dos 60-75% (CAMUS E EUSÉBIO, 2006).

3.2. SELEÇÃO TÉCNICA DAS TURBINAS

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

Para Fuchs, Santos e Souza (1983, p. 149), os fatores predominantes na escolha do tipo da turbina são: rotação específica e cavitação.

A rotação específica, segundo Fuchs, Santos e Souza (1983, p 149):

[...] é uma característica que fornece o tipo da turbina tendo por base elementos, tais como: Q - vazão (m^3/s). H - altura de queda (m), grandezas obtidas por estudos hidráulicos, hidrológicos, topográficos, consumo, custos e outros; n - rotação (rps), uma grandeza ligada à ciclagem do sistema - no Brasil 60 ciclos - e ao número de pares de polos do alternador.

A cavitação pode ser considerada um grupo de fenômenos que podem ocorrer no interior de sistemas hidráulicos, que segundo Fuchs, Santos e Souza (1983, p. 155) tem o seu surgimento através do aparecimento de recintos cheios de vapor e gases. Esses fenômenos acontecem em locais no interior dos sistemas onde é alcançada a pressão de saturação do vapor.

Na escolha da turbina, deve-se analisar, além dos parâmetros técnicos e do seu preço, a capacidade de imediato atendimento, em caso de problemas durante o funcionamento, e a disponibilidade para fornecimento de peças sobressalentes, por parte do fabricante. (ELETROBRÁS, 2012.)

Como a tendência de uma microcentral hidrelétrica é de que ela seja operada no modo não assistido, deve-se levar em consideração que a turbina tenha uma facilidade de manutenção e operação, sendo também dada fundamental importância à confiabilidade e robustez.

Para a escolha adequada do tipo de turbina a ser empregada, deve-se levar em consideração o fato de que tanto para o gerador assíncrono ou para o síncrono sem multiplicador, a velocidade de rotação é a mesma para turbina e gerador e,

sendo assim, deve-se procurar a velocidade síncrona mais próxima da calculada (conforme fórmulas típicas para cada tipo de turbina).

$$N_s = 120 \cdot \frac{f}{p} \quad (1)$$

Onde:

N_s = velocidade de rotação síncrona (rpm)

f = frequência da rede (Hz)

p = número de polos do gerador

Considerando a frequência da rede com o valor de 60 Hz, obtém-se os valores de N_s da tabela 3:

Tabela 3 – Relação do número de polos e a rotação

p	N_s (rpm)
4	1.800
6	1.200
8	900
10	720
12	600
14	514,3
16	450
18	400
20	360
24	300
28	257,1
30	240
32	225
36	200

Fonte: Autoria própria.

Para o gerador assíncrono ou para o síncrono sem multiplicador, a velocidade de rotação é a mesma para turbina e gerador e, sendo assim, deve-se procurar a velocidade síncrona mais próxima da calculada (conforme fórmulas típicas para cada tipo de turbina). Desta forma, conhecendo a velocidade de rotação síncrona do gerador, a vazão e a queda d'água, pode-se definir o melhor tipo de turbina a ser empregada, conforme a tabela 4.

Tabela 4 – Eficiência dos equipamentos

Nome	Rotação NS	Especificação	Vazão Q (m³/s)	Queda H (m)	Potência kW	ηmáximo (%)
	Nº Jatos	Ns				
	1	30				
Pelton	2	30 - 50	0,05-50	30-1.800	0,1-300.000	70-91
	4	40 - 60				
	6	50 - 70				
Banki	40 - 160		0,025 - 5	1 - 50	1 - 750	65 - 82
	Tipo	Ns	0,05 - 700	2 - 750	1 - 750.000	80 - 93
Francis	Lenta	60 - 170				
	Normal	150 - 250				
	Rápida	250 - 400				
Kaplan	300 - 800		0,3 - 1.000	5- 80	2- 200.000	88 - 93

Fonte: Adaptado de TIAGO FILHO, 2004.

O gráfico 1 demonstra o campo típico de aplicação de cada turbina em função das características apontadas (vazão, potência e queda).

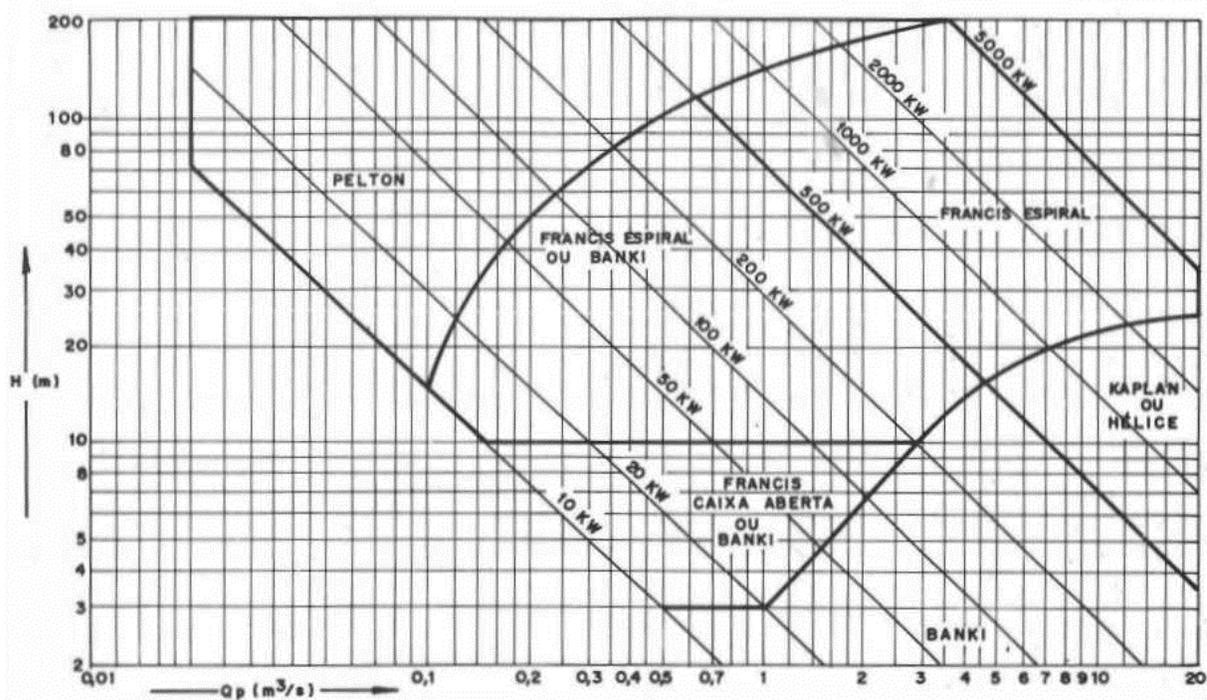


Gráfico 1 – Campo típico de aplicação de turbinas hidráulicas
Fonte: Souza, (1992, p.98).

3.3. CAVITAÇÃO

Para Pfleiderer e Petermann (1979, p. 75) cavitação é definida como “fenômeno do aparecimento de bolhas cheias de vapor. A pressão de vapor, ou seja, a pressão na qual ocorre a mudança de estado líquido para vapor e vice-versa depende da temperatura”.

A relação entre pressão de vapor e temperatura pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação entre pressão e temperatura

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, P. 75).

A cavitação tem efeitos negativos e podem se agravar caso a água estiver quimicamente poluída. E traz entre outras consequências a queda do rendimento e da potência útil da máquina, que acontece em virtude da “redução da seção disponível para o fluxo e à conversão incompleta da energia de velocidade e pressão”. (PFLEIDERER; PETERMANN, 1979, p. 75).

Souza, Fuchs e Santos (1983) acrescentam que os fenômenos de vapores e gases aparecem dentro dos sistemas em que há pressão de saturação do vapor P_v . Ao ser essa pressão atingida são produzidas bolhas de vapor que são conduzidas pelo líquido aos locais em que a pressão é maior, condensando-se violentamente. Ao desaparecerem as bolhas aparecem espaços para que passe o líquido. Essa troca é realizada de modo oscilatório de frequência próxima de $10^4 s^{-1}$. A desagregação do material, conseqüente dos choques contra as paredes provoca a erosão cavital. O material arrastado e os gases livres podem ocasionar reações químicas e elevam o efeito destrutivo. Vibrações e ruídos acompanham a cavitação.

O correto dimensionamento da turbina faz com que o índice de ocorrência do fenômeno cavitação seja minimizado. Este efeito está relacionado basicamente a duas variáveis: o número de cavitação de Thoma e a altura de sucção positiva.

O número de cavitação de Thoma, é dado pela seguinte equação:

$$H_s = B - \sigma H_n \quad (2)$$

Onde:

σ é o coeficiente empírico que depende da velocidade específica do rotor

A equação conhecida como fórmula de Thoma foi determinada através de experiências realizadas por fabricantes, experimentadores e pelo pesquisador Thoma, que relaciona a altura de aspiração (H_s) do tubo de sucção à altura topográfica do aproveitamento de reação (H_b) e ao valor B da altura de coluna de água, dependente da localização da saída do canal de fuga (nível jusante). Segundo Simone (2000), a velocidade específica do rotor da turbina é elemento fundamental e grande complicador do processo de determinação da altura de aspiração.

Por sua vez, o parâmetro B representa a altura da coluna d'água para uma determinada cota topográfica, em que se encontra o canal de fuga do aproveitamento.

Para determinação do parâmetro B, segue a tabela:

Tabela 6 – Cota Topográfica e Metros de Coluna de Água Correspondente

Cota (m)	0,0	200	400	600	800	1.200	2.250
B (mca)	10,33	9,76	9,52	9,28	9,15	9,00	7,00

Fonte: SIMONE, 2000.

O coeficiente σ está relacionado com o fenômeno da cavitação que ocorre nas pás do rotor e sua influência aumenta quanto maior for a velocidade específica do rotor da turbina. Outros fatores que influenciam neste fenômeno são a existência de materiais em suspensão na água e a temperatura da mesma.

A equação de Graeser, determina o coeficiente σ em função da velocidade específica do rotor da turbina, conforme segue:

$$\sigma = 154 \cdot 10^{-7} (n_s)^{1,7} \quad (3)$$

Onde:

n_s é velocidade específica do rotor em rpm.

Para a determinação da altura física do tubo de aspiração (H_L), deve-se trabalhar com as seguintes proposições (SIMONE, 2000):

- se a altura de aspiração H_s , for positiva e igual ou inferior a H_L , poderá trabalhar com ambas nos seus valores determinados. O rendimento da turbina será mantido e a cavitação reduzida aos valores previstos para instalação, obedecendo ao intervalo da expressão:

$$10\%H_b \leq H_L \leq 40\%H_b \quad (4)$$

- se a altura de aspiração H_s for nula, a altura H_L do tubo poderá ser mantida ou reduzida, dentro das conveniências do projeto, observando o valor da velocidade na saída do tubo, entre 1,5 m/s e 2,0 m/s;
- se a altura de aspiração H_s for negativa, a altura H_L poderá ser reduzida, tendo sempre em mente que o tubo de aspiração deve buscar atender à sua função;
- o tubo de aspiração não poderá ter altura física superior a 6,0 metros, por aspectos ligados à pressão atmosférica local.

A necessidade de certificação do índice de cavitação para turbinas torna-se importante para garantir um aumento da vida útil das máquinas e, por conseqüência, ganhos na geração de energia para o período desejado. A mudança de família para a melhor performance deve ser estudada pelo fabricante com o objetivo de buscar turbinas que se adequem às condições requeridas pelo contorno do projeto.

Como se pode observar na equação de Graeser, o coeficiente de cavitação está ligado diretamente à velocidade específica da turbina. Para minimizar a ocorrência da cavitação nos rotores das turbinas, procura-se elevar a pressão da água à saída do rotor, considerando a cota do rotor da turbina em relação ao canal de fuga determinada a partir da fórmula empírica de Thoma. Quando possível, deve-se alterar a família de turbina, buscando aquela que possua uma velocidade específica mais baixa, evitando que a altura de sucção não seja exageradamente negativa, comprometendo o custo do projeto com maior escavação. Logicamente, a escolha de uma nova turbina não depende somente deste fenômeno, pois deve-se verificar todos os parâmetros envolvidos e exigidos pelo projeto, tais como potência, eficiência e requisitos mecânicos, por exemplo.

4. ANÁLISES TÉCNICAS

4.1. USINA RANCHARIA

4.1.1. Localização

A Usina Rancharia está localizada no município de Rio Branco do Sul. De acordo com o IBGE (2013), o município possui uma área territorial de 812,288 km², distante 26 km da Capital e está localizado a uma altitude média de 885 m, localizando-se com as coordenadas: Latitude -25.1953, Longitude: -49.314. Situada na Região Metropolitana Norte de Curitiba, possui como áreas limítrofes os municípios de Itaperuçu, Colombo, Almirante Tamandaré, Cerro Azul, Bocaiúva do Sul e Castro.

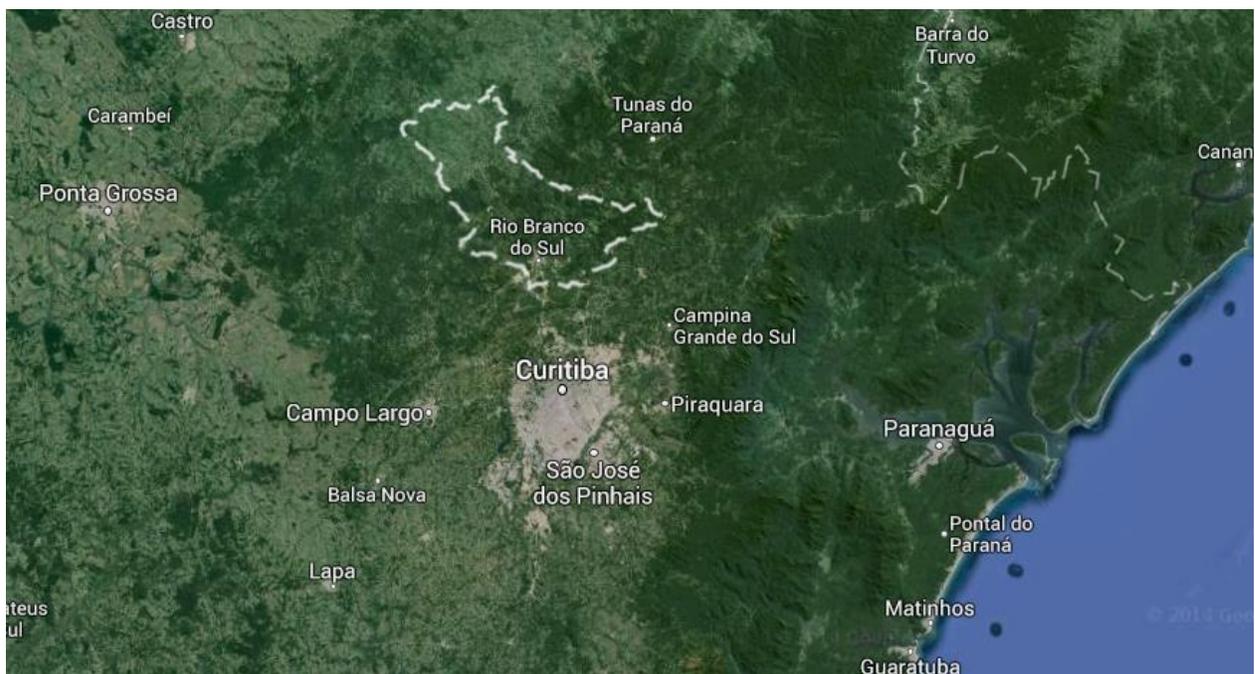


Figura 9 - Localização Geográfica do Município de Rio Branco do Sul.

Fonte: Google Maps (2014).

A Usina está situada no 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 do Hidrográfica do Rio Ribeira.

4.1.2. Atual Situação

A Usina Rancharia está desativada há mais de 50 anos, grande parte das instalações está deteriorada, as Figuras 10 e 11 mostram o canal de adução e a barragem da Usina.



Figura 10 – Canal de adução Usina Rancharia
Fonte: Autoria própria.



Figura 11 – Barragem da Usina Rancharia
Fonte: Autoria própria.

4.2. ESTUDO HIDROENERGÉTICO

De acordo com o trabalho realizado por Silva, Junior e Ortega (2015), o ponto de aproveitamento hidroenergético onde se encontra a Usina Rancharia, tem uma queda bruta de 20 metros. Em seus estudos foi encontrado o fluviograma e a curva de permanência do Rio Rancharia, que serão utilizados para a determinação das vazões de projeto. Para análise das potências serão utilizados três valores de vazão, o primeiro dado do Instituto de Águas do Paraná (2012), o segundo a vazão média a partir da análise do fluviograma do Rio Rancharia e o terceiro valor a vazão ótima de projeto partir da curva de energia.

O Instituto das Águas do Paraná emitiu um laudo em 08 de agosto de 2012, contendo os valores das vazões médias específicas das bacias dos Rios Turvo e Ribeira, considerando essas vazões dos estudos hidrológicos realizados para os aproveitamentos hidrelétricos das bacias, o instituto das Águas do Paraná adota o valor médio das vazões medias igual a $0,191 \text{ m}^3/\text{s}$, para o ponto da Usina Rancharia.

Silva, Junior e Ortega (2015), realizaram os estudos de transposição das vazões, para obter o fluviograma da Usina Rancharia, apresentado na Figura 12.

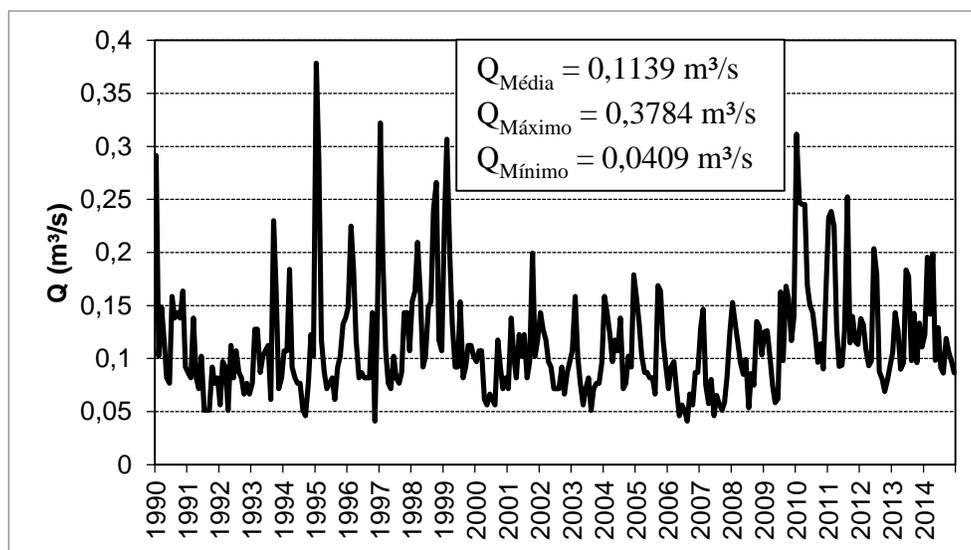


Figura 12 – Fluviograma do Rio Rancharia
Fonte: Adaptado de Silva, Junior e Ortega, 2015.

O fluviograma representa as vazões no tempo da seção transversal de um curso d'água. Sendo o gráfico que melhor representa, sob o aspecto visual, o comportamento variável e aleatório das vazões passadas (BASSETTI, 2008). Com os valores apresentados no fluviograma, é possível constatar que no período analisado de 25 anos, a vazão média é de $0,1139\text{m}^3/\text{s}$.

A partir do fluviograma, é possível a construção da curva de permanência, também chamada de curva de duração. Esta é uma curva acumulativa de frequência da série temporal contínua dos valores das vazões, observadas em um posto fluviométrico, que indica a porcentagem de tempo que um determinado valor de vazão foi igualado ou ultrapassado durante o período de observação (BASSETTI, 2008). A Figura 13 mostra a curva de permanência da Usina Rancharia.

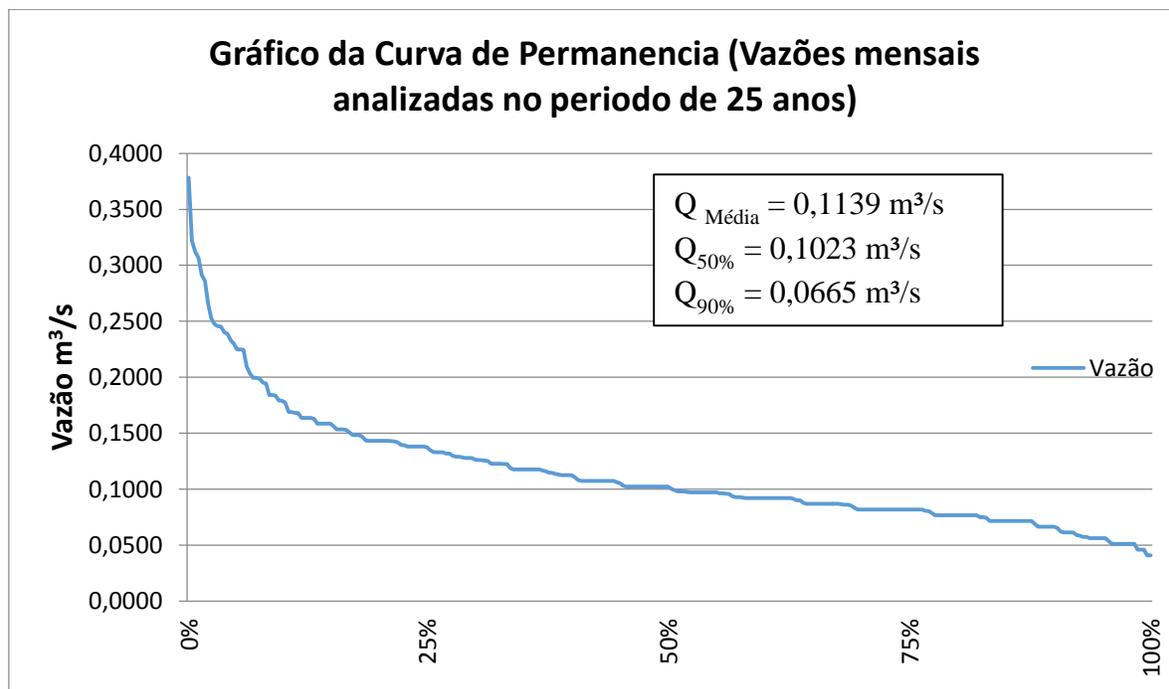


Figura 13 - Curva de Permanência da Usina do rio Rancharia.
Fonte: Silva, Junior e Ortega, 2015.

Sem considerar qualquer regularização, tomamos como referência a curva de permanência para a construção da curva de energia, através do método expresso em CERPCH (2008). Admitindo que um determinado valor de vazão, QL_1 , é aquele correspondente à capacidade de turbinamento da central hidrelétrica, a

área sob a curva de permanência referente a esta ordenada (área do trapézio OABC na Figura 14), é igual à vazão média turbinada referente às permanências P0 e P1 (BASSETTI, 2008).

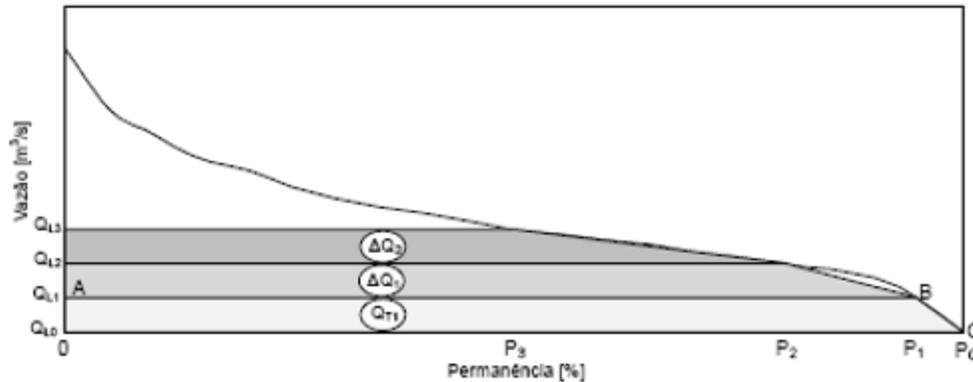


Figura 14 - Curva de permanência exemplo de construção da curva de energia.
Fonte: BASSETTI, 2008.

A área sob o trapézio OABC é dada por:

Equação 5: Vazão Média Turbinada para as Permanências P0 e P1

$$Q_{T1} = (Q_{L1} - Q_{L0}) \cdot \frac{(P_0 + P_1)}{2} \quad (5)$$

Onde:

Q_{T1} = Vazão média turbinada referente às permanências P0 e P1;

Q_{L1} = Vazão instalada com a permanência P1;

Q_{L0} = Vazão instalada com a permanência P0;

P_1 = Permanência da vazão Q_{L1} ;

P_0 = Permanência da vazão anterior.

Aumentando o valor da vazão instalada para QL2, o valor da vazão média turbinada QT1 será acrescido de ΔQ_1 :

Equação 6: Vazão Média Turbinada para as Permanências P0 e P2(A)

$$Q_{T2} = Q_{T1} + \Delta Q_1 \quad (6)$$

Onde:

QT1 = Vazão média turbinada referente às permanências P0 e P1;

QT2 = Vazão média turbinada referente às permanências P0 e P2;

ΔQ_1 = Acréscimo de área sob a curva e a área anterior.

Observa-se pela Figura 11, que:

Equação 7: Acréscimo de Área Sob a Curva e a Área Anterior

$$\Delta Q_1 = (Q_{L2} - Q_{L1}) \cdot \frac{(P_2 + P_1)}{2} \quad (7)$$

Onde:

ΔQ_1 = Acréscimo de área sob a curva e a área anterior;

QL2 = Vazão instalada com a permanência P2;

QL1 = Vazão instalada com a permanência P1;

P2 = Permanência da vazão QL2;

P1 = Permanência da vazão QL1.

Assim, podemos escrever:

Equação 8: Vazão Média Turbinada para as Permanências P0 e P2 (B)

$$Q_{T2} = Q_{T1} + (Q_{L2} - Q_{L1}) \cdot \frac{(P_2 + P_1)}{2} \quad (8)$$

Onde:

QT1 = Vazão média turbinada referente às permanências P0 e P1;

QT2 = Vazão média turbinada referente às permanências P0 e P2;

QL2 = Vazão instalada com a permanência P2;

QL1 = Vazão instalada com a permanência P1;

P2 = Permanência da vazão QL2;

P1 = Permanência da vazão QL1.

À medida que se aumenta a vazão instalada, a vazão média turbinada vai sendo acrescida de um incremento de vazão. Generalizando:

Equação 9: Vazão Média Turbinada – Equação Genérica(A)

$$Q_{Tn} = Q_{T(n-1)} + \Delta Q_{(n-1)} \quad (9)$$

Onde:

QTn = Vazão média turbinada referente às permanências P0 e Pn;

QT(n-1) = Vazão turbinada referente às permanências P0 e P(n-1);

$\Delta Q_{(n-1)}$ = Acréscimo de área sob a curva e a área anterior.

Equação 10: Vazão Média Turbinada – Equação Genérica (B)

$$Q_{Tn} = Q_{T(n-1)} + (Q_{Ln} - Q_{L(n-1)}) \cdot \frac{(P_n + P_{(n-1)})}{2} \quad (10)$$

Onde:

Q_{Tn} = Vazão média turbinada referente às permanências P_0 e P_n ;

$Q_{T(n-1)}$ = Vazão turbinada referente às permanências P_0 e $P_{(n-1)}$;

Q_{Ln} = Vazão instalada com a permanência P_n ;

$Q_{L(n-1)}$ = Vazão instalada com a permanência $P_{(n-1)}$;

P_n = Permanência da vazão Q_{Ln} ;

$P_{(n-1)}$ = Permanência da vazão $Q_{L(n-1)}$;

n = repartições adotado para a construção da curva de energia.

Segundo Bassetti (2008),

a tendência é que conforme se aumenta a vazão instalada diminui-se o incremento na vazão média turbinada. O resultado é uma curva crescente que vai saturando, ou seja, vai tendendo a um valor constante. A saturação da curva de energia nos mostra que o ganho de energia gerada que se consegue com o aumento da vazão turbinada, ou seja da capacidade do grupo gerador, acaba por ficar muito pequeno, enquanto que o custo da instalação sobe bastante, tornando inviável a opção por este valor de vazão.

Para construção da curva de energia, foi escolhido 23 (vinte e três) pontos da curva de permanência, conforme Tabela 7, resultando nos valores de vazão média turbinada conforme Tabela 8.

**Tabela 7: Valores relacionados da curva de permanência da Usina Rancharia.
Tabela 8: Valores de vazão média turbinada da Usina Rancharia.**

Permanência (%)	Vazão (m ³ /s)
1	0,3117
2	0,2863
4	0,2403
8	0,1954
10	0,1790
15	0,1585
20	0,1432
25	0,1375
30	0,1264
35	0,1176
40	0,1125
45	0,1055
50	0,1023
55	0,0971
60	0,0920
65	0,0869
70	0,0832
75	0,0818
80	0,0767
85	0,0716
90	0,0665
95	0,0562
100	0,0409

Vazão Média Turbinada(m ³ /s)	
QT1=	0,0150
QT2=	0,0244
QT3=	0,0289
QT4=	0,0331
QT5=	0,0371
QT6=	0,0381
QT7=	0,0406
QT8=	0,0438
QT9=	0,0467
QT10=	0,0494
QT11=	0,0510
QT12=	0,0539
QT13=	0,0558
QT14=	0,0587
QT15=	0,0618
QT16=	0,0630
QT17	0,0657
QT18=	0,0683
QT19=	0,0697
QT20=	0,0724
QT21=	0,0738
QT22=	0,0742

Fonte: Adaptado de Silva, Junior e Ortega, (2015) e própria.

Com os valores das Tabelas 7 e 8, foi construído o gráfico da Figura 15, que representa a curva de energia da Usina Rancharia.

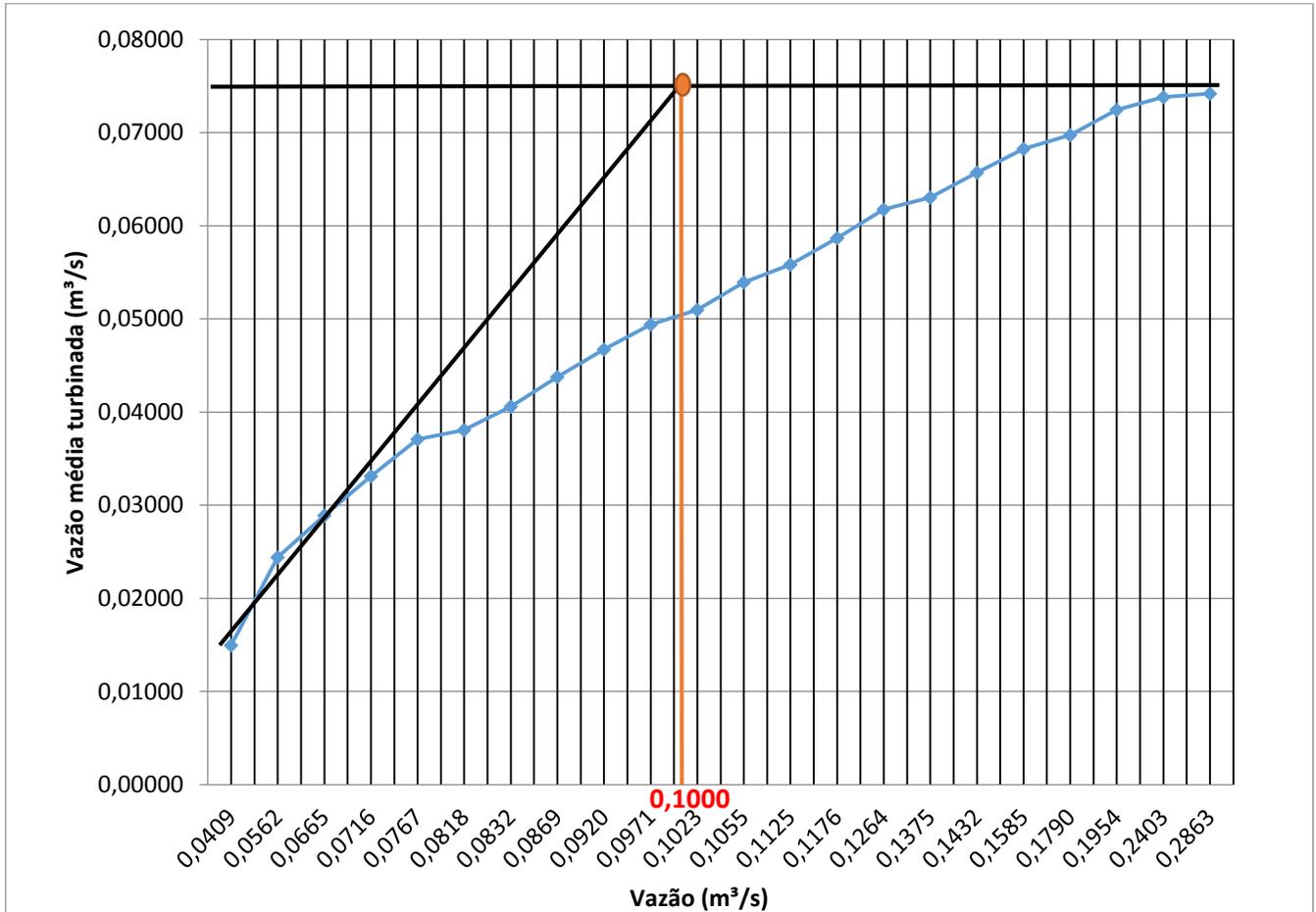


Figura 15 - Curva de Energia da Usina Rancharia.

Fonte: Autoria própria.

O valor da vazão ótima para o projeto corresponde à abscissa da intercessão das tangentes aos pontos inicial e final da curva (SOUZA, 1999). Para a Usina Rancharia, conforme observado na Figura 15, esse valor é de 0,100 m³/s. Vale ressaltar que este valor não considera qualquer tipo de regularização.

Conforme Bassetti (2008), este valor representa o valor ótimo de vazão, já que um valor inferior implicaria em menos potência gerada, enquanto que valores superiores não forneceriam uma potência suficientemente maior que justificasse os gastos excedentes provenientes do aumento da turbina e da instalação civil.

A partir dos valores obtidos e da curva de permanência da Usina do rio Rancharia, foi construído o gráfico da Figura 16, onde está relacionado o aproveitamento das vazões do rio, considerando o valor de vazão de projeto encontrado.

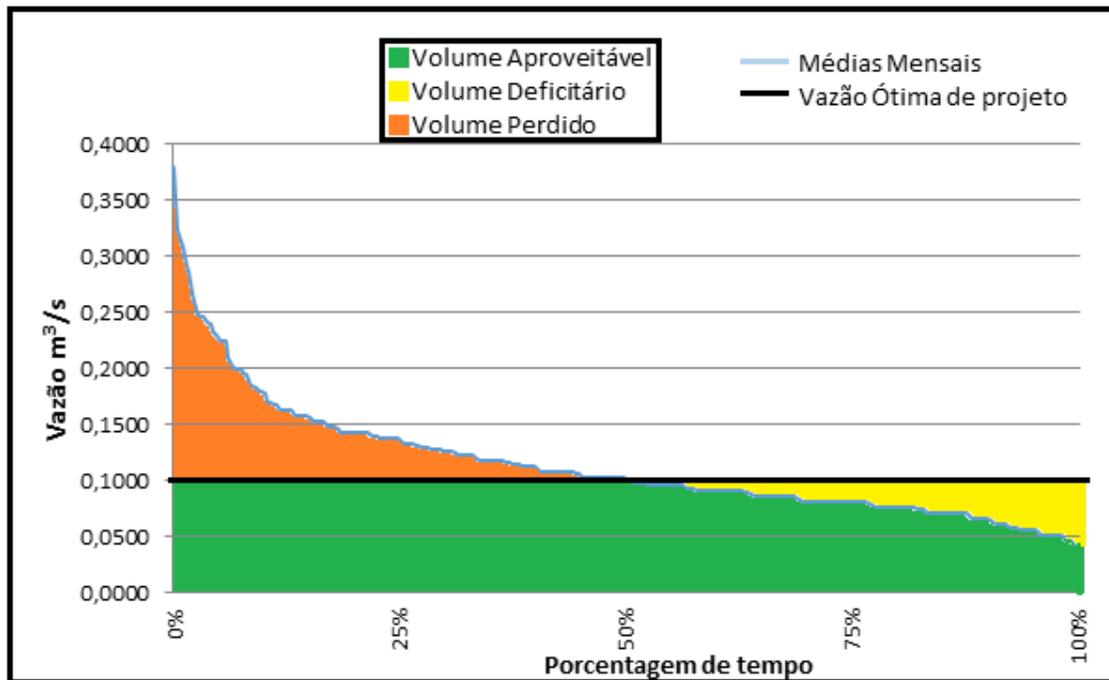


Figura 16 - Volume aproveitável conforme vazão de projeto.
Fonte: Autoria própria.

4.3. ANÁLISE DAS POTÊNCIAS DA USINA DO RIO RANCHARIA

Segundo Bortoni (2011), existem várias formas de se analisar as potências para uma turbina em um ponto de aproveitamento hidroenergético, como podem ser observadas pelas equações que serão vistas a seguir.

Potência Bruta é a equivalente à vazão sob a queda bruta, sem considerar perdas nos sistemas de adução (BORTONI, 2011).

Equação 11: Potência bruta.

$$P_{hb} = \rho \cdot g \cdot H_b \cdot Q \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

Onde:

Phb= potência bruta, em kW.

ρ = massa específica da água, em kg/m³.

g= aceleração da gravidade, em m/s².

Hb= Altura de queda bruta, em m.

Q = Vazão, em m³/s.

Potência Absorvida é a equivalente à vazão sob a queda líquida, considerando as perdas nos sistemas de adução (BORTONI, 2011).

Equação 12: Potência absorvida.

$$P_{hl} = \rho \cdot g \cdot H_l \cdot Q \cdot 10^{-3} \quad (12)$$

Onde:

P_{hl} = potencia absorvida, em kW.

ρ = massa específica da água, em kg/m^3 .

g = aceleração da gravidade, em m/s^2 .

H_l = Altura de queda útil ou líquida, em m.

Q = Vazão, em m^3/s .

Potência Efetiva ou de eixo é a potência mecânica entregue pelo eixo da turbina. Assim, segundo Bortoni (2011), a relação entre Potência de eixo sobre a Potência absorvida reflete a eficiência da turbina, conforme Equação 13:

Equação 13: Rendimento da turbina.

$$\eta_t = \frac{P_e}{P_{hl}} \quad (13)$$

Onde:

η_t = rendimento da turbina.

P_e = potência de eixo

P_{hl} = potência líquida.

Reescrevendo as equações (11), (12) e (13), substituindo as constantes por seus valores, massa específica da água: 1.000 kg/m^3 e aceleração da gravidade: $9,81 \text{ m/s}^2$, obtemos a Equação 14, a qual relaciona a potência de eixo com a queda líquida, vazão turbinada e o rendimento da turbina.

Equação 14: Potência entregue pelo eixo da turbina.

$$P_e = 9,81 \cdot H_l \cdot Q \cdot \eta_t \quad (14)$$

Onde:

Pe= potência de eixo, em kW.

Hl= Altura de queda útil ou líquida, em m.

Q = Vazão, em m³/s.

η_t = rendimento da turbina.

Será utilizada a Equação 14 para o cálculo das potências da Usina Rancharia, devido a variação de rendimento para cada tipo de turbina e para cada valor de vazão.

Como pode ser observado no estudo de Silva, Junior e Ortega (2015), a vazão não é constante, logo variando a vazão, altera-se o rendimento da turbina como pode ser verificado na Figura 17.

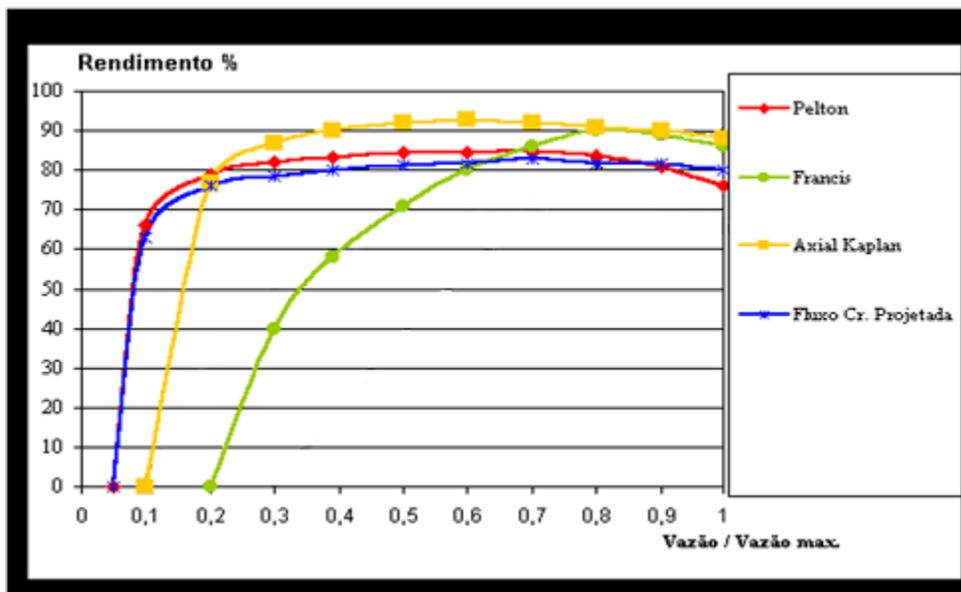


Figura 17 - Rendimento de turbinas com variação da vazão turbinada em relação à nominal mantendo queda líquida constante.
Fonte: Adaptado de Harvey et al., 1998.

Harvey et al. (1998) propõem o gráfico da Figura 17 para estimativa de rendimentos de turbinas para micro e minicentrals hidrelétricas. Os valores de rendimentos podem variar muito, conforme o fabricante e a tecnologia empregada, para todos os tipos de turbinas (JUNIOR, 2000).

Utilizando o gráfico da Figura 17 montamos a Tabela 9 que nos mostra o rendimento de cada turbina para valores de vazões distintos.

Tabela 9 - Rendimento das turbinas de acordo com a vazão turbinada.

Vazão Q (m ³ /s)	Relação com Q nominal	Rendimento (%)			
		Pelton	Francis	Kaplan	Banki
Q	100%	78%	89%	90%	80%
0,8.Q	80%	82%	92%	92%	82%
0,5.Q	50%	84%	70%	91%	81%
0,3.Q	30%	81%	38%	85%	78%

Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar a vazão de projeto, a média e a máxima, operando sem regularização, existirão momentos que será necessário extravasar a vazão do rio. Assim, poderíamos aumentar a vazão nominal das turbinas. Elevando o valor da vazão nominal da turbina para o valor máximo, o que acarretaria em gerar mais energia em momentos de grandes vazões. Porém, em épocas de vazões próximas à média, ocorreria uma queda no rendimento da turbina devido a relação vazão turbinada e vazão nominal ficar perto dos 30%, principalmente na Francis como pode ser verificado no gráfico da Figura 17.

Contornar esse problema implica a instalação de turbinas primárias e secundárias, cada qual com vazões nominais diferentes, o que refletiria uma operação separada de acordo com a vazão disponível no momento. Outra alternativa está na regularização do rio aumentando a barragem para melhor aproveitamento dos períodos de grandes vazões. Tal estudo está fora do escopo desse trabalho, podendo ser analisado em trabalhos futuros.

Antes de iniciarmos o cálculo das potências da usina do Rio Rancharia, temos que dar uma atenção para a as perdas no sistema de adução. Assim,

segundo Eletrobrás e DNAEE (1985) as perdas no sistema adutor são de 5% aplicando essa redução no valor da queda bruta. Como o valor de queda bruta é de 20 metros, considerando as perdas, teremos uma queda líquida de 19 metros.

Considerando os três valores de vazão e a altura líquida, montamos as tabelas 10, 11 e 12, que mostram as informações da potência entregue pelo eixo da turbina, utilizando a Equação 14 e considerando a variação das vazões de acordo com a Tabela 9, bem como os rendimentos das turbinas.

Tabela 10 - Potência entregue pelo eixo das turbinas para a vazão do Instituto das Águas.

VAZÃO A PARTIR DOS DADOS DO INSTITUTO DAS ÁGUAS									
Vazão Q (m³/s)	Relação com Q nominal	Rendimento (%)				Potência Entregue pelo eixo (kW)			
		Pelton	Francis	Kaplan	Banki	Pelton	Francis	Kaplan	Banki
0,1910	100%	78%	89%	90%	80%	27,76838	31,68444	32,04044	28,48039
0,1528	80%	82%	92%	92%	82%	23,35392	26,20196	26,20196	23,35392
0,0955	50%	84%	70%	91%	81%	14,95221	12,46017	16,19822	14,4182
0,0573	30%	81%	38%	85%	78%	8,650919	4,058456	9,078125	8,330515

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 - Potência entregue pelo eixo das turbinas para a vazão média.

VAZÃO MÉDIA A PARTIR DO FLUVIOGRAMA									
Vazão Q (m³/s)	Relação com Q nominal	Rendimento (%)				Potência Entregue pelo eixo (kW)			
		Pelton	Francis	Kaplan	Banki	Pelton	Francis	Kaplan	Banki
0,1139	100%	78%	89%	90%	80%	16,55926	18,89454	19,10684	16,98386
0,0911	80%	82%	92%	92%	82%	13,92676	15,62515	15,62515	13,92676
0,0570	50%	84%	70%	91%	81%	8,916525	7,430437	9,659569	8,598078
0,0342	30%	81%	38%	85%	78%	5,158847	2,4202	5,413604	4,967778

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 - Potência entregue pelo eixo das turbinas para a vazão ótima de projeto.

VAZÃO ÓTIMA DE PROJETO									
Vazão Q (m³/s)	Relação com Q nominal	Rendimento (%)				Potência Entregue pelo eixo (kW)			
		Pelton	Francis	Kaplan	Banki	Pelton	Francis	Kaplan	Banki
0,1000	100%	78%	89%	90%	80%	14,53842	16,58871	16,7751	14,9112
0,0800	80%	82%	92%	92%	82%	12,22718	13,7183	13,7183	12,22718
0,0500	50%	84%	70%	91%	81%	7,82838	6,52365	8,480745	7,548795
0,0300	30%	81%	38%	85%	78%	4,529277	2,124846	4,752945	4,361526

Fonte: Autoria própria.

A seguir podemos observar os valores de potência máxima para os quatro modelos de turbina, com a variação das vazões analisadas.

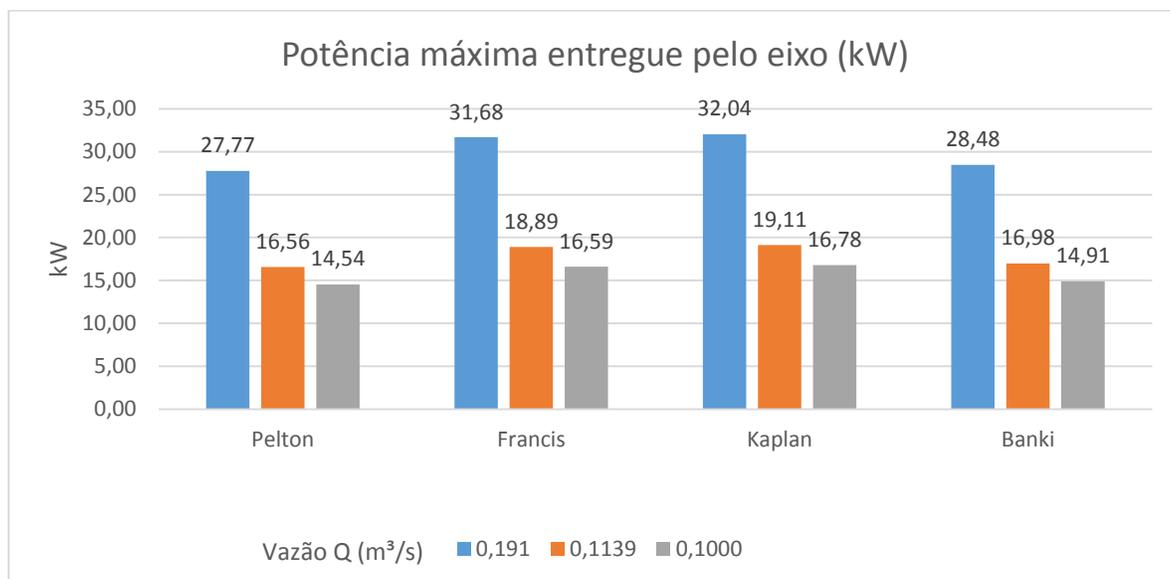


Gráfico 2 – Potência máxima entregue pelo eixo.
Fonte: Autoria própria.

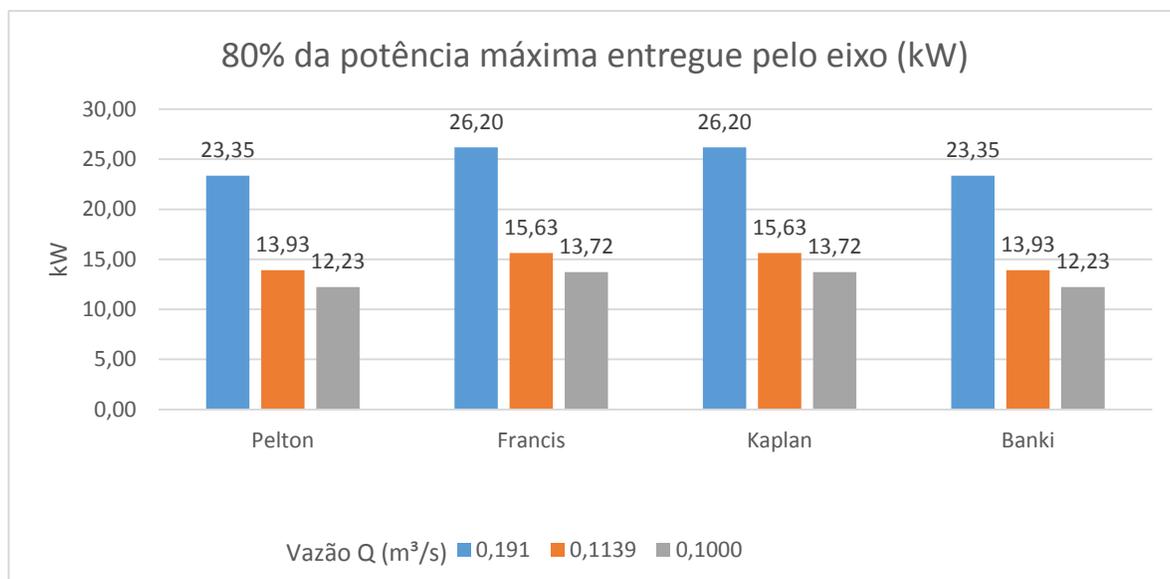


Gráfico 3 – 80 % da potência máxima entregue pelo eixo.
Fonte: Autoria própria.

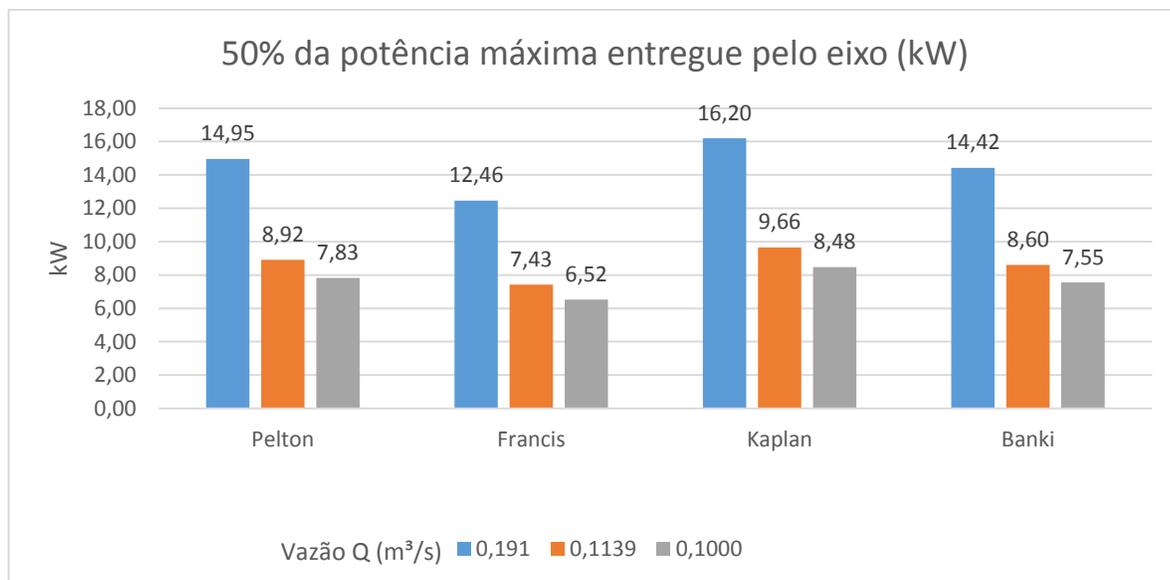


Gráfico 4 – 50 % da potência máxima entregue pelo eixo.
Fonte: Autoria própria

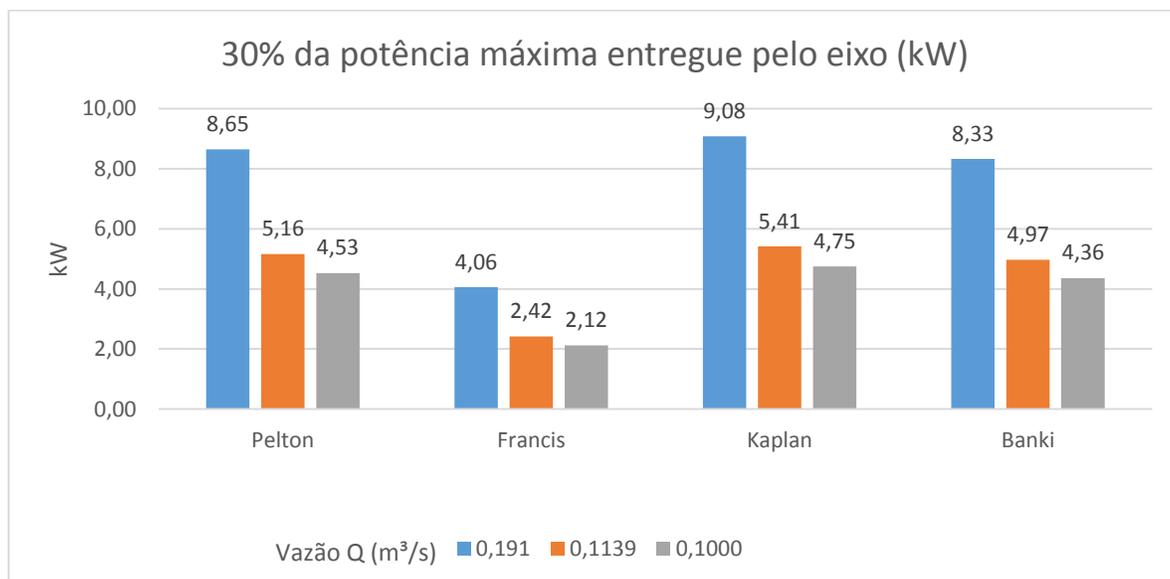


Gráfico 5 – 30 % da potência máxima entregue pelo eixo.
Fonte: Autoria própria

Nota-se, de acordo com as Tabelas 10,11 e 12, que quando os valores da vazão variam de 30% a 100% da vazão nominal, as faixas de potência entregue pelo eixo das turbinas, para as três vazões analisadas, vazão do Instituto das Águas, vazão média e vazão ótima, são respectivamente de 4,06 kW a 32,04 kW,

de 2,42 kW a 19,11 kW e de 2,12 kW a 16,78 kW, sem considerar qual tipo de turbina está gerando as potências.

As Turbinas Francis e Kaplan para valores de vazão próximo a 80% da vazão nominal, tem os rendimentos iguais e são as que apresentam os maiores níveis de potência, para tais configurações.

Ratifica-se que esse trabalho visa o estudo das turbinas em si e aplica-se a usina do Rio Rancharia com os dados correlatos já levantados. Maiores análises da parte civil, custos e regularização podem se alinhar com o objetivo de aperfeiçoar a energia produzida pela usina.

Objetivando-se otimizar a energia produzida, tornam-se necessárias essas análises refinadas de custo, regularização e obras civis, pois mesmo ao ser aplicada uma turbina com vazão nominal à máxima, devido a ter ocorrência baixa de grandes vazões, de acordo com a Figura 12, torna-se injustificável o gasto extra que se teria na parte civil e com a própria turbina para um ganho de potência em casos esporádicos.

5. CONCLUSÕES

Através do estudo da bibliografia apresentada e demais pesquisas efetuadas, foram levantados dados relativos à possibilidade da implantação das principais turbinas existentes para uma central hidrelétrica à ser ativada no Rio Rancharia.

De posse das informações obtidas sobre as turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Banki, além dos principais fatores que determinam a escolha da turbina ideal, como queda bruta e vazão, foi possível verificar através de cálculos realizados, a potência entregue por cada uma das turbinas.

Os valores possíveis de vazão de projeto, sem considerar a regularização da usina, foram determinados por três maneiras distintas, o primeiro dado do Instituto das Águas do Paraná, o segundo valor da vazão média e o terceiro a vazão ótima, conforme exposto no item 4.2, foram de 0,191 m³/s, 0,1139m³/s e 0,100m³/s respectivamente. Para cada um desses três valores, foi efetuado o cálculo de rendimento de cada turbina para 100%, 80%, 50% e 30% da vazão de projeto. Esse cálculo foi necessário pois, todas as turbinas trabalham em regimes de vazão variável, o que implica variação do rendimento e controle de cavitação, conforme vazão turbinada

Um valor de vazão de projeto representa o valor ótimo de vazão, já que um valor inferior implicaria em menos potência gerada, enquanto que valores superiores não forneceriam uma potência suficientemente maior que justificasse os gastos excedentes provenientes do aumento da turbina e da instalação civil.

Analisando as Tabelas 10, 11 e 12, é visto que, independente de qual das três vazões de projeto forem escolhidas, as turbinas que entregam maior potência em seu eixo são a Francis e a Kaplan. Contudo, pelos critérios apresentados no item 3.2, pode-se concluir que a turbina que mais se adéqua à usina do rio Rancharia é turbina Banki, graças ao seu baixo custo de implantação e facilidade de manutenção ou, a turbina Francis, devido aos aspectos de rotação específica, robustez, confiabilidade e peças disponíveis, haja vista o maior número de fabricantes nacionais desse modelo de turbina para essa aplicação e apresentar

uma maior robustez em seu funcionamento além da facilidade de manutenção e operação não assistida da turbina Francis.

Todavia, o objetivo é analisar todas as turbinas com o intuito de se ter dados para a implantação destas de forma didática. Este estudo demonstrou que, com os dados de queda e vazão da Usina do rio Rancharia, é possível a aplicação das quatro turbinas estudadas – Pelton, Francis, Kaplan e Banki - cada qual com diferentes rendimentos e diferentes valores de potência entregue em seu eixo.

Dessa forma, com os dados disponíveis e estudos possíveis realizados, considerando a pior situação, ou seja, considerando a vazão de projeto como a vazão ótima de 0,100 m³/s, as turbinas da Usina Rancharia entregam em seu eixo uma potência entre 2,12 kW e 16,78 kW, independente de qual turbina está operando, sendo operadas separadamente.

Como os valores de potência entregues ao eixo da turbina são bastante baixos para uma geração de energia satisfatória, possivelmente não será viável economicamente a revitalização da Usina do Rio Rancharia, pois os custos de implantação podem ser altos e, a economia na conta de luz pode ser pequena, o que não justificaria o investimento.

Contudo, um estudo detalhado de viabilidade de implantação do projeto poderá ser futuramente realizado, sendo esta, uma sugestão de objeto de estudo para um outro trabalho de conclusão de curso.

REFERÊNCIAS

ALSTOM. **Soluções em PCH**. Disponível em: www.alstom.com/brazil/productsand-services/downloads/015af_2012.pdf. Acesso em 08/08/2014.

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 – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Regionalização das Vazões**. TUCCI, C.E.M. (coord.). IPH / UFRGS. Porto Alegre. 2002.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução nº. 394, 04 de Dezembro de 1998.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/01-Introducao%283%29.pdf>. Acesso em 28/02/2014.

BALARIM, Carlos Roberto. Avaliação expedita do custo de implantação de micro centrais hidrelétricas. 1996.. 158f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 1996.

BASSETTI, Bruno Lorenzoni. **Estudo e Projeto Básico de uma Pequena Central Hidrelétrica**. Projeto de graduação (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

BEN – **Balanco Energético Nacional, 2013**. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf. Acesso em: 14/01/2014.

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

BORTONI, Viana. **Operação de Turbinas Hidráulicas e Reguladores de Velocidade**. 2011.

BRAN, Richard; SOUZA, Zulcy. **Máquinas de Fluxo: turbinas, bombas e ventiladores**. Rio de Janeiro: Editora Ao Livro Técnico S. A, 1969.

CAMUS, C., EUSÉBIO, E. GESTÃO DE ENERGIA - **Energia Mini-Hídrica**. ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. DEEA – Secção de Economia e Gestão, 2006.

CERPCH. **Turbina Francis**. Disponível em: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/pelton.php>. Acesso em 10/06/2014.

CERPCH. **Pequena Central Hidrelétrica**. Disponível em: http://www.cerpch.unifei.edu.br/michell_banki.php. Acesso em: 10/06/2014.

_____. **Micro e Mini Centrais Hidrelétricas: Soluções para Comunidades Isoladas da Região Amazônia**. 1. Ed., 2008.

ENERGIA RENOVÁVEL. Disponível em: <http://www.energiarenovavel.org/>. Acesso em 12/01/2014.

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

ELETROBRÁS. **Diretrizes de Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Brasília, 2012.

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.

GLOBAL HYDRO, Turbina Francis. Disponível em: <http://www.global-hydro.eu/en/technology/francis/>. Acesso em 12/07/2014.

HARVEY, Adam; BROWN, Andy; HETTIARACHI, Priyantha; INVERSIN, Allen R. **Micro-hydro design manual: a guide to small scale power schemes**. 1. ed. Londres: IT, 1998.

IDER. **Energias Renováveis**. Disponível em: <http://www.ider.org.br/energias-renovaveis/energias-renovaveis>. Acesso em 12/01/2014.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. **Recursos hídricos**. Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br>. Acesso em 08/01/2015.

JUNIOR, Antônio G. de Mello. **A turbina de fluxo cruzado (Michell-Banki) como opção para centrais hidráulicas de pequeno porte**. Dissertação de pós-graduação. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2000.

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

PFLEIDERER, Carl; PETERMANN, Hartwig. **Máquina de fluxo**. Tradução: Ana Lucia S. de Almeida; José ^a Royo dos Santos e Zulcy de Souza. Rio de Janeiro: Livros Técnicos, 1979.

SCHREIBER, Gerhard Paul. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo: Editora Blücher, 1978.

SILVA, Alex M.L.; JUNIOR, Anibal C.; ORTEGA, Luis A.. **Medição da Vazão do Rio Rancharia e Estudo do Melhor Aproveitamento Potencial Hidrelétrico da Usina**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Elétrica – ênfase em Eletrotécnica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SIMONE, G.A. **Centrais e Aproveitamentos Hidrelétricos** – Uma Introdução ao Estudo. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2000.

SIQUEIRA, RICARDO BARBOSA POSCH, 2006. **Construção de Diagramas de Custos para PCH Incorporando Turbinas de Mercado, 150 f**. Dissertação de Mestrado. Em: Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

SOUZA, Zulcy; SANTOS, Afonso H. M.; BORTONI, Edson da C. **Centrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1999.

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

_____. **Centrais Hidrelétricas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

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

ZECO. **Turbina Pelton**. Disponível em: < <http://www.zeco.it/zeco-group/zeco-turbine/turbina-pelton/>> Acesso em 12/07/2014.

ANEXO 1 – Tabela para cálculo da potência no eixo da turbina Michell-Banki

Queda Metros		Potência em C.V.																				
		Vazões em Litros por Segundo																				
		20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200	240	280	320	360	400	500	600	800	1000
2	Modelo	1515	2020	2020	2020	2030	2040	2040	3040	3040	3040	4045	4045	4045	4065	4065	4085	4085	40120	40120	40140	50140
	Potência	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,5	1,8	2,2	2,6	2,9	3,3	3,7	4,5	5,2	6	6,8	7,5	9,5	11,4	15,2	20
3	Modelo	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2040	3040	3040	3040	4045	4045	4045	4045	4065	4065	4085	40120	40120	40140	40140
	Potência	0,5	0,8	1,1	1,3	1,6	2,2	2,7	3,3	3,9	4,4	5	5,6	6,7	7,8	8,9	10	11,2	14,1	17,1	22,8	28,5
4	Modelo	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2040	3040	3040	3040	4045	4045	4045	4045	4065	4065	4085	40120	40120	40140	40140
	Potência	0,7	1	1,4	1,8	2,1	2,9	3,6	4,4	5,1	5,9	6,6	7,4	8,9	10,4	11,9	13,4	14,9	18,8	22,6	30,4	38
5	Modelo	1510	1515	1515	2020	2020	2020	2030	2040	2040	3040	3040	3040	4045	4045	4045	4045	4065	4065	4085	40120	40120
	Potência	0,9	1,3	1,7	2,2	2,7	3,6	4,6	5,5	6,4	7,3	8,3	9,2	11	13	14,9	16,7	18,6	23,3	28,2	38	47,5
6	Modelo	1510	1515	1515	2020	2020	2020	2030	2040	2040	3040	3040	3040	4045	4045	4045	4045	4065	4065	4085	4090	40120
	Potência	1	1,6	2,1	2,6	3,2	4,3	5,5	6,6	7,6	8,7	9,9	11	13,2	15,6	17,9	20,1	22,3	27,9	33,5	45,1	57
7	Modelo	1510	1515	1515	2020	2020	2020	2030	2040	2040	3040	3040	3040	4045	4045	4045	4045	4065	4065	4085	4085	40120
	Potência	1,2	1,8	2,4	3	3,7	5	6,4	7,6	8,9	10,2	11,5	12,9	15,5	18	20,8	23,4	26	32,6	39,1	52,6	66,5
8	Modelo	1510	1510	1515	1515	2020	2020	2020	2030	2040	2040	2040	3040	3040	3040	3040	3040	3040	4045	4065	4085	40120
	Potência	1,4	2,1	2,8	3,5	4,3	5,7	7,1	8,7	10,2	11,6	13,1	14,6	17,7	20,6	23,8	26,8	29,8	37,2	44,6	60,2	76
10	Modelo	1510	1510	1510	1515	1515	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	3040	3040	3040	3040	3040	4045	4065	4085	4085
	Potência	1,7	2,6	3,5	4,4	5,2	7,1	8,9	10,9	12,7	14,6	16,4	18,2	22,1	25,8	29,4	33,5	37,2	46,5	55,8	75,2	94
12	Modelo	1510	1510	1515	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	3040	3040	3040	3040	3040	4045	4065	4085	4085
	Potência	2,1	3,1	4,2	5,2	6,3	8,5	10,7	12,8	15,3	17,5	19,7	21,8	26,2	30,9	35,3	39,7	44,6	55,8	67	89,3	112,8
14	Modelo	1510	1510	1515	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	3040	3040	3040	3040	3040	4045	4065	4085	4085
	Potência	2,4	3,7	4,9	6,1	7,3	10	12,5	15	17,8	20,4	22,9	25,5	30,6	36,1	41,2	46,4	51,5	65,1	78,1	104,2	131,6
16	Modelo	1510	1510	1510	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2040	2040	3040	3040	4045	4065	4085
	Potência	2,8	4,2	5,6	7	8,4	11,4	14,2	17,1	19,9	23,3	26,2	29,1	34,9	40,8	47,1	53	58,9	74,4	89,3	119	150,4
18	Modelo	1510	1510	1510	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2040	3040	3040	4045	4065	4085	4085
	Potência	3,6	4,7	6,3	7,8	9,4	12,5	16	19,2	22,4	26,2	29,5	32,8	39,3	45,9	53	59,6	66,2	83,7	100,4	133,9	167,4
20	Modelo	1510	1510	1510	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2040	2040	3040	3040	4045	4065	4085
	Potência	4	5,2	7	8,7	10,4	13,9	17,8	21,4	24,9	28,5	32,8	36,4	43,7	51	58,2	66,2	73,6	92	111,6	148,8	186
22	Modelo	1510	1510	1510	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2040	2040	3040	3040	4045	4065	4085
	Potência	4,4	6,6	8,8	11	13,2	17,6	19,6	23,5	27,4	31,3	36	40	48	56,1	64,1	72,9	81	101,2	122,8	163,7	204,6
24	Modelo	1510	1510	1510	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2040	2040	3040	3040	4045	4065	4085
	Potência	4,8	7,2	9,6	12	14,4	19,2	21,4	25,6	29,9	34,2	38,4	43,7	52,4	61,2	69,9	79,5	88,3	110,4	133,9	178,6	223,2
26	Modelo	1510	1510	1510	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2040	2040	3040	3040	4045	4065	4085
	Potência	5,2	7,8	10,4	13	15,6	20,8	23,1	27,8	32,4	37	41,7	47,3	56,8	66,2	75,7	85,2	95,7	119,6	145,1	193,4	241,8
28	Modelo	1510	1510	1510	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2040	2040	3040	3040	4045	4065	4085
	Potência	5,6	8,4	11,2	14	16,8	22,4	28	29,9	34,9	39,9	44,9	51	61,2	71,3	81,5	91,7	103	128,8	156,2	208,3	260,4
30	Modelo	1510	1510	1510	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2040	2040	3040	3040	4045	4065	4085
	Potência	6	9	12	15	18	24	30	32	37,4	42,7	48,1	53,4	65,5	76,4	87,4	98,3	109,2	138	165,6	223,2	279
35	Modelo	1510	1510	1510	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2040	2040	3040	3040	4045	4065	4085
	Potência	7	10,5	14	17,5	21	28	35	37,4	43,6	49,8	56,1	62,3	76,4	89,2	101,9	114,7	127,4	161	193,2	260,4	325,5
40	Modelo	1510	1510	1510	1510	1515	2020	2020	2020	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2040	2040	3040	3040	4045	4065	4085
	Potência	8	12	16	20	24	32	40	48	49,8	57	64,1	71,2	87,4	101,9	116,5	131	145,6	184	220,8	297,6	372

Fonte: Turbinas Beta (www.bettahidroturbinas.com.br)

ANEXO 2 – LAUDO DO INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ (1/2)



AGUASPARANÁ
Instituto das Águas do Paraná



PARANÁ
GOVERNO DO ESTADO

PORTARIA Nº 920/2012 - DPCA

O INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ por intermédio de seu DIRETOR PRESIDENTE, com fundamento no artigo 39 – A, inciso IX da Lei Estadual nº 12.726, de 28 de novembro de 1.999 e artigo 5º e 6º, inciso I a VI, do Decreto Estadual nº 4.646, de 31 de agosto de 2001, e conforme informações constantes no Protocolo nº 11.511.291-0, resolve:

Art. 1º. Outorgar previamente o aproveitamento de potencial hidrelétrico, na modalidade de parecer administrativo, sob regime e condições abaixo especificadas, em favor de:

Razão social	: PEDRO PROENÇA DOS SANTOS
C.N.P.J.	: 567.957.859-04
Endereço	: Rocinha - CGH Rancharia.
Bairro/distrito	: Vila Velha
Município	: Rio Branco do Sul
Atividade	: Produção e distribuição de energia elétrica
Bacia hidrográfica	: Ribeira
Curso d'água	: Rio Rancharia
Vazão máx. engolimento	: 560,00 L/s
Vazão do vertedouro	: 3850,00 L/s
Vazão mín. de jusante	: 16,45 L/s
Coordenadas UTM	: 7214102 N 670823 E Fuso (22)

Art. 2º. Este ato de outorga prévia, objeto desta Portaria, tem como finalidade precípua, declarar a reserva de disponibilidade hídrica, para efeito de aplicação do disposto no artigo 7º, da Lei Federal nº 9.984, de 17/07/2000.

Art. 3º. Este ato de outorga prévia, objeto desta Portaria, não estabelece direitos de uso de recursos hídricos, correspondendo somente à manifestação prévia do Poder Público Outorgante quanto ao objeto requerido, possibilitando ao Outorgado prosseguir no planejamento e projeto de empreendimento, no atendimento às etapas de licenciamentos previstas nas legislações sobre uso e ocupação do solo, meio ambiente, exploração e aproveitamento de recursos naturais e, ainda, no cumprimento das demais disposições legais e regulamentares aplicáveis.

Art. 4º. O ato de outorga prévia estará garantido ao Outorgado, desde que os elementos do processo administrativo que deram sustentação a esta manifestação não venham a ser alterados nas fases subsequentes do processo administrativo de requerimento de autorização de direito de uso de recursos hídricos.

Art. 5º. A Outorga Prévia, objeto desta Portaria, vigorará pelo prazo de **5 (cinco) anos**.

Art. 6º. O Poder Público Outorgante pode, em decisão motivada, suspender, total ou parcialmente, em definitivo ou por prazo determinado, a outorga prévia concedida.

Art. 7º. A outorga prévia, objeto desta Portaria, poderá ser revogada, nos casos de indeferimento ou cancelamento da licença ambiental emitida pelo órgão ambiental competente ou se as licenças municipais para construção e funcionamento não forem emitidas, se for o caso dessas exigências.

Parágrafo único. As hipóteses de revogação de outorga não se limitam ao rol de situações descritas no art. 35 do Decreto Estadual nº 4.646/2001, uma vez que a outorga remete a ato administrativo e, nessa condição, submete-se a regime jurídico próprio, podendo o Poder Público Outorgante, por motivo de conveniência ou oportunidade, respeitados os direitos adquiridos, e ressalvada, em todos os casos, a apreciação judicial, revogar a outorga prévia concedida.

Art. 8º. Esta Portaria não dispensa nem substitui a obtenção pelo outorgado de certidões, alvarás ou licenças de qualquer natureza, exigidas pela legislação federal, estadual ou municipal.



Rua Santo Antonio, 239 – Rebouças –
CEP: 80230-120 – Curitiba-Paraná-Brasil
Fone: (41) 3213 4700 – Fax: (41) 3213 4800

ANEXO 2 – LAUDO DO INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ (2/2)

