

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

**RAFAEL MERIGUE
RICARDO SALOMÉ SILVA**

**ESTUDO DE TURBINAS PARA HIDRELÉTRICA DE RONCADOR –
BOCAIÚVA DO SUL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA - PR
2013**

**RAFAEL MERIGUE
RICARDO SALOMÉ SILVA**

**ESTUDO DE TURBINAS PARA HIDRELÉTRICA DE RONCADOR –
BOCAIÚVA DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Professor Dr. Gilberto Manoel Alves.

**CURITIBA – PR
2013**

Rafael Merigue
Ricardo Salomé Silva

Estudo de turbinas para hidrelétrica de Roncador - Bocaiúva do Sul

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

Curitiba, 09 de abril de 2013.

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

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Coordenador dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Clider Adriane de Souza Silva, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Eloi Rufato Junior, Me.
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

Agradecemos primeiramente ao professor Doutor Gilberto Manoel Alves pelo apoio e orientação para a realização dos estudos e deste trabalho.

Em especial aos nossos familiares e colegas que contribuíram com apoio e foram compreensíveis nos momentos que não estávamos presentes e sempre incentivaram para que atingíssemos nossos objetivos.

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

“Há poucos homens capazes de prestar homenagem ao sucesso de um amigo, sem qualquer inveja”.

Ésquilo.

RESUMO

SILVA, Ricardo S.; MERIGUE, Rafael. **Estudo de turbinas para hidrelétrica de Roncador – Bocaiúva do Sul**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

Em reunião realizada em 27 de setembro de 2010 entre o Campus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e a Prefeitura de Bocaiúva do Sul – Paraná, foi assinado o Termo de Convênio para criação de um Centro de Educação Ambiental na cidade, o qual inclui a implantação de uma usina hidrelétrica com finalidade didática. 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 Bocaiúva do Sul revitalização e desenvolvimento, haja vista que está completamente abandonada e sem proveito.

Palavras-Chave: Bocaiúva do Sul. Hidrelétrica. Turbinas. Usina Didática.

ABSTRACT

SILVA, Ricardo S.; MERIGUE, Rafael. **Study of turbines for Roncador hydroelectric – Bocaiúva do Sul**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

In a meeting on September 27th, 2010 between the Curitiba Campus of the Federal Technological University of Paraná (UTFPR) and the City Bocaiúva do Sul-Paraná, was signed an Agreement for the creation of an Environmental Education Center in the city, which includes the deployment of a hydroelectric plant with didactic purposes. The work presented deals with the studies of the turbines that will be applied at the power plant. It Will be exposed the history of the turbines, their functions in an objective ways and capacities of electricity generation based on hydrological data collected in previous studies. Besides the didactic benefits to the UTFPR and their students, since they can combine theory and practice, the region of Bocaiúva will be revitalized and developed, considering that it is completely abandoned and unprofitable.

Keywords: Bocaiúva do Sul. Hydroelectric Plant. Turbines. Didactic power plant.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Rotação da turbina.....	25
Equação 2: Rotação específica.....	26
Equação 3: Vazão Média Turbinada para as Permanências P0 e P1.....	42
Equação 4: Vazão Média Turbinada para as Permanências P0 e P2 (A).....	42
Equação 5: Acréscimo de Área Sob a Curva e a Área Anterior.....	43
Equação 6: Vazão Média Turbinada para as Permanências P0 e P2 (B).....	43
Equação 7: Vazão Média Turbinada – Equação Genérica (A).....	43
Equação 8: Vazão Média Turbinada – Equação Genérica (B).....	44
Equação 9: Potência bruta.....	47
Equação 10: Potência absorvida.....	48
Equação 11: Rendimento da turbina.....	48
Equação 12: Potência entregue pelo eixo da turbina.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	11
Figura 2: Localização Geográfica do Município de Bocaiúva do Sul.....	17
Figura 3: Vista aérea da hidrelétrica de Roncador	18
Figura 4: Instalações da Usina de Roncador.....	19
Figura 5: Fluviograma de vazões médias mensais para a Usina de Roncador.....	21
Figura 6: Variação da velocidade e da pressão da água em sua passagem por (a) uma turbina de reação e (b) uma turbina de ação.....	23
Figura 7: Gráfico para escolha da turbina de acordo com queda e vazão.	25
Figura 8: Desenho esquemático de uma turbina Pelton.....	30
Figura 9: Rotor Pelton	31
Figura 10: desenho esquemático de uma Turbina Francis vertical	32
Figura 11: Rotor de turbina Francis dupla eixo horizontal.	33
Figura 12 desenho esquemático de uma turbina Kaplan vertical.	34
Figura 13: Turbina Kaplan.....	35
Figura 14: Componente de uma turbina Kaplan.....	35
Figura 15: desenho esquemático de uma turbina Banki.	37
Figura 16: Rotor Banki.	37
Figura 17: Geometria do rotor Pelton.	38
Figura 18: Geometria do rotor Francis.	39
Figura 19: Geometria do rotor Kaplan.	39
Figura 20: Geometria do rotor Banki.	40
Figura 21: Curva de Permanência da Usina de Roncador.	41
Figura 22: Curva de permanência exemplo de construção da curva de energia.	42
Figura 23: Curva de Energia da Usina de Roncador.....	46
Figura 24: Volume aproveitável conforme vazão de projeto.	47
Figura 25: Rendimento de turbinas com variação da vazão turbinada em relação à nominal mantendo queda líquida constante.	49
Figura 26 – Danos causados por cavitação em uma Turbina Francis.....	52
Figura 27 – Escoamento em tubo e pressão de vapor.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação de turbinas de acordo com faixa de quedas.....	24
Tabela 2: Velocidade de Rotação	26
Tabela 3: Principais características das turbinas fabricadas no Brasil.....	27
Tabela 4: Escolha da turbina pela rotação específica.....	28
Tabela 5: Valores relacionados da curva de permanência da Usina de Roncador. ..	45
Tabela 6: Valores de vazão média turbinada de Usina de Roncador.....	45
Tabela 7: Rendimento das turbinas de acordo com a vazão turbinada.....	50
Tabela 8: Máximo de perdas de carga no sistema de adução	51
Tabela 9: Potência entregue pelo eixo das turbinas.....	51

SUMÁRIO

1	Introdução	10
1.1	TEMA DE PESQUISA	10
1.1.1	Delimitação do Tema	11
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	12
1.3	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivo Geral	12
1.3.2	Objetivos Específicos	12
1.4	JUSTIFICATIVA	13
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
1.7	CRONOGRAMA	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	BOCAIUVA DO SUL	16
2.1.1	Histórico	16
2.1.2	Localização	16
2.1.3	População	17
2.1.4	Hidrografia	17
2.2	USINA DE RONCADOR	18
2.2.1	Histórico	18
2.2.2	Localização	18
2.2.3	Situação atual	19
2.2.4	Revitalização	20
2.2.5	Dados Hidroenergéticos	20
2.2.6	Reservatório	21
2.2.7	Queda Bruta	21
3	TURBINAS HIDRÁULICAS	22
3.1	INTRODUÇÃO	22
3.2	SELEÇÃO DA TURBINA HIDRÁULICA	24
3.3	PELTÓN	29
3.3.1	Histórico	29
3.3.2	Funcionamento	30
3.4	FRANCIS	31
3.4.1	Histórico	31
3.4.2	Funcionamento	32
3.5	KAPLAN	33
3.5.1	Histórico	33
3.5.2	Funcionamento	34
3.6	BANKI	36
3.6.1	Histórico	36
3.6.2	Funcionamento	36
3.7	SINTESE TURBINAS HIDRÁULICAS	38
4	Análises técnicas	41
4.1	ESTUDO HIDROENERGÉTICO	41
4.2	ANÁLISE DAS POTÊNCIAS DA USINA DE RONCADOR	47
4.3	CAVITAÇÃO	52
4.4	OPERAÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS	54
5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA DE PESQUISA

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, 2002).

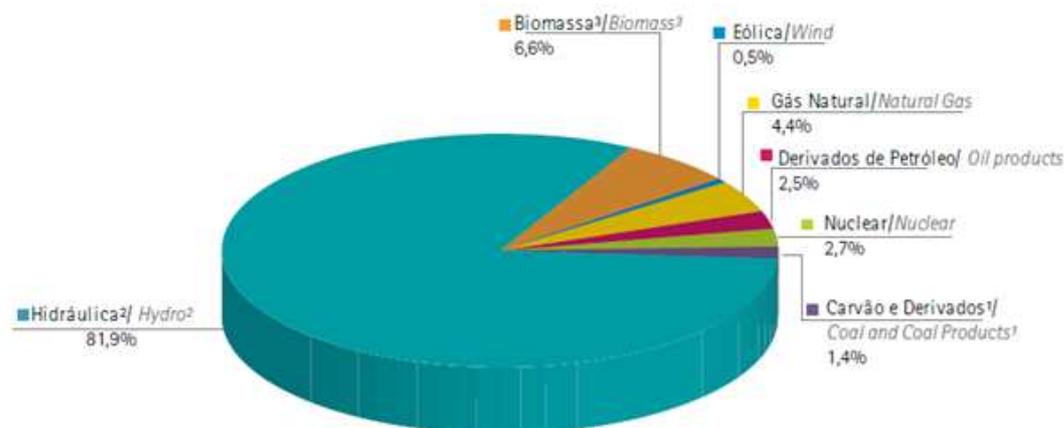
As energias renováveis são, na atualidade, um dos mais importantes assuntos para as discussões sobre o futuro da humanidade. Ao mesmo tempo em que se busca ampliar a oferta e reduzir os custos, crescem as preocupações com a sustentabilidade e o meio ambiente. É nesse contexto que as energias renováveis surgem e ganham destaque, tendo apoio de diversos grupos e organizações para a sua ampliação (IDER, 2012).

Segundo o Portal Brasileiro de Energias Renováveis (2011), as fontes de energia renovável são aquelas em que os recursos naturais utilizados são capazes de se regenerar, ou seja, são considerados inesgotáveis, diferente de fontes não renováveis como o petróleo.

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

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

Pode-se observar que o Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, sendo que a geração interna hidráulica responde por 74,0% da oferta. Somando as importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que 89% da eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis (BEN, 2012).



Notas/ Notes:

¹ Inclui gás de coqueria/ Includes coke oven gas

² Inclui importação de eletricidade/ Includes electricity imports

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações/ Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Figura 1: Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.
Fonte: Balanço Energético Nacional, 2012.

Mesmo com o aumento de outras fontes alternativas de energia, devido a restrições econômicas e ambientais sobre usinas hidrelétricas, existe a indicação de que a energia de hidrelétricas continuará sendo a principal fonte geradora de energia elétrica do país. Estipula-se que, no mínimo, 50% da necessidade de expansão da capacidade de geração de energia nos próximos anos sejam de origem hídrica (PORTAL BRASILEIRO..., 2011).

Assim, com o crescente potencial de geração por hidrelétrica e a busca por reduzir o impacto ambiental, pequenas centrais tem vantagens frente a grandes obras como Itaipu e Belo Monte, pois aquelas representam uma forma rápida e eficiente de promover a expansão da oferta de energia elétrica, além de suprir a crescente demanda verificada no mercado nacional (ANEEL GUIA DO EMPREENDEDOR..., 2003).

1.1.1 Delimitação do Tema

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

Já está em andamento o estudo para revitalização da Hidrelétrica de Roncador no município de Bocaiúva do Sul – PR o qual apresenta um diagnóstico de todas as instalações da usina verificando o que deve ser alterado ou acrescentado.

Neste contexto, o presente trabalho fará o estudo das turbinas que serão instaladas na hidrelétrica, fazendo um comparativo entre as turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Banki em função da vazão e da queda d'água. Em seguida, analisando a aplicação de cada uma na usina de Roncador, obteremos através de cálculos a potência elétrica gerada.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A principal pesquisa envolvendo o trabalho é realizar o estudo de viabilidade técnica 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.

Outro ponto importante é justificar e tornar viável a implantação de diversas turbinas para uma mesma queda e vazão, uma vez que há um modelo mais eficiente para cada combinação das variáveis descritas (BORTONI, 2011).

Objetiva-se verificar quais as características dos equipamentos disponíveis no mercado para o que está sendo proposto e as condições operacionais destes.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar e comparar os aspectos técnicos para implantação das turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Banki na Usina Roncador.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar as tecnologias e os equipamentos existentes para a geração de energia elétrica por meio de turbinas hidráulicas;
- Fazer um estudo para determinação da melhor turbina;
- Analisar e montar um comparativo de fornecimento de energia 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 de Roncador.

1.4 JUSTIFICATIVA

A busca por fontes alternativas de energia está em pauta atualmente. Somada a relevância social que pequenas centrais são sistemas de produção energética renovável excelente (ALVES, 2007) e que o Brasil fará pelo menos 50% de sua expansão da necessidade energética pelo sistema hídrico (PORTAL BRASILEIRO..., 2011), as centrais hidrelétricas de pequeno porte têm ótimas características buscando melhorias nas questões políticas, sociais e ambientais e técnicas como:

- Novas tecnologias visando reduzir custos, obter maior rendimento e menor impacto ambiental;
- Descentralização da geração de energia elétrica;
- Maior aproveitamento do potencial de energia existente em pequenas quedas d'água;
- Tecnologia com alta eficiência em relação a outros métodos de geração;
- Impactos ambientais reduzidos em comparação com grandes hidrelétricas;
- Utilização de fonte renovável de energia.

Em muitas disciplinas, nos cursos relacionados à engenharia elétrica, são mencionados geradores, turbinas, sistemas de proteção entre outros assuntos presentes em centrais hidrelétricas. Contudo, o corpo discente não tem a possibilidade de realizar atividades práticas devido a não existência de um local para tal finalidade.

A implantação de uma usina didática proporcionará estudar alguns desses aspectos em uma instalação real, aplicando o conhecimento teórico adquirido em sala. O estudo das diferentes turbinas a serem aplicadas possibilitará que sejam verificadas suas aplicações na Hidrelétrica, estudando também as adaptações necessárias.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

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

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

O estudo das turbinas da Usina Hidrelétrica de Roncador, localizada no município de Bocaiúva do Sul, no estado do Paraná, será fundamentado em dados coletados na pesquisa bibliográfica, relacionando-os sempre à realidade do projeto.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho será composto de quatro capítulos para abranger todo o conteúdo necessário.

O capítulo 1, Introdução ao tema e proposta de estudo, explica o tema central da pesquisa, introduz a necessidade de fontes renováveis de energia, foca na energia obtida através de hidrelétricas e apresenta os assuntos abordados.

O capítulo 2, Fundamentação Teórica, mostra a fundamentação necessária à compreensão dos termos e explicita os conceitos por trás de uma central hidrelétrica: classificação de usinas, estudo energético nacional e exemplos.

O capítulo 3, Turbinas Hidráulicas, apresenta o histórico das turbinas estudadas, seus funcionamentos e aplicabilidades.

O capítulo 4, Análises Técnicas, compila os dados gerais sobre as características técnicas das turbinas limitando sua área de atuação à usina de Roncador por meio de tabelas e planilhas. Assim, se podem fazer comparações de forma rápida e eficiente.

Para finalizar, são explicitadas as conclusões obtidas bem como as referências utilizadas para elaboração do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BOCAIÚVA DO SUL

2.1.1 Histórico

Ao serem descobertos os campos de Curitiba, já existia, no planalto curitibano, uma localidade chamada Arraial Queimado. Segundo consta, essa denominação originou-se de um incêndio que teria destruído a sua primitiva povoação, que se supõe tenha sido de mineradores. Depois do acidente, o local foi sendo abandonado e, depois de muitos anos, com o estabelecimento da família de Manoel José Cardoso, iniciou-se o repovoamento da região (IBGE, 2011).

Após a Proclamação da República, o Município de Arraial Queimado passou a denominar-se Bocaiúva, em homenagem ao Ministro das Relações Exteriores do governo provisório, Quintino Bocaiúva, ato que se concretizou pelo Decreto nº 19 de 11 de janeiro de 1890 (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL, 2011).

Somente em março de 1938, por força do decreto lei nº 705, a sede municipal foi elevada à categoria de cidade e no ano de 1946, o Decreto Lei Estadual, o município passou a denominar-se Bocaiúva do Sul. O Prefeito Manoel Costacurta que teve o mandato durante o período de 1947 à 1951, realizou algumas obras de relevância, entre elas, a usina Hidroelétrica de Roncador, atualmente desativada (PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL, 2011).

2.1.2 Localização

De acordo com o IBGE (2011), o município de Bocaiúva do Sul possui uma área territorial de 826 km², distante 41,60 km da Capital e está localizado a uma altitude média de 980 m, localizando-se com as coordenadas: Latitude 25°13'00" e Longitude 49°06'00", fazendo parte da Região Metropolitana de Curitiba desde janeiro de 1974. Possui como áreas limítrofes os municípios de Colombo, Campina Grande do Sul, Rio Branco do Sul, Tunas do Paraná e Adrianópolis.

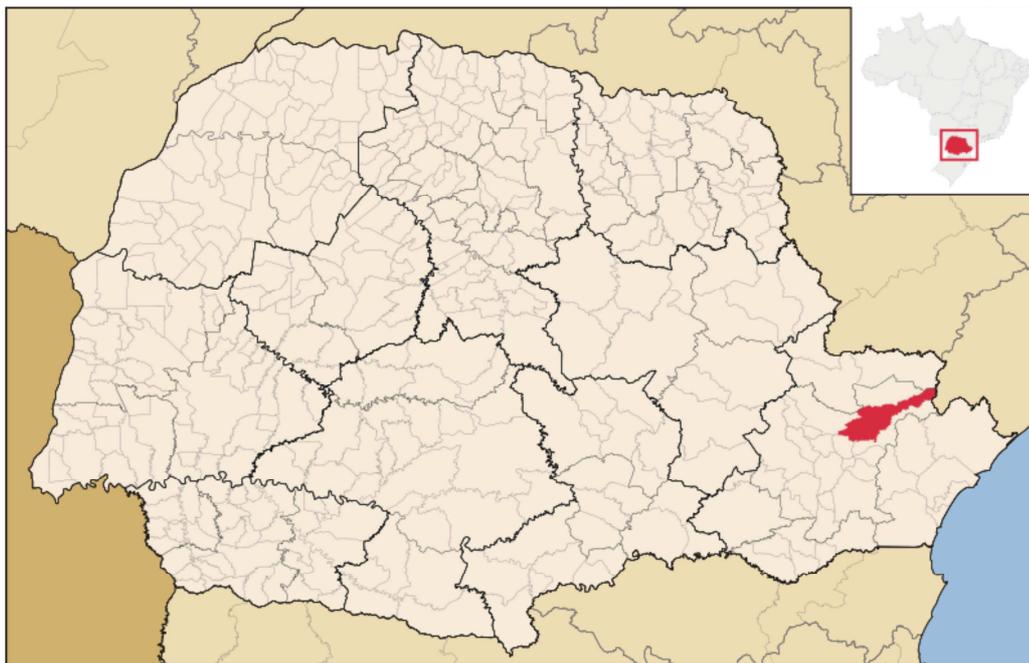


Figura 2: Localização Geográfica do Município de Bocaiúva do Sul
Fonte: Prefeitura municipal de Bocaiúva do Sul (2011)

2.1.3 População

De acordo com o Censo Demográfico do IBGE no ano de 2010, o município possui uma população de 10.987 habitantes, dos quais cerca de 61% da população habitam a zona rural e apenas 39% do total se distribuem na zona urbana (IBGE, 2011).

2.1.4 Hidrografia

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

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

2.2 USINA DE RONCADOR

2.2.1 Histórico

De acordo com a prefeitura municipal de Bocaiúva do Sul (2011), entre 1947 e 1951 o Sr. Manoel Costacurta foi o prefeito, e em sua gestão realizou 4 obras de relevância para o município: hospital (hoje Hospital Municipal Santa Júlia); o Grupo Escolar Coronel Gordiano Dias Batista (atual Colégio Estadual "Carlos Alberto Ribeiro" ensino de 1º e 2º graus); o Clube Recreativo Bocaiuvense; e a Usina Hidrelétrica de Roncador, atualmente desativada.

Segundo o Instituto das Águas do Paraná (2011) o início da operação ocorreu em 1953 sendo composto de dois geradores, um de 200 kW e outro de 30 kW ambos com turbina do tipo Francis. A sua desativação ocorreu em 1959.

2.2.2 Localização

A Usina de Roncador localiza-se no município de Bocaiúva do Sul localizada ao Leste do Estado do Paraná – latitude 25°11'14"S e 49°08'23" W (INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ, 2011).

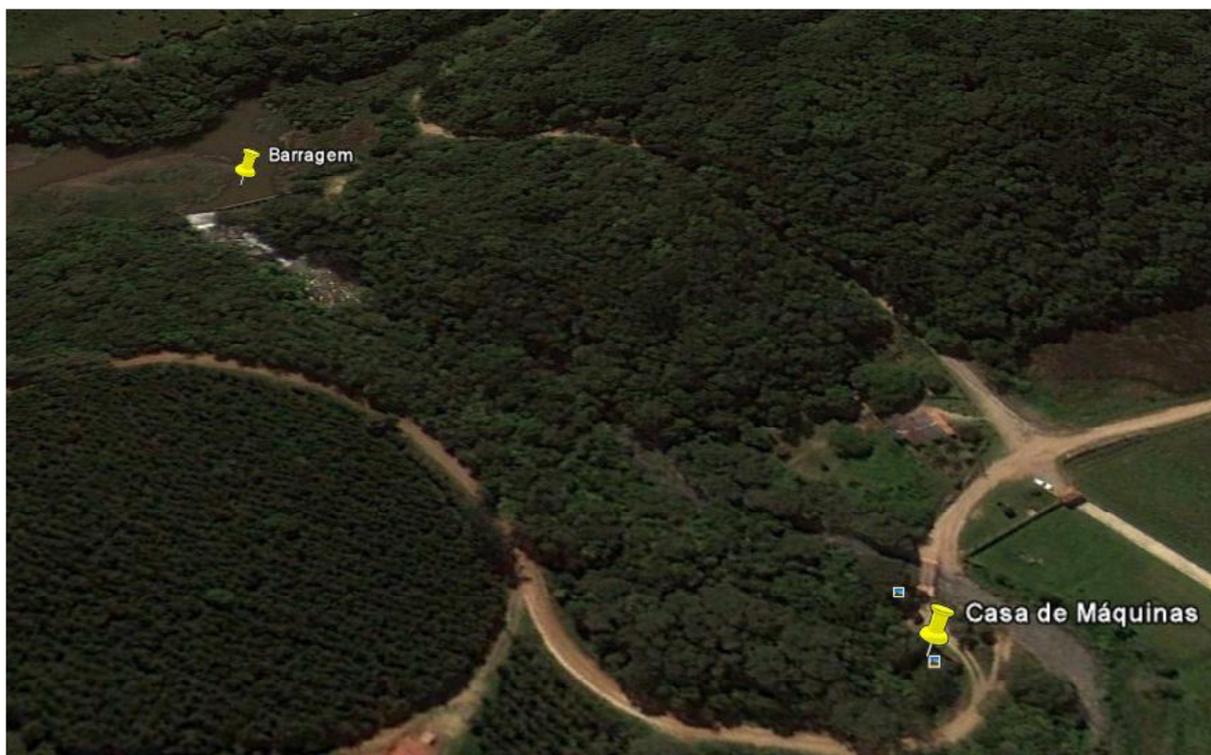


Figura 3: Vista aérea da hidrelétrica de Roncador
Fonte: Google Earth, 2011.

Distante 3 km de Bocaiúva do Sul e a 44,60 km de Curitiba, situa-se no curso d'água Rio Santana que pertence à sub-bacia do Rio Capivari, este um dos principais rios da região e da Bacia Hidrográfica do Atlântico trecho Sudeste (REIS, FILHO E SOUZA, 2011).

2.2.3 Situação atual

Segundo Reis, Filho e Souza (2011),

a Usina de Roncador foi desativada há mais de 40 anos e grande parte das instalações existentes na época de seu funcionamento hoje está deteriorada pelo tempo ou por atos de vandalismo. As Figuras 4.a, 4.b e 4.c mostram a casa de máquinas, o conduto forçado e a barragem, respectivamente.



(a) – Casa de máquinas



(b) – Conduto forçado



(c) - Barragem

Figura 4: Instalações da Usina de Roncador.
Fonte: REIS, FILHO E SOUZA, 2011.

2.2.4 Revitalização

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e a Prefeitura de Bocaiúva do Sul estão reativando a Usina Hidrelétrica de Roncador, de acordo com o Termo de Convênio firmado no dia 27/09/2010.

Fechada há mais de 40 anos, após a reativação, a Usina Roncador deverá proporcionar espaços de uso conjunto pela Universidade e pela prefeitura, que poderão ser utilizados para ações de meio ambiente, turismo e tecnológicas. A intenção desse projeto é tornar a usina um ambiente educativo, pensando-se também a questão ambiental (UTFPR, 2010).

2.2.5 Dados Hidroenergéticos

Segundo Ricardo (2006),

a determinação da vazão característica de um curso d'água possui caráter estatístico, admitindo-se que os eventos se repetem de forma cíclica. Dessa forma, para se determinar a vazão de projeto de um aproveitamento hidrelétrico, faz-se necessário conhecer a série histórica de vazões para o local, num período mais extenso possível.

Devido aos fatos da Usina de Roncador estar localizado num pequeno córrego na região rural de Bocaiúva do Sul e de estar desativada há mais de 4 (quatro) décadas, não há informações disponíveis quanto à sua série histórica nos registros da Agência Nacional de Águas.

Dada a indisponibilidade de dados, para se obter a série histórica de vazões da Usina de Roncador é necessário realizar uma transposição de vazões, que consiste em obter uma relação entre a vazão num curso d'água com série histórica desconhecida e a vazão num curso d'água com série conhecida. Este procedimento só é válido para o caso de cursos d'água presentes numa mesma bacia hidrográfica (SOUZA, FUCHS E SANTOS, 1983).

Para se obter a série histórica da Usina de Roncador, foi utilizada a série histórica do posto fluviométrico Capivari-Montante, que apresenta vazões da Usina GPS de 1984 a 2005 (REIS, FILHO E SOUZA, 2011).

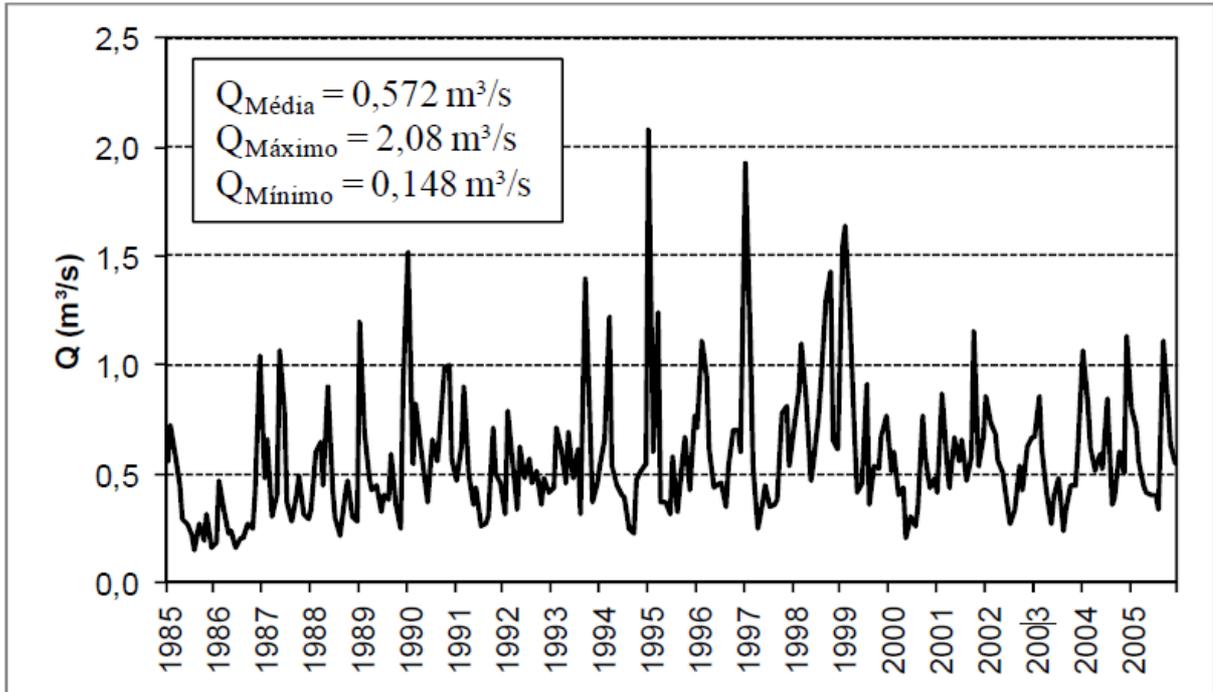


Figura 5: Fluviograma de vazões médias mensais para a Usina de Roncador.
Fonte: Reis, Filho e Souza (2011).

Pelo fluviograma da figura 5 foi possível calcular a vazão média na Usina de Roncador para um período de 21 (vinte e um) anos. O valor encontrado foi de 0,572 m³/s (REIS, FILHO E SOUZA, 2011).

2.2.6 Reservatório

Esta Usina tem seu funcionamento a fio de água, isto é, o volume criado pela barragem é desprezado. A vazão de estiagem atende a demanda máxima prevista instalada. Sua barragem possui altura pequena, pois sua função é desviar água para o circuito de adução (GARCIA, POMPERMAIER E REBELATTO, 2011).

2.2.7 Queda Bruta

A queda bruta corresponde à diferença de altura entre o nível d'água no reservatório e a casa de máquinas.

Para a Usina de Roncador, de acordo com Reis, Filho e Souza (2011), ela foi obtida a partir das leituras linimétricas realizadas através de medição e da diferença de altura entre a barragem e a casa de máquinas. O valor obtido foi de 14,8 metros.

3 TURBINAS HIDRÁULICAS

3.1 INTRODUÇÃO

Segundo Souza, Fuchs e Santos (1983) a turbina hidráulica é definida 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 destinado, respectivamente, à orientação da água em escoamento e à transformação em trabalho mecânico.

Existem vários tipos de turbinas hidráulicas, cada qual com a sua aplicação, rendimento e histórico. Fora a evolução do estudo de rodas de água dos antigos engenhos, ainda encontradas em pequenos sítios, que originou as atuais turbinas hidráulicas, sendo que a principal diferença está no sistema fechado das turbinas, no qual a água é levada por um tubo de grande pressão que impele a roda a girar em grande velocidade (ALVES, 2007).

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

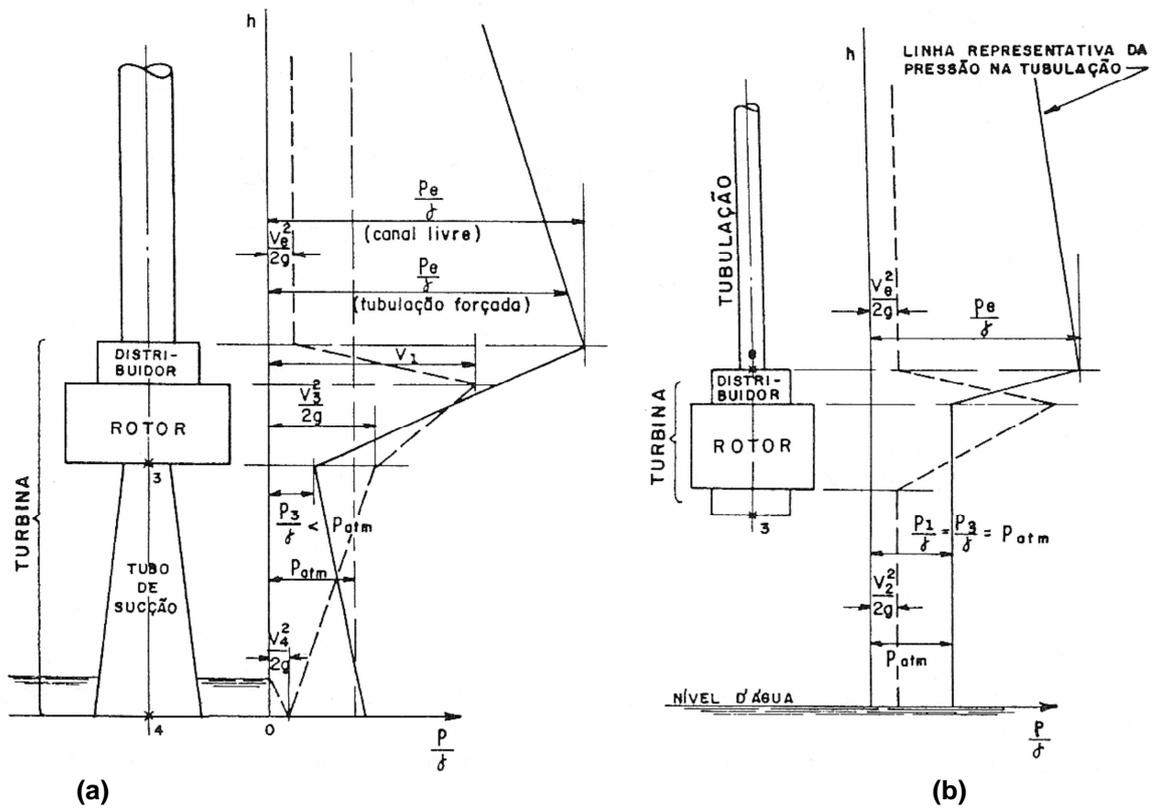


Figura 6: Variação da velocidade e da pressão da água em sua passagem por (a) uma turbina de reação e (b) uma turbina de ação.
 Fonte: MACINTYRE (1983).

Podemos compilar as turbinas e classificá-las de acordo com seu modo de conversão de energia, direção do fluxo e definir sua aplicação conforme Tabela 1.

Tabela 1: Classificação de turbinas de acordo com faixa de quedas.

Tipos de Turbina		Aplicação
Pela conversão de Energia	Pela direção do fluxo	Faixas de quedas (m)
Ação	Pelton	100-1770
	Turgo	50-400
	Fluxo Cruzado:	
	Michell-Banki	10-100
Reação	Turbinas axiais:	
	Tubular	<20
	Bulbo	<20
	Hélice	03 – 80
	Kaplan	03 - 80
	Francis	10-700
	Fluxo diagonal	4-120
	Fluxo radial	100-700

Fonte: ALVES, 2007

3.2 SELEÇÃO DA TURBINA HIDRÁULICA

Devido existir vários modelos de turbinas, cada qual com suas peculiaridades, o problema reside em escolher qual o melhor tipo de turbina para o ponto em análise. Logo, a escolha de uma turbina deve considerar a facilidade de operação e manutenção, capacidade de atendimento (em casos de problemas durante o funcionamento) e a disponibilidade do fabricante em fornecer peças sobressalentes. Outros pontos importantes são a confiabilidade e robustez do equipamento, haja vista que nesse tipo de aplicação, pequenas centrais, geralmente a operação é de modo não assistido (ELETROBRÁS, 2010).

O modelo mais adequado para cada instalação, leva em conta também os fatores queda, vazão e velocidade de rotação e pode-se montar um gráfico com o campo típico de aplicação para cada turbina (HACKER, 2012).

Queda bruta (m)

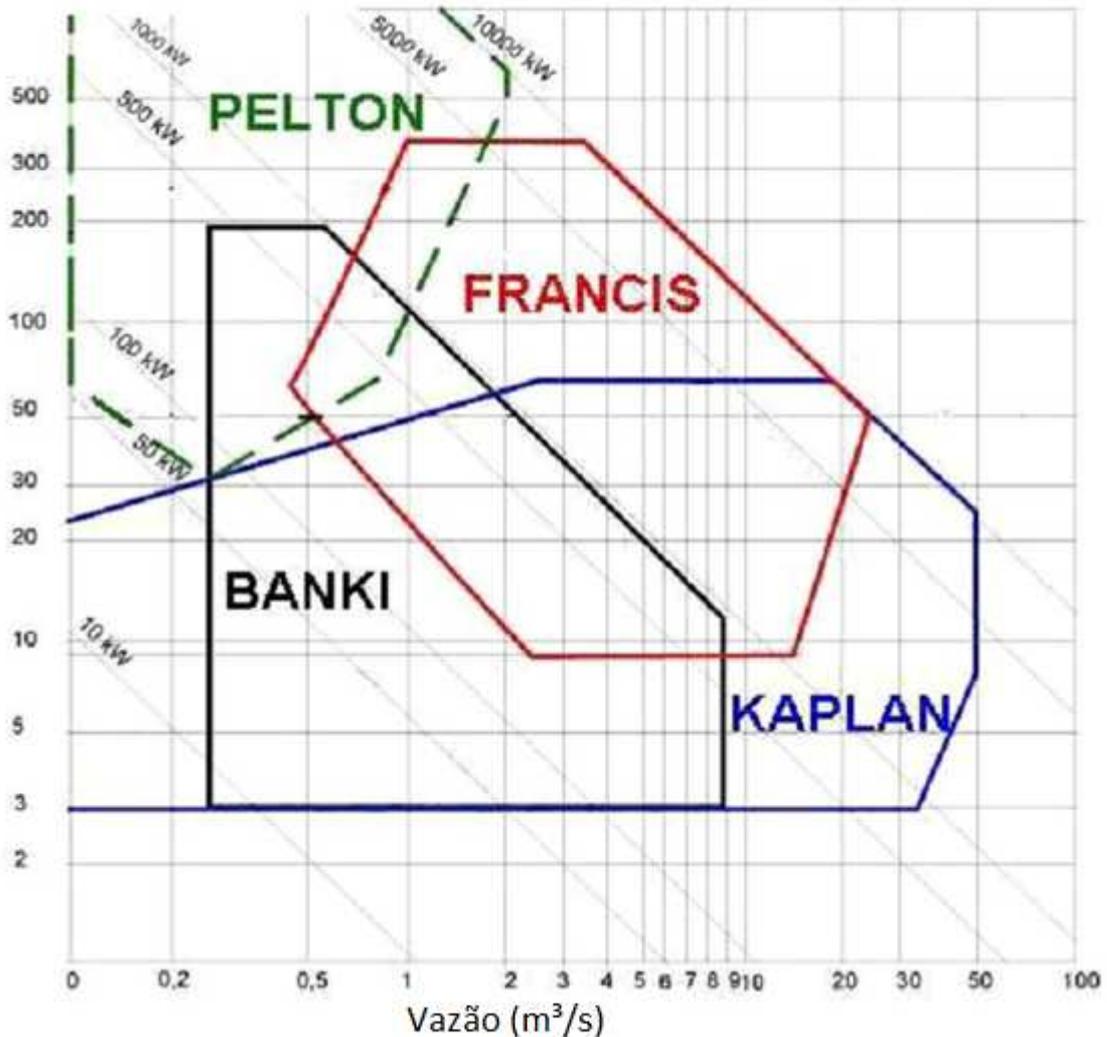


Figura 7: Gráfico para escolha da turbina de acordo com queda e vazão.
Fonte: Adaptado de ELECTROSERVICE, 2013.

A velocidade de rotação, para gerador assíncrono e síncrono sem multiplicador, é considerada a mesma para turbina e gerador sendo que se deve procurar uma velocidade síncrona mais próxima da calculada que é encontrada pela Equação 1 (ELETROBRÁS, 2010):

Equação 1: Rotação da turbina.

$$n = \frac{120.f}{p} \quad (1)$$

onde :

n = velocidade de rotação síncrona em rpm.

f = frequência em Hertz.

p = número de polos do gerador.

A Tabela 2 apresenta os valores de velocidade de rotação da turbina correspondente ao número de polos do gerador, geralmente utilizados na frequência de 60 Hz:

Tabela 2: Velocidade de Rotação

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

Fonte: ELETROBRÁS (2010).

O tipo de turbina para determinada aplicação pode ser baseado na seleção através da rotação específica (ALVES, 2007). O cálculo da rotação específica é feito conforme Equação 2 segundo a Organização Latino Americana de Desenvolvimento Energético (OLADE, 1996).

Segundo a Olade (1996),

Define-se como rotação específica, ou ainda velocidade específica, o número de rotações por minuto de uma turbina unidade, tomada como padrão da turbina dada, e que representa todas as que lhe forem geometricamente semelhantes, desenvolvendo a potência de $P = 1$ HP, sob uma queda $H = 1$ m em função da vazão conforme Equação 2:

Equação 2: Rotação específica.

$$N_s = \frac{n \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (2)$$

Onde:

N_s = rotação específica, adimensional.

n = rotação em RPM.

Q = vazão em m^3/s .

H = altura em m.

O critério técnico é que a turbina tenha a maior rotação possível, trabalhe com cavitação controlada no campo entre Q_{max} e Q_{min} e que o rendimento máximo seja reduzido em 5% para a Grande Central Hidrelétrica (GCH) e 10% para a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) (ALVES, 2007). Assim, uma relação entre as características das turbinas resulta na Tabela 3.

Tabela 3: Principais características das turbinas fabricadas no Brasil.

Nome	Rotação Específica N_s		Vazão Q (m^3/s)	Queda H (m)	Potência (kW)	Rendimento Máximo (%)
	Número de jatos	N_s				
Pelton	1	30	0,05-50	30-1800	0,1-300.000	70-91
	2	30-50				
	4	40-60				
	6	50-70				
Michell Banki	-	40-160	0,025-5	1-50	1-750	65-82
Francis	TIPO	N_s	0,05-700	2-750	1-750.000	80-93
	Lenta	60-170				
	Normal	150-250				
	Rápida	250-400				
Hélice Kaplan	-	300-800	0,3-1000	5-80	2-200.000	88-93

Fonte: Adaptado de TIAGO FILHO (2004)

Tendo como base os dados hidroenergéticos levantados por Reis, Filho e Souza (2011) acerca das vazões e queda bruta, utilizaremos as informações do gráfico da Figura 7, as das equações (1) e (2) e as das tabelas 2 e 3. Intercalando-as para definir a turbina para usina de Roncador, considerando-se, também, a facilidade de operação e manutenção e capacidade de atendimento (ELETROBRÁS, 2010).

Pela análise do gráfico da Figura 7, a escolha fica dentro da área de aplicação da Francis, Kaplan e Banki, utilizando-se valor de vazão máxima do rio. Com valor da vazão média, a área de atuação da Francis fica exclusiva. Porém, é importante ressaltar que esses gráficos de queda e vazão são provenientes de fabricantes e tem grandes diferenças entre si, servindo apenas como uma análise inicial não sendo um aspecto classificatório ou eliminatório do modelo de turbina a ser adotado.

A Tabela 4 intercala as informações número de polos do gerador, rotação da turbina, queda e vazão da usina de Roncador e rotação específica, indicando assim uma turbina de acordo com a rotação específica encontrada, utilizando-se dos dados presentes na Tabela 3. A vazão utilizada foi a vazão média encontrada por Reis, Filho e Souza (2011) no valor de 0,572 m³/s.

Tabela 4: Escolha da turbina pela rotação específica

Número de polos do gerador	n (rpm)	Ns	Turbina
4	1.800	180	Francis
6	1.200	120	
8	900	90	Francis e Banki
10	720	72	
12	600	60	Francis, Banki e Pelton
14	514	52	
16	450	45	Banki e Pelton
18	400	40	
20	360	36	
24	300	30	Pelton

Fonte: Própria

Pela Figura 7 as turbinas possíveis seriam a Banki e a Kaplan, porém os gráficos variam entre fabricantes. Assim, partindo para uma análise técnica generalista, utiliza-se o valor da rotação específica. Segundo Alves (2007), a turbina deve ter a maior rotação possível, logo limitando nosso gerador a 8 polos, para altas rotações da turbina, teríamos as turbinas Francis e Banki para serem escolhidas.

Segundo Eletrobrás (2010) se deve considerar a facilidade de operação e manutenção, capacidade de atendimento e a disponibilidade do fabricante em fornecer peças sobressalentes além da confiabilidade e robustez do equipamento, devido tipo de aplicação de pequenas centrais onde a operação é de modo não assistido geralmente.

O presente estudo tem por objetivo uma usina didática, todos os modelos serão analisados em todos os aspectos. Apenas se analisa qual seria o modelo mais adequado baseado nas características apresentadas.

Devido os aspectos rotação específica, robustez, confiabilidade e peças disponíveis, a Francis se torna uma escolha mais adequada, 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 da turbina Francis.

3.3 PELTON

3.3.1 Histórico

A turbina Pelton fora desenvolvida por Allan Lester Pelton. Com idade de 20 anos, em 1850, foi para a Califórnia, EUA e em 1864 tornou-se dono de um moinho na Califórnia nos Estados Unidos. Treze anos mais tarde em 1877, inicia experimentos com rodas d'água que o conduziram a invenção de um novo conceito baseadas no conceito chamado *splitter* (HACKER, 2012).

O primeiro rotor que Pelton colocou em funcionamento foi usado para fazer funcionar a máquina de costura de sua esposa. Pelton recebeu a primeira patente em 1880, após a criação de sua empresa *Alaan Machine Shop and Foundry*, e rotores de vários tamanhos foram feitos e testados. Seus rotores foram usados ao redor do mundo dentro de 15 anos após sua primeira patente.

No ano de 1898 sua empresa se mudou para São Francisco, sob nome de Pelton Water Wheel Company e futuramente vendeu os direitos para outras empresas. Contudo, Allan Pelton permaneceu como consultor e se aposentou em Oakland (HACKER, 2012).

3.3.2 Funcionamento.

São classificadas como uma turbina de ação, pois para provocar o movimento de rotação elas utilizam a velocidade do fluxo de água (GOMES, 2010).

Esta turbina consiste em uma roda circular que tem na sua periferia um conjunto de copos, ou conchas, sobre as quais é inserido tangencialmente um jato de água por um ou mais injetores que são distribuídos uniformemente na periferia da roda (GOMES, 2010).

As conchas, que têm uma aresta central situada ao longo de seu perímetro, podem ser fundidas e aparafusadas ao disco central quando serem fundidas em uma única peça junto ao rotor. Quando o jato cai sobre as arestas se subdivide em dois jatos que escoam pelos dois lados da concha (ALVES, 2007).

Na turbina Pelton, o torque é gerado pela ação de um jato livre sobre a dupla concha do rotor. Por essa razão a turbina Pelton também é chamada de turbina de jato livre (JUNIOR, 2000).

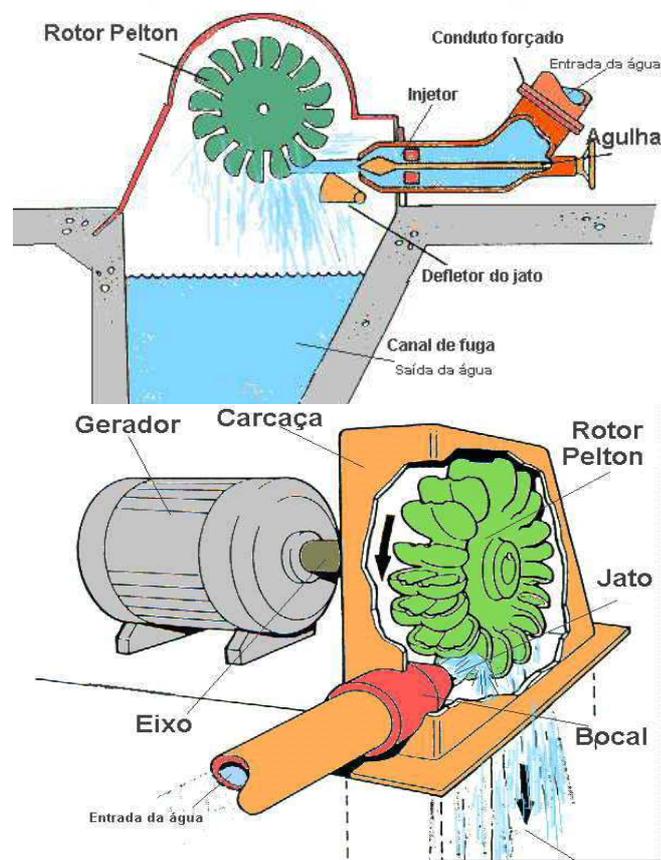


Figura 8: Desenho esquemático de uma turbina Pelton.
Fonte: Junior, 2000.



Figura 9: Rotor Pelton
Fonte: Vivendo Eletricidade, 2012.

3.4 FRANCIS

3.4.1 Histórico

O nome e o desenvolvimento desta turbina hidráulica, deve-se à James Bicheno Francis (1815-1892) nascido na Inglaterra, e que emigrou mais tarde para os Estados Unidos e trabalhou na função de engenheiro em empresas às margens do Rio Murrumbidgee (HACKER, 2012). James Francis teve interesse em uma máquina de escoamento centrípeta, já patenteada em 1838 por Samuel Dowd (1804-1879). No entanto foram de tal importância as modificações de Francis sobre o projeto de Dowd, que esse tipo de turbina mereceu seu nome (HACKER, 2012).

A primeira turbina foi construída pela firma J.M. Voith em 1873, passando desde então por aperfeiçoamentos constantes, como a utilização das pás diretrizes, também chamadas de pás Fink (JUNIOR, 2000).

3.4.2 Funcionamento.

É uma turbina do tipo de reação, ou seja, funciona com uma diferença de pressão entre os dois lados do rotor. As pás do rotor são perfiladas de uma maneira complexa e uma caixa espiral, normalmente fundida, para as turbinas pequenas, distribuí a água ao redor do rotor (JUNIOR, 2000).

As turbinas Francis têm um rendimento máximo mais elevado, se comparado com as turbinas Pelton, com velocidades maiores e com dimensões menores. A característica das Francis é ter uma roda formada por uma coroa de aletas fixas que constituem uma série de canais hidráulicos recebendo radialmente a água e a orientam para a saída do rotor em uma direção axial (GOMES, 2010).

Em operação, a água entra no rotor pela periferia, após passar através da pás diretrizes as quais guiam o líquido em um ângulo adequado para a entrada das pás do rotor, deixando o mesmo axialmente em relação ao eixo. Assim, água transfere parte da sua energia para o rotor e deixa a turbina pelo tubo de sucção. Podem ser executada tanto com eixo na horizontal quanto na vertical (JUNIOR, 2000).

Segundo Junior (2000), um dos únicos inconvenientes dessa turbina é a variação da curva de rendimento com a vazão.

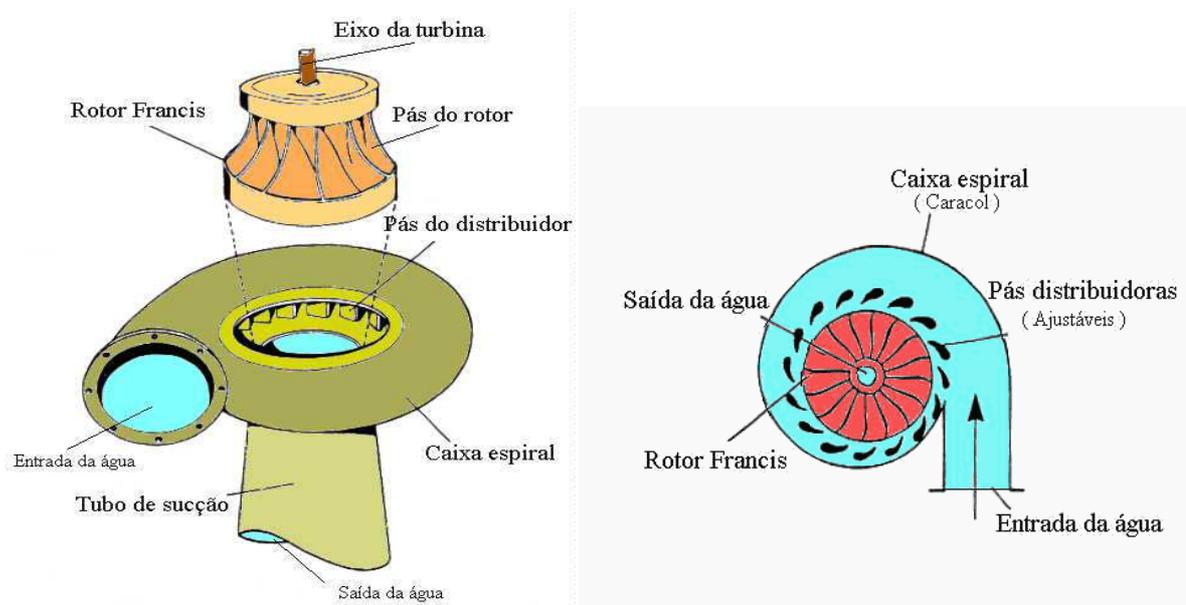


Figura 10: desenho esquemático de uma Turbina Francis vertical
Fonte: Junior, 2000.



Figura 11: Rotor de turbina Francis dupla eixo horizontal.
Fonte: Própria, 2012.

3.5 KAPLAN

3.5.1 Histórico

O engenheiro austríaco Victor Kaplan (1876-1934) professor da Universidade Técnica de Brno, após estudos teóricos e experimentos, desenvolve em 1912 um tipo novo de turbina axial com rotor em forma de hélice. Este rotor possuía um sistema de orientação em suas pás, possibilitando sua regulagem independente. Atualmente este rotor é aplicado principalmente nas turbinas Tubulares "S" (HACKER, 2012).

O sistema apresentado por Victor Kaplan causou sensação em 1912, mesmo que inicialmente estivesse coberto de desconfiança pelos fabricantes, que a julgavam impossível de ser feita. As vantagens do alto rendimento em quedas médias e baixas com alto volume de água e o crescente número de unidades instaladas com sucesso fizeram com que as turbinas Kaplan se tornassem uma ótima opção para as Pequenas Centrais Hidrelétricas. Logo se tornaram fundamentais para o desenvolvimento do mercado energético mundial (HACKER, 2012).

3.5.2 Funcionamento

É uma turbina de reação e utilizada para grandes vazões e baixas quedas. A turbina Kaplan geralmente tem eixo vertical, porém é possível encontrar com eixo horizontal (GOMES, 2010).

É constituída 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).

As aletas vinculam-se ao cubo hidrodinâmico e se abrem radialmente como se fossem hélices que impulsionam um avião. Rodeiam os seus eixos e são impulsionadas por um sistema mecânico posicionado na metade inferior do cubo hidrodinâmico. Como a movimentação requer muita força, entra em ação o servomotor hidráulico colocado no interior do eixo motor da turbina, que é vazado longitudinalmente. A canalização de óleo passa na parte central do eixo do gerador que contém um furo axial em seu comprimento. Desse modo, as aletas ajustam-se à vazão da turbina e ajustam a potência gerada pela turbina à potência que o gerador solicita o que ocorre pelo ajustamento das pás do rotor (ALVES, 2007).

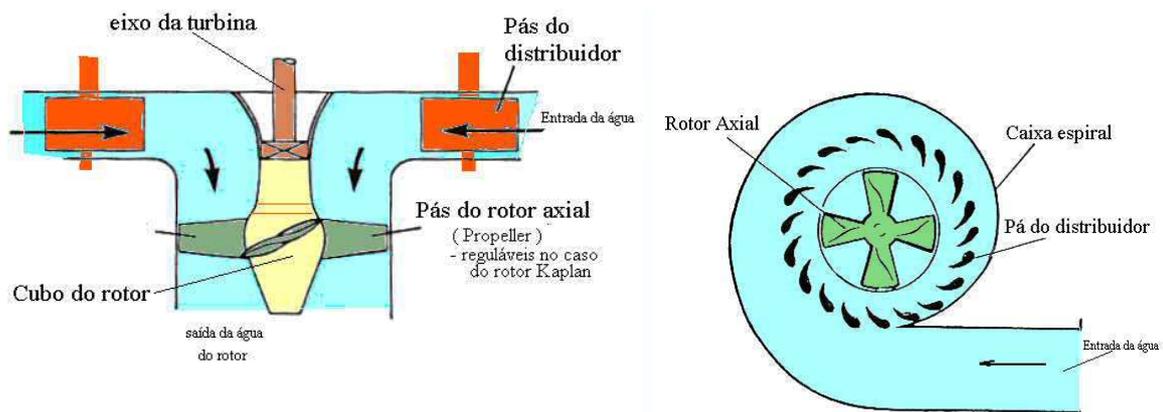


Figura 12 desenho esquemático de uma turbina Kaplan vertical.
Fonte: Junior, 2000.

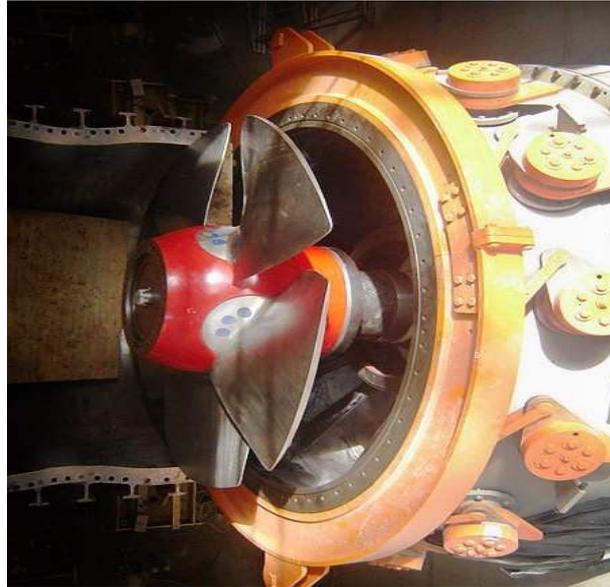


Figura 13: Turbina Kaplan
Fonte: Hisa, 2012.

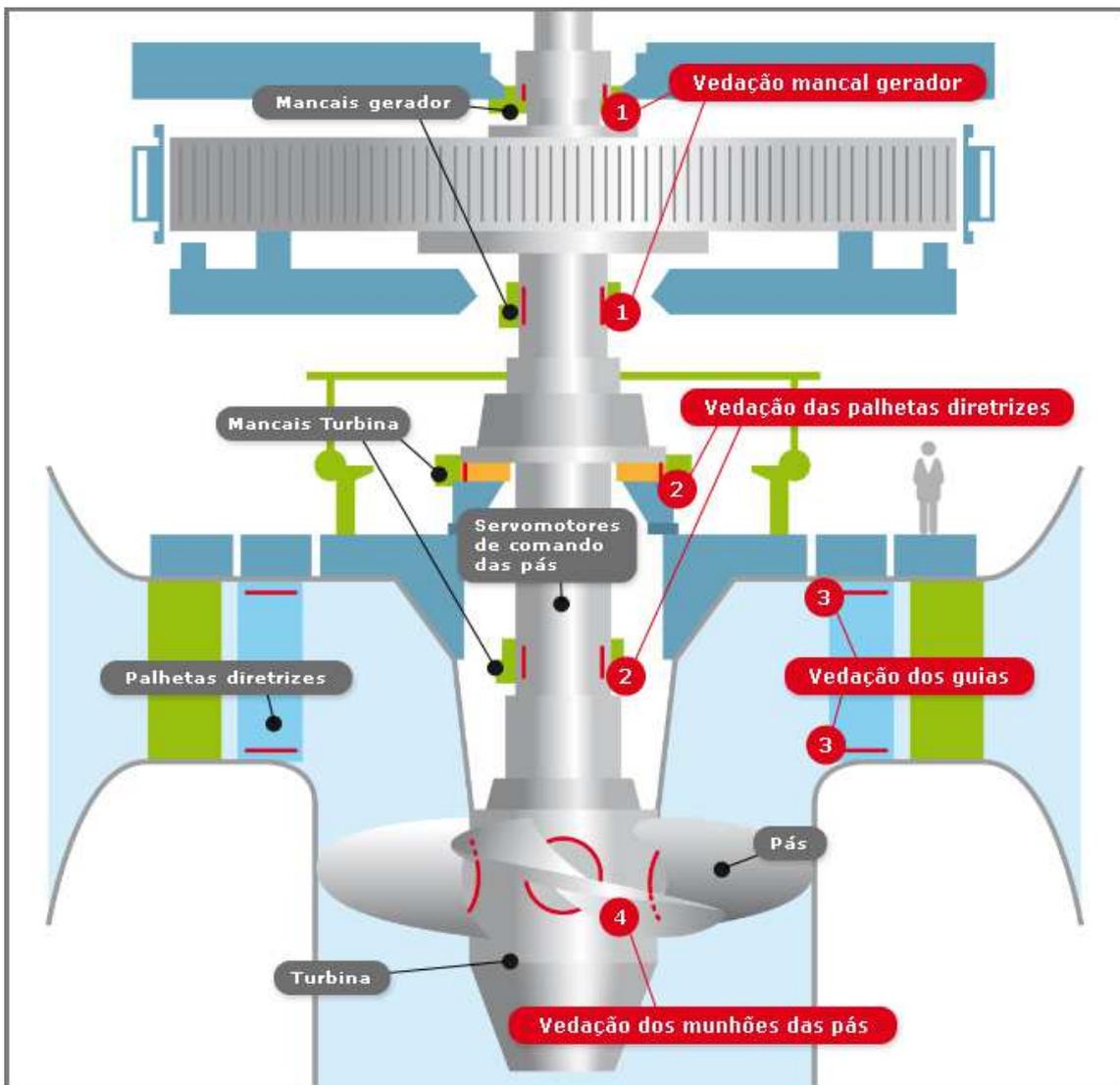


Figura 14: Componente de uma turbina Kaplan
Fonte: Pxlseals, 2012.

3.6 BANKI

3.6.1 Histórico

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, 2012).

3.6.2 Funcionamento

A turbina de fluxo cruzado é também chamada de fluxo transversal, Michell-Banki ou Banki, que se comporta como turbina de ação, ao lado da turbina Pelton (ALVES, 2007).

É constituída por um rotor tipo tambor, este é 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 HIDROTURBINAS, 2011).

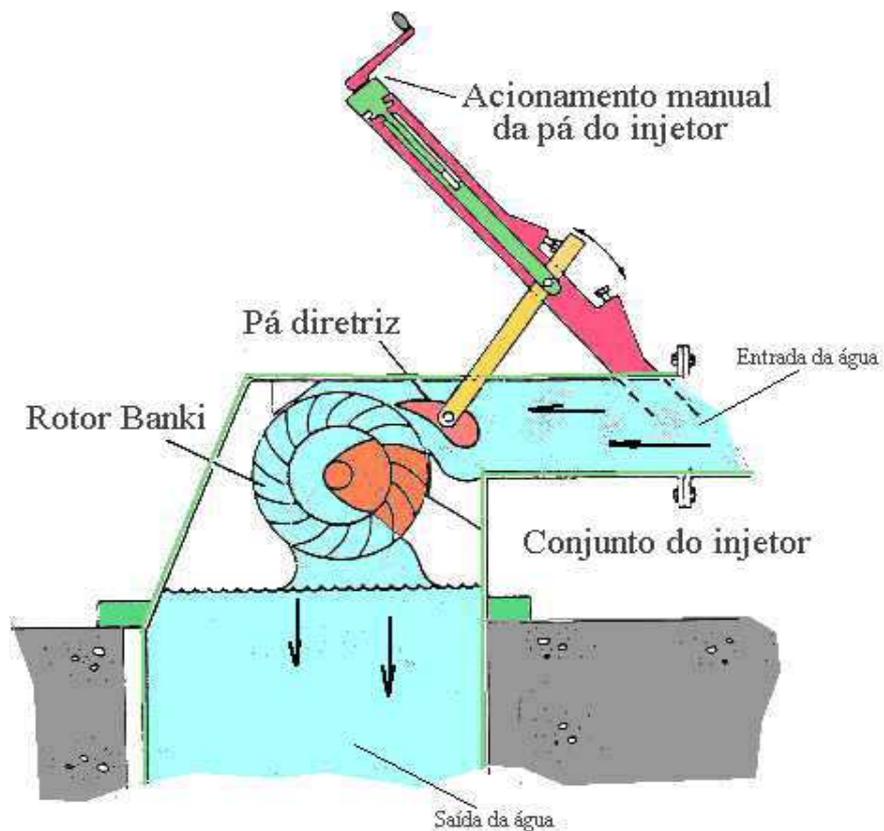


Figura 15: desenho esquemático de uma turbina Banki.
Fonte: Junior, 2000.



Figura 16: Rotor Banki.
Fonte: Accessecosolar, 2012.

3.7 SÍNTESE TURBINAS HIDRÁULICAS

As turbinas são classificadas em dois tipos: as de ação, quando o escoamento por meio do rotor procede sem variação de pressão; as de reação, quando o escoamento que ocorre por meio do rotor procede com variação de pressão (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009).

Apresentam-se as geometrias dos rotores de turbinas hidrelétricas nas Figuras 17, 18, 19 e 20.

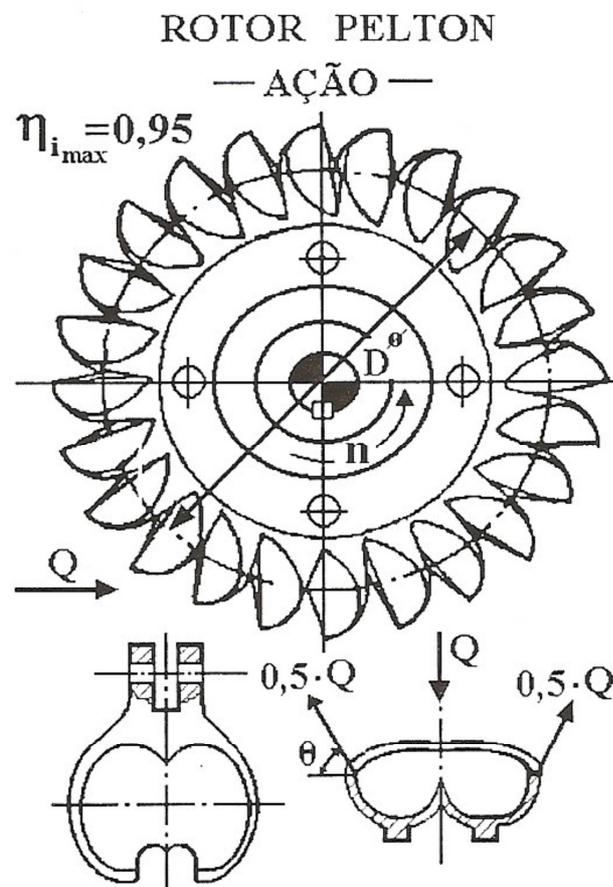


Figura 17: Geometria do rotor Pelton.
Fonte: SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009.

ROTOR FRANCIS

— REAÇÃO —

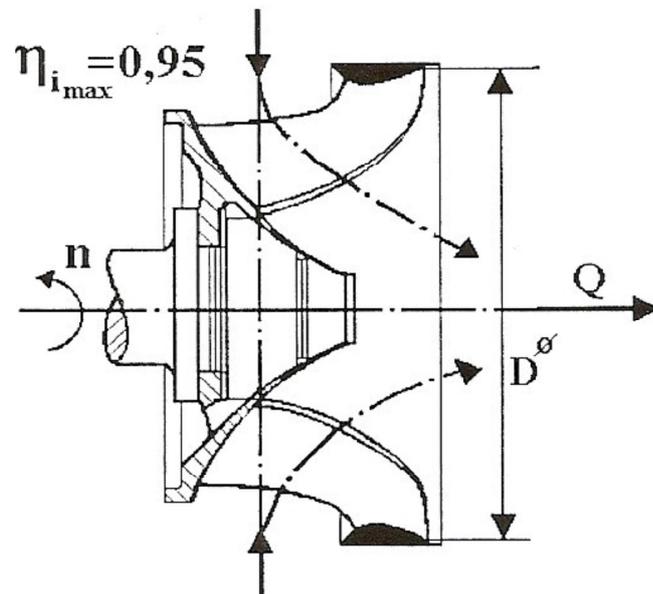


Figura 18: Geometria do rotor Francis.
Fonte: SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009.

AXIAL – hélice – Kaplan

— REAÇÃO —

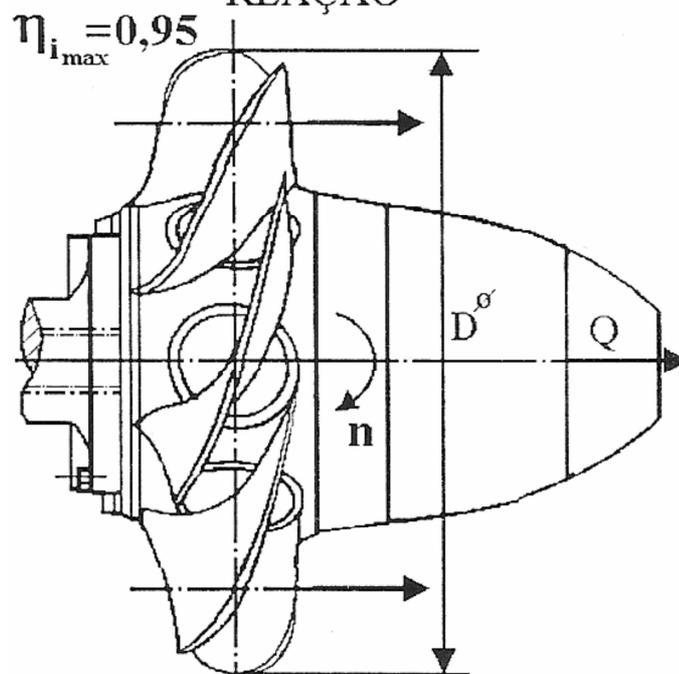


Figura 19: Geometria do rotor Kaplan.
Fonte: SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009.

ROTOR MICHELL –BANKI

— AÇÃO —

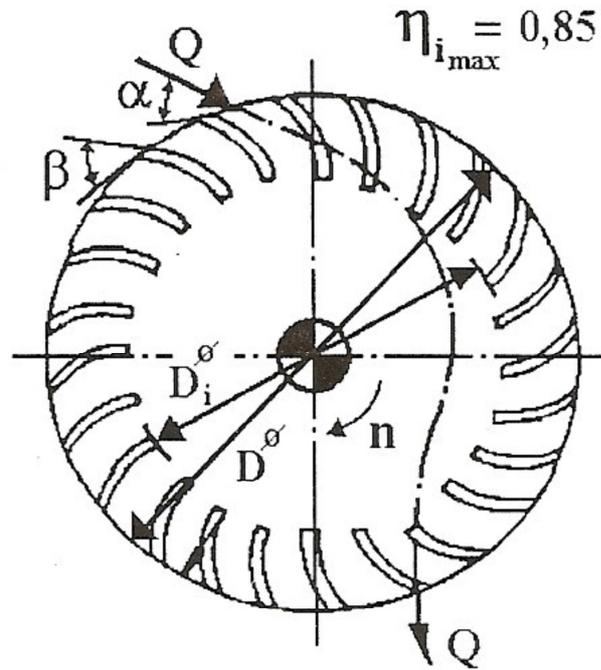


Figura 20: Geometria do rotor Banki.
Fonte: SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009.

4 ANÁLISES TÉCNICAS

4.1 ESTUDO HIDROENERGÉTICO

De acordo com Reis, Filho e Souza (2011), o ponto de aproveitamento hidroenergético onde se encontra a Usina de Roncador tem uma queda bruta (H_b) de 14,8 metros. Para determinação da vazão de projeto, será usado o fluviograma da Usina de Roncador, apresentado na Figura 5.

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).

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 21 mostra a curva de permanência da Usina de Roncador.

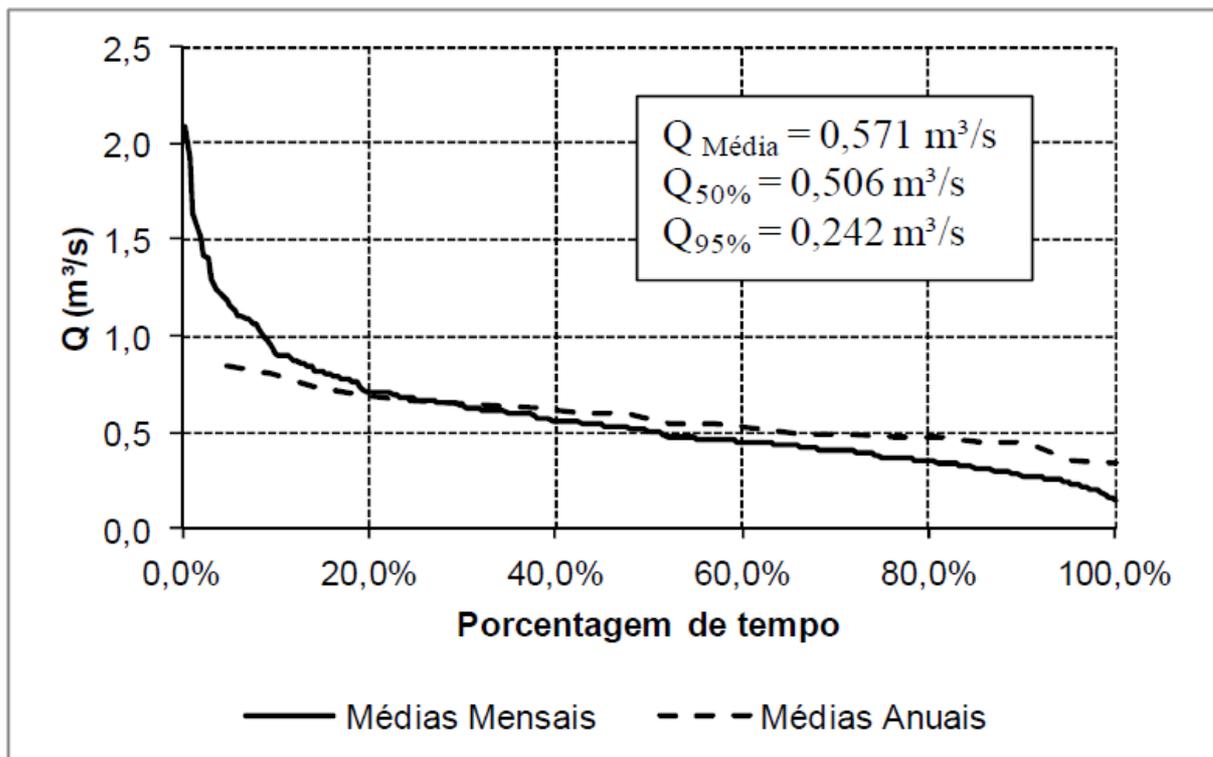


Figura 21: Curva de Permanência da Usina de Roncador.
Fonte: REIS, FILHO E SOUZA, 2011.

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, Q_{L1} , 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 22), é igual à vazão média turbinada referente às permanências P_0 e P_1 (BASSETTI, 2008).

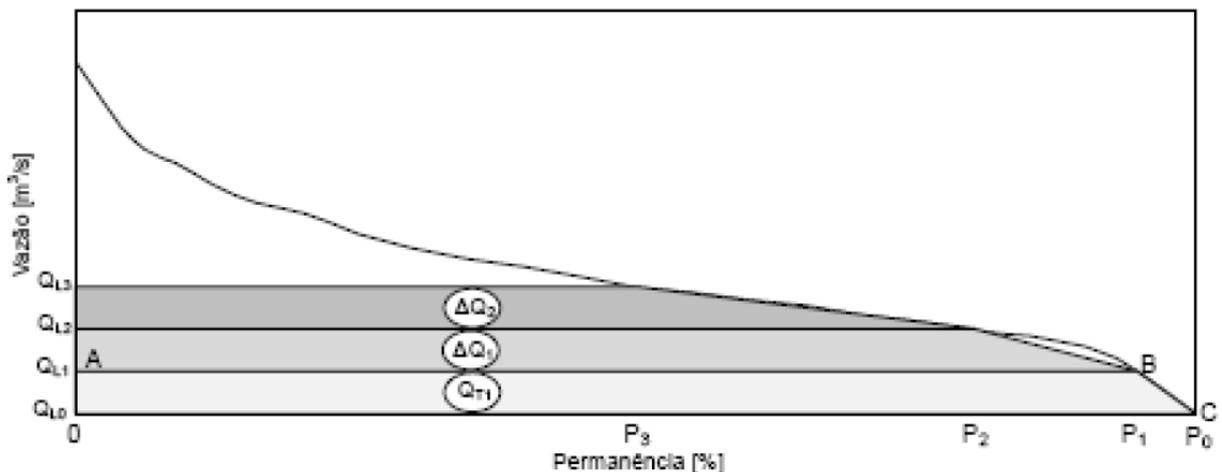


Figura 22: Curva de permanência exemplo de construção da curva de energia.
Fonte: BASSETTI, 2008

A área sob o trapézio OABC é dada por:

Equação 3: Vazão Média Turbinada para as Permanências P_0 e P_1

$$Q_{T1} = (Q_{L1} - Q_{L0}) \times \frac{(P_0 + P_1)}{2} \quad (3)$$

Onde,

Q_{T1} = Vazão média turbinada referente às permanências P_0 e P_1 ;

Q_{L1} = Vazão instalada com a permanência P_1 ;

Q_{L0} = Vazão instalada com a permanência P_0 ;

P_1 = Permanência da vazão Q_{L1} ;

P_0 = Permanência da vazão anterior.

Aumentando o valor da vazão instalada para Q_{L2} , o valor da vazão média turbinada Q_{T1} será acrescido de ΔQ_1 :

Equação 4: Vazão Média Turbinada para as Permanências P_0 e P_2 (A)

$$Q_{T2} = Q_{T1} + \Delta Q_1 \quad (4)$$

Onde,

Q_{T1} = Vazão média turbinada referente às permanências P_0 e P_1 ;

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 22, que:

Equação 5: Acréscimo de Área Sob a Curva e a Área Anterior

$$\Delta Q_1 = (Q_{L2} - Q_{L1}) \times \frac{(P_2 + P_1)}{2} \quad (5)$$

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

$$Q_{T2} = Q_{T1} + (Q_{L2} - Q_{L1}) \times \frac{(P_2 + P_1)}{2} \quad (6)$$

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 7: Vazão Média Turbinada – Equação Genérica (A)

$$Q_{Tn} = Q_{T(n-1)} + \Delta Q_{(n-1)} \quad (7)$$

Onde,

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

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

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

Equação 8: Vazão Média Turbinada – Equação Genérica (B)

$$Q_{Tn} = Q_{T(n-1)} + (Q_{Ln} - Q_{L(n-1)}) \times \frac{(P_n + P_{(n-1)})}{2} \quad (8)$$

Onde,

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

$Q_{T(n-1)}$ = Vazão média 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 5, resultando nos valores de vazão média turbinada conforme Tabela 6.

Tabela 5: Valores relacionados da curva de permanência da Usina de Roncador.
 Tabela 6: Valores de vazão média turbinada de Usina de Roncador.

Permanência (%)	Vazão (m ³ /s)	Vazão Média Turbinada	
1%	2,00	QT1 =	0,06045
2%	1,65	QT2 =	0,0956
4%	1,40	QT3 =	0,1306
8%	1,08	QT4 =	0,15535
10%	0,90	QT5 =	0,1786
15%	0,80	QT6 =	0,20035
20%	0,73	QT7 =	0,22735
25%	0,68	QT8 =	0,23985
30%	0,65	QT9 =	0,2456
35%	0,62	QT10 =	0,25925
40%	0,58	QT11 =	0,28015
45%	0,55	QT12 =	0,2929
50%	0,51	QT13 =	0,3079
55%	0,48	QT14 =	0,31765
60%	0,47	QT15 =	0,3259
65%	0,45	QT16 =	0,33715
70%	0,41	QT17 =	0,3494
75%	0,38	QT18 =	0,3619
80%	0,35	QT19 =	0,37765
85%	0,32	QT20 =	0,39605
90%	0,28	QT21 =	0,40355
95%	0,24	QT22 =	0,4088
100%	0,18		

Fonte: Adaptado de Reis, Filho e Souza (2011) e Própria.

Dos valores acima, foi construído o gráfico da figura 23:

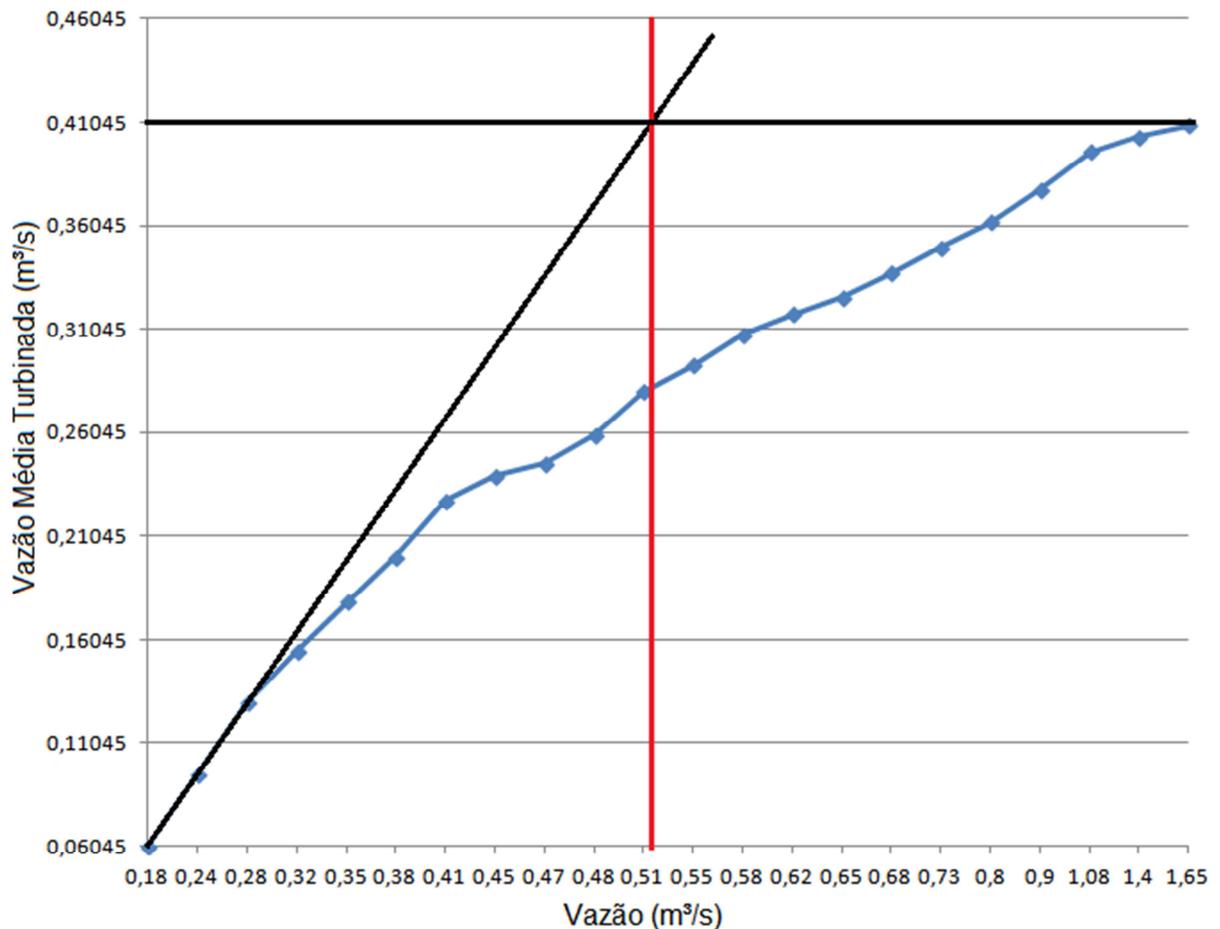


Figura 23: Curva de Energia da Usina de Roncador.
Fonte: Própria.

O valor da vazão ótima para o projeto corresponde à abscissa da intercessão das tangentes aos pontos inicial e final da curva (SOUZA, 1996). Para a Usina de Roncador, conforme observado na Figura 23, esse valor é de 0,517 m³/s, o qual, para efeito de projeto, será arredondado para 0,520 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 de Roncador, foi construído o gráfico da Figura 24, onde está relacionado o aproveitamento das vazões do rio, considerando o valor de vazão de projeto encontrado.

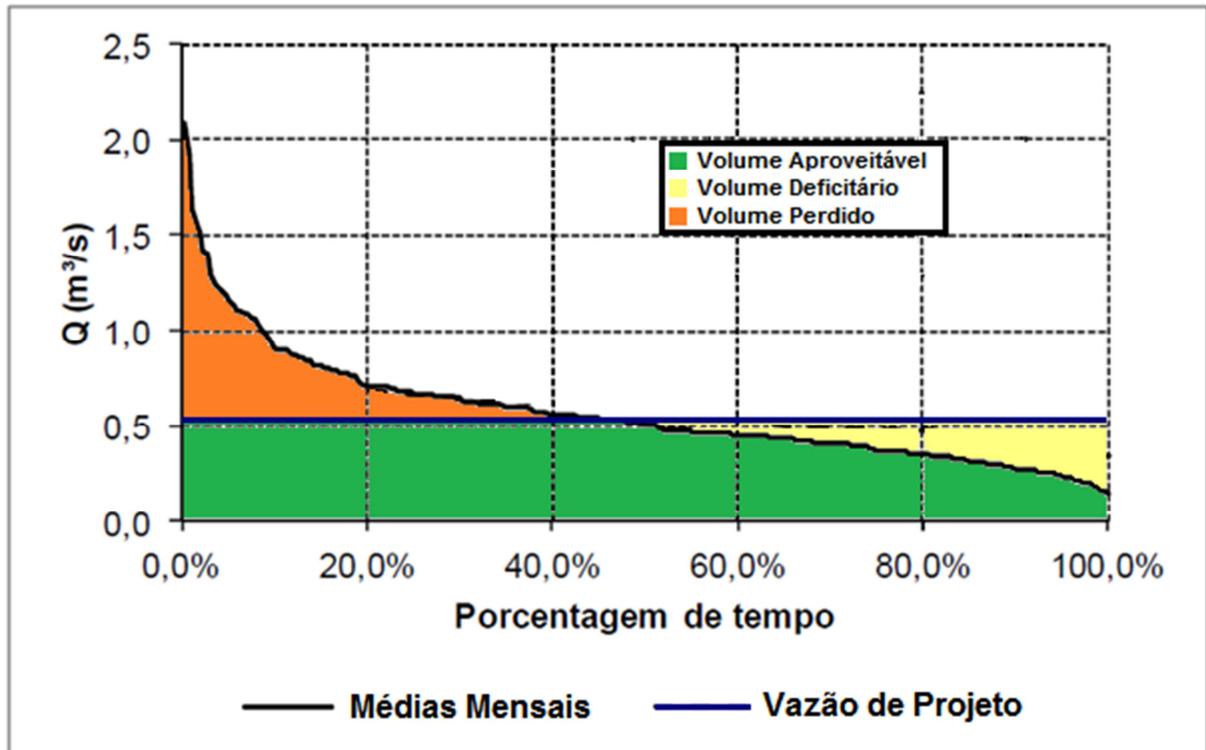


Figura 24: Volume aproveitável conforme vazão de projeto.
 Fonte: Adaptado de Reis, Filho e Souza (2011).

4.2 ANÁLISE DAS POTÊNCIAS DA USINA DE RONCADOR.

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 9: Potência bruta.

$$P_{hb} = \rho \cdot g \cdot H_b \cdot Q \cdot 10^{-3} \quad (9)$$

Onde:

P_{hb} = potencia bruta, em kW.

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

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

H_b = Altura de queda bruta, em m.

Q = Vazão, em m^3/s .

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

Equação 10: Potência absorvida.

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

(Equação 10)

Onde:

P_{hl} = potencia absorvida, em kW.

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

g = aceleração da gravidade, em m/s².

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

Q = Vazão, em m³/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 11:

Equação 11: Rendimento da turbina.

$$\eta_t = \frac{P_e}{P_{hl}} \quad (11)$$

Onde:

η_t = rendimento da turbina.

P_e = potencia de eixo

P_{hl} = potencia líquida.

Reescrevendo as equações (9), (10) e (11), substituindo as constantes por seus valores, massa específica da água: 1.000 kg/m³ e aceleração da gravidade: 9,81 m/s², obtemos a Equação 12, a qual relaciona a potência de eixo com a queda líquida, vazão turbinada e o rendimento da turbina.

Equação 12: Potência entregue pelo eixo da turbina.

$$P_e = 9,81 \cdot H_l \cdot Q \cdot \eta_t \quad (12)$$

Onde:

P_e = potencia de eixo, em kW.

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

Q = Vazão, em m^3/s .

η_t = rendimento da turbina.

Será utilizada a Equação 12 para o cálculo das potências da usina de Roncador devido a variação de rendimento para cada tipo de turbina e para cada valor de vazão.

Como pode ser observado no estudo de Reis, Filho e Souza (2011), a vazão não é constante, logo variando a vazão, altera-se o rendimento da turbina como pode ser verificado na Figura 25.

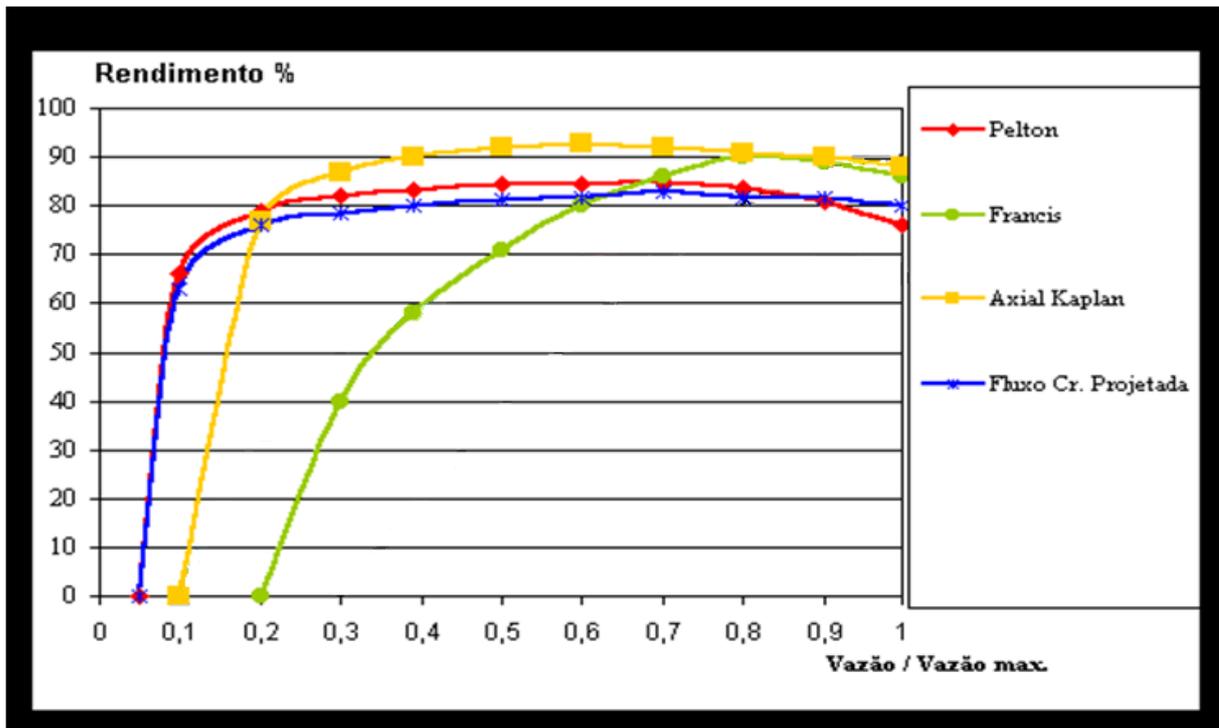


Figura 25: Rendimento de turbinas com variação da vazão turbinada em relação à nominal mantendo queda líquida constante.

Fonte: Adaptado de Harvey et al., 1998.

Harvey et al. (1998) propõem o gráfico da Figura 25 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 25 montamos a Tabela 7 que nos mostra o rendimento de cada turbina para valores de vazões distintos. Considerar-se-á como vazão nominal das turbinas a vazão de projeto encontrada, no valor de $0520 m^3/s$.

Tabela 7: Rendimento das turbinas de acordo com a vazão turbinada.

Vazão Q (m ³ /s)	Relação com Q nominal	Rendimento (%)			
		Pelton	Francis	Kaplan	Banki Projetada
0,156	30%	81	38	85	78
0,260	50%	84	70	91	81
0,416	80%	82	92	92	82
0,52	100%	78	89	90	80

Fonte: 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, 2,08 m³/s, acarretaria em gerar mais energia em momentos de grandes vazões. Porém, em épocas de vazões próximas à média, 0572 m³/s, 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 25.

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 de Roncador, 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.

Buscando um valor mais próximo do real, utilizaremos as perdas calculadas por Garcia, Rebellato e Pompermaier (2011) conforme Tabela 8. Ressalta lembrar que esses valores de perdas foram calculados com vazão máxima, 2,08 m³/s e representam o máximo de perdas, pois, segundo equações nos estudos de Garcia, Rebellato e Pompermaier (2011), a perda de carga diminui com a redução da vazão.

Tabela 8: Máximo de perdas de carga no sistema de adução

	Tomada d'água	Grade tomada d'água	Entrada Conduto forçado	Atrito conduto forçado	Total
Perda (m)	0,0013	0,0013	0,1014	0,5921	0,696
Perda (%)	0,0087	0,0087	0,6854	4,0007	4,704

Fonte: Garcia, Rebellato e Pompermaier (2011)

A partir das exposições acima, calculou-se apenas as potências líquidas, considerando as perdas da Tabela 8. O valor de queda bruta, segundo Reis, Filho e Souza (2011) é de 14,8 metros. Considerando as perdas teremos uma queda líquida de 13,284 metros.

A Tabela 9 compila as informações de potência entregue pelo eixo da turbina, utilizando a Equação 12 e considerando as vazões presentes nas Tabela 7, bem como os rendimentos das turbinas.

Tabela 9: Potência entregue pelo eixo das turbinas

Vazão Q (m ³ /s)	Relação com Q nominal	Potência entregue pelo eixo (kW)			
		Pelton	Francis	Kaplan	Banki
0,156	30%	16,47	7,73	17,28	15,86
0,260	50%	28,46	23,72	30,83	27,44
0,416	80%	55,57	62,34	62,34	55,57
0,52	100%	52,86	60,31	60,99	54,21

Fonte: Própria

Nota-se, de acordo com a Tabela 9, que tem-se uma variação de potência de 7,73 kW a 62,34 kW sem considerar qual turbina está gerando as potências.

Ratifica-se que esse trabalho visa o estudo das turbinas em si e aplica-se a usina de Roncador 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 aperfeiçoar 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 5, 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.

4.3 CAVITAÇÃO

A cavitação é o fenômeno do aparecimento de bolhas cheias de vapor, sendo determinada pela pressão de vapor, ou seja, a pressão na qual ocorre a mudança de estado líquido para vapor e vice-versa (ALVES, 2007).

Segundo Bortoni (2011), o nome cavitação é um grupo de fenômenos que podem ocorrer no interior de sistemas hidráulicos pelo aparecimento de recintos cheios de vapor e gases.

Estes fenômenos ocorrem em locais no interior da turbina, onde é alcançada a pressão de vapor. Quando esta pressão é alcançada, produzem-se bolhas de vapor que são arrastadas pelo líquido até locais de maior pressão condensando-se violentamente, isso gera um choque inelástico do líquido com as partes internas da máquina, como as pás do rotor. Este choque pode arrancar partículas do metal causando a erosão por cavitação (BORTONI, 2011). A Figura 26 mostra um exemplo de rotor Francis com erosão por cavitação.



Figura 26 – Danos causados por cavitação em uma Turbina Francis.
Fonte: Wikipédia, 2012.

A Figura 27 mostra o escoamento de um líquido em um tubo para exemplificar o fenômeno da cavitação. Variando-se a vazão no tubo, apresentam valores de pressões distintos nos mesmos pontos analisados. Nota-se que com vazão Q_c a

pressão no ponto 2 (dois) atingiu a pressão de vapor formando bolhas e posteriormente é levado até o ponto 3 (três), de maior pressão, causando o fenômeno de cavitação.

- $P_{1i} > P_{2i}$;
- $P_{3i} > P_{2i}$;
- $P_{1i} = P_{3i}$ (sem perdas).
- Q_a, Q_b, Q_c – Vazão regulada pela válvula.

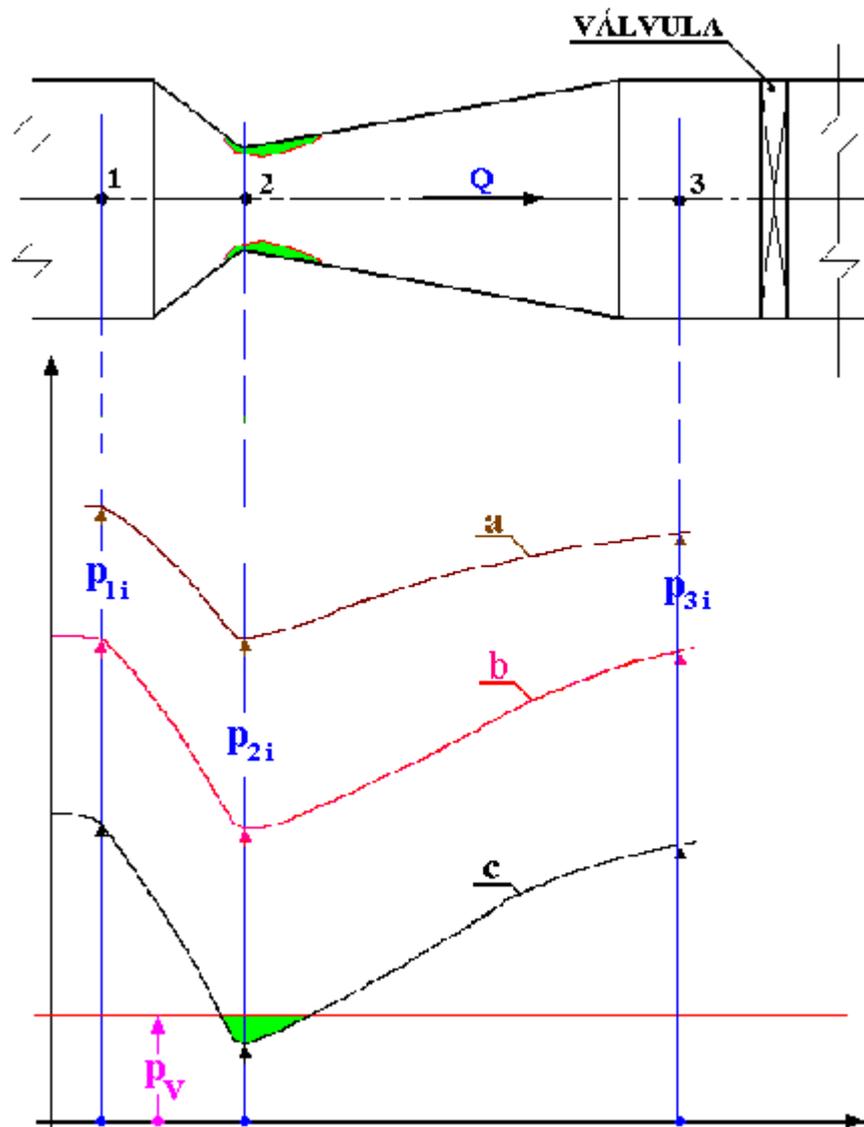


Figura 27 – Escoamento em tubo e pressão de vapor.
Fonte: BORTONI, 2011.

Além de danificar peças por choque mecânico, segundo Alves (2007) a cavitação ocasiona queda no rendimento e redução da potência útil da máquina,

pois há redução da secção disponível para o fluxo e conversão incompleta de energia.

Sinais de que está ocorrendo a cavitação são, segundo Bortoni (2011), a trepidação e vibração devido ao desbalanceamento e o ruído provocado pela implosão das bolhas.

Alves (2007) menciona que a eliminação da fonte de baixa pressão e elaboração de projetos que eliminam a formação de espirais são maneiras óbvias de se evitar a cavitação. Contudo, “frequentemente, nem é possível nem desejável projetar as estruturas hidráulicas que estarão livres da cavitação” Alves (2007). Nestes casos, onde a erosão do material é o interesse preliminar, os efeitos da cavitação podem mitigar de diversas maneiras segundo Alves (2007) e Bortoni (2011).

- Bom acabamento superficial das partes internas;
- Utilização de materiais resistentes à cavitação como aço inoxidável ou concreto de fibra reforçado para retardar ao máximo a taxa de danos;
- Estudar nível de sucção adequado e
- Projetar para que as cavidades implodam fora do campo do fluxo.

4.4 OPERAÇÃO DAS TURBINAS HIDRÁULICAS

A turbina deve operar com seus valores nominais a fim de suprir a demanda de energia tendo o maior rendimento e sem cavitação. Como opera com rotação constante, o controle da vazão determina a potência entregue pelo eixo. Logo, a vazão, a altura de queda e a cavitação (a qual além de outras variáveis tem relação com a vazão) são determinantes para se estabelecer as faixas de operação de uma turbina (BORTONI, 2011).

Segundo fabricantes de turbinas como Hacker, Hisa, Mecamidi entre outros, pode-se estimar as faixas de operação durante o projeto, como valores de faixa de vazão e queda para curvas de rendimento, de cavitação e de potência gerada. Contudo, além de se ter valores de operação na etapa de projeto “são nos ensaios que ficarão determinados precisamente os valores dos limites de operação da turbina” (BORTONI, 2011).

O presente trabalho aplica-se a análise das turbinas para a usina de Roncador, não havendo, entretanto, projetos já estabelecidos nem turbinas

fabricadas especificamente para Roncador após sua desativação. Isso nos impede de levantar limites específicos de operação das turbinas. Assim, apenas foram explanados quais são as variáveis que determinam tais limites de operação e funcionamento de uma turbina hidráulica.

5 CONCLUSÕES

Através do estudo da bibliografia citada e demais pesquisas, foram levantados dados suficientes para posterior implantação das turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Banki na Usina de Roncador. Também se pode, através dos cálculos realizados, definir a turbina mais adequada à usina e qual a potência entregue por cada uma das turbinas.

Os vários tipos de turbina trabalham em regimes de vazão variável o que implica variação do rendimento e controle da cavitação, conforme a vazão turbinada. As variáveis que definem a faixa de operação são queda e vazão. Como a usina de Roncador trabalha sem regularização, apenas a vazão há de impactar nessa restrição. Tais valores limitantes serão obtidos futuramente na fase de projeto e ensaios.

O valor da vazão de projeto, sem considerar a regularização da usina e conforme exposto no item 4.1, é de 0,520 m³/s. 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.

Analisando a Tabela 9, é visto que 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 de Roncador é a 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 de Roncador, 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, as turbinas da usina de Roncador entregam em seu eixo uma potência entre 7,73 kW e

62,34 kW, independente de qual turbina está operando, sendo operadas separadamente.

REFERÊNCIAS

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

ACCSSECOSOLAR. Disponível em:
<http://www.accessecosolar.com/it/mini_e_micro-hidroeletrico/micro_turbina_banki.htm>. Acesso em 02/10/2012.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** Brasília: ANEEL, 2002.

_____. **Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** Brasília, 2003.

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, 2012.** Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>. Acesso em: 10/03/2013.

BETTA HIDROTURBINAS. **HIDROTURBINAS** Disponível em
<<http://www.bettahidroturbinas.com.br/produto/mch-banki>>. Acesso em 13/10/2011.

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

CAMUS, C.; EUSÉBIO, E. **GESTÃO DE ENERGIA** - Energia Mini-Hídrica. ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2006. Disponível em:
<<http://pwp.net.ipl.pt/deea.isel/ccamus/Doc/ENERGIAS3.pdf>>. Acesso em: 10/09/2011.

CERPCH. **Pequena Central Hidrelétrica.** Disponível em:
<http://www.cerpch.unifei.edu.br/michell_banki.php>. Acesso em: 06/09/2011.

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

ELECTROSERVICE. **Hydro Power Turbines.** Disponível em:
<<http://www.electroservice.ro/en/services/3-hydro-power-turbines/>>. Acesso em 04/03/2013

ELETROBRÁS. **Diretrizes para projetos de PCH.** Disponível em
<<http://www.portalpch.com.br>>. Acesso em 11/10/2011.

_____. **Manual de microcentrais hidrelétricas.** Rio de Janeiro: [sn], 1985. 344p.

ENERGIA RENOVÁVEL. Disponível em: <<http://www.energiarenovavel.org/>>. Acesso em 04/02/2012.

FAINZILBER, Abrahão. **Biblioteca Educação é Cultura: Energia Hidrelétrica; “O Aproveitamento das Fontes Hidrelétricas Brasileiras”**. Rio de Janeiro: Bloch, 1980.

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

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.

HACKER INDUSTRIAL. **Turbinas hidráulicas Pelton**. Disponível em: <http://www.hacker.ind.br/produtos_turbinas_pelton_turbinas.php>. Acesso em: 13/09/2011.

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.

IBGE. **Censo Cidades - 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=410310#>>. Acesso em 05/11/2011.

IDER. **Energias Renováveis**. Disponível em <<http://www.ider.org.br/energias-renovaveis/energias-renovaveis>>. Acesso em 06/07/2012.

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

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.

MACINTYRE, A. Joseph. **Máquinas motrizes hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1983.

MELLO, Henrique Couto Ferreira. **Setor Elétrico Brasileiro – Visão Política e Estratégica**. Monografia. Rio de Janeiro: ESG, 1999.

OLADE/CEPAL/GTZ. **Energia y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe**. Quito, 1996.

PÉREZ, E. P.; CARROCCI, L. R.; MAGALHÃES FILHO, P.; DE CARVALHO JR. J. A. **Projeto Hidráulico e Mecânico de uma Micro Turbina para Zonas Rurais** – In: III International Congress University – Industry Cooperation, 2010. Ubatuba, 2010.

PORTAL BRASILEIRO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Energia Hidrelétrica.**

Disponível em:

<http://www.energiarenovavel.org/index.php?option=com_content&task=view&id=50&Itemid=142>. Acesso em: 06/09/2011.

PORTAL PCH. **Pequena Central Hidrelétrica.** Disponível em:

<http://www.portalpch.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=702>. Acesso em: 02/09/2011.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BOCAIÚVA DO SUL. **O Município.** Disponível em:

<<http://www.bocaiuvadosul.pr.gov.br>>. Acesso em 05/11/2011.

PXSEALS. Disponível em: <http://www.pxseals.com/site_br/index.php/turbine-kaplan/>. Acesso em 02/10/2012.

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

RICARDO, Mateus. **Transposição de dados hidrológicos para a determinação da vazão de projeto de micro e minicentrals hidrelétricas: estudo de caso.** PCH Notícias & SHP News. N.28. Itajubá: 2006.

SOUZA, Z. de Santos, A. H. BORTON, E.C. – **Centrais Hidrelétricas – Estudos para Implantação** . 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.

STRAUHS, F. D. R. **Gestão do Conhecimento em Laboratório Acadêmico:** Proposição de Metodologia. 2003. Tese (Doutorado e, Engenharia de Produção). UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

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

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Turbina Francis.** Disponível em:

<<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/turbina2.htm>>. Acesso em: 13/09/2011.

UTFPR – Campus Curitiba. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/curitiba/estrutura-universitaria/assessorias/ascom/noticias/acervo/convenio-entre-campus-curitiba-e-prefeitura-de-bocaiuva-do-sul-cria-centro-de-educacao-ambiental-e-mini-usina-para-geracao-de-energia-eletrica>>. Acesso em 05/11/2011.

VIVENDO ELETRICIDADE. Disponível em:
<<http://vivendoeletricidade.blogspot.com.br/2010/08/turbina-pelton.html>>. Acesso em
13/10/2012.