



Enoque Pinto de Oliveira Júnior

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA CONSTRUÇÃO
DE UMA PCH.**

Horizontina

2015

Enoque Pinto de Oliveira Júnior

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA CONSTRUÇÃO
DE UMA PCH.**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Ademar Michels, Dr.

Horizontina

2015

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

“Estudo da viabilidade técnica para construção de uma PCH.”

Elaborada por:

Enoque Pinto de Oliveira Júnior

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 12/11/2015
Pela Comissão Examinadora**

**Dr. Ademar Michels,
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**MsC. Anderson Dal Molin
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Esp. Valmir Vilson Beck
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2015**

DEDICATÓRIA

Aos meus amigos familiares, em especial meus pais Enoque Pinto de Oliveira e Maria da conceição Alves de Oliveira, que com sua fé em Deus e força interior me ensinaram o bom caminho, motivando e fortalecendo a certeza de que nunca estarei sozinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado à oportunidade de chegar até aqui com vida e saúde. Também, em especial, a minha namorada Taísa Ribeiro pelo apoio, motivação e compreensão.

Aos professores da FAHOR, que de várias formas contribuíram para a realização deste sonho em destaque maior ao professor Dr. Ademar Michels pela orientação ao desenvolver este trabalho.

A toda minha família, que de várias maneiras me apoiaram nesta importante etapa da minha vida.

“O conhecimento torna a alma jovem e diminui a amargura da velhice. Colhe, pois, a sabedoria. Armazena suavidade para o amanhã.”

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade estudar os elementos básicos para construção de uma PCH (pequena central hidrelétrica) com vistas a elaborar um roteiro de cálculo a partir de estudos bibliográficos, dados topográficos e geológicos, objetivando encontrar o potencial energético no trecho do rio Itamarandiba do Mato que fica no estado de Minas Gerais, município de Itamarandiba, compreendido entre latitude Sul 18.02837° e longitude Oeste 42.67319° e latitude Sul 18.02269° e longitude 42.67305° . Deste ponto de vista, este trabalho teve sua estrutura baseada numa pesquisa definida nas seguintes etapas: a) Estabelecer estudos básicos sobre a topografia e a geologia do local de implantação da PCH. b) Medir a vazão do curso d'água, assim como a altura do desnível natural, a fim de identificar possível viabilidade energética. c) Realização de cálculos de dimensionamento dos principais componentes mecânicos. O trecho do rio em estudo se mostra bastante favorável à instalação de uma PCH, pois, este se apresenta em um local onde se forma um vale estreito entre duas montanhas paralelamente dispostas e no final delas existe um desnível natural em forma de corredeira que propicia o aproveitamento energético. Os cálculos desenvolvidos neste trabalho visam principalmente, definir as características principais da PCH a ser implantada no local, conhecer as perdas envolvidas no processo, encontrar o tipo de turbina ideal e por fim, a potência no eixo. Os dados levantados por esta pesquisa apontam para um aproveitamento de queda de projeto de 52 m tendo uma vazão média de $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ resultando em um aproveitamento energético de aproximadamente 1,48 MW.

Palavras-chaves: PCH, potencial energético, viabilidade técnica.

ABSTRACT

This work aims to study the basic elements for building a PCH (small hydroelectric power plant) in order to prepare a calculation script from bibliographical studies, topography and geological, aiming to find the energy potential in the river stretch of Mato Itamarandiba which is in the state of Minas Gerais, the city of Itamarandiba, between latitude 18.02837 ° South and West longitude and latitude 42.67319 ° South and longitude 42.67305 ° 18.02269 °. From this point of view, this work had its structure based on the following steps defined research: a) Establish baseline studies on the topography and geology of the site of the PCH. b) Measure the flow of the watercourse, as well as the height of the natural unevenness in order to identify possible energy feasibility. c) carrying out sizing calculations of the main mechanical components. The stretch of the river under study proves favorable to the installation of a PCH therefore it presents itself in a place where it forms a narrow valley between two mountains parallel arranged and at the end of which there is a natural gap-shaped chute that delivers the energy use. The calculations developed in this work aimed primarily define the main characteristics of the PCH to be deployed on-site, knowing the losses involved in the process, find the ideal type of turbine and finally the shaft power. The data collected by this survey point to a project falling utilization of 52 m with an average flow of 3,5 m³/s resulting in energy use of approximately 1,48 MW.

Keywords: PCH, energy potential, technical feasibility

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Barragem de terra	19
Figura 2: Barragem de enrocamento	20
Figura 3: Barragem de concreto	20
Figura 4: Ilustração de um vertedouro	21
Figura 5: Perda de carga na entrada da tubulação	24
Figura 6: Curva $Zd = f(K')$ - Coeficiente Zd em função de K	27
Figura 7: Saída da tubulação forçada	29
Figura 8: Perda de carga nas curvas ou cotovelos	30
Figura 9: Curva na entrada da turbina	31
Figura 10: Turbina Pelton	33
Figura 11: Turbina Francis	34
Figura 12: Turbina Kaplan	35
Figura 13: Gráfico para seleção de turbinas hidráulicas	36
Figura 14: Gerador	37
Figura 15: Flutuador com garrafa plástica	38
Figura 16: Vertedouro retangular	40
Figura 17: Parâmetros para cálculos da potência hidráulica	42
Figura 18: Vista aérea do local de instalação	45
Figura 19: Medição de vazão por flutuador	46
Figura 20: Coordenadas de localização e desnível	47
Figura 21: Saída do conduto forçado	51
Figura 22: Curva da tubulação na entrada da turbina	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	16
2.1.1 PCH A FIO D'ÁGUA	16
2.1.2 PCH DE ACUMULAÇÃO, COM REGULARIZAÇÃO DIÁRIA DO RESERVATÓRIO	17
2.1.3 PCH DE ACUMULAÇÃO, COM REGULARIZAÇÃO MENSAL DO RESERVATÓRIO	17
2.1.4 CENTRAIS QUANTO À POTÊNCIA INSTALADA E QUANTO À QUEDA DE PROJETO.....	17
2.2 ELEMENTOS DE UMA PCH.....	18
2.2.1 BARRAGEM	18
2.2.2 VERTEDOURO	21
2.2.3 CIRCUITO DE ADUÇÃO	21
2.2.4 CASA DE FORÇA.....	32
2.2.5 TURBINAS HIDRÁULICAS	33
2.2.6 GERADORES	37
2.3 ELEMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO	38
2.3.1 MEDIÇÃO DA VAZÃO.....	38
2.3.2 QUEDA DE PROJETO.....	41
2.3.3 POTÊNCIA HIDRÁULICA	42
2.4 IMPACTO AMBIENTAL	43
2.4.1 ESTUDO DE IMPACTO AMBIENTAL.....	43
3 METODOLOGIA	45
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS.....	45
3.1.1 RIO ITAMARANDIBA DO MATO.....	45
3.1.2 MEDIÇÃO DA VAZÃO.....	46
3.1.3 MEDIÇÃO DA ALTURA DE QUEDA	47
3.1.4 ESTUDOS TOPOGRÁFICOS.....	48
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
4.1 ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA.....	49
4.2 MEMORIAL DE CÁLCULO	49
4.2.1 BARRAGEM	49
4.2.2 VERTEDOURO	50
4.2.3 TOMADA D'ÁGUA.....	50
4.2.4 TUBULAÇÃO DE BAIXA PRESSÃO	50
4.2.5 CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	50
4.2.6 CONDUITO FORÇADO.....	50
4.2.7 GOLPE DE ARÍETE	51
4.2.8 CASA DE FORÇA.....	51
4.2.9 ESTUDO DAS PERDAS	52
4.2.10 PERDAS TOTAIS.....	54
4.2.11 QUEDA LÍQUIDA	55
4.2.12 DETERMINAÇÃO DO TIPO IDEAL DE TURBINA	55
4.2.13 POTÊNCIA NO EIXO.....	56
5 CONCLUSÕES.....	57

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
APÊNDICE A – DESENHO ESQUEMÁTICO DOS ELEMENTOS BÁSICOS DIMENSIONADOS.....	61
.....	61
APÊNDICE B – TABELA DE MEDIÇÕES DA VÃZÃO DO CURSO DO RIO.....	62

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que se apresenta em um cenário privilegiado no tema referente a questão de potenciais hidrelétricos, provenientes de pequenos rios com corredeiras ou quedas d'água, que podem ser aproveitados como energia primária. Essa energia, geralmente é utilizada para recalcar água para reservatórios mais elevados, mover moinhos, acionar máquinas estacionárias, e também para pequenos aproveitamentos elétricos, que é o tema deste trabalho.

O estado de Minas Gerais é o pioneiro em tecnologia de PCH's, sendo que a primeira usina instalada no Brasil foi na cidade de Diamantina, montada a partir de um desnível de 5 m. Este pequeno aproveitamento de energia gerava 12 kW utilizando dois geradores acionados por roda d'água. A partir daí, esta tecnologia tem se disseminado por todo o país, beneficiando a população em geral (FARRET, 2014).

Segundo Farret (2014), a oferta de energia elétrica brasileira tem seu valor determinado em cerca de 117,14 GW e 81,9% desta energia são provenientes de hidrelétricas. As PCH's representam uma fatia de 3,3% deste mercado, e surgem como alternativa de empregos diretos e indiretos bem como arrecadação de impostos municipais, contribuindo para o desenvolvimento do país. Com o aumento da demanda energética torna-se imprescindível a elaboração de estudos na busca de potenciais energéticos em nossos rios.

De acordo com Dal Molin (2007), a crescente demanda no consumo de energia elétrica pela população em geral, pode ocasionar a falta ou a elevação do custo da mesma, portanto, se faz-se necessário a implantação de novas alternativas de geração de energia elétrica, bem como a reestruturação e modernização de unidades geradoras já existentes.

Diante da possibilidade de aproveitar pequenos potenciais hidrelétricos no cenário brasileiro, as PCH's surgem como alternativa muito atraente de elevação da oferta energética, contribuindo não só com a produção de energia elétrica, mas também com desenvolvimento local, onde foi instalada (DAL MOLIN, 2007).

1.1. JUSTIFICATIVA

A energia elétrica é um bem de consumo essencial na vida das pessoas. Nos últimos anos o consumo aumentou significativamente, devido à utilização nos processos de produção industrial e comércio em geral, além do conforto que proporciona aos domicílios da população.

A energia elétrica de origem hidráulica está entre as mais utilizadas em todo Brasil. Ela é produzida com o aproveitamento do potencial hidráulico de um rio, podendo ser utilizados desníveis naturais, como quedas d'água, ou também desníveis proporcionados com desvios de cursos de rios, a fim de aumentar as quedas d'água.

As Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH representam uma forma rápida e eficiente de promover a expansão da oferta de energia elétrica, visando suprir a recente demanda verificada no mercado nacional. Esse tipo de empreendimento possibilita um melhor atendimento às necessidades de carga de pequenos centros urbanos e regiões rurais, uma vez que, na maioria dos casos, complementa o fornecimento realizado pelo sistema interligado. (ANEEL, 2004).

As pequenas centrais hidrelétricas, além de contribuir com a geração de energia elétrica, possui um papel fundamental na geração de empregos diretos e indiretos, bem como na arrecadação de impostos municipais, colaborando com o desenvolvimento da região de instalação (DAL MOLIN, 2007).

Diante disso, as PCH's aparecem como alternativa solucionadora, para suprir as lacunas energéticas vividas no país, uma vez que apresenta uma forma rápida de promover a expansão da energia, com baixo custo de investimento e baixo impacto ambiental. Esse tipo de empreendimento possibilita uma melhora no atendimento das necessidades de energia nos pequenos centros urbanos e regiões rurais (ANEEL, 2011).

1.2. OBJETIVOS GERAIS

Apresentar a viabilidade técnica para implantação de uma PCH em um trecho do rio Itamarandiba do Mato, situado no município de Itamarandiba.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar desnível e a vazão do rio onde será instalada a PCH;
- Definir local para implantação da PCH;
- Desenvolver estudo sobre o potencial energético do rio onde será instalada a PCH;
- Identificar a viabilidade técnica para construção de uma PCH através de um roteiro básico de cálculos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Na primeira edição do Manual (Eletrobrás, 1982), uma Usina Hidrelétrica era considerada como uma PCH quando:

- A potência instalada total estivesse compreendida entre 1,0 MW e 10 MW;
- A capacidade do conjunto turbina-gerador estivesse compreendida entre 1,0 MW e 5,0 MW;
- Não fossem necessárias obras em túneis (conduto adutor, conduto forçado, desvio de rio, etc.);
- A altura máxima das estruturas de barramento do rio (barragens, diques, vertedouro, tomada d'água, etc.) não ultrapassasse 10 m;
- A vazão de dimensionamento da tomada d'água fosse igual ou inferior a 20 m³/s.

Não havia limite para a queda do empreendimento, sendo as PCH's classificadas em de baixa, média e alta queda.

Em função das mudanças institucionais e na legislação, a resolução da ANEEL 394, de 04/12/98, estabelece que os aproveitamentos com características de PCH são aqueles que têm potência entre 01 e 30 MW e área inundada até 3,0 km².

2.1.1 PCH a fio d'água

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

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

Esse tipo de PCH apresenta, dentre outras, as seguintes simplificações:

- Dispensa estudos de regularização de vazões;
- Dispensa estudos de sazonalidade da carga elétrica do consumidor;

- Facilita os estudos e a concepção da tomada d'água;
- As barragens serão, normalmente, baixas, pois têm a função apenas desviar a água para o circuito de adução;
- Como as áreas inundadas são pequenas, os valores despendidos com indenizações serão reduzidos (ELETROBRÁS, 2000).

2.1.2 PCH de acumulação, com regularização diária do reservatório

Esse tipo de PCH é empregado quando as vazões de estiagem do rio são inferiores à necessária para fornecer a potência para suprir a demanda máxima do mercado consumidor e ocorrem com risco superior ao adotado no projeto. Nesse caso, o reservatório fornecerá o adicional necessário de vazão regularizada (ELETROBRÁS, 2000).

2.1.3 PCH de acumulação, com regularização mensal do reservatório

Quando o projeto de uma PCH considera dados de vazões médias mensais no seu dimensionamento energético, analisando as vazões de estiagem médias mensais, pressupõe-se uma regularização mensal das vazões médias diárias, promovida pelo reservatório (ELETROBRÁS, 2000).

2.1.4 Centrais quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto

As PCH's podem ser ainda classificadas quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto, como mostrado na no Quadro (1), considerando-se os dois parâmetros conjuntamente, uma vez que um ou outro isoladamente não permite uma classificação adequada.

Para as centrais com alta e média queda, onde existe um desnível natural elevado, a casa de força fica situada, normalmente, afastada da estrutura do barramento. Consequentemente, a concepção do circuito hidráulico de adução envolve, rotineiramente, canal ou conduto de baixa pressão com extensão longa.

Para as centrais de baixa queda, todavia, a casa de força fica, normalmente, junto da barragem, sendo a adução feita através de uma tomada d'água incorporada ao barramento.

Classificação das PCH's 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	$1.000 < P < 30.000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

Quadro 1 – Classificação das PCH's. Fonte: Eletrobrás 2000.

2.2 ELEMENTOS DE UMA PCH

Uma pequena central Hidrelétrica é constituída por diversos componentes cuja função principal é captar e conduzir à água a um conjunto turbina e gerador, que são os componentes responsáveis pela transformação da energia hidráulica em eletricidade. As PCH's são formadas por uma barragem, formadora do reservatório, por sua vez a barragem é composta pelo vertedouro, pela bacia de dissipação e por outros componentes de controle. O sistema adutor é formado pela tomada d'água, pelo conduto de adução, chaminé de equilíbrio e por último o conduto forçado de alta pressão. A última parte da central é composta pela casa de máquinas e o canal de fuga (ELETROBRÁS, 2000).

2.2.1 Barragem

Magalhães (2009) destaca que as barragens possuem três finalidades distintas: criar um desnível para produção de uma queda d'água; formar um reservatório; ou pode ser simplesmente o levantamento do nível da água a fim de possibilitar a entrada da água em um canal, túnel ou tubulação. Em situações mais singulares, elas também podem ter finalidades múltiplas, como por exemplo, além de reservatório de energia hidráulica servir de recreação ou irrigação.

As configurações de barragens mais utilizadas em projetos PCH's, com vistas ao aproveitamento hidrelétrico têm sido preferencialmente os seguintes: barragem de terra; barragem de enrocamento e barragem de concreto (ELETROBRÁS, 2000).

A Eletrobrás (2000) define que as barragens de terra conforme Figura 1, são escolhidas em locais onde a topografia apresenta características de ondulação

suave e também em vales pouco encaixados. Para escolha deste tipo de barragem o local de construção deve possuir as seguintes peculiaridades:

- Áreas de pedreiras localizadas em cotas superiores as da barragem visando facilitar o transporte dos materiais;
- O eixo do barramento deve ser posicionado no local mais estreito do rio;
- As margens do reservatório devem ser estáveis, visando-se minimizar escorregamentos.

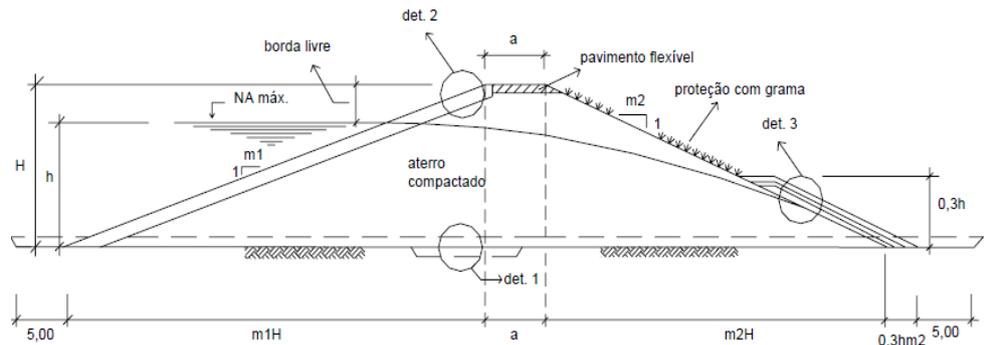


Figura 1: Barragem de terra. Fonte: Eletrobrás, 2000.

Dal Molin (2007) destaca que a barragem de enrocamento conforme Figura 2, com espaldares de rocha e núcleo impermeável assim como a barragem de terra, é recomendada para vales suavemente encaixados, no entanto, devem ser levadas em consideração algumas questões como disponibilidade de material rochoso, verificando também a possibilidade de existência de condições adequadas de fundação e pedreiras próximas ainda exploráveis. Um local, para ser considerado adequado à construção desse tipo de barragem deve possuir as seguintes características:

- Disponibilidade de material rochoso;
- A largura do vale na crista do barramento dever ser a mais estreita no trecho, com o objetivo de reduzir o volume da barragem;
- As fundações e as ombreiras devem ser resistentes e estanques;
- Facilidade de acesso à construção.

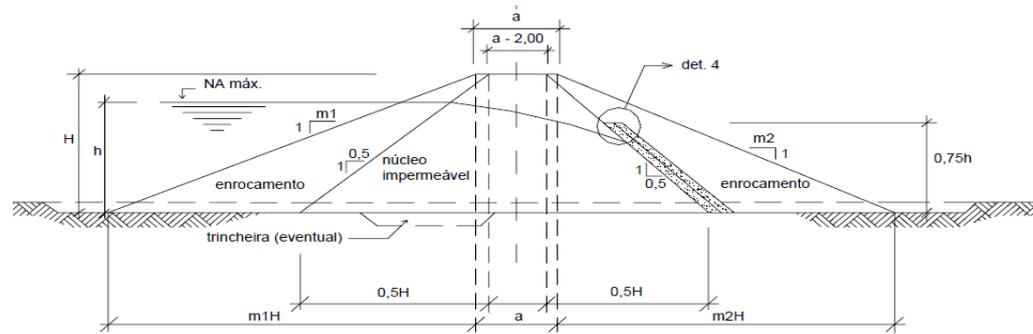


Figura 2: Barragem de enrocamento. Fonte: Eletrobrás, 2000.

Recomenda-se a utilização da barragem de concreto, Figura 3, em locais onde houver vales estreitos, encaixados, e materiais rochosos duros em condições de fixar fundações. Deve-se optar por barragem de concreto, sobretudo quando o local dispuser das seguintes características (ELETROBRÁS, 2000):

Possuir largura do vale na crista estreita visando diminuir o volume de concreto, possuir pedreiras para obtenção de britas e areias, assim como facilidade em conseguir cimento que atenda as demandas exigidas para conclusão da obra (DAL MOLIN, 2007).

Deve-se atentar para a qualidade nas fundações e ombreiras, estas devem ser resistentes constituídos de maciços de pedras sãs, ou seja, material rochoso pouco fraturado (1 a 3 fraturas/metro) (ELETROBRÁS, 2000).

A construção da barragem de concreto deve ser do tipo em etapas, ou seja, em blocos e entre eles deverão ser colocadas juntas verticais de dilatação, mas que mantenha as vedações asseguradas contra quaisquer vazamentos (ELETROBRÁS, 2000).

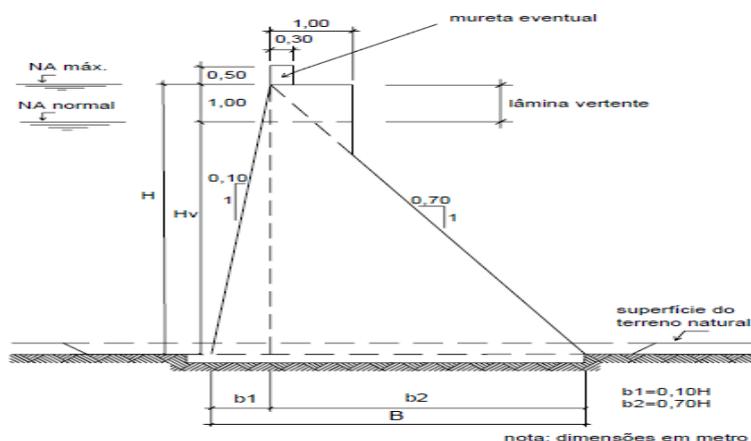


Figura 3: Barragem de concreto. Fonte: Eletrobrás, 2000.

2.2.2 Vertedouro

Segundo Dal Molin (2007), o vertedouro tem a função de descarregar a vazão máxima de água determinada pelo projeto.

Os vertedouros que geralmente são aplicados em projetos de PCH's podem ser definidos em três tipos básicos, conforme ilustrados na Figura 4^a e 4^b (ELETROBRÁS, 2000).

- I. Por um canal lateral, em cota elevada em relação ao leito do rio, tendo coleira vertedora à jusante (Figura 4b);
- II. Pelo próprio corpo da barragem, ao longo de toda extensão ou somente parte dela (Figura 4a);
- III. Através dos tipos citados acima.

O comprimento máximo (b_v) do vertedouro pode ser obtido utilizando-se a eq.1, ANELL, 2009.

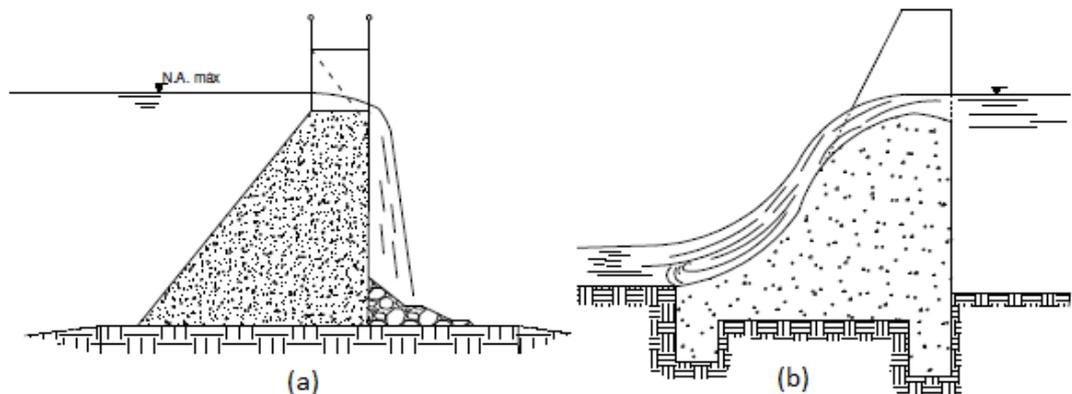


Figura 4: ilustração de um vertedouro: (a) vertimento pelo corpo da barragem e (b) vertimento por canal lateral. Fonte: ANELL, 2009.

$$b_v = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{1,7 \cdot h_v^{1,5}} \quad (1)$$

Onde:

b_v = Comprimento máximo do vertedouro (m);

$Q_{m\acute{a}x}$ = Vazão máxima de cheia (m³/s);

h_v = Altura da lâmina d'água no vertedouro (m).

2.2.3 Circuito de adução

O circuito de adução deve ser projetado de acordo com as características de cada empreendimento porque em cada projeto varia de acordo com suas

especificidades. Basicamente ele é constituído por: tomada d'água; canal; tubulação de baixa pressão; chaminé de equilíbrio; e o conduto forçado (DAL MOLIN 2007).

A tomada d'água é responsável por captar e conduzir a água até a tubulação que conduzirá à turbina além de fechar a entrada d'água quando se fizer necessário. Recomenda-se que coloque grades de proteção para impedir entrada de corpos estranhos que podem por consequência danificar os componentes da PCH (DAL MOLIN 2007).

A limpeza nas grades de proteção deve ser realizada periodicamente, e quando o parâmetro a montante é inclinado deve obedecer a mesma inclinação, geralmente 75° a 80°. A distância livre entre as barras de proteção devem ser respeitadas de acordo como tipo e as dimensões de cada turbina, conseqüentemente, das passagens livres entre as pás móveis do rotor, estas dimensões podem ser vistas na Tabela 1, (DAL MOLIN 2007).

Tabela 1

Valores para distância livre entre as barras da grade de proteção

Tipo de turbina	Vão livre entre as barras
Pelton	1/5 do diâmetro do bocal
Kaplan de médias dimensões e Francis	5 a 8 cm
Kaplan de grandes dimensões	8 a 15 cm

Fonte: Fonte: Schreiber *apud* Dal Molin.

Segundo Schreiber *apud* Dal Molin, quando se deseja definir a área de seção plana de uma tomada d'água, deve-se considerar a velocidade de escoamento entre 1,0 e 1,2 m/s. desta forma, a estrutura deverá ser dimensionada levando em conta a vazão máxima de projeto, para o dimensionamento usa-se a eq. 2.

$$A = \frac{Q}{V} \quad (2)$$

Onde:

V = Velocidade de escoamento na grade de proteção (m/s);

Q = Vazão de projeto (m³/s);

A = Área de seção plana da tomada d'água (m²).

Para o dimensionamento do diâmetro da tubulação de adução de baixa pressão calcula-se através da eq.3, (ELETROBRÁS 1985).

$$D = 83,383 \cdot Q^{0,388} \cdot \left(Ka \frac{L}{H}\right)^{0,204} \quad (3)$$

Onde:

Q = Vazão de projeto (m³/s);

D = Diâmetro da tubulação (m);

H = Altura de queda bruta (m);

L = Comprimento da tubulação (m)

Ka = 0,32 – Tubulação de aço, parede interna sem costura (valor tabelado).

A espessura mínima da parede do tubo em aço é determinada pela eq. 4, (ELETROBRÁS 1985).

$$e = \frac{D+508}{400} (\text{mm}) \quad (4)$$

Onde:

e = Espessura mínima da parede (mm);

D = Diâmetro da tubulação (cm).

A perda de carga no túnel de adução, conforme ilustrado na Figura 5, geralmente varia entre 2% a 5% do total de queda bruta, no entanto a perda de carga na entrada do túnel de adução precisa ser considerada e calculada, esse cálculo pode ser executado usando a eq. (5).

$$h_e = K_e \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

Onde:

h_e = Perda de carga na entrada do túnel de adução (m);

K_e = Coeficiente em função da forma da boca do conduto, (Figura 5).

V = Velocidade de escoamento (m/s).

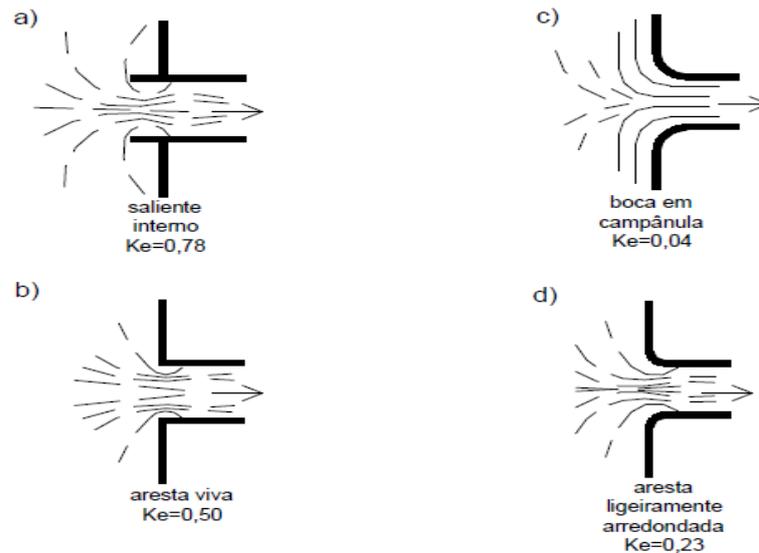


Figura 5: Perda de carga na entrada da tubulação. Fonte: Eletrobrás, 2000.

A velocidade de escoamento (V) pode ser calculada pela eq. (6)

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (6)$$

Onde:

V = Velocidade de escoamento (m/s);

Q = Vazão de projeto (m³s);

D = Diâmetro da tubulação (m).

Também é necessário determinar o coeficiente de perda de carga (f) em função da rugosidade das paredes internas da tubulação e da velocidade de escoamento. Para este cálculo usa-se a eq. 7.

$$f = 124,58 \frac{n^2}{D^{0,333}} \quad (7)$$

Onde:

f = Coeficiente de perda de carga;

n = Coeficiente de Manning, (Tabela 2);

D = Diâmetro da tubulação (mm).

Tabela 2
Valores do coeficiente de Manning

Revestimento	n
Sem revestimento	0,025
Concreto	0,013
Aço	0,01

Fonte: Eletrobrás 2000.

A Eletrobrás (2000) conceitua chaminé de equilíbrio como sendo um reservatório de eixo vertical, que é posicionado normalmente no final da tubulação de adução de baixa pressão, e a montante do conduto forçado, seu uso se destaca pelas seguintes finalidades:

- Amortecer as variações de pressão, dentro do conduto forçado, denominado golpe de aríete, devido ao interrompimento de forma abrupta do fluxo de água; e
- Servir de reservatório para o conduto forçado fornecendo água no fluxo inicial devido à nova abertura da turbina, até que se estabeleça o regime constante.

Quando o uso da chaminé se fizer necessário, esta deve ser instalada o mais próximo possível da casa de força, a fim de reduzir o comprimento do conduto forçado e conseqüentemente os efeitos provocados pelo golpe de aríete (ELETROBRÁS 2000).

O indicativo para verificação da necessidade de instalação de uma chaminé de equilíbrio é dada pela eq. 8, (ELETROBRÁS 2000).

$$\frac{L_{cf}}{H_b} \leq 5 \quad (8)$$

Onde,

L_{cf} = Comprimento do conduto forçado (m);

H_b = Queda bruta (m);

Sendo, $L_{cf} > 5H_b$, recomenda-se o uso da chaminé de equilíbrio (ELETROBRÁS 2000).

Para encontrar o ponto de elevação do nível d'água estático máximo e o nível de depleção mínimo, usa a eq. 9, (ELETROBRÁS 2000).

$$Y_e = Y_d = v \sqrt{\frac{A_{ta} \times L_{ta}}{g A_c}} \quad (9)$$

Onde:

$Y_e = Y_d$ = Elevação do nível d'água estático máximo (m);

v = Velocidade do fluido (m/s);

A_{ta} = Área interna da tubulação adutora (m²);

L_{ta} = Comprimento da tubulação adutora (m);

A_c = Área interna mínima da seção transversal da chaminé de equilíbrio (m²);

g = Aceleração da gravidade (m/s²).

As perdas no sistema de adução são obtidas através das eqs. (10), (11) e (12), (ELETROBRÁS 2000).

$$Y_E = Z_e \cdot Y_e \quad (10)$$

$$Z_e = 1 - \frac{2}{3} K + \frac{1}{9} K^2 \quad (11)$$

$$K = \frac{h_{ta}}{Y_e} \quad (12)$$

Onde:

Y_e = Elevação do nível d'água estático máximo (m);

K = Coeficiente do material do conduto (adm);

h_{ta} = Perda de carga no sistema adutor (m).

A depleção máxima é obtida através da eq. (13), (ELETROBRÁS 2000).

$$Y_D = Z_d \cdot Y_d \quad (13)$$

Onde:

Y_D = Depleção máxima (m);

Z_d = Coeficiente em função de K' ;

$Y_e = Y_d$ = Elevação do nível d'água estático máximo (m).

O coeficiente em função de K' (Z_d) pode ser encontrado na Figura 6, definida como padrão inicial da eq.(14), (ELETROBRÁS, 2000).

$$K' = \frac{h'_{ta}}{Y_d} \quad (14)$$

Onde:

h'_{ta} = Perda de carga no sistema adutor (m);

Y_e = Elevação do nível d'água estático máximo (m);

K' = Coeficiente (adm).

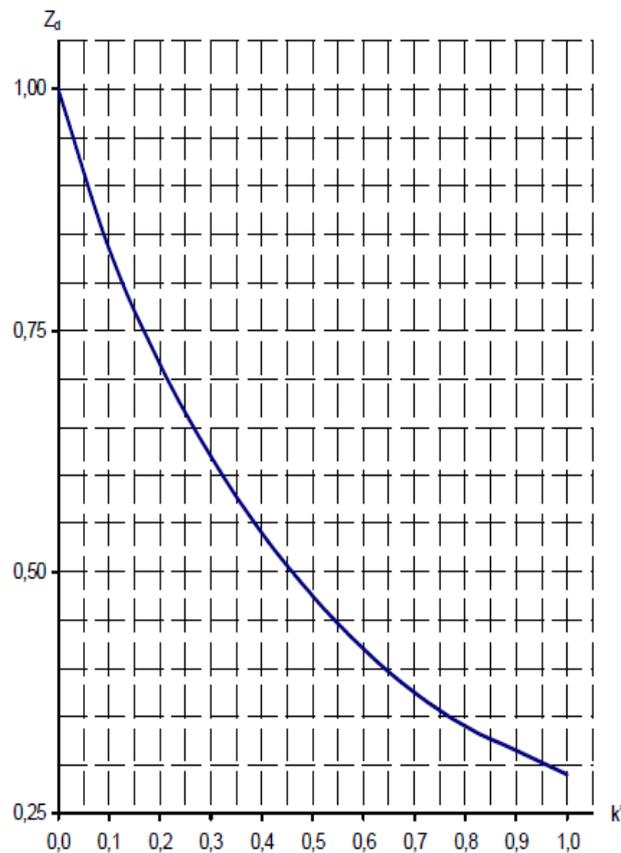


Figura 6: Curva $Z_d = f(K')$ - Coeficiente Z_d em função de K' . Fonte: Eletrobrás, 2000.

Para definição da altura da chaminé de equilíbrio (H_c), usa-se a eq. (15), (ELETROBRÁS, 2000).

$$H_c = Y_E + y_e + Y_D + y_D + Y_R \quad (15)$$

Onde:

y_e e y_D = São parâmetro de segurança, (1,0m);

Y_R = Depleção máxima do reservatório.

Para o conduto forçado, a Eletrobrás 2000, recomenda que se use diâmetro único ao longo de todo seu comprimento. Esta padronização é definida como diâmetro econômico, ou seja, é a preocupação em dimensionar a tubulação para que a relação custo-benefício seja máxima.

O diâmetro econômico pode ser calculado pela eq. (16), (ELETROBRÁS, 2000).

$$De = 123,7 \sqrt[7]{\frac{Q^3}{H_f}} \quad (16)$$

Onde:

De = Diâmetro econômico (cm);

Q = Descarga de projeto (m³/s);

H_f = H_b + h_o = carga hidráulica total sobre o conduto (m), igual à soma da queda bruta (H_b) com a sobrepressão devida ao golpe de aríete (h_o).

H_b = Queda Bruta (m)

h_o = Golpe de Aríete.

Após calcular o diâmetro econômico, deve-se atentar para os dados de verificação de velocidade máxima admitida em cada tipo de tubulação. Estes dados são obtidos na Tabela 3, (ELETROBRÁS, 2000).

Tabela 3
Velocidade máxima admissível por material

Material	V(máx) admissível (m/s)
Aço	5
Concreto	3

Fonte: Eletrobrás, 2000.

De acordo com Sá (2009), quando a queda bruta somada com a altura correspondente ao golpe de aríete for menor que 100 metros, pode se calcular a espessura mínima do conduto forçado usando a eq. 17.

$$e = \frac{0,10 \cdot H \cdot d}{2 \cdot \sigma t} + c \quad (17)$$

Onde:

e = Espessura da parede do conduto forçado (mm);

$H = H_b + h_o$ (m);

H_b = Queda bruta (m)

h_o = Altura correspondente ao “golpe de Aríete” (m);

d = Diâmetro do conduto forçado (m);

c = Coeficiente que compensa o efeito da ferrugem, 2 a 3mm ($c= 0,002$ a $0,003m$)

σ_t = Coeficiente de tração do aço. $\sigma_t = 1000 \text{ kgf/cm}^2$

Ainda no campo de dimensionamento do conduto forçado devem-se calcular as perdas provocadas pelo mesmo.

As principais perdas são:

a) Perdas na saída do conduto forçado conforme representado na Figura 7.

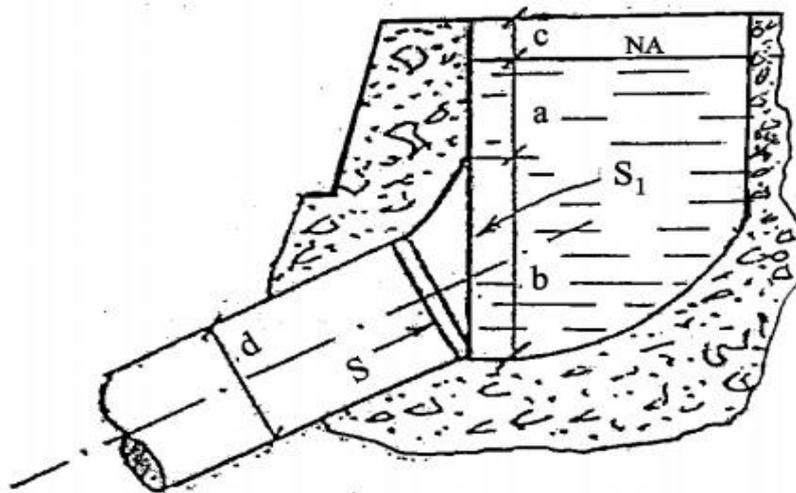


Figura 7: Saída da tubulação forçada. Fonte: Sá 2009

Tem se os valores a seguir:

$c = 0,20 \text{ m}$ – de acordo com a lâmina d’água no vertedouro

$a = d$ – quando $> 1,50 \text{ m}$

$b = 1,30 \cdot d$ (mínimo)

Usa-se a eq. 18, para a determinação desta perda

$$h_1 = \frac{v^2}{2 \cdot g} \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right)^2 \quad (18)$$

Onde:

h_1 = Perda da saída da tubulação;

V = Velocidade da água na tubulação;

μ = coeficiente de valor adimensional.

O Quadro 2, mostra a relação do coeficiente (μ) em função da área de entrada de água no conduto forçado. (SÁ, 2009).

$$\mu = \frac{S}{S_1} \quad (19)$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (20)$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot b^2}{4} \quad (21)$$

$\frac{S}{S_1}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
μ	0,624	0,632	0,643	0,659	0,681	0,712	0,765	0,813	0,892

Quadro 2 – Relação entre áreas para escolha do coeficiente μ . Fonte: Sá, 2009.

b) Perdas nas partes retas do conduto forçado;

Calcula-se através da eq. 22, Sá, 2009.

$$h_2 = \lambda \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{L}{D} \quad (22)$$

Onde:

λ = Coeficiente – geralmente $\lambda = 3$;

V = Velocidade da água na tubulação (m/s²);

L = Comprimento da tubulação (m);

D = Diâmetro da tubulação (m);

g = Aceleração da gravidade (m/s²).

c) Perdas nas curvas: (Figura 8);

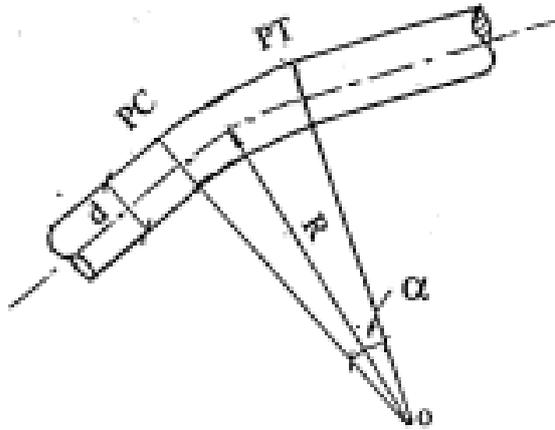


Figura 8: Perda de carga nas curvas ou cotovelos Fonte: Sá, 2009 p. 85.

Segundo Sá 2009, podem ser encontradas através das eqs. (23), (24) e (25).

$$h_3 = \left(\text{sen}^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot \text{sen}^4 \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (23)$$

Fazendo:

$$\varepsilon = \left(\text{sen}^2 \cdot \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot \text{sen}^4 \cdot \frac{\alpha}{2} \right) \quad (24)$$

Tem-se:

$$h_3 = \varepsilon \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (25)$$

Onde:

ε = Coeficiente singular de perda de carga;

α = Ângulo da curva;

V = Velocidade da água na tubulação (m/s)

O valor de ε em função de α é determinado através do Quadro 3, (Sá, 2009).

α°	10	20	30	40	45	50	55	60	65	70	80	90
ε	0,01	0,03	0,08	0,14	0,18	0,24	0,30	0,37	0,46	0,55	0,75	1,00

Quadro 3 – Valor de ε em função de α° . Fonte: Sá, 2009.

Para os valores com ângulos intermediários, ou seja, que não estão com seu valor definido no Quadro 3, deve-se fazer interpolação a fim de encontrar o valor de ε .

d) Perda na entrada da turbina: (Figura 9).

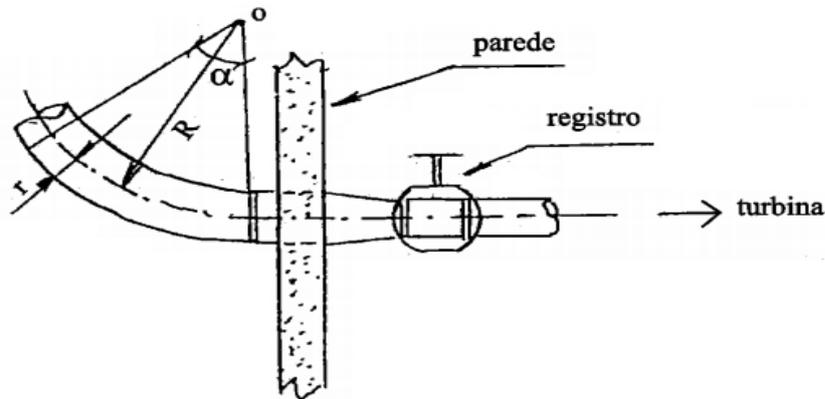


Figura 9: Curva na entrada da turbina. Fonte: Sá, 2009.

As perdas na entrada da turbina são obtidas com a eq. 26, (SÁ, 2009).

$$h_4 = \varepsilon \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (26)$$

Onde:

h_4 = perda na entrada da turbina (m);

ε = coeficiente obtido no Quadro 3;

V = Velocidade da água na tubulação (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

É de fundamental importância nos projetos de PCH's que seja calculado o golpe de Aríete, para tal, usa-se a eq. 27. (SÁ, 2009).

$$h_o = \frac{3}{2} \cdot \frac{LV}{g \cdot t} \quad (27)$$

Onde:

h_o = Altura correspondente ao "golpe de Aríete" (m);

L = Comprimento do conduto forçado (m);

V = Velocidade da água (m/s²), (valor médio recomendado: 2,5 m/s (Sá, 2009); g = Aceleração da gravidade;

t = tempo de fechamento total do regulador da turbina (geralmente $t = 4$ s).

2.2.4 Casa de força

De acordo com Dal Molin (2007), as casas de força tem por finalidade alojar máquinas e equipamentos, possibilitando efetuar montagens e desmontagens ou

manutenções e operações diversas. O modelo de casa de força é escolhido de acordo com cada projeto, podendo ser subterrânea ou “exterior abrigada”, porém, para os projetos de PCH’s, geralmente o modelo adotado é do tipo “exterior abrigada”.

Para o projeto de casa de força deve-se considerar como aspecto relevante as dimensões básicas a fim de alojar todos os equipamentos, como turbina e gerador. Outro ponto de importância que deve ser observado durante o projeto de casas de força é o posicionamento em relação ao nível da jusante para que em períodos de grandes quantidades de chuva não venha submergir e comprometer o funcionamento da instalação. Todo projeto de uma casa de força deve respeitar antes de tudo o correto funcionamento da usina, e principalmente o futuro das operações e manutenções dos equipamentos (ELETROBRÁS, 2000).

2.2.5 Turbinas hidráulicas

Segundo Farret (2014), turbinas são rodas acionadas por algum fluido em movimento, que as fazem girar por ação da energia nele contida sobre as palhetas sob a forma potencial ou cinética. Cada modelo de turbina carrega consigo uma forma diferente de palhetas. Os princípios de funcionamento de cada modelo de turbina, usadas hoje em dia variam de acordo com a forma de energia usada para seu acionamento. Em função disso, existem diversos modelos de turbinas fabricadas no país.

A escolha do tipo de turbina varia de acordo com o campo de aplicação levando em consideração principalmente, altura, vazão entre outros critérios como manutenção, valor do investimento, disponibilidade comercial e sensibilidade a materiais em suspensão (FARRET 2014).

Para implantação em PCH’s, recomenda-se a utilização dos seguintes modelos de turbinas:

- Turbina Pelton (TP);
- Turbina Francis (TF);
- Turbina Kaplan, tipo “S” ou Sifão (TS).

Turbina Pelton (TP) demonstrada na Figura 10, é uma turbina de ação e fluxo livre. Nela a energia potencial da água transforma se em energia cinética mediante injetores que facilitam o impulso da água sobre as pás da roda motriz, o que a faz

trabalhar sob condições de pressão atmosférica aproximadamente. Devido a isso a altura líquida, H , é limitada em sua cota inferior pelo ponto de impacto do jato sobre as pás da roda motriz (FARRET 2014).

Nas pequenas centrais hidrelétricas, o emprego da TP pode resultar em uma economia razoável quando operar com vazões a partir de 10 L/s e quedas desde 20 metros.



Figura 10: Turbina Pelton.

A turbina Francis (TF) representada na Figura 11, é uma turbina radial de reação. O campo de ampliação da TF, em pequena central hidrelétrica, é de 2 a 150 metros de altura e desde 100 L/s de vazão do projeto da água motriz.

Em comparação com as TF, as TP tem a vantagem de uma melhor curva de rendimento. Essa curva apresenta-se mais horizontal desde $Q_{\text{efetivo}} / Q_{\text{projeto}} = 25\%$, o que se explica pela pouca variação da velocidade do fluxo em função das vazões e pela sensibilidade ao desgaste por materiais em suspensão trazidos pelas águas motrizes. O desgaste da TP por grãos finos é menor do que nas TF e Turbinas Michel-Banki (FARRET 2014).



Figura 11: Turbina Francis.

A turbina Kaplan ilustrada na Figura 12, é do tipo axial na forma de sifão e está relacionada a baixas quedas ou fio d'água, a pequenas potencias e a grandes variações de vazão ao longo do ano e é recomendada para quedas de aproximadamente, 0,8 A 5 m (FARRET, 2014).

Uma das vantagens desta turbina é o baixo custo em relação aos outros modelos convencionais de turbinas para baixas quedas. Além disso, tem a vantagem de manter todos os equipamentos eletromecânicos fora da água, facilitando não só a inspeção e a manutenção, como também a segurança em caso de cheias. Como a sua instalação não requer reservatório de agua ou obra civis de destaque o impacto sobre o meio ambiente é desprezível (FARRET, 2014).

De acordo com o tipo de vazão, regularizada ou variável, as pás da roda são fixas ou ajustáveis respectivamente. O rendimento da turbina torna-se maior se forem usadas pás ajustáveis, pois estas se adaptam melhor a flutuações do curso de água (FARRET, 2014).

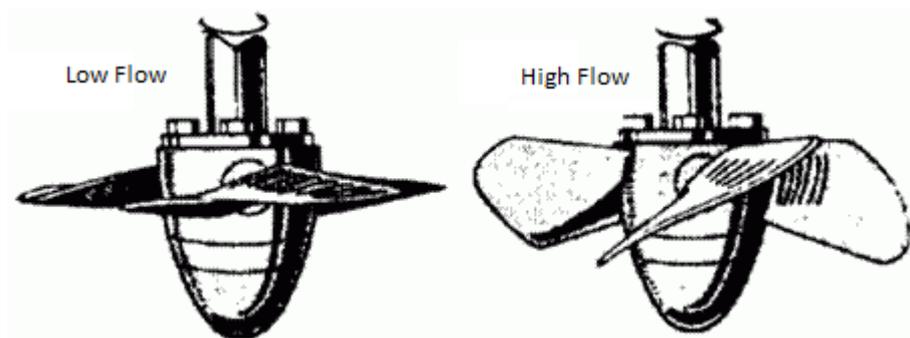


Figura 12: Turbina Kaplan. Fonte: renewablesfirst 2015

De acordo com Henn (2012), para escolha do tipo ideal de turbina hidráulica, é necessário conhecer a velocidade de rotação específica (n_{qa}), pois, este é o um elemento fundamental para a determinação da correta do modelo a de encaixar no projeto em estudo.

O valor de (n_{qa}) pode ser determinado pela eq. 28.

$$n_{qA} = 1000 \cdot n \cdot \frac{Q^{1/2}}{\gamma^{3/4}} \quad (28)$$

Onde:

n_{qA} = Velocidade de rotação específica;

n = Rotação da turbina (rps);

Q = Vazão de projeto (m^3/s);

γ = Salto energético (j/kg)

Salto energético é definido através da aceleração da gravidade multiplicado pela altura de queda de projeto.

A Eletrobrás (2000) define que a rotação escolhida deverá ser aquela que resulta na melhor combinação de fatores: maior rotação e máxima altura de sucção. A recomendação em escolher as que possuem maior rotação está principalmente ligado ao fato do custo do gerador, pois, este é diretamente proporcional ao número de par de polos: quanto menor for à rotação do gerador, maior será o número de par de polos.

O Quadro 4, apresenta um *range* de valores correspondentes a algumas maquinas hidráulicas para efeito de comparação.

Tipo de turbina	N_{qa}
Para turbina hidráulica tipo Pelton	$n_{qa} = 5$ a 70
Para turbina hidráulica tipo Francis lenta	$n_{qa} = 50$ a 120
Para turbina hidráulica tipo Francis normal	$n_{qa} = 120$ a 200
Para turbina hidráulica tipo Francis rápida	$n_{qa} = 200$ a 320
Para turbina hidráulica tipo Kaplan e Hélice	$n_{qa} = 300$ a 1000

Quadro 4 – Valores de n_{qA} para diferentes turbinas. Fonte: Henn, 2012.

A fim de facilitar ainda mais a escolha da turbina ideal do projeto, pode se fazer o uso do gráfico apresentado na Figura 13, no qual são apresentados os

diferentes tipos e rendimentos de turbinas em função da vazão e da velocidade de rotação específica (n_{qA}).

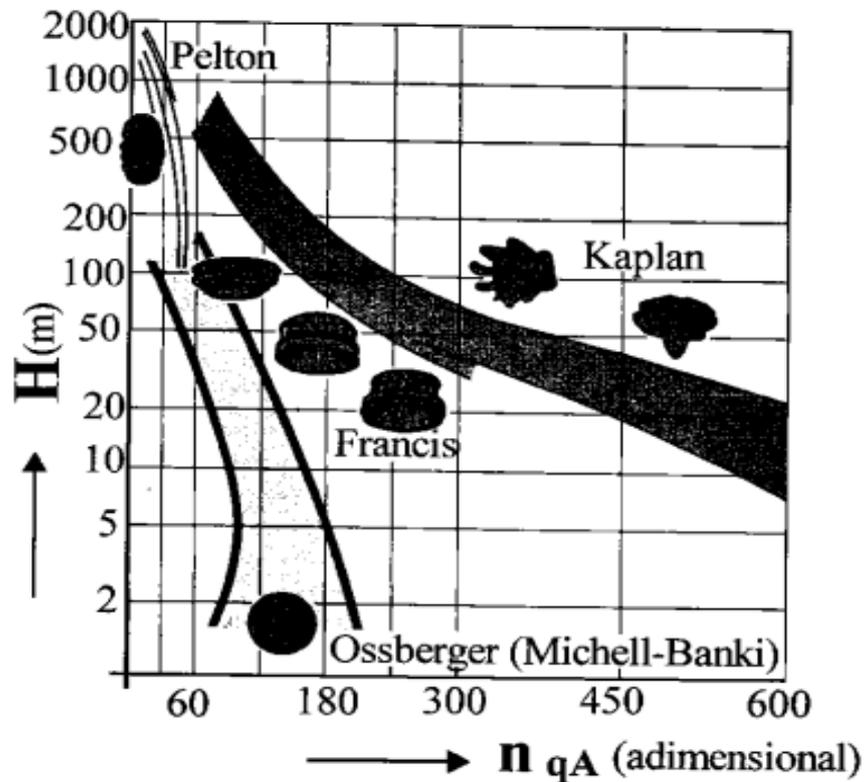


Figura 13: Gráfico para seleção de turbinas hidráulicas. Fonte: Henn, 2012

2.2.6 Geradores

Geradores são equipamentos que transformam energia mecânica em energia elétrica. Os geradores empregados para a produção de energia elétrica através de turbinas hidráulicas apresentam, como principal característica, a existência de um rotor com grande número de polos magnéticos, o que permite sua utilização para gerar energia em 50 Hz ou 60 Hz (SÁ, 2009).

O tipo mais comum de gerador elétrico é o dínamo, que converte energia mecânica em elétrica através da indução magnética. Neste sentido, quando a energia mecânica da turbina gira o rotor cria-se um campo magnético produzido por um ímã permanente que atravessa os conjuntos de espiras e leva a induções de tensões nos terminais das mesmas.



Figura 14: Gerador da PCH de Rio Bonito.

2.3 ELEMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

Os elementos básicos de determinação do potencial energético são: vazão do curso d'água, topografia, geologia e altura de queda.

2.3.1 Medição da vazão

A medição da vazão de um curso d'água é um processo relativamente complexo que envolve equipamentos e técnicos especializados. Não sendo economicamente viável a realização de medições de vazões de forma contínua, de modo a permitir ao hidrólogo o conhecimento pleno do regime fluvial dos rios, estas medições são feitas de forma esporádica, procurando-se definir uma relação entre o nível d'água e a vazão, de tal forma que a partir da medida da cota se obtenha a vazão correspondente (Eletrobrás 2000).

Farret 2014 propõe métodos mais simplificados de medir a vazão de um curso d'água, então para se medir a vazão de uma vala, córrego, riacho ou até de um rio lança-se mão destes métodos.

Os principais métodos para media a vazão de um curso d'água são:

- Medição com flutuador;
- Medição com vertedouro retangular;
- Medição com vertedouro triangular.

Na medição com flutuadores, conforme Figura 15, escolhe-se um trecho onde o curso d'água seja uniforme, reto e que tenha escoamento de forma serena. Então, fixam-se dois pontos formando uma medida L no sentido do escoamento do rio, recomenda-se que esta distância seja superior a 10 m. Para a demarcação dos pontos, podem ser cravadas estacas nas margens do leito do rio, e com isso amarrar cordas em posição perpendicular ao escoamento da água (FARRET, 2014).

Em seguida, coloca-se o flutuador a alguns metros acima do primeiro ponto demarcado e ao meio do leito, para que quando o flutuador passar pelo primeiro ponto já tenha rompido a inércia do deslocamento. Com um cronômetro, determina-se o tempo t, em que o flutuador leva para percorrer o trecho entre os pontos demarcados anteriormente (FARRET, 2014).

Os flutuadores podem ser construídos de garrafas PET devidamente fechadas, lastradas com água com volume a 3/4 do volume total, para que assim permaneça na posição vertical durante o percurso (FARRET, 2014).

A vazão pode ser calculada pela eq. 29.

$$Q = (0,8 \cdot L \cdot \bar{A})/t \quad (29)$$

Onde:

L = Comprimento do trecho demarcado (m);

\bar{A} = Média das áreas das seções transversais (m²);

t = Tempo de percurso do flutuador (s);

0,8 = Coeficiente médio de correção da velocidade superficial para a velocidade média na seção de medição.

O motivo de maior imprecisão as medições, está ligado ao fato de que a velocidade da água varia de acordo com sua posição no leito rio, ou seja, a velocidade de escoamento é diferente nas proximidades das margens, no eixo, e no topo do curso d'água (FARRET, 2014).

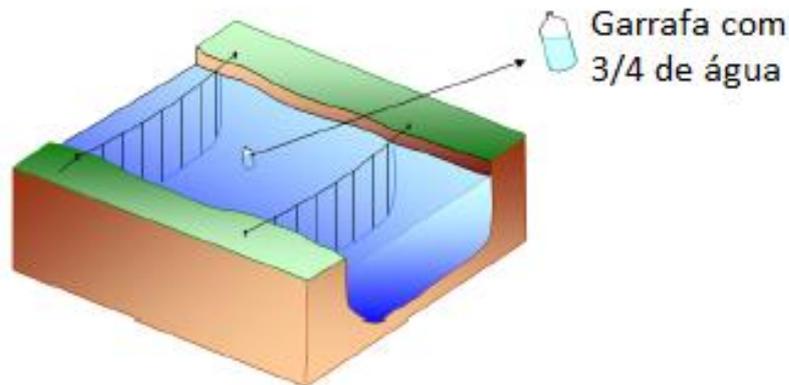


Figura 15: Flutuador com garrafa plástica. Fonte: Manual de mini e micro centrais hidrelétricas Eletrobrás, 2007.

Para o sistema de medição com vertedouro retangular, ilustrado na Figura 16, obtêm-se resultados mais precisos em relação aos flutuadores, porém nem sempre é possível fazer uso deste método devido às condições morfológicas do leito do rio. Adotando este processo, barra-se o curso de água com um painel de tábuas que tenha uma abertura central retangular de área conhecida, que seja suficiente para passar toda água do rio (FARRET, 2014).

Estando o painel fixo e todas as fendas vedadas, crava-se uma estaca a montante, a um ou dois metros de distância entre si, cuja extremidade superior fique no nível em que está a crista do vertedouro (parte inferior da abertura). Após a água ter escoado normalmente pelo vertedouro, mede-se a altura do nível de água, (h) que estiver acima do topo da estaca. A descarga de água é calculada pela eq. (30), (FARRET, 2014).

$$Q = 1,84 \cdot (L - 0,2h) \cdot h^{3/2} \quad (30)$$

Onde:

Q = vazão (m^3/s);

L = Largura da abertura do vertedouro (m) (e maior que $3h$);

H = Altura do nível de água acima da crista do vertedouro (m);

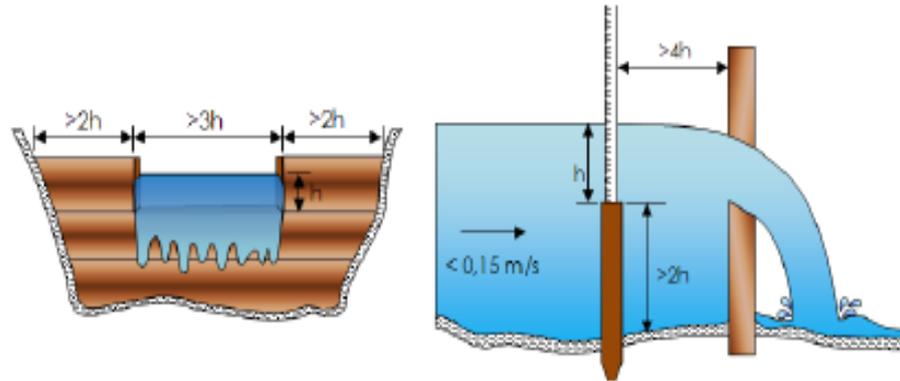


Figura 16: Vertedouro retangular. Fonte: Manual de mini e micro centrais hidrelétricas Eletrobrás, 2007.

Já o método de medição com vertedouro triangular, é empregado em pequenas descargas, inferiores a 200l/s ou então quando o córrego possui largura reduzida em relação a sua profundidade. Os métodos e processos para instalação e medição do vertedouro triangular, seguem os mesmos apresentados nos tipos retangulares, no entanto, a vazão é calculada com a eq. 31, (FARRET, 2014).

$$Q = 1,4 \cdot h^{5/2} \quad (31)$$

Onde:

h = Altura (m) do nível de água acima do vértice inferior do vertedouro, medida a montante desse local onde foi cravada a estaca.

2.3.2 Queda de projeto

De acordo com a Eletrobrás 2000, queda de projeto é aquela ao qual o rendimento da turbina é o máximo, ou seja, seu aproveitamento é de 100%. Dimensiona-se a queda de projeto como queda mais frequente, ou seja, conforme a distribuição de quedas da usina, obtida da simulação da operação e também dos históricos de vazões naturais.

Existem dois tipos de quedas a ser considerada no momento de elaboração do projeto, e estas são:

- Queda máxima operativa e;
- Queda mínima operativa.

A Eletrobrás 2000 conceitua queda máxima operativa como sendo aquela em que a diferença entre o nível máximo normal de operação do reservatório e o nível

do canal de fuga com uma unidade operando a plena carga, sem vertimento, subtraídas as perdas hidráulicas do circuito de geração.

Por outro lado, queda mínima operativa é a menor queda obtida entre a diferença do nível mínimo da montante e o nível do canal de fuga, (sem vertimento, com todas as unidades operando com abertura total do distribuidor e subtraídas as perdas hidráulicas do circuito de geração) (ELETROBRÁS, 2000).

Para garantir um melhor projeto, as quedas máximas e mínimas operativas devem ser identificadas tanto no momento de implantação da PCH, quanto para um horizonte de médio prazo, salientado que a condição a ser dada como válida é sempre a pior (ELETROBRAS, 2000).

2.3.3 Potência hidráulica

Potência hidráulica é a energia liberada pela água quando cai de determinada altura percorrendo uma distância conhecida, ou pode-se dizer que é o trabalho executado neste percurso. A energia liberada é o produto de sua massa pela gravidade, enquanto que a altura de queda é a distância vertical entre o nível de montante e jusante. A energia do potencial hidráulico existente em um curso d'água pode ser calculada pela eq. 32, (ELETROBRÁS, 2006).

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \quad (32)$$

Onde:

P_h = Potencia hidráulica (W);

ρ = Massa especifica da água (kg/m³);

Q = Vazão da água (m³/s);

h = Altura de queda bruta disponível (m).

A eq. 32 considera rendimento hidráulico de 100%, no entanto, sabe-se que qualquer máquina ou dispositivo não opera com percentual de 100%, existem as perdas que precisam ser acrescentadas no cálculo efetivo de rendimento (ELETROBRÁS, 2006).

Para o cálculo da potência no eixo o processo final de conversão de energia hidráulica em energia elétrica deve ser a potência hidráulica multiplicada pelo

rendimento da turbina, assim expressa pela eq. 33. A Figura 17, ilustra o funcionamento de uma PCH, assim como as principais perdas envolvidas.

$$P_e = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h \cdot \eta_t \quad (33)$$

Onde:

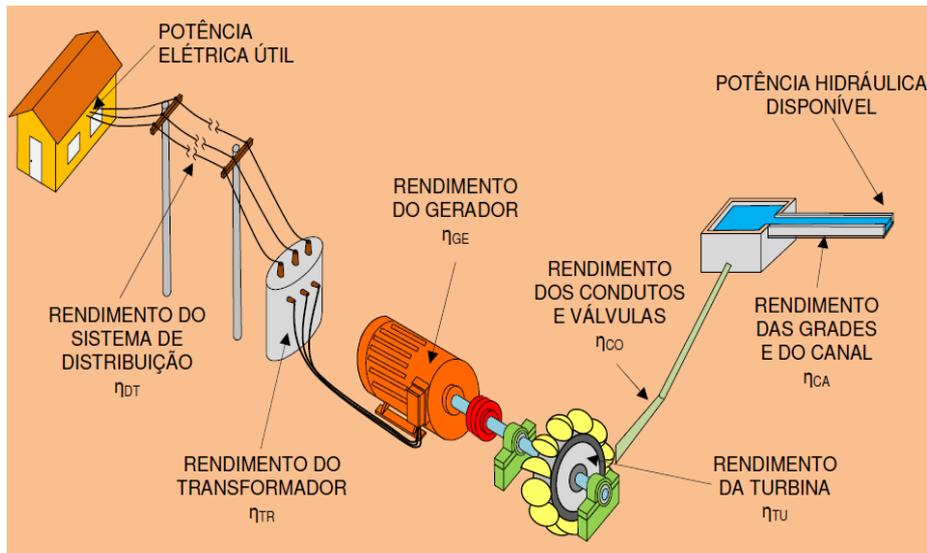


Figura 17: Parâmetros para cálculo da potência hidráulica em pequenos aproveitamentos hidrelétricos. Fonte: Manual de mini e micro centrais hidrelétricas, Eletrobrás 2007.

2.4 IMPACTO AMBIENTAL

2.4.1 Estudo de impacto ambiental

Segundo Dal Molin (2007), o objetivo de se estudar os impactos ambientais é fundamentalmente para proteger a integridade de um determinado ambiente, minimizando ao máximo as consequências causadas pela alteração das características socioeconômicas e biogeofísicas de certo local.

Para a instalação das pequenas centrais hidrelétricas a fim de transformar energia hidráulica em energia elétrica, tem em sua concepção o processo licenciatório ambiental fator de grande importância. Durante a execução dos projetos, diversos meios de poluição provenientes do desenvolvimento tecnológico contribui para a degradação ambiental. Por isso, é necessário que os projetos ambientais e os de crescimento socioeconômicos andem em paralelo, uma vez que um empreendimento desta natureza contribui para geração de emprego e renda

para as comunidades locais além de suprir a demanda de energia elétrica (ANEEL, 2009).

As centrais hidrelétricas são consideradas de certa forma sistemas de energia “limpa”, no entanto, por estes tipos de empreendimento apresentar estas características não são motivos para que não se façam estudos de impacto ambiental causados pela sua implantação, que por menor que seja, notadamente acontecerá alteração do curso e do regime d’água, inundação de áreas que abrigam fauna e flora nativas. O impacto ambiental é geralmente proporcional ao tamanho do empreendimento, neste sentido as pequenas centrais possuem impacto ambiental reduzido, uma vez que a área inundada do reservatório é pequena (ANEEL, 2009).

O pedido de licenciamento ambiental deve ser formalizado e encaminhado ao órgão ambiental competente, que realizará análise técnica a fim de constatar a necessidade ou não de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), os principais fatores decisivos para conclusão da análise são: o porte da central em estudo, sua potência instalada e também a capacidade da linha de transmissão. Assim o órgão responsável define com base no pedido enviado pelo empreendedor, em qual categoria se enquadra o referido empreendimento e quais as medidas de licenciamento ambiental devem ser tomadas (ELETROBRÁS, 2007).

3 METODOLOGIA

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

A fim de determinar a viabilidade técnica para implantação da PCH em estudo, buscou-se de forma aprofundada, conhecer os aspectos fundamentais de caráter teórico e prático. O método de pesquisa trabalhado é definido por Yin, apud Guilherme (2014), como estudo de caso. Este método possibilita analisar e obter conhecimento sobre um fenômeno de forma profunda.

O estudo de caso contido neste trabalho busca analisar apenas os elementos fundamentais para estudo da viabilidade técnica, que são: medição da vazão, determinação da altura disponível, escolha do tipo e perfil da barragem sem o respectivo dimensionamento, sistema adutor, (tubulação de baixa pressão e conduto forçado), diâmetro e espessura da tubulação, escolha do tipo de turbina e a potência no eixo.

O trabalho também aborda de forma sucinta estudos topográficos, geológicos, hidrológicos e hidrográficos do local de implantação da PCH. Os dados coletados nestas áreas são importantes para compor o corpo do trabalho, no entanto não há dedicação exclusiva de área responsável a esses temas.

3.1.1 Rio Itamarandiba do Mato

O rio Itamarandiba do mato tem sua nascente em Itamarandiba-MG e fica localizado no referido município. O município situa-se no nordeste do estado, no Vale do Jequitinhonha e possui área de 2.735,573 km² representando 0,4665 % do Estado, e 0,0322% de todo território nacional (IBGE 2010).

Em um trecho do curso do rio, encontra-se um desnível em forma de corredeira que é favorável à implantação de instalações de aproveitamento energético. A localização deste ponto pode ser visualizada na Figura 18, compreendida entre a latitude Sul 18.02837° e longitude Oeste 42.67319° e latitude Sul 18.02269° e longitude 42.67305°.



Figura 18: Vista aérea do local de instalação. Fonte: Google Earth, 2015.

3.1.2 Medição da vazão

Primeiramente foi realizada uma exploração do trecho do rio, para identificar a possibilidade de aproveitamento do potencial energético. Depois de identificado, partiu-se para a etapa seguinte, medição da vazão e altura de queda.

O estudo da vazão do canal hidráulico foi realizado utilizando o método dos flutuadores, mostrado na Figura 19, no qual, foi demarcada uma distancia de flutuação, fixando um ponto de partida (A) e um ponto de chegada (B), e cronometrados os tempos. O flutuador utilizado para medição de velocidade da água foi construído de garrafa PET, de volume igual a dois litros sendo que foi ocupado 3/4 de seu volume com água do próprio rio.

Procurou-se um ponto do canal onde a área de sessão fosse relativamente uniforme possível e com isso foi definido uma distancia de 20 metros entre o ponto de partida e o ponto de chegada do flutuador. Para minimizar os efeitos de inercia no ponto de partida, o flutuador foi começou a percorrer o caminho rio-a-baixo dois metros acima do ponto de partida, (A) assim quando o flutuador passava por este ponto, a inercia já havia sido quebrada contribuindo para melhor precisão na definição de vazão e a velocidade da água.

As medições das vazões do curso d'água, conforme Apêndice B, foram executadas nos períodos iniciais de cada mês, entre os dias primeiro e dez de cada mês, a escolha das datas para medir a vazão não tem nenhum embasamento teórico, sendo adotado este devido à indisponibilidade de acesso ao local. Foram

executadas 08 (oito) medições de vazão média (Gráfico 1), começando no mês de Março e finalizando em Outubro de 2015.

Dentre as 30 medições de tempo efetuadas com o flutuador, chegou-se a uma vazão média em m^3/s em cada mês.



Figura 19: Medição de vazão por flutuador.

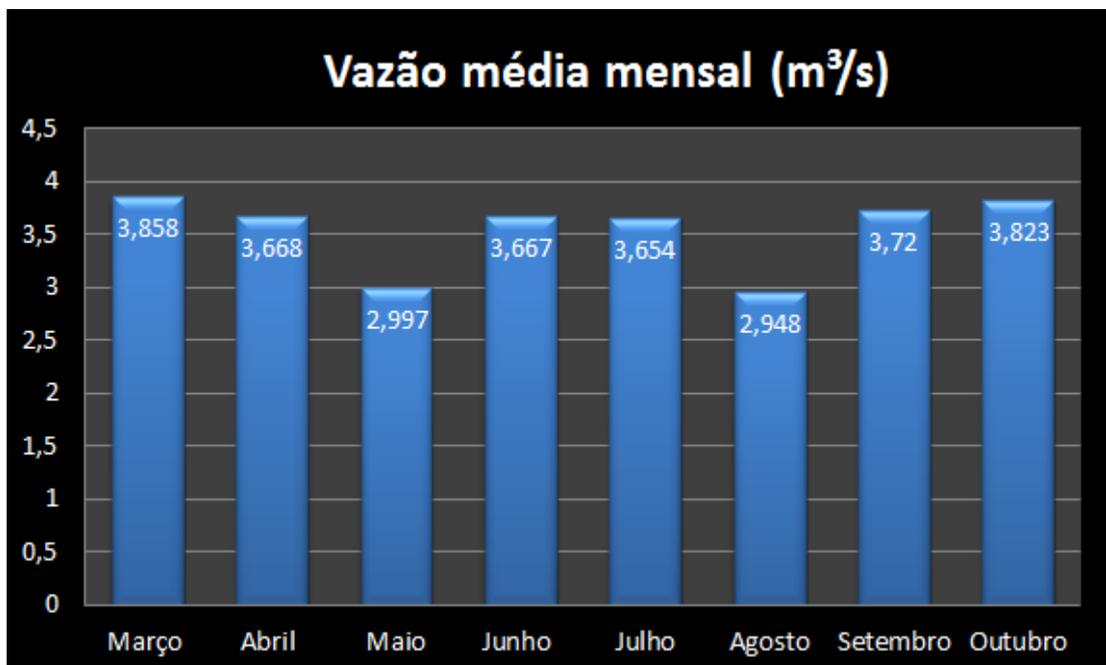


Gráfico 1: Vazão média mensal.

3.1.3 Medição da altura de queda

Para medir a altura de queda utilizou-se um aparelho GPS, “Global Positioning System” da marca Aquarius Discovery. Posicionando-o no ponto inferior e superior, foi possível identificar a diferença de altitude (Figura20) e determinar o

desnível existente no local de implantação da PCH. De posse das informações coletadas, altura de queda e vazão do curso do rio, foi possível calcular através de equações a potência de projeto da PCH.

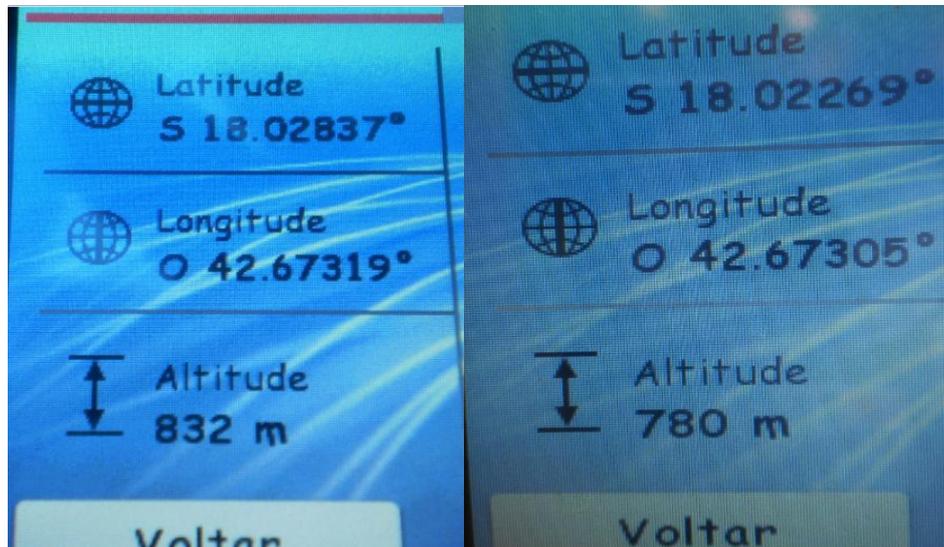


Figura 20: Coordenadas de localização e desnível.

3.1.4 Estudos topográficos

O passo seguinte foi a exploração do trecho do rio, para a escolha do local ideal para a construção da barragem.

Depois de ter percorrido um determinado trecho e ter realizadas algumas análises e observações, foi identificado um local onde o rio passa entre duas montanhas formando um estrangulamento em seu canal, ideal para construção da barragem, canal de adução, vertedouro e logo abaixo, a casa de máquinas.

Tendo escolhido o local provável da barragem, buscou-se fazer um estudo mais acurado em boa parte do rio, principalmente onde seria o ponto afetado pelo alagamento, tendo em vista que a área represada, não pode exceder área de 3 km².

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA

Diante da perspectiva de implantação de uma PCH e da condição energética presente no local, considera-se satisfatoriamente a possibilidade de construção da pequena central hidrelétrica, uma vez que o local conta com vasta disponibilidade de matéria prima, sobretudo para a construção da barragem. Nesta mesma perspectiva, pôde-se destacar também local apropriado para represar a água, tendo em vista que o alagamento ficará contido entre duas montanhas topograficamente dispostas paralelamente, formando entre si, um canal perfeito para o reservatório.

4.2 MEMORIAL DE CÁLCULO

Os cálculos para a PCH aqui apresentados determinam a potência no eixo da usina, para isso, são dimensionados equipamentos que causam interferência direta a esse valor. A pretensão desta etapa é estudar a viabilidade técnica, a partir de estudos básicos de alguns elementos e o dimensionamento de outros, que são considerados de ordem mecânica.

Alguns componentes essenciais à construção de uma PCH que são de competência do setor civil estão apenas citados e não dimensionadas, como por exemplo: o tipo de barragem escolhida e respectivo vertedouro adotado a esse empreendimento.

4.2.1 Barragem

A topografia do local de construção da barragem é constituída por vales estreitos, e com boas condições de fundação, para tal, foi escolhida a configuração de barragem de concreto.

Este trabalho não tem a pretensão de dimensionar a barragem desta PCH, uma vez que cabe tão somente a engenharia civil, esta competência. Para este caso, buscou-se apenas sugerir o tipo de barragem apropriada, baseando-se em estudos topográficos efetuados anteriormente.

4.2.2 Vertedouro

O vertedouro escolhido para esta instalação é do tipo lateral a barragem que mesmo sendo mais difícil de ser construído, apresenta a vantagem de escoar vazão maior de água que do tipo soleira livre. Da mesma forma que a barragem, este trabalho não se atem aos cálculos do vertedouro.

4.2.3 Tomada d'água

A fim de efetuar o dimensionamento da tomada d'água, usou-se a eq. 2, Segundo Schreiber apud Dal Molin área de seção plana de uma tomada d'água, deve-se considerar a velocidade de escoamento entre 1,0 e 1,2 m/s, portanto:

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{3,5 \text{ m}^3/\text{s}}{1 \text{ m}^3/\text{s}} = 3,5 \text{ m}^2$$

4.2.4 Tubulação de baixa pressão

Devido às características topográficas do local em estudo, não se faz necessário o uso de tubulação de baixa pressão, pois o conduto forçado, fará a captação diretamente no reservatório.

4.2.5 Chaminé de equilíbrio

Para este projeto, pode-se desconsiderar o uso de chaminé de equilíbrio, ou seja, o próprio reservatório funciona como tal.

4.2.6 Conduto forçado

O conduto forçado foi dimensionado conforme recomendação da Eletrobrás, 2000, adotando-se diâmetro único em todo seu comprimento. Para isso, usou-se a eq. 16.

$$De = 123,7 \sqrt[7]{\frac{Q^3}{H_f}} \text{ Portanto:}$$

$$De = 123,7 \sqrt[7]{\frac{3,5^3}{61,2}} = 117,6 \text{ cm}$$

A vazão Q foi obtida com base na média das medidas de cada mês. A fim de manter a padronização dos tubos do conduto forçado, o diâmetro foi arredondado para 120 cm, considerando que este diâmetro já é padrão de mercado e pode ser encontrado com mais facilidade.

Para definição da espessura do conduto forçado usa-se a equação (17) Sá, 2009.

$$e = \frac{0,10 \cdot H \cdot d}{2 \cdot \sigma t} + c$$

$$e = \frac{0,10 \cdot 59,65 \cdot 1,2}{2 \cdot 1000} + 0,003$$

$$e = 6,6 \text{ mm}$$

4.2.7 Golpe de Aríete

O golpe de Aríete calcula-se com base na equação (27)

$$h_o = \frac{3}{2} \cdot \frac{L \cdot v}{g \cdot t}$$

$$h_o = \frac{3}{2} \cdot \frac{80 \cdot 2,5}{9,81 \cdot 4}$$

$$h_o = 7,65 \text{ m}$$

4.2.8 Casa de força

A casa de força foi projetada para ter sua estrutura instalada em um local de fundação de pedras que fica localizado no “pe” da barragem, a cinco metros de elevação em relação à jusante.

A altura de elevação da casa foi escolhida baseada em dados históricos de enchentes, que foram levantados com os moradores locais. De acordo com as informações obtidas, nunca foi constatado níveis de enchentes que invadissem o local escolhido para construção da casa de força.

A casa de força segue projeto de construção de forma simplificada, tendo sua fundação em pedras quartzíticas e graníticas retiradas do local de escavação da própria barragem. Suas paredes são de alvenaria cobertas com argamassa.

4.2.9 Estudo das perdas

O estudo de perdas envolvidas no projeto de implantação de uma PCH é bastante amplo, no entanto, para este trabalho foram consideradas apenas as seguintes:

- Perdas na entrada do conduto forçado (h_1);
- Perdas nas paredes retas da tubulação (h_2);
- Perda na curva do conduto forçado (h_3);
- Perda na curva de entrada na turbina (h_4).

e) s perdas na entrada do conduto forçado foram calculadas com base na equação (18), (SÁ, 2009).

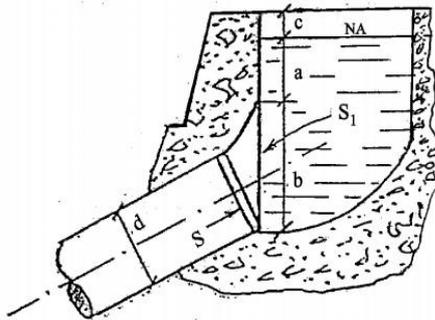


Figura 21: Saída do conduto forçado. Fonte: Sá, 2009.

Tem-se:

$$D = 1,2 \text{ m};$$

$$b = 1,3 \times 1,2 = 1,56 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,1415 \cdot (1,2)^2}{4} = 1,13 \text{ m}^2$$

$$A_1 = \frac{\pi \cdot b^2}{4} = \frac{3,1415 \cdot (1,56)^2}{4} = 1,91 \text{ m}^2$$

$$\mu = \frac{A}{A_1} = \frac{1,13}{1,91} \rightarrow \mu = 0,592$$

$$V = 2,5 \text{ m/s}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Logo:

$$h1 = \frac{v^2}{2.g} \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right)^2$$

$$h1 = \frac{2,5^2}{2.9,81} \left(\frac{1}{0,592} - 1 \right)^2$$

$$h1 = 0,151 \text{ m}$$

f) Perdas nas paredes retas (Apêndice A). Usou-se a equação (22).

Tem-se:

$\lambda = 0,03$ - Coeficiente para casos gerais (SÁ, 2009);

$V = 2,5\text{m/s}$ - (velocidade de escoamento da água);

$D = 1,2\text{m}$ - (Diâmetro do conduto forçado);

$L = 80\text{m}$ - (comprimento do conduto forçado);

$g = 9,81\text{m/s}^2$ - (Aceleração da gravidade).

Logo:

$$h2 = \lambda \cdot \frac{v^2}{2.g} \cdot \frac{L}{D}$$

$$h2 = 0,03 \cdot \frac{2,5^2}{2 \cdot 9,81} \cdot \frac{80}{1,2}$$

$$h2 = 0,637 \text{ m}$$

g) Perda na curva do conduto forçado, calculada pela Equação (23), (SÁ, 2009).

Tem-se:

$\alpha = 12^\circ$ - Ângulo de inclinação na curva "1" (apêndice A)

Logo:

$$h3 = \left(\text{sen}^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot \text{sen}^4 \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$\varepsilon = \left(\text{sen}^2 \cdot \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot \text{sen}^4 \cdot \frac{\alpha}{2} \right)$$

$$\varepsilon = (0,1045)^2 + 2 \cdot (0,1045)^4$$

$$\varepsilon = 0,011$$

$$h3 = \varepsilon \cdot \frac{v^2}{2.g}$$

$$h_3 = 0,011 \cdot \frac{(2,5)^2}{(2 \cdot 9,81)}$$

$$h_3 = 0,005 \text{ m}$$

h) Perda na entrada da turbina, (Figura 1), calculada pela Equação (23).

Tem-se:

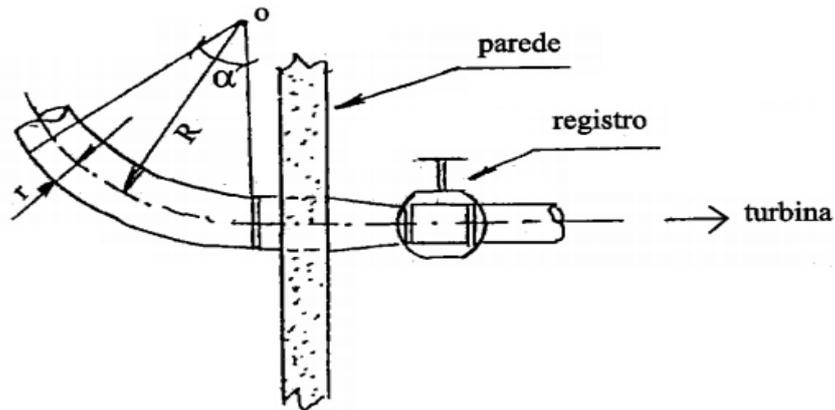


Figura 22: Curva da tubulação na entrada da turbina. Fonte: Sá, 2009.

$\alpha = 46^\circ$ - Ângulo de inclinação na curva "2" (apêndice A)

Logo:

$$h_4 = \left(\text{sen}^2 \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot \text{sen}^4 \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

$$\varepsilon = \left(\text{sen}^2 \cdot \frac{\alpha}{2} + 2 \cdot \text{sen}^4 \cdot \frac{\alpha}{2} \right)$$

$$\varepsilon = (0,3907)^2 + 2 \cdot (0,3907)^4$$

$$\varepsilon = 0,0466$$

$$h_4 = \varepsilon \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

$$h_4 = 0,0466 \cdot \frac{(2,5)^2}{(2 \cdot 9,81)}$$

$$h_4 = 0,1485 \text{ m}$$

4.2.10 Perdas totais

$$h_t = h_1 + h_2 + h_3 + h_4$$

$$h_t = 0,151 + 0,96 + 0,005 + 0,1485$$

$$h_t = 1,27 \text{ m}$$

4.2.11 Queda líquida

Para o cálculo da queda líquida definiu-se a diferença entre queda bruta do projeto e as perdas calculadas anteriormente.

Tem-se:

$H_b = 52$ metros - Queda bruta

Logo:

$$H_{liq} = H_b - \sum \text{perdas}$$

$$H_{liq} = (52 - 1,27)$$

$$H_{liq} = 50,73 \text{ m}$$

4.2.12 Determinação do tipo ideal de turbina

Para encontrar o tipo de turbina adequado a esta instalação, determina-se a velocidade de rotação específica, (n_{qA}) que é dado pela equação (28).

Tem-se:

$\gamma = (g \cdot H_{liq})$ – Salto energético;

$n = 400$ rpm - rotação da máquina = (6,667 rps)

$Q = 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$

$$n_{qA} = 1000 \cdot n \cdot \frac{Q^{1/2}}{\gamma^{3/4}}$$

$$n_{qA} = 1000 \cdot 6,667 \cdot \frac{3,5^{1/2}}{(9,81 \cdot 50,73)^{3/4}}$$

$$n_{qA} = 118,37$$

Portanto, de acordo com o Quadro 4, a turbina ideal para este projeto é a Turbina Francis lenta.

4.2.13 Potência no eixo

Para o cálculo da potência no eixo usa se a equação (33), adotando-se rendimento de 85% e vazão média de 3,5 m³/s.

$$P_e = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_{liq} \cdot \eta$$

Portanto:

$$P_e = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{3,5 \text{ m}^3}{\text{s}} \cdot \left(\frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} \cdot 50,73 \text{ m} \right) \cdot 0,85$$

$$P_e = 1.480 \text{ kW}$$

$$P_e = 1,48 \text{ MW}$$

Considerando que 01 kW de potência seja suficiente para suprir as demandas de energia elétrica de três pessoas, então, pode-se multiplicar o valor da potência encontrada por três, portanto:

$$\text{Capacidade} = 1480 \text{ (kW)} \cdot 03 \text{ (pessoas)}$$

$$\text{Capacidade} = 4440 \text{ pessoas}$$

Considerando também, a média familiar de cinco pessoas, podemos constatar que a potência disponível desta PCH, é suficiente para abastecer 888 residências.

5 CONCLUSÕES

Diante da perspectiva e análise geral do estudo básico de elaboração de um roteiro para aproveitamento energético do rio Itamarandiba do Mato, no trecho situado entre a latitude Sul 18.02837° e longitude Oeste 42.67319° e latitude Sul 18.02269° e longitude 42.67305°, fica evidenciada a condição satisfatória para implantação de uma PCH.

O estudo realizado comprovou situação energética favorável no trecho do rio a partir de dados coletados in loco, assim como medição da vazão do curso d'água desnível natural, e também estudos básicos sobre a topografia do local.

O estudo detalhado trouxe consigo demanda de dados considerados apurados sobre alguns elementos fundamentais para instalação da PCH e suas respectivas peculiaridades. Deste ponto de vista, os principais estudos com vistas a conhecer ou dimensionar componentes, identificaram e apontaram para uma PCH com as seguintes características:

- a) PCH com regularização mensal do reservatório;
- b) Barragem de concreto;
- c) Vertedouro lateral a barragem;
- d) Não haverá necessidade de tubulação de baixa pressão e chaminé de equilíbrio;
- e) Conduto forçado: Diâmetro 1,2 m; espessura 6,6 mm; e comprimento 80 metros;
- f) Turbina hidráulica tipo Francis lenta;
- g) Queda líquida de 50,73 metros;
- h) Vazão média de 3,5 m³/s;
- i) Potência no eixo de 1,48 MW.

Definidas as características gerais da PCH para o Rio Itamarandiba do Mato, e comprovada sua viabilidade técnica, pode se a partir daí dar sequência ao projeto, sobretudo, nas áreas não dimensionadas neste trabalho.

A geração de energia elétrica através das PCH's contribui para o resultado de se obter energia elétrica com baixo custo e de baixo impacto ambiental. Além disso, possui o benefício da geração de empregos diretos e indiretos, assim como fornecer

o bem maior à população que é o desenvolvimento social, uma vez que normalmente as PCH's são construídas em áreas onde os índices de desenvolvimento humano são baixos.

Neste sentido, vale destacar a importância deste estudo intitulado como “Estudo da viabilidade técnica para construção de uma PCH”. Como possível e viável fonte de obtenção de energia elétrica que por sua vez, possa contribuir para o cenário energético brasileiro e principalmente para o benefício da comunidade local.

Visando a continuidade deste trabalho e aprofundamento nos resultados, recomenda-se a construção de uma estação fluviométrica que possa fornecer um banco de dados com resultados mais acurados que servirão de base sólida para a implantação da PCH.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL – Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: Setembro de 2015.

DAL MOLIN, Anderson. **Anteprojeto de Pequena Central Hidrelétrica para o Rio Toropi**. 2007. 79 f. Dissertação de Mestre em Engenharia (Pós-graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

EICK, Guilherme, **Viabilidade econômica e financeira de uma pequena central hidrelétrica no Brasil**. Monografia submetida ao grau de bacharelado em ciências econômicas da Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas Centrais Hidrelétricas**, Ed. Eletrobrás, RJ, 2000.

ELETROBRÁS. **Manual de Mini e Micro Centrais Hidrelétricas**, 2009. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/acessoainformacao/data/Pages/LUMISF99678B3PTBRIE.htm>> acesso em agosto de 2015.

ELETROBRÁS. **Manual de PCHs, Diretrizes Básicas para o Estudo e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. ANEEL, 2011.

FARRET, Felix Alberto, **Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia**. Elétrica 3 ed. – Santa Maria – Editora UFSM, 2014 - Universidade Federal de Santa Maria.

GOOGLE. Programa Google Earth. Versão 7.1.5.1557.

GUILHERME WEILLER, João, **Análise de viabilidade técnica de implantação de uma PCH 2014** Trabalho de final de curso para obtenção de Bacharel em Engenharia Mecânica – FAHOR – Faculdade Horizontina.

HENN, Erico Antônio Lopes, 2012, **Máquinas de Fluido**. 3 ed. Santa Maria – RS, Editora UFSM.

IBGE 2010, disponível em <<http://cod.ibge.gov.br/6Z9>> acesso em Setembro de 2015).

MÜLLER, Arnaldo carlos. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo - SP – Editora: Makron Books, 1995.

MAGALHÃES, Ricardo Nogueira. **Estimação de custo para projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Dissertação de mestrado (Pós-graduação em Engenharia da Energia). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Procedimentos para dimensionamento básico de micro e minicentrais hidrelétricas**, ANEEL 2009.

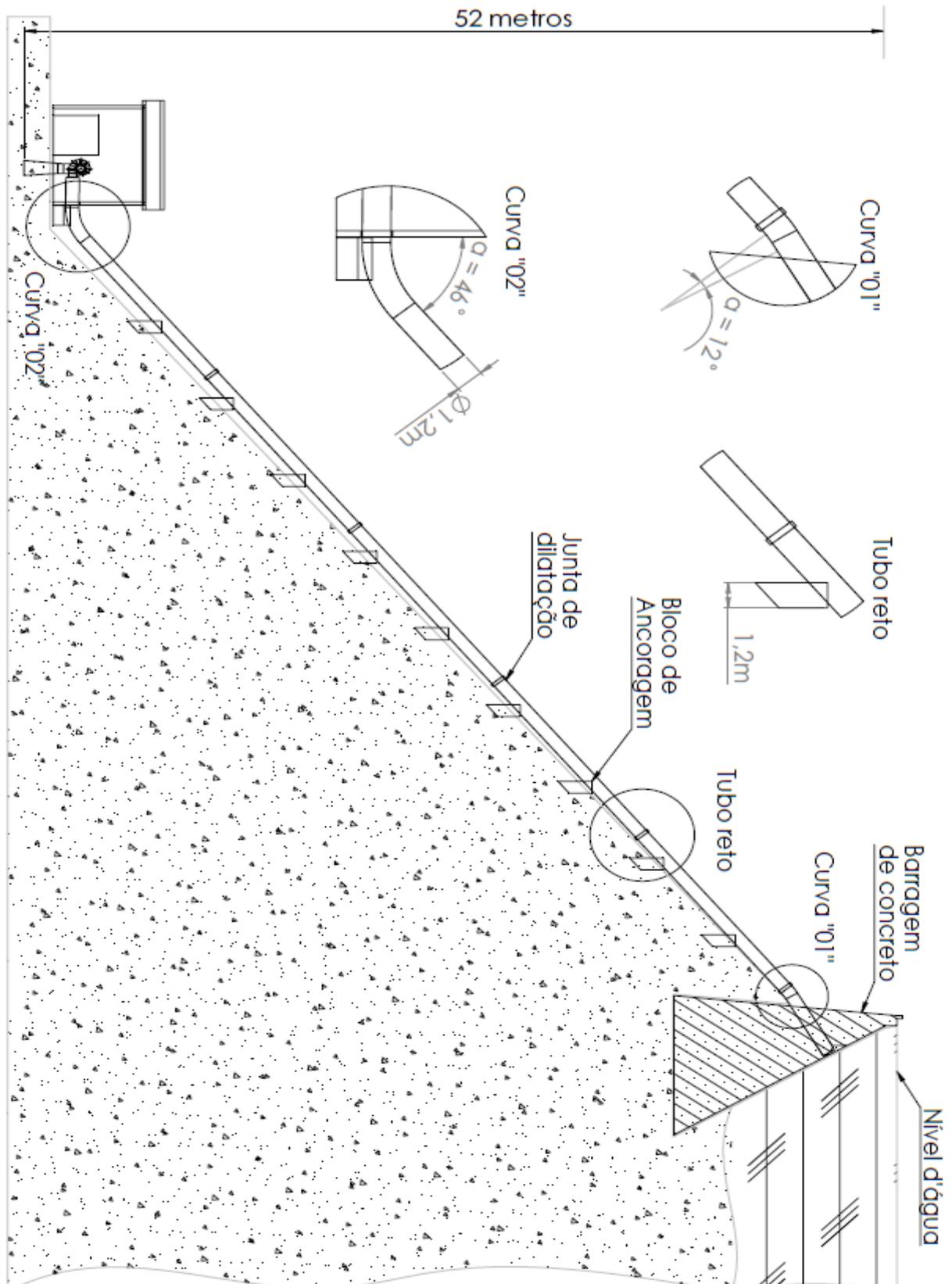
OLIVEIRA, Ana Claudia Pedrosa. et al. **Análise da Implantação do Programa do Programa Minas PCH: O Caso da PCH Cachoeirão.** XXXIV Encontro da ANPAD. Rio de Janeiro. 2010.

PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2 ed – São Paulo-SP. Editora: Páginas e letras editora e gráfica 2004.

RENEWABLESFIRST, **Turbina Hidráulica tipo Kaplan,** disponível em: <<https://www.renewablesfirst.co.uk/hydropower/hydropower-learning-centre/kaplan-turbines/>> Acesso em Agosto de 2015.

SÁ, Cleber Malta de. **Micro, Mine e PCH's, Pequenas centrais hidrelétricas.** Goiânia – GO – Editora Kelps, 2009.

APÊNDICE A – DESENHO ESQUEMÁTICO DOS ELEMENTOS BÁSICOS DIMENSIONADOS



APÊNDICE B – TABELA DE MEDIÇÕES DA VÃZÃO DO CURSO DO RIO

RIO ITAMARANDIBA DO MATO	
Período Mar/2015 a Out 2015	
Data	Vazão (m³/s)
Março	3,858
Abril	3,668
Maio	2,997
Junho	3,667
Julho	3,654
Agosto	2,948
Setembro	3,72
Outubro	3,823
Vazão média	3,502