

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

**FELIPE DURÃES COELHO  
JORGE ANTONIO XAVIER**

**REVITALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E DO CONDUTO  
FORÇADO DA USINA HIDRELÉTRICA DE RIO BRANCO DO SUL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CURITIBA  
2015**

FELIPE DURÃES COELHO  
JORGE ANTONIO XAVIER

**REVITALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E DO CONDUTO  
FORÇADO DA USINA HIDRELÉTRICA DE RIO BRANCO DO SUL**

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

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Manoel Alves

CURITIBA  
2015

Felipe Durães Coelho  
Jorge Antonio Xavier

## Revitalização da câmara de carga e do conduto forçado da Usina hidrelétrica de Rio Branco do Sul

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

Curitiba, 03 de Julho de 2015.

---

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

---

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

### ORIENTAÇÃO

---

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

### BANCA EXAMINADORA

---

Gilberto Manoel Alves, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Eloi Rufato Junior, Me.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Ivan Azevedo Cardoso, Dr.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

## RESUMO

COELHO, Felipe D.; XAVIER, Jorge A.; REVITALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E DO CONDUTO FORÇADO DA USINA HIDRELÉTRICA DE RIO BRANCO DO SUL. 2015. 119 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

A energia, em suas diversas facetas é indispensável à sobrevivência da espécie humana. De acordo com o crescimento demográfico e econômico mundial, presume-se um aumento do consumo de energia elétrica. Contudo, esgotam-se os recursos naturais, o que gera preocupações relacionadas a reduções no fornecimento de energia. Com esse cenário preocupante, tornou-se plausível a implantação de micro usinas hidrelétricas para as comunidades rurais na proporção que dispõe condições técnico/econômicas adjuntas às novas tecnologias. Dessa maneira a motivação deste trabalho está em assegurar soluções e descrever os cálculos para revitalização da câmara de carga e do conduto forçado da Usina Hidrelétrica de Rio Branco do Sul - USIMAR, localizada no Estado do Paraná, para a verificação de qual situação técnica é a mais viável. O desenvolvimento deste trabalho foi fundamentado em estudos teóricos e práticos, fazendo uso de normas nacionais e internacionais utilizadas por projetistas de usinas hidrelétricas e por informações provindas do campo e de fontes bibliográficas, para a estimativa e avaliação de três localizações para câmara de carga e conduto forçado, através de critérios e cálculos hidráulicos da câmara de carga (golpe de aríete) e cálculos hidráulicos para conduto forçado (diâmetro econômico e perdas) e blocos de apoio. São apresentados os resultados do projeto, a localização mais viável tecnicamente para a revitalização da câmara de carga e do conduto forçado. A revitalização proporcionará gerar energia elétrica de qualidade, trazendo benefícios não somente ao proprietário da Usina, mas também um acréscimo científico para os alunos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

**Palavras-chave:** Micro central Hidrelétrica. Câmara de Carga. Conduto Forçado.

## ABSTRACT

COELHO, Felipe D.; XAVIER, Jorge A.; REVITALIZATION OF LOADING CLAMBER AND PENSTOCK OF RIO BRANCO DO SUL HYDROELECTRIC POWER PLANT. 2015. 119 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Energy, in its various facets is crucial to the survival of the human species. According to the demographic and global economic growth, it is assumed an increase in electricity consumption. However, they sell out natural resources, which raises concerns related to reductions in power supply. With this worrying scenario, it has become plausible deployment of micro hydropower plants for rural communities in the proportion which provides technical / economic conditions accompanying the new technologies. In this way the motivation of this work is to ensure solutions and describe the calculations for revitalization of the loading chamber and penstock of the hydroelectric plant of Rio Branco do Sul - USIMAR, in the state of Paraná, for the verification of which is the technical situation more viable. The development of this work was based on theoretical and practical studies, making use of national and international standards used by designers of power plants and information emanating from the field and literature sources for the estimation and evaluation of three locations for loading chamber and flue forced by applying criteria and hydraulic calculations of the loading chamber (water hammer) and hydraulic calculations for penstock (economic diameter and losses) and support blocks. Project results are presented, the location more technically feasible for the revitalization of the loading chamber and penstock. The revitalization will provide generate electric power quality, bringing benefits not only to the plant owner, but also a scientific addition to the students of the Federal Technological University of Paraná - UTFPR.

**Keywords:** Micro Hydroelectric Power Plant. Loading Chamber. Penstock.

**LISTA DE GRÁFICOS**

GRÁFICO 1 – OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA POR FONTE - 2013 .15	
GRÁFICO 2 – DIÂMETRO ECONÔMICO DO CONDUTO FORÇADO.....57	
GRÁFICO 3 – DIÂMETRO ECONÔMICO MATERIAL PVC.....81	
GRÁFICO 4 – DIÂMETRO ECONÔMICO MATERIAL AÇO .....82	
GRÁFICO 5 – DIÂMETRO ECONÔMICO MATERIAL CONCRETO.....83	
GRÁFICO 6 – RELAÇÃO ENTRE A DISTÂNCIA DO CONDUTO E DO BLOCO DE APOIO ..... 100	

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – LOCALIZAÇÃO NO MAPA DO PARANÁ .....	18
FIGURA 2 – LOCALIZAÇÃO DA MCH DE RIO BRANCO DO SUL – PR .....	18
FIGURA 3 – ÁREA ALAGADA NA PROPRIEDADE .....	19
FIGURA 4 – BARRAGEM EXISTENTE NA PROPRIEDADE .....	19
FIGURA 5 – BARRAGEM EXISTENTE NA PROPRIEDADE .....	19
FIGURA 6 – PLANTA DO IMÓVEL. ....	20
FIGURA 7 – CORTE ESQUEMÁTICO CHD, COM SEUS PRINCIPAIS.....	31
FIGURA 8 – CORTE ESQUEMÁTICO CHD, COM SEUS PRINCIPAIS.....	31
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES PARA ESTUDOS E PROJETO BÁSICO DE PCH .....	34
FIGURA 10 – FLUXOGRAMA DE IMPLANTAÇÃO DE UMA PCH .....	35
FIGURA 11 – ETAPAS PARA O DIMENSIONAMENTO DAS ESTRUTURAS E EQUIPAMENTOS DE UMA USINA.....	36
HIDRELÉTRICA DE PEQUENO PORTE .....	36
FIGURA 12 – CORTE LONGITUDINAL DA CENTRAL HIDRELÉTRICA .....	38
FIGURA 14 – BARRAGEM DE CONCRETO .....	40
FIGURA 15 – ESTRUTURA DE CAPTAÇÃO COM TOMADA D'ÁGUA .....	43
FIGURA 16 – FORMATOS HIDRODINÂMICOS PARA AS BARRAS DAS GRADES	43
FIGURA 17 – COMPORTA DE MADEIRA DA TOMADA D'ÁGUA. ....	44
FIGURA 18 – PLANTA CÂMARA DE CARGA .....	47
FIGURA 19 – MODELO HIDRÁULICO DE CÂMARA DE CARGA.....	49
FIGURA 20 – A) GRÁFICO DE VAZÕES EM FUNÇÃO DOS TEMPOS PARA PARTIDA BRUSCA.....	50
B) ELEMENTO DE ÁGUA NA CÂMARA DE CARGA. ....	50
FIGURA 21 – GRÁFICO DA VAZÃO EM FUNÇÃO DA ALTURA DA ELEVAÇÃO NA CÂMARA DE CARGA .....	52
FIGURA 22 – CONDUTO FORÇADO DA MCH DE RIO BRANCO DO SUL. ....	55
FIGURA 23 – PERDA DE CARGA NA ENTRADA DA TUBULAÇÃO .....	64
FIGURA 24 – TUBULAÇÃO DE AÇO APOIADAS EM BLOCOS OU SELAS .....	65
FIGURA 25 – TUBULAÇÃO DE CONCRETO OU CIMENTO-AMIANTO .....	66
FIGURA 26 – 1ª LOCALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E CONDUTO FORÇADO JÁ EXISTENTE DA MCH DE RIO BRANCO DO SUL .....	69

FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO DAS MEDIDAS FEITA EM CAMPO DA 1ª LOCALIZAÇÃO .....	70
FIGURA 28 – 2ª LOCALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E CONDUTO FORÇADO DA MCH DE RIO BRANCO DO SUL .....	71
FIGURA 29 – REPRESENTAÇÃO DAS MEDIDAS FEITA EM CAMPO DA 2ª LOCALIZAÇÃO .....	72
FIGURA 30 – 3ª LOCALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E CONDUTO FORÇADO DA MCH DE RIO BRANCO DO SUL .....	72
FIGURA 31 – REPRESENTAÇÃO DAS MEDIDAS FEITA EM CAMPO DA 3ª LOCALIZAÇÃO .....	73
FIGURA 32 – DESENHO EM 3D DA CÂMARA DE CARGA .....	75
FIGURA 33 – CONDUTO FORÇADO DE RIO BRANCO DO SUL .....	79
FIGURA 34 – DESENHO EM 3D DO CONDUTO FORÇADO .....	87
FIGURA 35 – 1ª LOCALIZAÇÃO COM CARGAS ATUANTES. ....	92
FIGURA 36 – 1ª LOCALIZAÇÃO COM ESFORÇOS CORTANTES. ....	93
FIGURA 37 – 1ª LOCALIZAÇÃO COM MOMENTO FLETOR. ....	93
FIGURA 38 – 1ª LOCALIZAÇÃO COM DEFORMAÇÃO DO PVC. ....	94
FIGURA 39 – 2ª LOCALIZAÇÃO COM CARGAS ATUANTES. ....	94
FIGURA 40 – 2ª LOCALIZAÇÃO COM ESFORÇOS CORTANTES. ....	95
FIGURA 41 – 2ª LOCALIZAÇÃO COM MOMENTO FLETOR. ....	95
FIGURA 42 – 2ª LOCALIZAÇÃO COM DEFORMAÇÃO DO PVC. ....	96
FIGURA 43 – 3ª LOCALIZAÇÃO COM CARGAS ATUANTES. ....	96
FIGURA 44 – 3ª LOCALIZAÇÃO COM ESFORÇOS CORTANTES. ....	97
FIGURA 45 – 3ª LOCALIZAÇÃO COM MOMENTO FLETOR. ....	97
FIGURA 46 – 3ª LOCALIZAÇÃO COM DEFORMAÇÃO DO PVC. ....	98
FIGURA 47 – TUBULAÇÃO DE AÇO APOIADAS EM BLOCOS OU SELAS .....	102

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – POTENCIAL HIDRELÉTRICO BRASILEIRO POR BACIA HIDROGRÁFICA EM MAR/2003.....	16
TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO À QUEDA DAS DIFERENTES CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	28
TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO DAS PCHS EM DIVERSOS PAÍSES (KW) .....	28
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS E LIMITES DAS MICRO E MINICENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	33
TABELA 5 – VELOCIDADE MÁXIMA ADMISSÍVEL PARA CADA TIPO DE TUBULAÇÃO. ....	57
TABELA 6 – VALORES DE $k_f$ .....	60
TABELA 7 – NATUREZA DAS PAREDES E COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DO CANAL. ....	63
TABELA 8 – VALORES DE $K_a$ .....	65
TABELA 9 – DISTÂNCIA ENTRE BLOCOS DE ANCORAGEM .....	67
TABELA 10 – VAZÃO DO RIO RANCHARIA.....	74
TABELA 11 - VALORES DO COEFICIENTE K EM FUNÇÃO DO MATERIAL .....	76
TABELA 12 – DADOS DE ENTRADA PARA O PROGRAMA DE CÁLCULO DO DIÂMETRO ECONÔMICO PVC.....	80
TABELA 13 – DADOS DE ENTRADA PARA O PROGRAMA DE CÁLCULO DO DIÂMETRO ECONÔMICO AÇO .....	81
TABELA 14 – DADOS DE ENTRADA PARA O PROGRAMA DE CÁLCULO DO DIÂMETRO ECONÔMICO CONCRETO.....	82
TABELA 15 – TABELA COM CÁLCULOS DE, (DIÂMETRO ECONÔMICO) MM. ....	83
TABELA 16 – TABELA COM CÁLCULOS DE, (DIÂMETRO ECONÔMICO) MM. ....	84
TABELA 17 – VELOCIDADE MÁXIMA PARA DIMENSIONAMENTO. ....	85
TABELA 18 - VELOCIDADE MÉDIA ECONÔMICA PARA TUBULAÇÕES. ....	85
TABELA 19 – TABELA COM CÁLCULOS DE, (DIÂMETRO ECONÔMICO) MM. ....	86
TABELA 20 – MEDIDAS DOS CONDUTOS FORÇADOS.....	92
TABELA 21 – TABELA COM CÁLCULOS DE, (DIÂMETRO ECONÔMICO) MM. ....	99
TABELA 22 - VALORES DO COEFICIENTE C DA FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS .....	103

TABELA 23 – NATUREZA DAS PAREDES E COEFICIENTE DE RUGOSIDADE DO CANAL. ....	105
TABELA 24 – VALORES ADOTADOS E RESULTADOS DA PERDA NO CANAL DE ADUÇÃO. ....	105
TABELA 25 - COEFICIENTE DE ATRITO DE MANNING.....	106
TABELA 26 – VALORES POTÊNCIA DA USINA EM CADA LOCALIZAÇÃO .....	107
TABELA 27 – ESTIMATIVA DE CUSTO .....	108

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Art.	Artigo
CO	Carbono
CCR	Concreto, convencional ou compacto a rolo
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras
Hd	Queda de projeto
IDER	Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis
kW	Quilowatt
MCHs	Micro centrais Hidrelétricas
MW	Megawatt
NA	Nível d'água
NBR	Norma Brasileira
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PVC	Poli Cloreto de Vinila
RG	Fechamento de Registro
SIN	Sistema Inteligado Nacional
USIMAR	Usina Siderúrgica Marumby LTDA
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 TEMA .....	14
1.1.1 Delimitação do Tema .....	17
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS .....	21
1.3 OBJETIVOS .....	22
1.3.1 Objetivo Geral .....	22
1.3.2 Objetivos Específicos .....	22
1.4 JUSTIFICATIVA .....	23
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>25</b>
2.1 LEGISLAÇÃO .....	25
2.2 ADEQUABILIDADE DO LOCAL .....	26
2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS .....	27
2.4 ARRANJOS BÁSICOS .....	30
2.5 RESERVATÓRIO .....	37
2.6 BARRAGEM .....	39
2.7 VERTEDOURO .....	41
2.8 TOMADA D'ÁGUA E DESARENADOR .....	42
2.9 SISTEMA DE ADUÇÃO .....	45
2.10 CÂMARA DE CARGA .....	45
2.10.1 Partida brusca .....	49
2.10.2 Parada brusca .....	51
2.10.3 Algoritmo .....	53
2.11 GOLPE DE ARÍETE .....	53
2.12 CONDUTOS DE ADUÇÃO DE ÁGUA .....	54
2.13 CONDUTO FORÇADO .....	55
2.13.1 Materiais do Conduto .....	56
2.13.2 Diâmetro Econômico .....	56
2.13.3 Espessura do conduto .....	59
2.14 PERDAS DE CARGA .....	62
2.14.1 Perdas de carga em canais .....	62
2.14.2 Perda na entrada do conduto .....	63
2.14.3 Perda por atrito .....	64
2.15 BLOCOS DE APOIO .....	65
2.15.1 Distância entre Blocos: .....	66
2.16 CASA DE MÁQUINAS .....	68
<b>3 RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
3.1 TOPOGRAFIA .....	69
3.1.1 1ª LOCALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E CONDUTO FORÇADO .....	69
3.1.2 2ª LOCALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E CONDUTO FORÇADO .....	71
3.1.3 3ª LOCALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E CONDUTO FORÇADO .....	72
3.2 VAZÃO DA MCH DE RIO BRANCO DO SUL .....	73
3.3 CÂMARA DE CARGA .....	74
3.3.1 Golpe de Aríete .....	75
3.3.1.1 Aspectos Conceituais .....	75
3.3.1.2 Duração da Manobra de Fechamento .....	76
3.3.1.3 Cálculos do Golpe de Aríete .....	78

3.4 CONDUTO FORÇADO .....	79
3.4.1 Diâmetro econômico – Método Gráfico.....	80
3.4.2 Diâmetro econômico – Método Eletrobrás.....	84
3.4.3 Memorial de Cálculos do Conduto Forçado .....	86
3.4.3.1 Dados técnicos.....	86
3.4.3.2 Pressão Estática Máxima .....	88
3.4.3.3 Pressão Dinâmica Máxima .....	88
3.4.3.4 Pressão Total .....	89
3.4.3.5 Tensão Devido à Pressão .....	89
3.5 BLOCO DE APOIO.....	91
3.5.1 Bloco de Apoio – <i>software</i> FTOOL.....	91
3.5.2 Peso do conduto e Peso da Água.....	91
3.5.3 Cálculo das Tensões Devido aos Pesos do Conduto e da Água .....	92
3.5.3.1 Cálculo das Tensões da 1ª Localização .....	92
3.5.3.2 Cálculo das Tensões da 2ª Localização .....	94
3.5.3.3 Cálculo das Tensões da 3ª Localização .....	96
3.5.4 Cálculo do Momento de Inércia.....	98
3.5.5 Bloco de Apoio – AFLON (Catálogo Técnico).....	99
3.5.5.1 Distância Mínima Recomendada para Apoios dos Tubos.....	100
3.5.5.2 Espaçamento Máximo entre Suportes de Fixação.....	101
3.5.6 Bloco de Apoio - Eletrobrás .....	101
3.6 PERDAS.....	103
3.6.1 Perdas de carga em canais de adução.....	103
3.6.2 Perdas na entrada do conduto forçado .....	105
3.6.3 Perdas de carga no conduto forçado .....	106
3.7 POTÊNCIA DA USINA EM CADA LOCALIZAÇÃO .....	107
3.8 ESTIMATIVA DE CUSTO.....	108
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>110</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

A energia, em suas diversas facetas é indispensável à sobrevivência da espécie humana. Dispondo a eletricidade como uma das formas multifuncionais e oportuna de energia, transforma-se no recurso imprescindível para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países. (ANEEL, 2005).

Um dos temas primordiais para as discussões sobre o futuro da humanidade discorre sobre as energias renováveis, que prioriza a viabilidade técnica e econômica, porém sem deixar de ressaltar as preocupações com a sustentabilidade e o meio ambiente. Desse modo ganham ênfase as energias renováveis. (IDER, 2014).

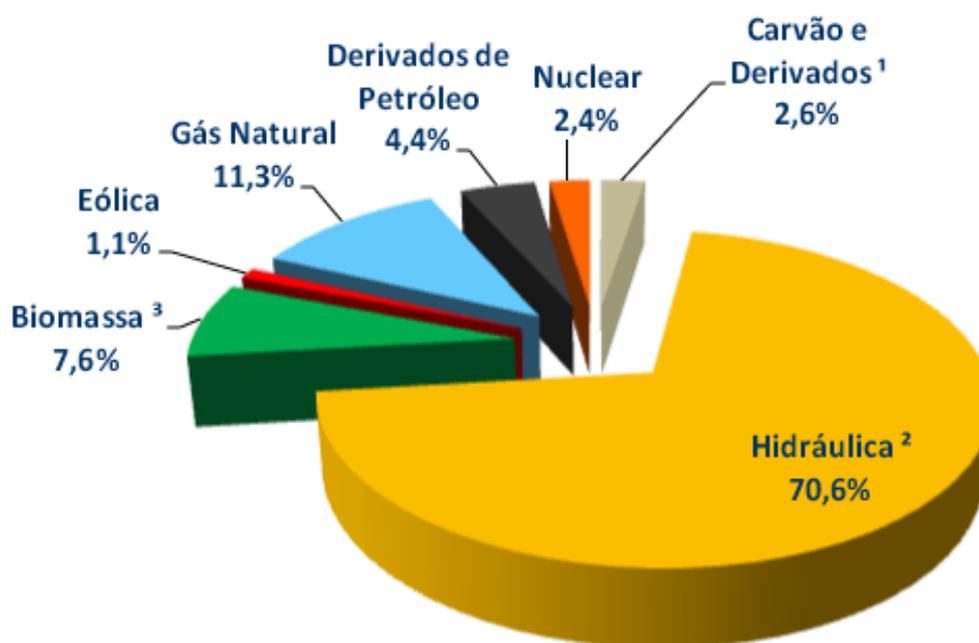
Da mesma forma a água de acordo com Alves (2007, p.15) além de ser inerente a vida humana e de seres vivos, é também usada para saneamento, lazer, irrigação e para produção de energia. No entanto, como as reservas mundiais de água estão ameaçadas por diversos fatores, avolumam-se os problemas econômicos,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

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

São classificadas como energias renováveis ou recursos naturais:

- Bioenergia;
- Energia Geotérmica;
- Hidrelétrica;
- Energia do Oceano, incluindo a energia das marés, das ondas e energia térmica;
- Energia Solar;
- Energia Eólica.

O gráfico abaixo apresenta a estrutura da oferta de energia renovável por fonte elétrica no Brasil em 2013.



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

No que diz respeito a caráter renovável, a energia hidráulica já era utilizada no século I, para realizar a tarefa de mover rodas na moagem de cereais, foi uma das primeiras formas de substituição do trabalho animal pelo mecânico. Segundo Okuno, Caldas e Chow (1986), essas rodas receberam relevante função no século XVI, por circunstância da industrialização da Europa. Com essas rodas foi possível o surgimento das máquinas de conversão de energia hidráulica em energia mecânica e por consequência as usinas hidrelétricas.

O Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica que predomina a energia renovável, sendo 70,6% geração hidráulica. Pode-se afirmar segundo o Balanço Energético Nacional (2014), que 79,3% da eletricidade no Brasil é gerada por fontes renováveis.

Assim também é possível verificar através da tabela 1 o potencial hidrelétrico brasileiro por bacia hidrográfica, dados esses obtidos no ano de 2003, em que praticamente toda a extensão territorial brasileira obtém um grande potencial de geração de energia de fonte renovável hidrelétrica.

**Tabela 1 – Potencial hidrelétrico brasileiro por bacia hidrográfica em mar/2003**

Bacia	Código	Estimado		Inventariado		Total (MW)	
		(MW)	%	(MW)	%	(MW)	%
Bacia do Rio Amazonas	1	64164,49	78,8%	40883,07	23,0%	105047,56	40,6%
Bacia do Rio Tocantins	2	2018,8	2,5%	24620,65	13,9%	26639,45	10,3%
Bacia do Atlântico Norte/Nordeste	3	1070,5	1,3%	2127,85	1,2%	3198,35	1,2%
Bacia do Rio São Francisco	4	1917,28	2,4%	24299,84	13,7%	26217,12	10,1%
Bacia do Atlântico Leste	5	1779,2	2,2%	12759,81	7,2%	14539,01	5,6%
Bacia do Rio Paraná	6	7119,29	8,7%	53783,42	30,3%	60902,71	23,5%
Bacia do Rio Uruguai	7	1151,7	1,4%	11664,16	6,6%	12815,86	5,0%
Bacia do Atlântico Sudeste	8	2169,16	2,7%	7296,77	4,1%	9465,93	3,7%
<b>Total</b>	-	<b>81390,42</b>	<b>100,0%</b>	<b>177435,57</b>	<b>100,0%</b>	<b>258825,99</b>	<b>100,0%</b>

Fonte: ELETROBRAS (2003).

A energia hidráulica segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – (ANEEL) (2005) é resultante da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, através da evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre. Dessa forma essa fonte renovável representa uma porcentagem significativa da matriz energética mundial e obtém tecnologias consolidadas, sendo a fonte principal de energia elétrica para mais de 30 países.

Neste contexto o processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro tem incentivado a descentralização da energia elétrica, no qual as fontes convencionais, como as renováveis, ganham espaço e papel importante na matriz energética nacional.

Um país desenvolvendo-se com sustentabilidade, segundo o Relatório Brundtland (1987), busca manter um equilíbrio ambiental, econômico e sócio político, para satisfazer as necessidades da sua população, sem deixar de se preocupar com as necessidades das gerações futuras. Portanto, possibilitar à população acesso aos serviços básicos de infraestrutura, saúde, educação, capacitação profissional, empregos e demais necessidades, a vida humana, precisa direcionar o uso consciente dos recursos naturais, enfatizando a sua máxima preservação. Logo, para contribuir com o desenvolvimento sustentável do país é essencial à utilização de geração de energia por meio de fontes renováveis.

Além disso, segundo Alves (2007, p.12) são necessárias mudanças relevantes nas políticas, para que essas ampliem as escolhas de tecnologias e investimentos no setor energético, para que esse se torne sustentável. Deste modo cria-se uma abertura para investimentos privados, tendo como resultado a redução de impactos ambientais.

Ainda Alves (2007, p.13) destaca que “a energia é um insumo essencial para o bem-estar de qualquer sociedade. Ela esta presente em todos os bens e serviços produzidos e, portanto, é um item básico de consumo”.

Portanto, esse estudo mostrará a importância do uso de energia sustentável, a definição de Micro central Hidrelétrica (MCH) e, a viabilidade de implantação de uma MCH como meio energético, tendo como objeto e objetivo central a revitalização da câmara de carga e do conduto forçado.

### 1.1.1 Delimitação do Tema

No mês de outubro do ano de 2013, o proprietário Sr. Pedro Proença dos Santos, procurou um grupo de alunos com intuito de realizar a reutilização do potencial hidrelétrico em sua propriedade, onde já tem como cenário uma antiga usina hidrelétrica, a Usina Siderúrgica Marumby Ltda – (Usimar), onde foi autorizada pelo Decreto nº 47.015 de 13 de Outubro de 1959 a lavrar minério de ferro, em terrenos de sua propriedade, porém atualmente encontra-se em estado inoperante e em situações precárias.

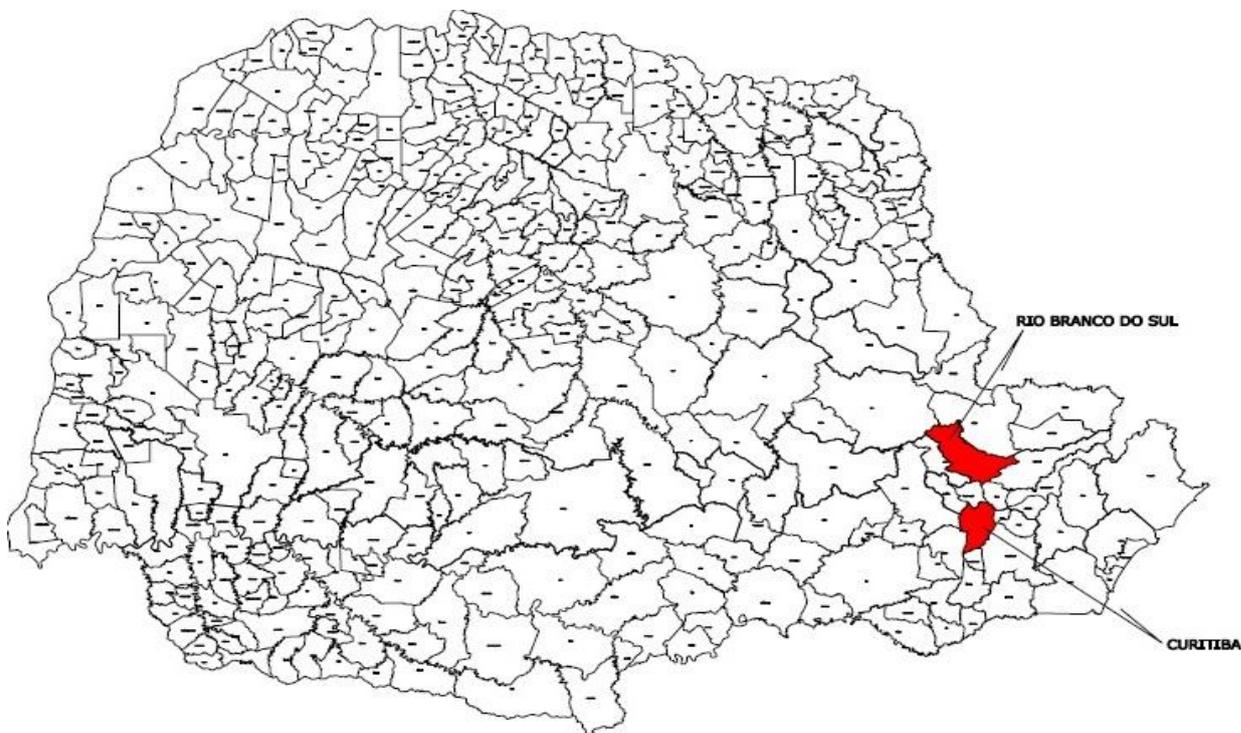
Assim, foi realizado um acordo entre o proprietário Sr. Pedro Proença dos Santos e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), para a restauração da usina deixando-a funcional.

Neste contexto, o presente estudo apresenta uma análise da conjuntura da revitalização da câmara de carga e do conduto forçado da Micro central Hidrelétrica de Rio Branco do Sul.

Para a realização desse evento será preciso cumprir gradativamente diversas etapas, onde serão divididas em: estudos gerais, histórico da usina, documentações, estudo para verificação das amplas possibilidades de localização da câmara de carga e do conduto forçado, classificação da potência e tipo da usina.

A propriedade em foco localiza-se em Pocinho, distrito e município de Rio Branco do Sul, Estado do Paraná, distante 26 km da capital, Curitiba/Pr. Tem uma área de vinte e quatro hectares (24 ha), delimitada por um retângulo que tem um vértice a duzentos e vinte e cinco metros (225 m) no rumo verdadeiro quarenta e seis graus dez minutos nordeste (46° 10' NE), da bifurcação das estradas de rodagem rio

Branco do Sul-Colombo-Bocaiuva do Sul e os lados, divergentes desse vértice, com os seguintes comprimentos e rumos verdadeiros: oitocentos metros (800 m), vinte e um graus dez minutos nordeste ( $21^{\circ} 10'$  NE); trezentos metros (300 m), sessenta e oito graus cinquenta minutos sudeste ( $68^{\circ} 50'$  SE).



**Figura 1 – Localização no mapa do Paraná**  
Fonte: Autoria própria (2015).



**Figura 2 – Localização da MCH de Rio Branco do Sul – PR**  
Fonte: Google Earth (2015).

As figuras a seguir mostram a área alagada e a barragem da Usimar.



**Figura 3 – Área alagada na propriedade**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**



**Figura 4 – Barragem existente na propriedade**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**



**Figura 5 – Barragem existente na propriedade**  
**Fonte: Autoria própria (2014).**

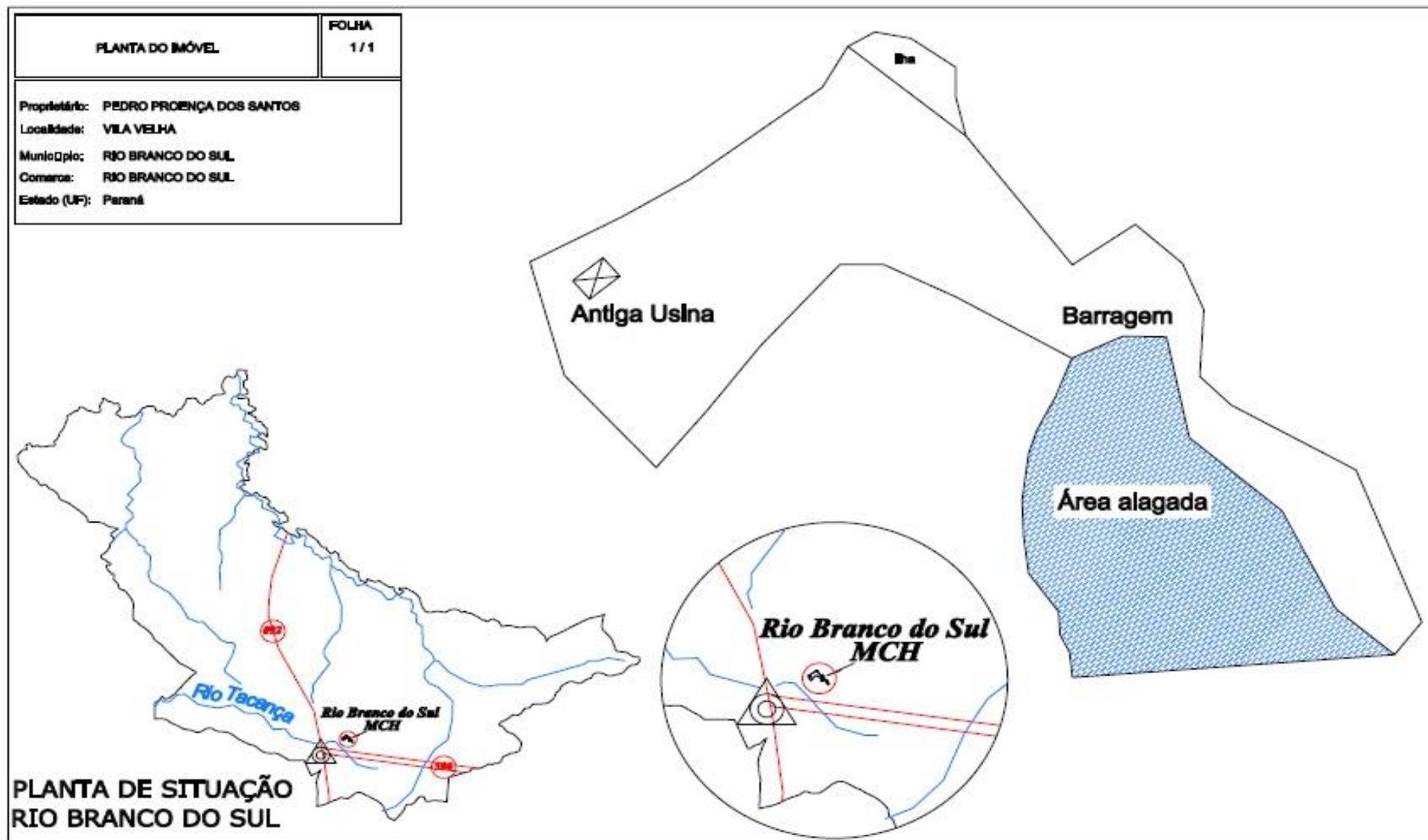


Figura 6 – Planta do Imóvel.  
Fonte: Autoria própria (2015).

## 1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Uma gama de consumidores rurais, em geral, apresenta baixo consumo de energia elétrica, o que impossibilita o atendimento financeiro por parte das concessionárias e inabilitaria, portanto, a aquisição de bens de consumo que dependem da eletricidade. Segundo Alves (2007, p.5) seria viável com a energia elétrica ampliar as atividades produtivas, desfrutar dos recursos naturais, acrescer o mercado de trabalho e refinar a situação econômica, cultural e social dos consumidores.

Com intuito de gerar os benefícios que a energia elétrica pode propiciar ao consumidor rural o Sr. Pedro Proença dos Santos e os acréscimos no conhecimento específico e científico para os alunos da UTFPR, houve a parceria estabelecida entre ambos, onde não possibilitou apenas a constatar que a usina de Rio Branco do Sul se encontra sucateada, com estruturas e equipamentos deteriorados, mas também a verificação que é imprescindível e possível uma revitalização da usina para propiciar condições de geração de energia.

Uma Micro central hidrelétrica é constituída de: reservatório de água, barragem, tomada d'água, câmara de carga, conduto forçado, casa de força, equipamentos eletromecânicos, subestação entre outras partes.

Para o restabelecimento funcional da Usina de Rio Branco do Sul, faz-se indispensável o estudo de cada parte da usina. Porém, nesse contexto este trabalho se concentrará no estudo de implantação de projeto de câmara de carga e conduto forçado.

A vista disso, não é uma tarefa simples a revitalização da câmara de carga e do conduto forçado, sendo relevante levantar dados bibliográficos e estudo de campo.

Dessa maneira a motivação deste trabalho está em assegurar soluções para o dimensionamento da câmara de carga e do conduto forçado, o levantamento das necessidades que deverão ser atendidas para que a MCH de Rio Branco do Sul possa gerar energia e contribuir para o aprimoramento do ensino para os alunos da UTFPR.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é descrever os cálculos para revitalização da câmara de carga e do conduto forçado da Usina Hidrelétrica de Rio Branco do Sul, para a verificação de qual situação técnica é a mais viável.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

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

- Estudar três localizações para câmara de carga e conduto forçado e suas respectivas distâncias e alturas;
- Demonstrar cálculos hidráulicos da câmara de carga (golpe de aríete);
- Designar cálculos hidráulicos para conduto forçado (diâmetro econômico e perdas) e blocos de apoio;
- Realizar desenho da localização da câmara de carga e do conduto forçado, em 3D sendo necessário *software* (Autocad/SolidWorks).

## 1.4 JUSTIFICATIVA

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

Com esse cenário preocupante, tornou-se plausível a implantação de micro usinas hidrelétricas para as comunidades rurais na proporção que dispõe condições técnico/econômicas adjuntas às novas tecnologias.

Um dos itens em destaque dessa iniciativa segundo Alves (2007, p.13) é que a disponibilidade de energia elétrica permanente possibilita a ampliação das atividades produtivas, assim como o uso racional dos recursos naturais, acarretaria em uma situação econômica, cultural e social favorável e estimável aos habitantes.

Ainda que os serviços públicos de distribuição de energia sejam obrigados a atender a demanda do mercado sem qualquer discriminação de consumidores, sejam eles rurais ou de baixa renda, isso não vem acontecendo revela Poppe (2007), citado por Alves (2007, p. 5), ademais, a norma regulamentadora designa que haja "solicitação prévia do interessado e a sua participação financeira nos investimentos requeridos, complementando o limite de investimento da distribuidora", o que impede o proveito da energia elétrica para uma "significativa parcela da população brasileira, situada em áreas com população esparsa e de baixo poder aquisitivo". (POPPE, 2007 apud ALVES, 2007, p.1).

Visto esse problema anteriormente descrito, as múltiplas opções para a geração de eletricidade por meio de fontes primárias, no que diz respeito a custos/benefícios/tecnologia, as fontes renováveis das micro usinas hidrelétricas ganham destaque por serem as mais adequadas e por consequência poderem sanar as necessidades dos consumidores em questão.

Logo, o mais difícil é obter o local que tenha potencial para gerar energia, sem que prejudique o meio ambiente e não cause impactos ambientais negativos. Como a estrutura para a realização da MCH já existe, ou seja, por já haver a barragem é minimizado o impacto ambiental. Dessa forma não acarretarão danos a população, ao contrário a população tende a ganhar benefícios em um ambiente que se encontra depredado e sem uso.

Dessa maneira, o estudo para a verificação da alternativa de revitalização de câmara de carga e conduto forçado será importante para obter dados específicos das possíveis localizações, cotas e distâncias.

Pois, com o estudo da revitalização da câmara de carga e conduto forçado, será possível determinar a melhor viabilidade técnica, já que a usina está desativada, assim será praticável as diversas possibilidades de localização e trajeto da câmara de carga e do conduto forçado, permitindo alcançar reais condições de aproveitamento da usina. E também, no âmbito acadêmico a presente monografia pode ser referência importante para os alunos de graduação da área elétrica no que tange a sistemas de potência, fontes alternativas de energia, geração de energia, linhas de transmissão, câmara de carga, conduto forçado, entre outras, já que serão levantados fatos e estudos referentes a esses temas em proveito e benefício da comunidade acadêmica.

Portanto, esses fatores apresentados como referência de estudo para a comunidade acadêmica, justificam a proposta apresentada para a realização do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 LEGISLAÇÃO

A Lei 9.427/96 juntamente com o Decreto 2.335/97 a (ANEEL) – Agência Nacional de Energia Elétrica e também com o Decreto 2.003/96 constituiu o direito dos Produtores Independentes e Autoprodutores.

Segundo o Art. 2º da Lei 9.427/96 a Agência Nacional de Energia Elétrica – (ANEEL) tem por finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal.

Já o Art. 2º do Decreto 2.003/96 define Produtor independente e Autoprodutor:

I - Produtor Independente de Energia Elétrica, a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco;

II - Autoprodutor de Energia Elétrica, a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo.

Art. 3º Dependem de concessão de uso de bem público, precedida de licitação:

I - o aproveitamento de potencial hidráulico de potência superior a 1.000 kW, por produtor independente;

II - o aproveitamento de potencial hidráulico de potência superior a 10.000 kW, por autoprodutor.

A Lei 10.848/04 também dispõe sobre a comercialização da energia elétrica. Segundo o Art. 1º a comercialização de energia elétrica entre concessionários, permissionários e autorizados de serviços e instalações de energia elétrica, bem como destes com seus consumidores, no Sistema Interligado Nacional - SIN, dar-se-á mediante contratação regulada ou livre, nos termos desta Lei e do seu regulamento.

O Decreto 5.163/04 regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, tendo em seu Capítulo I as regras gerais de comercialização de energia elétrica, abrangendo no Art. 1º a comercialização de energia elétrica entre concessionários, permissionários e autorizados de serviços e instalações de energia elétrica, bem como destes com seus consumidores no Sistema Interligado Nacional - SIN, dar-se-á nos Ambientes de Contratação Regulada ou Livre, nos termos da legislação, deste Decreto e de atos complementares.

Este decreto ainda estabelece os fins de comercialização de energia elétrica, explicitando os segmentos Ambientes de Contratação Regulada ou Livre, assim este decreto, entende-se como:

I - Ambiente de Contratação Regulada - ACR o segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica entre agentes vendedores e agentes de distribuição, precedidas de licitação, ressalvados os casos previstos em lei, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos;

II - Ambiente de Contratação Livre - ACL o segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica, objeto de contratos bilaterais livremente negociados, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos.

Visto a legislação regulamentadora para este tipo de atividade com fins de produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica é preciso incluir a análise das condições topogeológicas do terreno a adequabilidade do local.

## 2.2 ADEQUABILIDADE DO LOCAL

Um local adequado para a efetivação de uma MCH deve atender alguns itens segundo as diretrizes da ELETROBRÁS (2000):

- ter na propriedade rural de preferência uma queda natural que aliada a altura da barragem, que geralmente nesses casos são baixas, propiciará a queda bruta aproveitável.

- devem apresentar boas condições de fundação.

- apresentar próximo à propriedade ou na região jazidas naturais de materiais de construção, para minimizar as distancias de transporte até o local da MCH.

- condições ambientais propicias para esse empreendimento.

### 2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Quando se trata de energia hidráulica, se bem aplicada é uma excelente alternativa para suprir a demanda energética, pois apresentam custos viáveis e utilizando-se de equipamentos duráveis com tecnologia e equipamentos sedimentados pode-se utilizar em pequenas e grandes potências e ainda podem causar poucos impactos ambientais.

Em diversos países, inclusive o Brasil, apresenta uma crescente necessidade de fornecimento de energia para as áreas rurais, tanto para abastecimento de eletricidade como para apoio às atividades produtivas. O atendimento por meio de extensão de rede tem suas limitações, sendo talvez a principal limitação o custo alto do atendimento.

Dessa forma as alternativas para esse problema são as fontes renováveis de energia, mostrando-se assim alternativas promissoras para o atendimento rural.

Entre as diversas fontes renováveis destaca-se a hidroeletricidade através das pequenas potências hidrelétricas, sendo a mais comum as micro centrais hidrelétricas.

Nesse contexto este trabalho tem como foco a revitalização da câmara de carga e conduto forçado de uma micro central hidrelétrica. É possível classificar a usina de Rio Branco do Sul como micro central, pois sua potência máxima é inferior a 50 (kW), como pode-se observar na tabela abaixo:

**Tabela 2 – Classificação quanto à queda das diferentes centrais hidrelétricas**

<b>Classificação Das Centrais</b>	<b>Potência Máxima (kW)</b>	<b>Queda de Projeto - Hd (m)</b>		
		<b>Baixa</b>	<b>Média</b>	<b>Alta</b>
MICRO	50	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
MINI	500	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
PEQUENAS	5000	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

**Fonte: Olade (1996).**

As usinas de pequeno porte variam sua classificação de um país para outro, segundo Balarim (1999, p.12). Sendo assim, os diversos países classificam de formas diferentes as micros, minis e pequenas centrais hidrelétricas. Isso é possível pela variação do estágio industrial de cada país em seu determinado período. A seguinte tabela demonstra essa classificação.

**Tabela 3 – Classificação das PCHs em diversos países (kW)**

<b>País</b>	<b>Micro</b>	<b>Mini</b>	<b>Pequena</b>
Brasil	100	101 a 1000	101 a 10000
Bolívia	100	101 a 1000	-
China	100	101 a 500	501 a 25000
Equador	50	51 a 500	501 a 5000
Estados Unidos	500	501 a 2000	2002 a 15000
Peru	5 a 50	51 a 500	501 a 5000
Polônia	100	101 a 1000	1001 a 15000

**Fonte: Alves (2007).**

Permitida a verificação da classificação da usina de Rio Branco do Sul, Nogueira (2007) define algumas vantagens e limitações das micro centrais hidrelétricas:

As principais vantagens da energia hidráulica são:

-A energia é produzida a uma taxa constante; dessa forma, a imposição de armazenamento em baterias é quase nula e a energia está disponível a qualquer momento.

-Apresentam concepção simplificada, que lhes beneficia com baixo custo de implantação, manutenção e facilidade na operação.

-A tecnologia é de fácil adequação para a fabricação e utilização em países em desenvolvimento ou em áreas remotas.

-Não é imprescindível a utilização de combustíveis e os custos de manutenção são mínimos.

-A tecnologia é sólida, resistente e apresenta vida útil elevada, cerca de 20 anos, podendo atingir 50 a 60 anos de funcionamento sem muitos investimentos, com um custo baixo de reparos e manutenção.

-A manutenção das micro centrais são bastante acessíveis. Consiste-se na lubrificação periódica dos rolamentos e na substituição de correias de transmissão, quando necessário. Trabalhos de conservação das estruturas, bem como pintura e limpeza também são indicados.

-Os custos totais, comumente, são baixos se comparados aos custos das outras alternativas.

-Não há grandes barragens, obras hidráulicas importantes e grandes alagamentos; com isso, os problemas enfrentados pelas grandes hidroelétricas, como o deslocamento de populações e a estratificação dos reservatórios, são evitados.

-As centrais não emitem dióxido de carbono (CO) ou qualquer outro resíduo prejudicial à saúde, além de serem silenciosas e operarem com reduzida perda de calor.

As micro centrais hidrelétricas ainda oferecem a vantagem de adotarem uma tecnologia antiga, totalmente dominada e estabelecida.

No entanto existem limitações, assim são elas:

-É uma tecnologia de "local específico"; ou seja, se faz necessário locais apropriados próximos ao ponto onde a energia será desfrutada.

-Nos pequenos riachos, onde são comumente instaladas, a potência máxima é limitada e não pode ser aumentada caso haja um crescimento da demanda.

-Pode acontecer de ser reduzida ou inexistente a potência nos períodos de seca.

-Secas e mudanças na utilização da água e do solo podem baixar a produção de energia.

- Certas regiões, a demanda não é grande o suficiente para propiciar a tecnologia adequada e os equipamentos primordiais para uma fácil implantação.

Mesmo com algumas desvantagens da implantação de micro centrais hidrelétricas, elas ainda apresentam-se como as mais adequadas para sua efetivação em fazendas para possibilitar o fornecimento de eletricidade as

propriedades rurais. Elas são construídas aproveitando-se do local já existente, com cursos d'água, vazões e quedas pequenas, possibilitando-se gerar baixos custos e impactos ambientais quase nulos.

Justifica-se ainda o uso de micro centrais por diversas situações como explica Nogueira (2007):

- Em propriedades que encontram-se afastadas das redes de distribuição de eletricidade das concessionárias.

- Nas fazendas onde o consumo de energia elétrica é elevado.

- Nas propriedades onde buscam-se abastecimento em rede trifásica e a concessionária só atende em rede monofásica. Onde as linhas trifásicas apresentam vantagens de permitirem o acionamento de motores trifásicos, que por sua vez são mais baratos que os monofásicos, solicitam menores custos de manutenção, e são encontrados com maiores potências.

- Para atender comunidades rurais, onde habitantes apresentam baixa qualidade de vida.

- Para a inserção social, com uso da energia na melhoria das condições das atividades produtivas de uma fazenda ou de uma comunidade.

- Para atendimento a programas de universalização do uso da energia elétrica.

Portanto, pode-se constatar que além das micro centrais apresentarem impacto ambiental reduzido, pouca manutenção e vida útil elevada, elas também permitem um rápido retorno do investimento.

## 2.4 ARRANJOS BÁSICOS

Atualmente as usinas hidrelétricas de pequeno porte são classificadas em dois arranjos básicos segundo ELETROBRÁS e DNAEE (1982).

Sendo o primeiro constituído por barragem, vertedouro, tomada d'água, canal de adução, câmara de carga, tubulação forçada, casa de máquinas e canal de fuga e o segundo arranjo substituirá a câmara de carga por chaminé de equilíbrio. Verifica-se esses dois arranjos nas seguintes figuras:

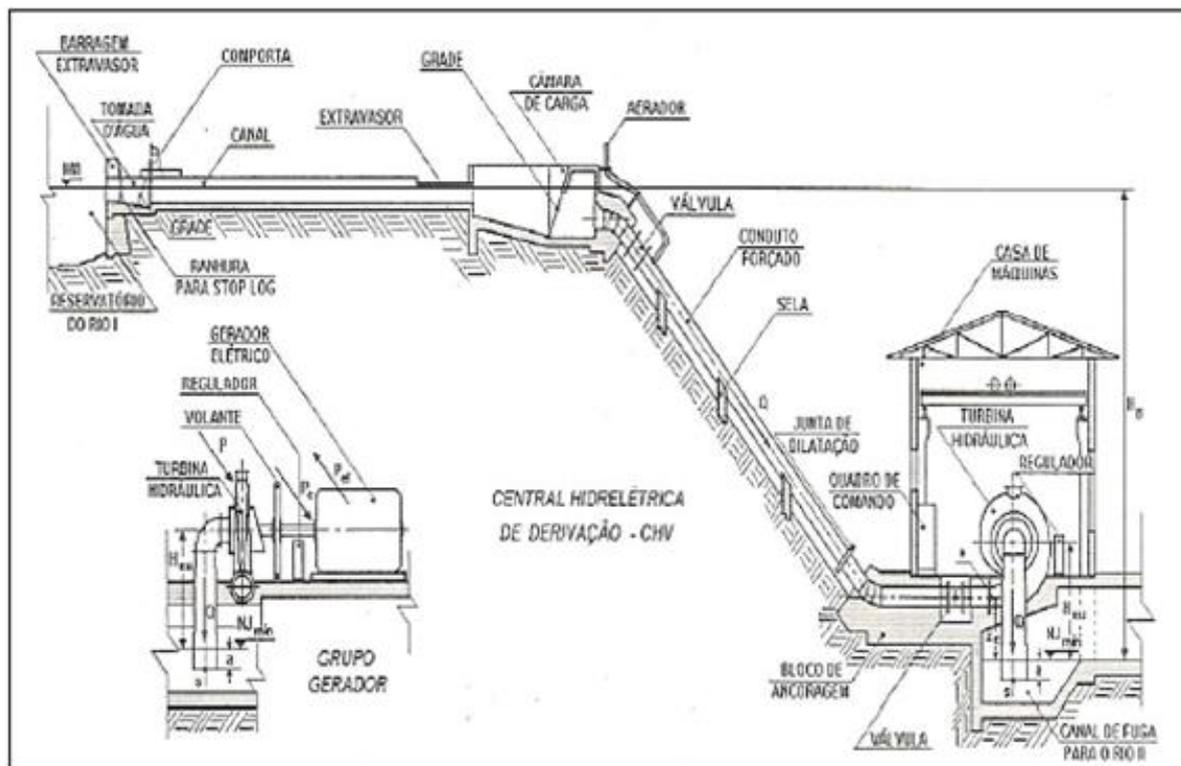


Figura 7 – Corte esquemático CHD, com seus principais componentes incluindo câmara de carga

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (1999, p. 26).

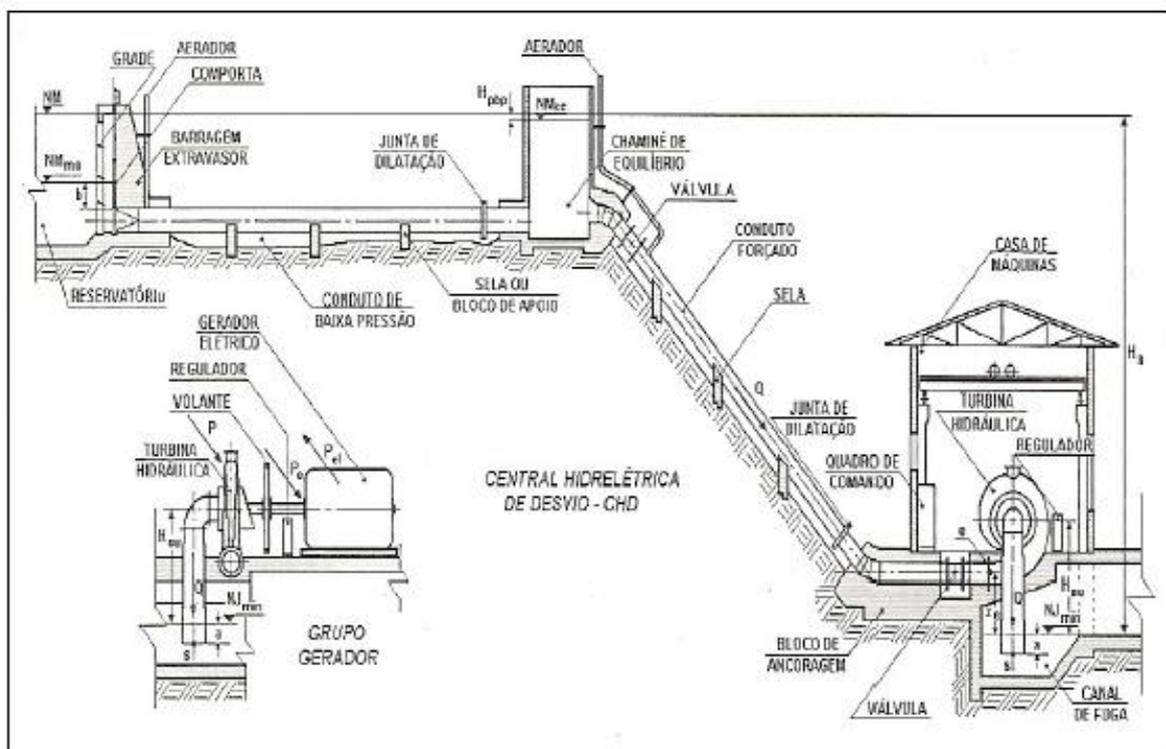


Figura 8 – Corte esquemático CHD, com seus principais componentes incluindo chaminé de equilíbrio.

Fonte: Souza, Santos e Bortoni (1999, p. 25).

Após a delimitação dos principais componentes de uma usina hidrelétrica de pequeno porte se faz necessário determinar quando utilizar câmara de carga ou chaminé de equilíbrio.

De acordo com ELETROBRÁS (2000) câmara de carga é a estrutura que está posicionada entre o canal de adução e a tomada d'água. E chaminé de Equilíbrio é um reservatório de eixo vertical, que geralmente está posicionado no final da tubulação de adução de baixa pressão e a montante do conduto forçado, com os principais objetivos:

- amortecer as variações de pressão, que se propagam pelo conduto forçado, golpe de aríete, decorrente do fechamento rápido da turbina;
- armazenar água para fornecer ao conduto forçado o fluxo inicial provocado pela nova abertura da turbina, até que se estabeleça o regime contínuo.

Através da relação na equação abaixo é possível estabelecer o não uso da instalação de chaminé de equilíbrio.

$$\frac{L_{cf}}{H_b} \leq 5 \quad (1)$$

$L_{cf}$  comprimento do conduto forçado (m)

$H_b$  queda bruta (m)

Apenas com essa relação pode-se afirmar-se que a MCH de Rio Branco do Sul não apresenta necessidade da instalação de chaminé de equilíbrio já que o a relação do comprimento do conduto forçado e da queda bruta é menor que 5.

Portanto essa MCH utilizará a estrutura de câmara de carga.

A ELETROBRÁS e DNAEE (1985) demarcam as características e limites das usinas hidrelétricas de pequeno porte.

**Tabela 4 – Características e Limites das micro e minicentraís hidrelétricas**

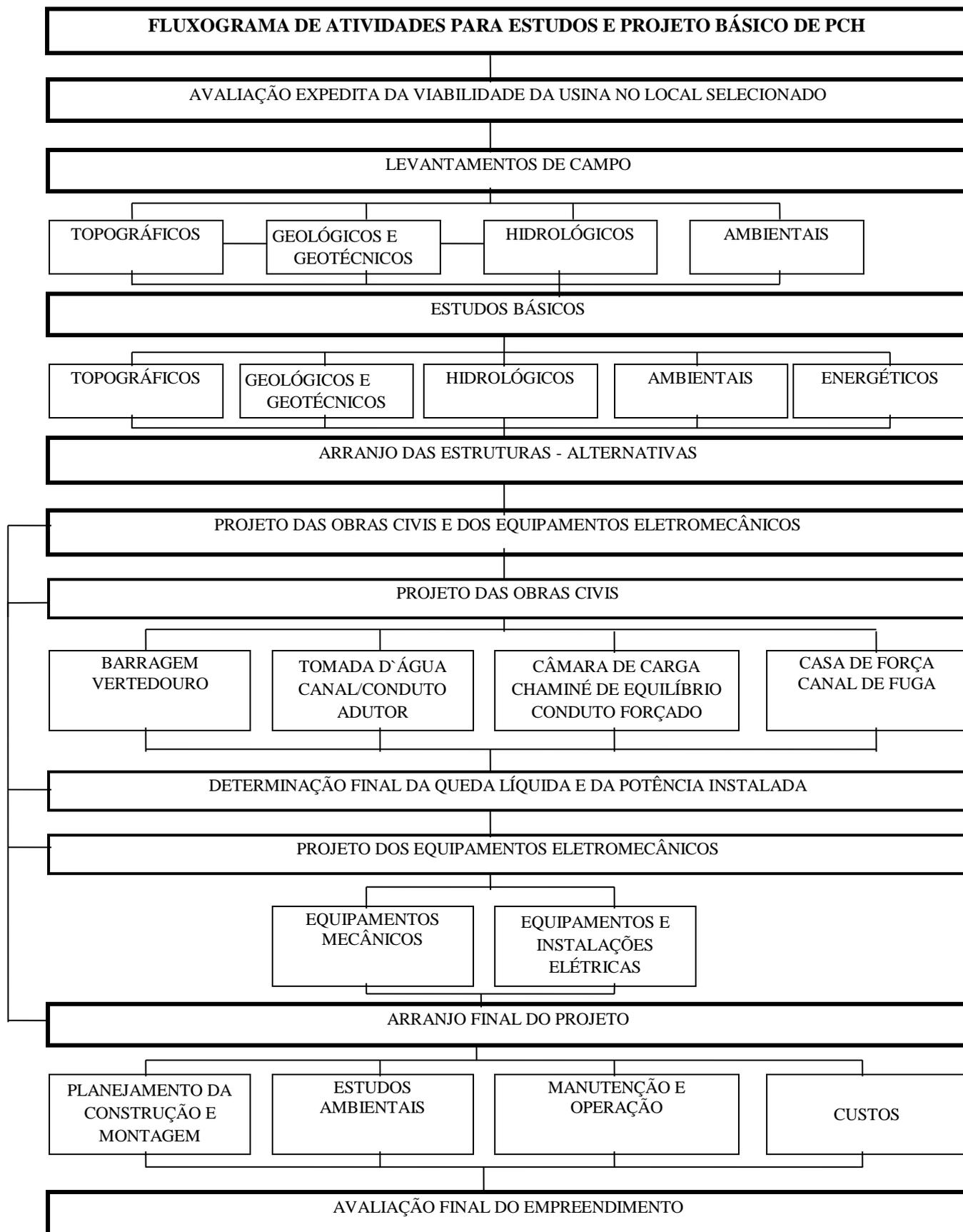
<b>Características</b>	<b>Micro</b>	<b>Mini</b>
Potência máxima (kW)	100	1000
Altura máxima da barragem (m)	3	5
Vazão máxima da central (m <sup>3</sup> /s)	2	15
Número mínimo de grupos geradores para a vazão máxima	1	2
Potência máxima do grupo gerador (kW)	100	1000
Período de recorrência para obras de desvio – vazão de cheias (anos)	-	5 a 10
Período de recorrência para obras permanente extravasores – cheia máxima (anos)	-	500-1000
Período máximo para implantação (meses)	6	12 -24
Regularização	Q <sub>95</sub> ou no Máximo Regularização Diária	

**Fonte: Eletrobrás; DNAEE (1985).**

A ELETROBRÁS (2000) apresenta dois fluxogramas para o estudo e implantação de uma pequena central, onde estes ilustram as etapas e atividades indispensáveis a consecução de uma PCH.

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

As atividades dos dois fluxogramas são típicas para estudos e projetos dessa natureza, independentemente do porte do aproveitamento. ELETROBRÁS (2000).



**Figura 9 – Fluxograma de atividades para Estudos e Projeto Básico de PCH**  
 Fonte: Eletrobrás (2000).

### FLUXOGRAMA DE IMPLANTAÇÃO DE UMA PCH

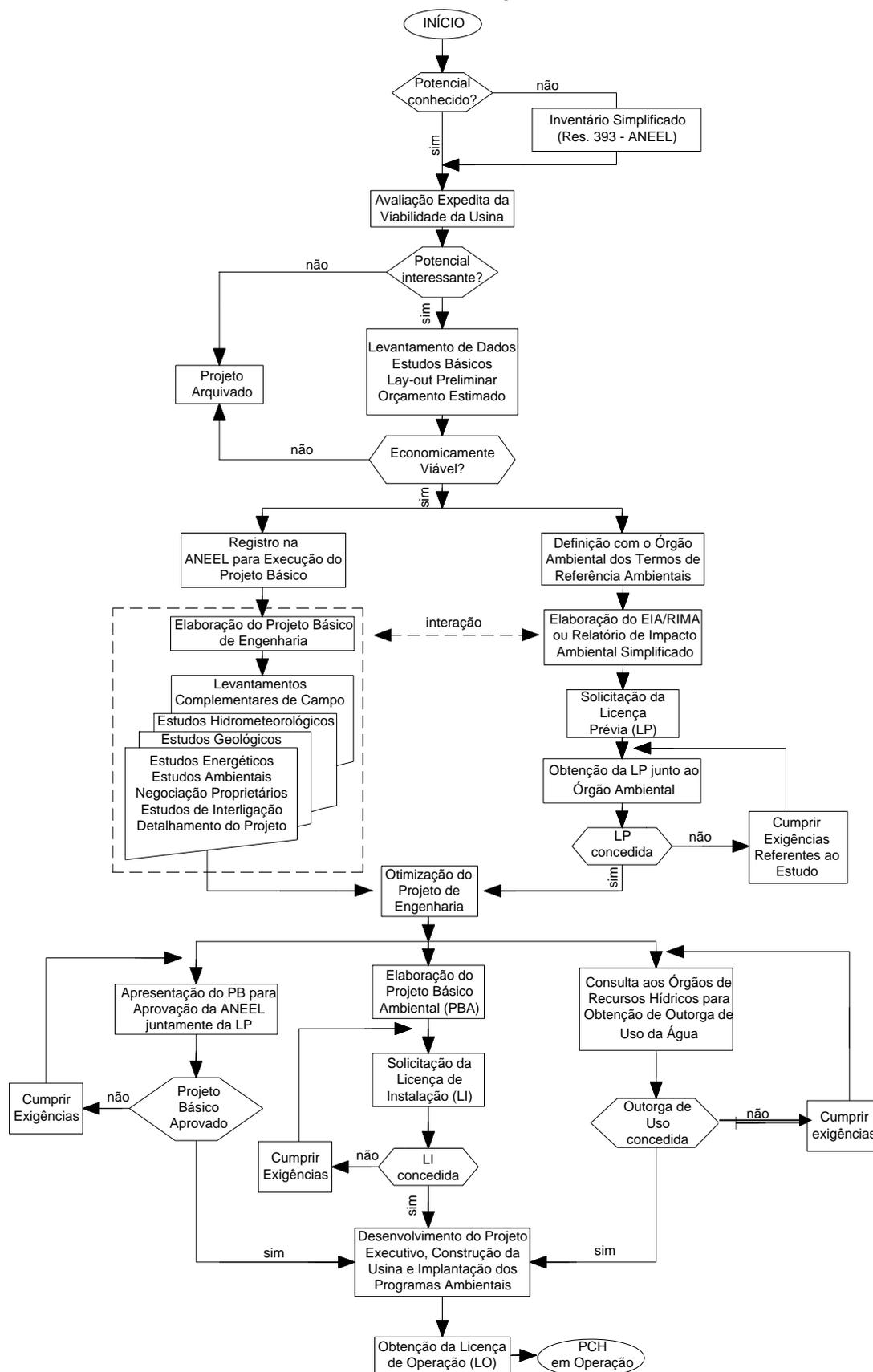


Figura 10 – Fluxograma de Implantação de uma PCH  
Fonte: Eletrobrás (2000).

Visto os dois arranjos básicos, o fluxograma de atividades para Estudos e Projeto Básico de PCH e o de implantação faz-se necessário abordar sucintamente os componentes da MCH que se apresentam antes da câmara de carga e conduto forçado, para um melhor entendimento do funcionamento da MCH.

A figura abaixo mostra os principais componentes de uma micro central hidrelétrica.

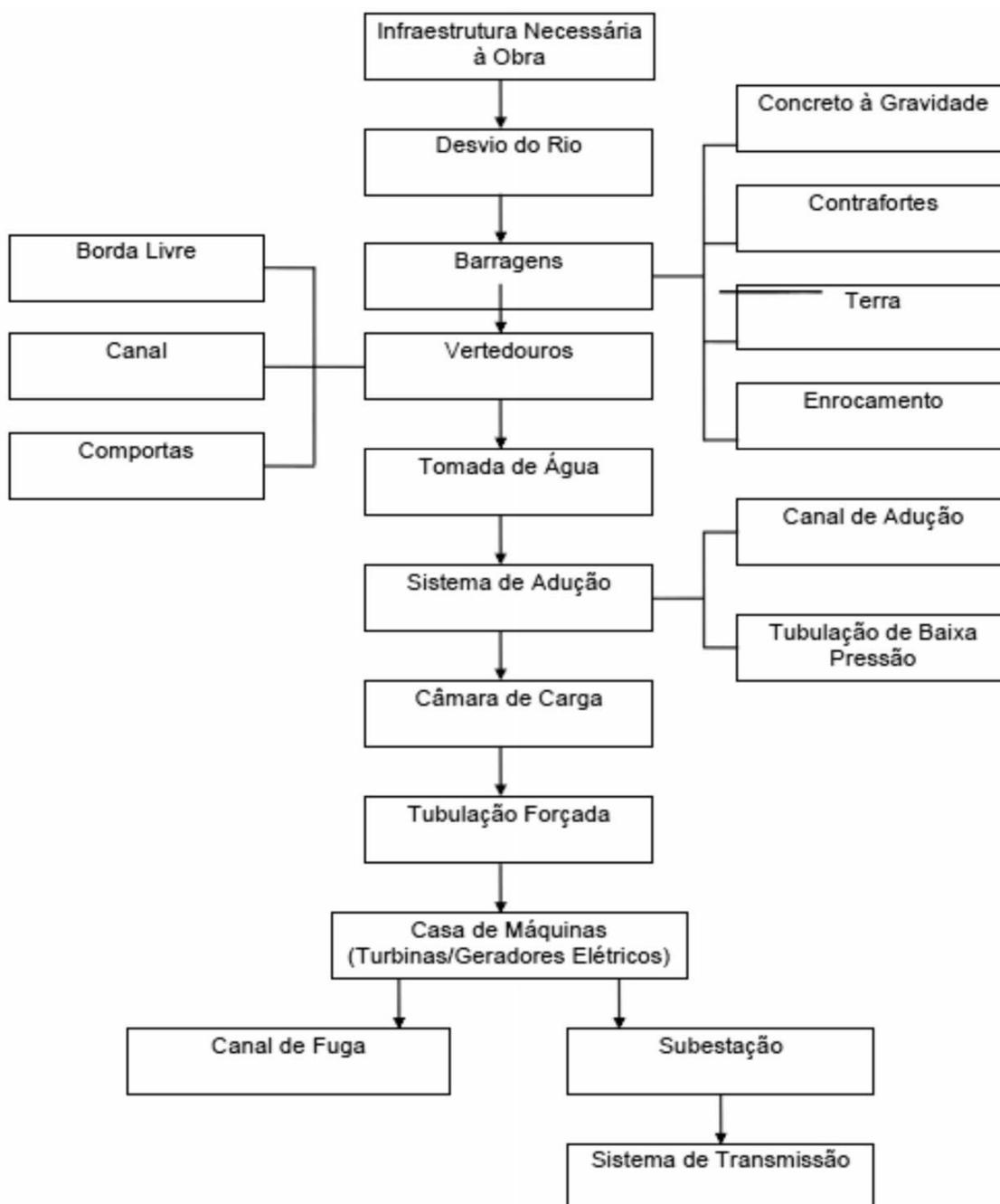


Figura 11 – Etapas para o dimensionamento das estruturas e equipamentos de uma usina hidrelétrica de pequeno porte

Fonte: Balarim (1999).

A MCH de Rio Branco do Sul será composta pelas seguintes estruturas: Reservatório, Barragem, vertedouro, tomada d'água, sistema de adução, câmara de carga, conduto forçado e casa de máquinas.

## 2.5 RESERVATÓRIO

O reservatório exige uma atenção por suas características energéticas e ambientais. “As características do reservatório são uma consequência natural do barramento do curso d'água e da topografia a montante deste barramento.” (SOUZA et al, 1999, p.38).

Quanto à capacidade de regularização do reservatório para MCH segundo determina ELETROBRÁS (2000) podem ser:

- a Fio d'Água
- de acumulação, com Regularização Diária do Reservatório;
- de acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório.

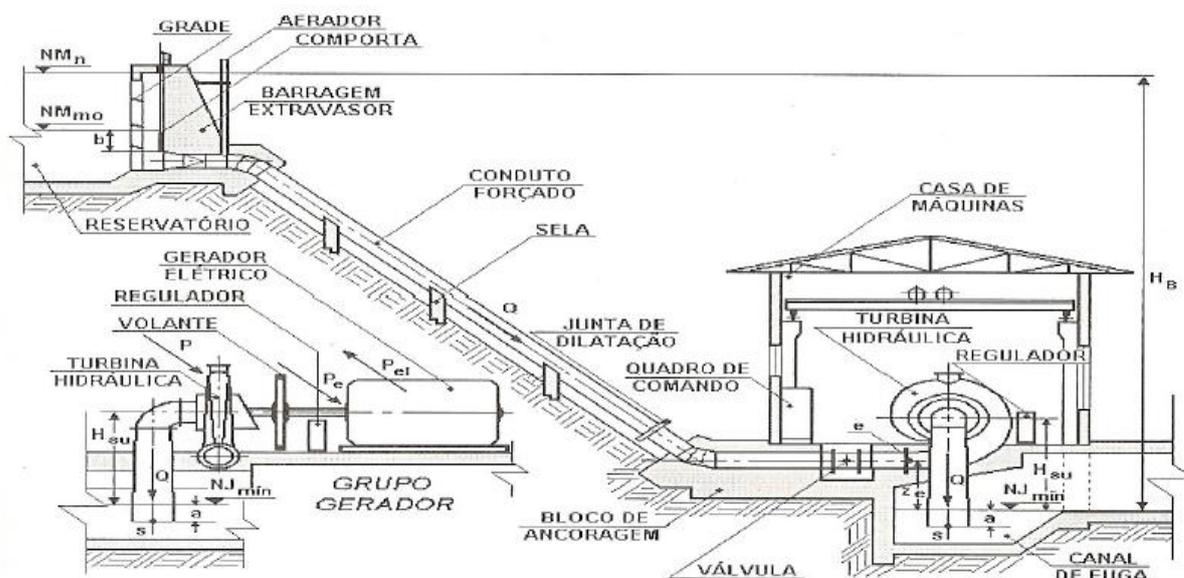
A MCH de Rio Branco do sul é classificada como Fio d'Água.

Esse tipo de classificação é delimitado “quando as vazões de estiagem são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista” (ELETROBRAS, 2000, p.17).

Dessa forma, não se utiliza do volume do reservatório criado pela barragem, explica as Diretrizes da ELETROBRÁS (2000):

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. (ELETROBRAS, 2000, p.17).

Na figura abaixo pode-se constatar esse aproveitamento energético:



**Figura 12 – Corte longitudinal da central hidrelétrica**  
**Fonte: Souza, Santos e Bortoni (1999, p. 25).**

Assim esse tipo de MCH fio d'água demonstra outras simplificações conforme justifica as Diretrizes da ELETROBRÁS (2000 p.17):

- dispensa estudos de regularização de vazões;
- dispensa estudos de sazonalidade da carga elétrica do consumidor;
- facilitam os estudos e a concepção da tomada d' água.

E ainda no projeto (ELETROBRÁS, 2000, p.17):

- não havendo flutuações significativas do NA (nível d'água) do reservatório, não é necessário que a tomada d'água seja projetada para atender a depleções do NA;

- do mesmo modo, quando a adução primária é projetada através de canal aberto, a profundidade do mesmo deverá ser a menor possível, pois não haverá a necessidade de atender às depleções;

- pelo mesmo motivo, no caso de haver necessidade de instalação de chaminé de equilíbrio, a sua altura será mínima, pois o valor da depleção do reservatório, o qual entra no cálculo dessa altura, é desprezível;

- as barragens serão, normalmente, baixas, pois têm a função apenas de desviar a água para o circuito de adução;

- como as áreas inundadas são pequenas, os valores despendidos com indenizações serão reduzidos.

## 2.6 BARRAGEM

A estrutura que tem por objetivo represar a água no intuito de alimentar a tomada d'água chama-se barragem.

A barragem é a estrutura que tem a função de represar a água, visando, com a elevação do nível d'água do rio, possibilitar a alimentação da tomada d'água. No caso de locais de baixa queda, a barragem tem também a função de criar o desnível necessário à produção da energia desejada. (ELETROBRÁS, 2000,p.78).

Os projetos de aproveitamento hidrelétricos tem se utilizado dos seguintes tipos de barragem (ELETROBRÁS, 2000,p.78):

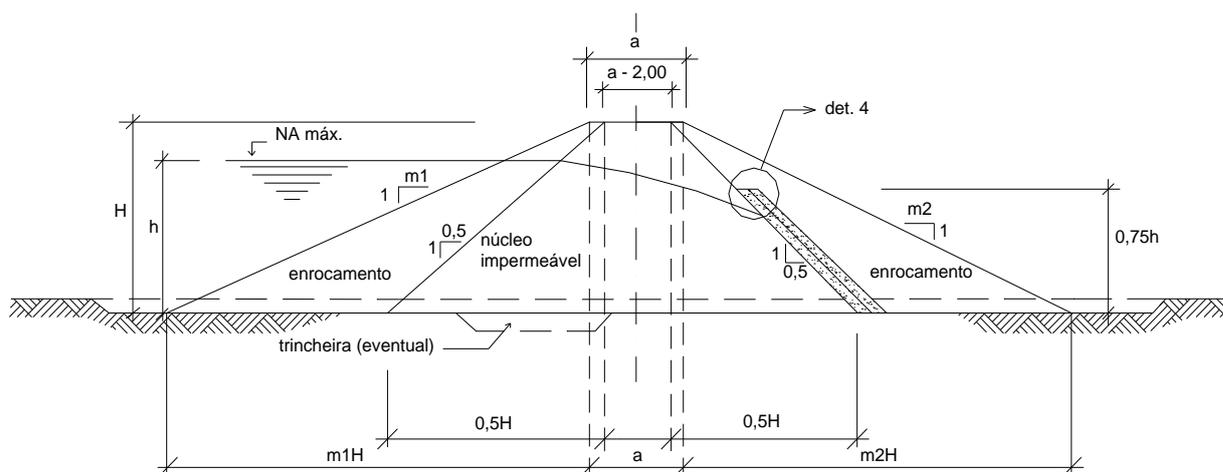
- de terra, em seção homogênea em solo;
- de enrocamento;
- de concreto, convencional ou compactado a rolo (CCR), em seção tipo gravidade.

### Barragem de Terra:

Quando construída com terra compacta, possuindo geralmente, um núcleo de material impermeável com um filtro de drenagem a jusante. Estas barragens possuem seções transversais trapezoidais, sendo seus parâmetros recobertos por revestimento protetor que normalmente, é de pedra ou grama. Neste tipo de barragem a água não deve passar sobre sua crista devido ao risco de erosão, motivo pelo qual são ditas barragens não galgáveis. (SOUZA et al, 1999, p.134)

### Barragem de Enrocamento:

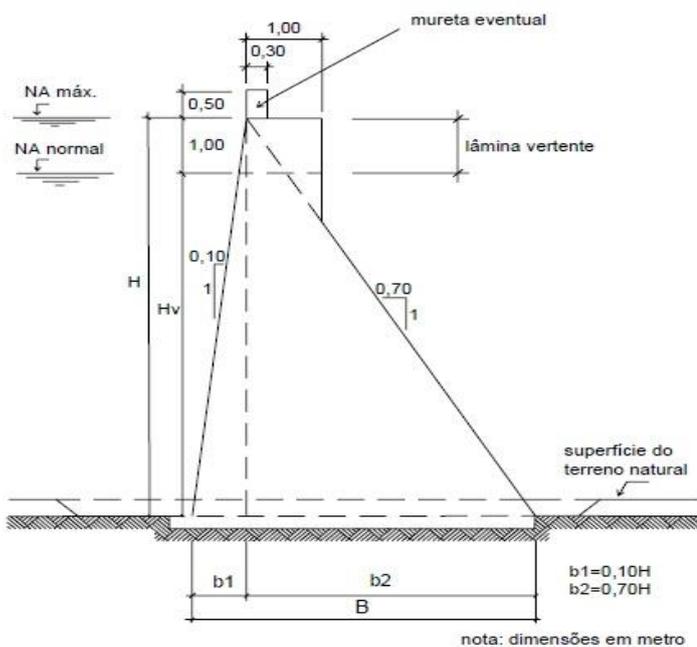
Quando construída com pedras lançadas e pedras arrumadas, manualmente ou mecanicamente, cujas seções transversais possuem forma intermediária entre a barragem à gravidade de concreto e a barragem de terra. Tais barragens possuem uma membrana impermeabilizante, geralmente no paramento ou talude de montante, ligada a um diafragma colocado nas fundações. (SOUZA et al, 1999, p.134)



**Figura 13 – Barragem de Enrocamento Convencional**  
 Fonte: Eletrobrás (2000)

#### Barragem à Gravidade:

Quando sua estrutura resiste aos esforços de tombamento, deslizamento, esmagamento e cisalhamento proveniente, em cada caso da pior situação de carregamento. (SOUZA et al, 1999, p.134)



**Figura 14 – Barragem de Concreto**  
 Fonte: Eletrobrás (2000)

A MCH de Rio Branco do Sul tem a barragem de concreto, onde está tem a capacidade de resistir com seu próprio peso à pressão da água do reservatório e à subpressão das águas que se infiltram pelas fundações.

Segundo as Diretrizes da ELETROBRÁS (2000, p.92) “Esse tipo de barragem é recomendado para vales estreitos, encaixados, em maciço rochoso pouco fraturado e com boas condições de fundação”.

“A seção da barragem pode incorporar o vertedouro quando as condições topográficas do local dificultarem a concepção de vertedouro lateral”. (ELETROBRÁS 2000, p.92).

## 2.7 VERTEDOURO

O vertedouro tem como função controlar o nível do reservatório, não permitindo numa grande cheia que a água passe por cima da barragem, deteriorando sua estrutura.

De um modo geral pode haver três tipos de vertedouro segundo exemplifica as diretrizes da ELETROBRÁS (2000, p.98):

- por um canal lateral, em cota elevada em relação ao leito natural do rio, com soleira vertedouro a jusante;
- por sobre o próprio corpo da barragem, ao longo de toda a extensão da crista ou parte dela;
- através da associação dos tipos acima citados.

A MCH de Rio Branco do Sul tem seu vertedouro no próprio corpo da barragem, ao longo da crista.

O vertedouro é uma estrutura importante, onde deve buscar ser uma operação segura no projeto. Segundo Alves (2007) se apresentar falha na execução do vertedouro pode acarretar danos a propriedade.

A falha do vertedouro ao executar sua função do projeto pode conduzir à falha da barragem com danos a propriedade e possíveis perdas de vida. A determinação dos fluxos da inundação do projeto é crítica, particularmente para as barragens tipo de terra e de enrocamento, que não podem suportar transbordamento. Porque as barragens elevam o nível de água em um córrego, os vertedouros

geralmente devem ser projetados para o fluxo de alta velocidade, desde que esta energia potencial adicional seja transformada em energia cinética. Não somente o vertedouro deve ser projetado para suportar estas velocidades, mas também a estrutura terminal, ou o dissipador, que deve liberar o fluxo em uma velocidade pequena suficiente e produzir condições de modo que a barragem não seja colocada em perigo pela erosão da correnteza excessiva. (ALVES, 2007, p.37).

Portanto, existem diversas configurações do vertedouro para que o projetista possa utilizar. Além dos tipos básicos ainda estão disponíveis dois vertedouros. Um chamado de serviço que “pode ser utilizado para passagem de pequenas inundações que ocorrem frequentemente. Outro vertedouro auxiliar, projetado para passagem de enchentes”. (ALVES, 2007, p.37) Esses auxiliares são facilmente adaptáveis aos locais com calha natural, assim permite que o fluxo seja descarregado no traçado natural do canal da barragem e com menos exigências de segurança.

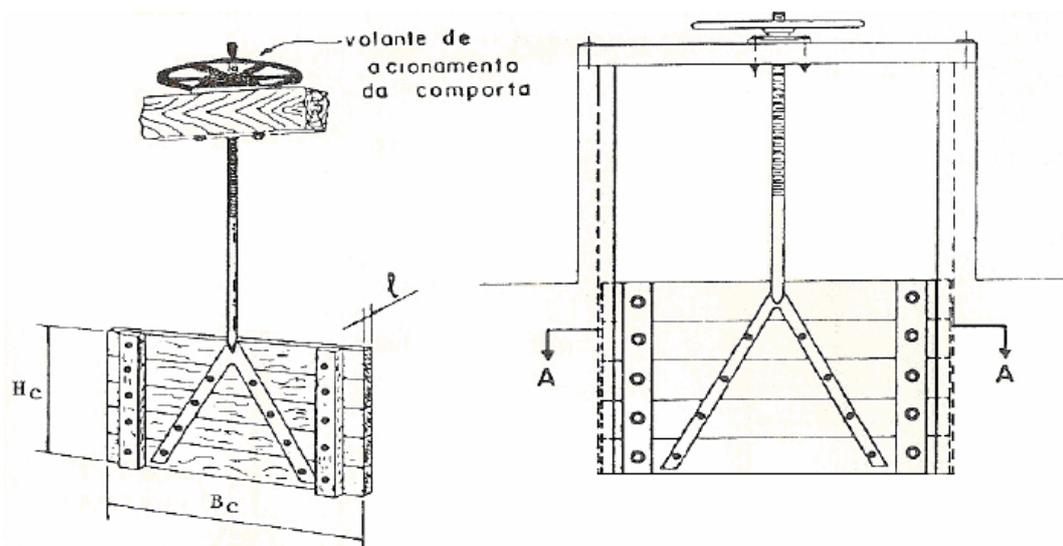
## 2.8 TOMADA D'ÁGUA E DESARENADOR

A estrutura que possibilita captar a descarga de água no rio oportunizando a movimentação da turbina.

a captação da água é feita pela tomada d'água que será implantada o mais próximo possível da casa de máquinas. Sua implantação será feita sobre terreno firme em posição tal que capte as vazões do curso d'água entre o nível máximo e mínimo de tal modo que atenda as cargas necessárias”. (ELETROBRÁS/DNAEE, 1985, p.16)

As funções da tomada d'água são duas: “permitir o ensecamento da tubulação forçada ou canal de adução para a realização das obras de manutenção (...); prover a retenção de corpos flutuantes e de material sólido (sedimentos) transportados pelo escoamento” (ELETROBRÁS/DNAEE, 1985 apud ALVES, 2007, p.38).





**Figura 17 – Comporta de madeira da tomada d'água.**  
**Fonte: Eletrobrás (1985, p. 95).**

Alves (2007) explica que a função do desarenador é de permitir o esvaziamento da barragem e descartar o material decantado.

A função do desarenador é possibilitar o esvaziamento da barragem e eliminar o material decantado. Deve ser de material impermeável e resistente à pressão do aterro. Na implantação do projeto, é a primeira estrutura a ser construída. Depois disso, o curso da água é desviado para o seu interior, o que facilitará as atividades de construção da barragem. (ALVES, 2007, p.39).

Segundo Alves (2007) o dimensionamento da tomada de água pode considerar duas etapas, a primeira ser ligada na tubulação, permitindo a condução da água até a máquina e a segunda descarregar a água captada em canal aberto de adução.

A locação da tomada d'água deve levar em consideração (SOUZA et al, 1999, p.157):

- escoamento, se possível isento de perturbações e de baixa velocidade;
- mínimo transporte de material sólido submerso e de superfície;
- possibilidade de acesso para manutenção;
- garantia de afogamento do conduto forçado ou do conduto de baixa pressão, de modo a eliminar a possibilidade de aeração externa no escoamento.

A tomada d'água segundo Souza (et al, 1999) deve apresentar tanto na forma geométrica como nos componentes nela mergulhados um projeto no qual leve

em consideração critérios que resultem em perdas de energia mínimas, aliadas a escoamento com perturbações também mínimas.

## 2.9 SISTEMA DE ADUÇÃO

Em relação ao sistema de adução, consideram-se dois tipos de PCH segundo ELETROBRÁS (2000, p. 19):

- adução em baixa pressão com escoamento livre em canal / alta pressão em conduto forçado;
- adução em baixa pressão por meio de tubulação / alta pressão em conduto forçado.

Para a escolha do melhor tipo dependerá da topografia e das condições geológicas do local, além do estudo econômico comparativo.

Assim, “para sistema de adução longo, quando a inclinação da encosta e as condições de fundação forem favoráveis à construção de um canal, este tipo, em princípio, deverá ser a solução mais econômica”. (ELETROBRÁS, 2000, p. 19).

## 2.10 CÂMARA DE CARGA

A ELETROBRÁS (2000) define câmara de carga como uma estrutura que está posicionada entre o canal de adução e a tomada d'água e isso implica em:

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

É importante observar no projeto de câmara de carga os seguintes aspectos segundo ELETROBRÁS (2000):

- Para obter um escoamento tranquilo é preciso evitar mudanças bruscas de direção na transição canal de adução.

- as denominadas “zonas mortas” e zonas de turbulência devem ser diminuídas e/ou evitadas.

Alves (2007) reporta o que a ELETROBRÁS/DNAEE (1985) explica sobre câmaras de carga:

As câmaras de carga são utilizadas nos casos em que a alimentação do conduto forçado ocorre por meio de canais ou galerias de superfície livre. São consideradas as condições topogeológicas do terreno, ao se realizar a tomada d'água, que capta a água necessária para movimentar a turbina. Dependendo das condições, a tomada d'água pode descarregar a água em canal aberto de adução ou em tubulação de baixa pressão, que leva a água até o ponto mais adequado para a instalação da tubulação. Caso a opção seja pelo canal a céu aberto de adução, a câmara de carga age como estrutura intermediadora entre o canal e a tubulação. (ELETROBRÁS/DNAEE, 1985 apud ALVES, 2007, p.41).

Balarim (1999) afirma:

A câmara de carga é uma estrutura destinada a fazer a ligação do sistema de adução de baixa pressão com o conduto forçado. Esta é em geral colocada o mais próximo possível da casa de máquinas, para se reduzir o comprimento da tubulação forçada. (BALARIM, 1999, p.35).

Souza, Fuchs e Santos (1983, p. 33) exemplifica o objetivo das câmaras: “proporcionar um espelho-d'água para a reflexão das ondas do golpe de aríete, reduzindo sua intensidade; proporcionar um volume de água de reserva capaz de atender rapidamente ao aumento da vazão (...); receber o excesso de água rejeitado pelas turbinas”.

Alves (2007) referencia Souza, Fuchs e Santos resumindo como as câmaras de carga são formadas e quando são utilizadas:

As câmaras de carga são formadas por “expansões nas extremidades dos canais formando pequenos reservatórios de água, aos quais estão conectadas as partes superiores dos condutos forçados”. Souza, Fuchs e Santos (1983, p. 33). São utilizadas quando o conduto forçado ocorre por meio de canais ou galerias de superfície livre. Tem como funções: apresentar um espelho-d'água para “a reflexão das ondas do golpe de aríete, reduzindo sua intensidade”; apresentar um volume de água de reserva capaz de “atender rapidamente ao aumento da vazão requerido pelas turbinas



Lvl – Comprimento da crista do vertedouro lateral de soleira fixa;

Bvl – Largura do vertedouro lateral de soleira fixa.

Em se tratando de aspecto hidráulico, deve ser dimensionada a câmara de carga para suprir atendimento de duas condições críticas de operação de uma central hidrelétrica segundo SCHREIBER (1977, p.256):

- Em partida brusca, garantindo que não entre ar no conduto forçado;
- Em parada brusca, garantindo a estabilidade funcional da câmara de carga e do canal adutor.

SCHREIBER (1977, p.256) explica que para realizar a primeira condição é necessário que o volume de água útil que fica armazenado na câmara de carga seja compatível com a variação da vazão, desde seu valor zero até o máximo valor.

A segunda condição para ser atendida, deve ser estipulada na câmara de carga um sangradouro lateral, onde procura-se evitar flutuações no nível da água pelo canal de adução, pelo fato de que as variações bruscas da descarga no conduto forçado pode ocasionar essas flutuações.

O dimensionamento hidráulico explica SCHREIBER (1977, p.256) será metodizado, onde busca determinar dimensões, dessa forma se objetiva alcançar a segurança operacional da central hidrelétrica e utiliza-se dos seguintes quesitos:

- fluido isento de atrito;
- tempos nulos para as celeridades;
- canal e câmara de fundo plano, sendo esta de seção transversal retangular;
- nível de água de referência horizontal e coincidente com o nível crista do extravazador lateral, onde se encontra no canal adutor junto à câmara de carga.

A figura abaixo demonstra o modelo hidráulico da câmara de carga tanto para partida e parada brusca.

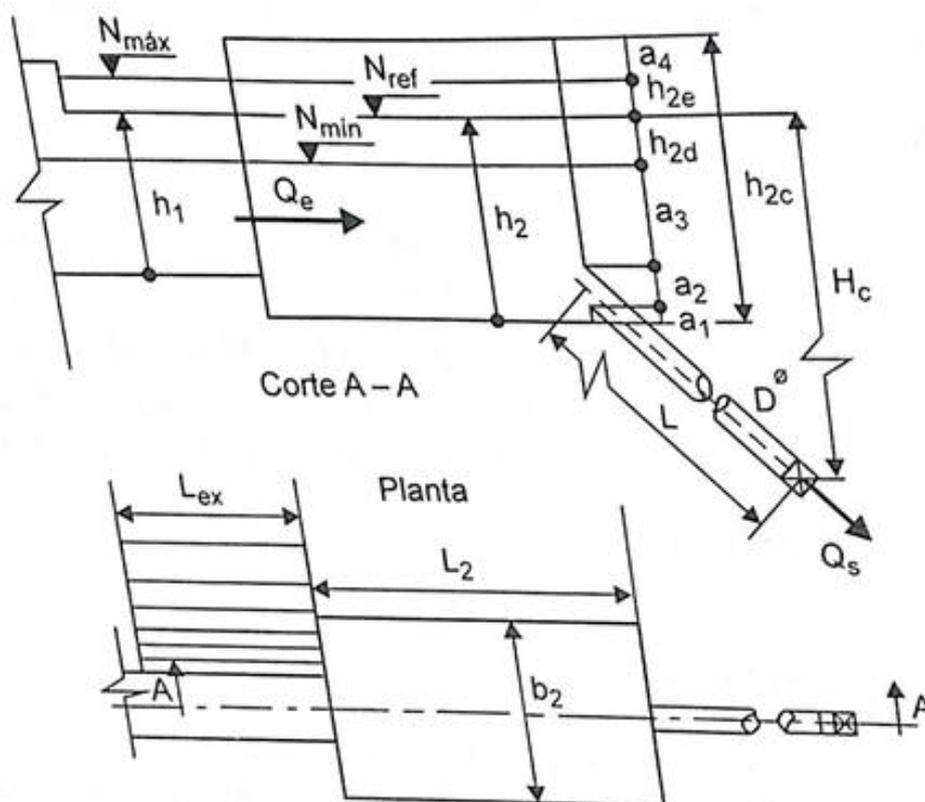


Figura 19 – Modelo hidráulico de câmara de carga  
Fonte: SCHREIBER (1977).

### 2.10.1 Partida brusca

Deve ser realizado as seguintes operações SCHREIBER (1977, p.257):

- Aceleração de água no conduto forçado igual seu valor médio;
- Vazões variando linearmente com os respectivos tempos hidráulicos.

Analisando os quesitos já exposto acima para uma depleção  $H_{2d}$  do nível de água na câmara de carga conforme figura 19 tendo o intervalo de tempo  $dt$ , o princípio de conservação da massa possibilita expressar:

$$b_2 \cdot l_2 \cdot dh = (Q_s - Q_e) \cdot dt \quad (2)$$

Decorrido um tempo  $T_2$  na partida brusca o nível mínimo de água na câmara de carga é alcançado, quando  $Q_e = Q_s$ . Assim nesse tempo a vazão de água se eleva na seção de entrada da câmara de carga onde vai de zero até o seu valor máximo,  $Q$ .

Cresce de forma linear a vazão que sai da câmara de carga com o tempo hidráulico do conduto forçado  $t_3$  e no intervalo  $t_3-t_2$  mantem-se constante e igual o valor máximo  $Q$ . SCHREIBER (1977, p.257):

Dessa forma a equação (2) pode ser escrita:

$$b_2 \cdot L_2 \cdot h_{2d} = A \cdot 0, C, t_3 + A \cdot t_3, C, B, t_2 - A \cdot (0, B, t_2) \quad (3)$$

Conforme a figura a seguir tem se  $t_2$

$$t_2 = t_2 + \frac{2 \cdot b_2 \cdot L_2 \cdot h_{2d}}{Q} \quad (4)$$

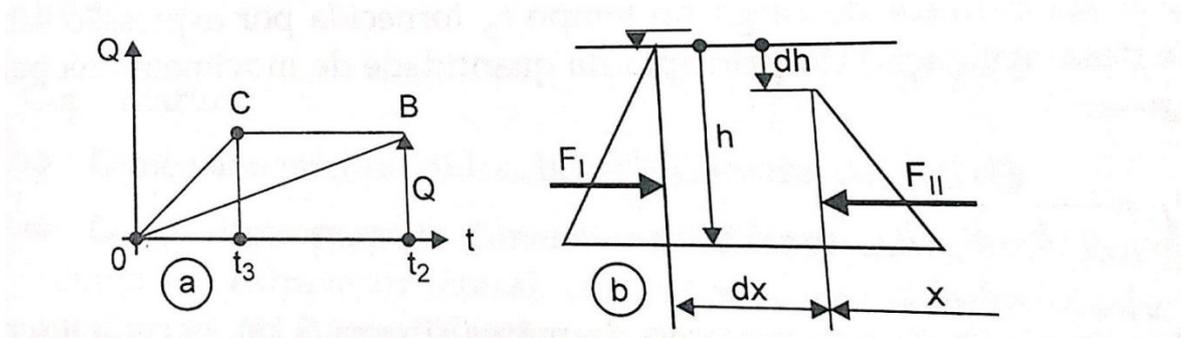


Figura 20 – a) Gráfico de vazões em função dos tempos para partida brusca.  
b) Elemento de água na câmara de carga.

Fonte: SCHREIBER (1977).

Se aplicar o princípio da quantidade de movimento ao um elemento de água da câmara de carga (figura 20 b) possibilita expressar:

$$F_I - F_{II} = m \cdot \frac{dv}{dt} \text{ ou } \gamma \cdot b_2 \cdot h \cdot dh = \frac{\gamma \cdot v_2}{g \cdot t_2} \cdot dx, \text{ logo}$$

$$t_2 = \frac{v_2 \cdot L_2}{g \cdot h_{2d}} = \frac{Q \cdot L_2}{g \cdot b_2 \cdot h_{2d} \cdot h_{2d}}$$

Se equiparar (3) e (4) obterá em uma expressão que resultará o comprimento  $L_2$  da câmara de carga em decorrência das características da central hidrelétrica e da depleção máxima  $h_{2d}$ .

$$L_2 = \frac{g \cdot Q \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot t_3 \cdot h_{2d}}{Q^2 - 2 \cdot g \cdot h_2 \cdot b_2^2 \cdot h_{2d}^2} \quad (6)$$

Agora para  $L_2$  ser finito tem-se:

$$Q^2 - 2 \cdot g \cdot h_2 \cdot b_2^2 \cdot h_{2d}^2 > 0 \text{ ou}$$

$$h_{2d_{\max}} < \frac{Q}{b_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2}} \quad (7)$$

Depois de analisar câmaras de carga para PCH, obtendo-se um coeficiente 1,58, atinge-se a depleção para a partida brusca:

$$h_{2d} = \frac{Q}{7 \cdot b_2 \cdot \sqrt{h_2}} \quad (8)$$

Conduzindo o valor de  $h_{2d}$  da (7) e (6) será possível obter a expressão para o comprimento mínimo da câmara de carga:

$$L_2 = 2,34 \cdot t_3 \cdot h_2^{0,5} = 0,304 \cdot \frac{Q \cdot L \cdot h_2^{0,5}}{H_c \cdot D^2} \quad (9)$$

### 2.10.2 Parada brusca

Contemplando as hipóteses gerais e uma velocidade média de desaceleração da água na câmara de carga no tempo  $t_2$ , cedida pela expressão igual a resultada pela aplicação do princípio da quantidade de movimento na partida brusca, SCHREIBER (1977, p.258), obtém-se:

$$t_2 = \frac{Q \cdot L_2}{g \cdot b_2 \cdot h_2 \cdot h_{2e}} \quad (10)$$

Analisando a figura 21 é possível descrever:

$$L_2 \cdot b_2 \cdot h_{2e} \cdot \frac{dh}{dt} = \int_0^{h_{2e}} Q_e - Q_v \cdot dh \text{ ou } L_2 \cdot b_2 \cdot \frac{h_{2e}^2}{t_2} = 3,5 \cdot Q \cdot h_{2e} \text{ logo}$$

$$t_2 = \frac{5 \cdot b_2 \cdot L_2 \cdot h_{2e}}{3 \cdot Q}$$

(11)

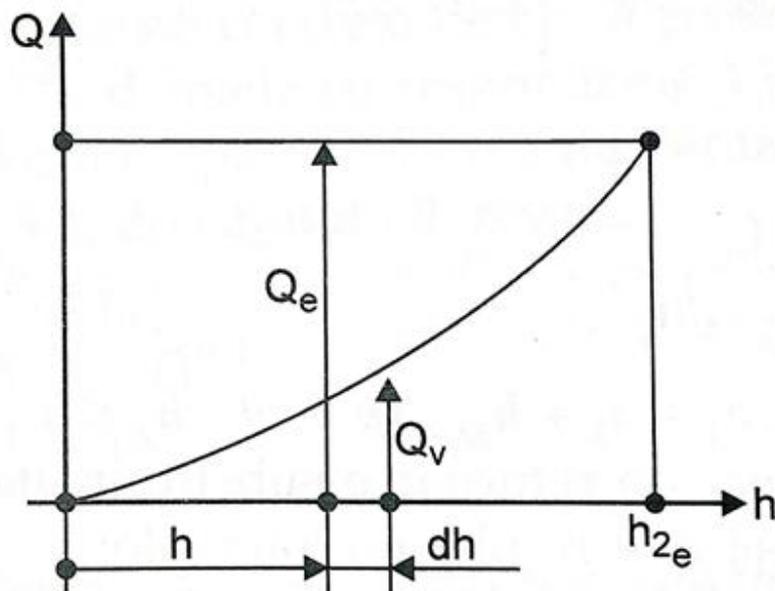


Figura 21 – Gráfico da vazão em função da altura da elevação na câmara de carga.

Fonte: SCHREIBER (1977).

Equiparando-se a (11) com a (10) obtém-se:

$$h_{2e} = \frac{0,25 \cdot Q}{b_2 \cdot h_2^{0,5}}$$

(12)

Através do extravasor lateral para  $h_{2e}$  decorre a vazão máxima  $Q = Q_{ex}$  assim:

$$Q_{ex} = k_{ex} \cdot L_{ex} \cdot \frac{0,25 \cdot L_{ex}}{b_2 \cdot h_2}^{3/2} \text{ ou}$$

$$L_{ex} = \frac{8}{k_{ex}} \cdot \frac{b_2^{3/2} h_2^{3/4}}{Q^{1/2}}$$

(13)

Se o extravasor de parede espessa é  $k_{ex}= 1,51$  e extravasor de parede tipo Greager é  $k_{ex}=2,20$  os valores de  $a_1$  (figura 19) indicados são:

$$0,3 < a_1 \text{ m} < 0,5; a_2 \cong D; < a_3 < 1,5 \cdot D; 0,3 < a_4 < 0,5 \text{ (m)} \quad (14)$$

A altura da câmara de carga decorre em:

$$h_{2c} = h_2 + h_{2e} + a_4 = a_1 + a_2 + a_3 + h_{2d} + h_{2e} + a_4 \quad (15)$$

### 2.10.3 Algoritmo

Segundo SCHREIBER (1977, p.259) é o algoritmo que possibilita dimensionar hidráulicamente a câmara de carga e o extravasor lateral, concebendo a velocidade do escoamento no interior da câmara de carga 1,0 m/s.

## 2.11 GOLPE DE ARÍETE

Golpe de aríete pode ser definido como “a resultante da variação da pressão e da velocidade da água nas tubulações no momento em que as condições de escoamento se alteram pela variação da descarga”. (ALVES, 2007, p.43).

Ou ainda:

É uma onda de choque que atinge o sistema hidráulico sempre que é fechada uma saída. Isso ocorre porque quando uma saída é aberta a água escoar no sistema correndo pela tubulação. Ao se fechar a saída, há interrupção do fluxo e a tendência da água e refluir para dentro do tubo. Quando ocorre um refluxo violento concretiza-se o golpe de aríete em geral com as válvulas de descarga, que operam com pressões elevadas e tubos largos. Paulatinamente isso pode provocar vazamentos e rachaduras. (ALVES, 2007, p.43).

Macintyre (1983) citado por Alves (2007), diz que é “uma expressão usada como sinônimo de escoamento ou regime variável (variado), significando que neste escoamento as condições de escoamento variam com o tempo” (MACINTYRE, 1983, apud ALVES, 2007, p.43).

Para realizar o cálculo do golpe de aríete pode usar vários métodos, segundo Alves (2007), como o método clássico (fechamento de válvula a jusante) método aritmético ou numérico (foi utilizado nos anos 30), método gráfico (foi mais usado após o surgimento do computador) e o método das equações (resolver os problemas mais complexos através do computador).

O golpe de aríete pode ainda ser explicado como “um fenômeno transitório de elevação (golpe de aríete positivo) ou diminuição (golpe de aríete negativo) da pressão provocada (...) pela abertura rápida do mecanismo de controle (válvula, injetor, distribuidor, etc.) de vazão no conduto forçado”. (MARTINS, TIAGO FILHO; LAURENT, 2000, apud ALVES, 2007, p.43).

## 2.12 CONDUTOS DE ADUÇÃO DE ÁGUA

Souza, Fuchs e Santos (1983) considera dois grupos de condutos de adução de água, os de baixa pressão e os condutos forçados, onde estes tem a função de conduzir a água da barragem ate as turbinas.

Os condutos de baixa pressão comumente apresentam baixas declividades e como resultado baixas velocidades de escoamento, o que torna possível, em caso de galerias através de rochas sãs, a dispensa de revestimento. Os condutos forçados são fechados, nos quais o escoamento ocorre a pressões crescentes de montante para jusante e sua parte inferior é submetida à pressão máxima de aproveitamento. Se executados em galerias devem ser revestidos para que não haja atritos provocadores de perdas dinâmicas. Se em céu aberto, os condutos são formados por tubulações armadas ao terreno. Em médias e altas pressões, são utilizados tubos de aço soldado. Em pequenas e médias pressões, é possível usar tubulações de concreto armado ou de madeira armada. (ALVES, 2007, p.41)

A MCH de Rio Branco do Sul utilizava conduto forçado para conduzir a água até a casa de máquinas e como este projeto tem o objetivo de revitalizar a MCH continuará sendo realizado a condução da água pelo conduto forçado.

A imagem abaixo mostra o conduto forçado da MCH de Rio Branco do Sul, onde é possível constatar que o mesmo está sucateado.



**Figura 22 – Conduto forçado da MCH de Rio Branco do Sul.  
Fonte: Autoria própria (2014).**

### 2.13 CONDUTO FORÇADO

Define-se conduto forçado às tubulações de grande diâmetro, podendo ser composto de aço, concreto, fibra de vidro, PVC. São os condutos forçados que conduzem a água de um reservatório, ou de um sistema adutor para a casa de máquinas segundo NOVAK (2004, p.496-499). São projetados para tolerar altas tensões por causa da pressão estática da coluna d'água e também por causa do golpe de aríete criado pelas mudanças bruscas no fluxo d'água, e pode ser realizado pelo fechamento e aberturas de válvulas e/ou distribuidor da turbina.

A ligação entre o sistema de baixa pressão e as máquinas hidráulicas é feita por meio de um sistema de alta pressão que pode ser constituído de uma ou mais tubulações. A configuração desse sistema depende da vazão turbinada, da extensão da tubulação e do número de turbinas escolhido. (BALARIM, 1999, p.36).

O conduto forçado (que também pode ser conhecido como tubulação forçada) pode ser projetado para ficar exposto ou enterrado. Se for exposto deve ser fundido em berços de concreto ou pedra. Vai depender da topografia da propriedade para delimitar o número de condutos, pode-se ter um conduto para cada máquina hidráulica ou ainda um com diâmetro maior que se ramifica em outros criando uma bifurcação de diâmetros menores de acordo com o número de máquinas.

Se o conduto forçado for de aço e enterrado devem ter a preocupação de ser projetados com mecanismos que previnam e minimizem a corrosão, pois não será possível fazer a inspeção visual. Agora os condutos expostos com grandes extensões devem ser projetados juntas que possibilitem a dilatação do material, pois a temperatura varia e devem ser criados com tampas de inspeção.

### 2.13.1 Materiais do Conduto

Como já foram explicitados logo acima os condutos forçados podem ser de aço, concreto, fibra de vidro, PVC, ferro dúctil. Dessa forma este trabalho mostrará a melhor viabilidade técnica, tanto em relação ao material, manutenção, durabilidade, vida útil, perdas, sendo pesquisados e calculados os materiais: aço, PVC e concreto. Após os resultados será escolhido o material com melhor funcionamento sem muitos investimentos, com um custo baixo de reparos e manutenção, para garantir que o projeto seja viável, seguro, com sustentabilidade econômica, resultando em um potencial energético de qualidade.

### 2.13.2 Diâmetro Econômico

O diâmetro da tubulação é definido através do cálculo de diâmetro econômico. A equação a seguir é realizada de acordo com a norma brasileira NBR 12296 para definir o dimensionamento do cálculo para o diâmetro econômico apresentando a fórmula de Bondschu:

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

Sendo:

$D_e$  = diâmetro econômico, em cm;

$Q$  = descarga máxima na tubulação, em m<sup>3</sup>/s;

$H$  = queda bruta, em m.

Após o cálculo do diâmetro econômico, deve-se averiguar a velocidade máxima admissível para cada tipo de tubulação, demonstrada na tabela a seguir:

**Tabela 5 – Velocidade máxima admissível para cada tipo de tubulação.**

Material	$V_{max}$ admissível (m/s)
Aço	5,0
Concreto	3,0

Fonte: Eletrobrás (2000).

A equação abaixo defini a velocidade da água no interior do conduto:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot Q}{3,1416 \cdot D_e^2} \quad (17)$$

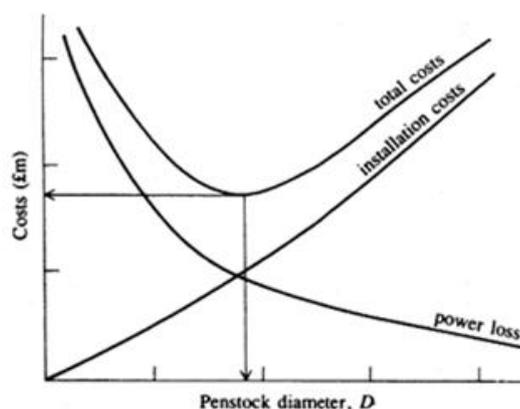
Onde:

$Q$  = em m<sup>3</sup>/s;

$D_e$  = diâmetro econômico, em m;

$A$  = área interna da seção transversal da tubulação.

O gráfico (2) mostra que o valor do diâmetro econômico é calculado pela comparação entre os custos referente a construção do conduto e as receitas deixadas de acumular em razão das perdas de carga, dessa forma somados esses valores é possível estipular o valor mínimo.



**Gráfico 2 – Diâmetro econômico do conduto forçado**  
Fonte: Novak (2004).

Para cálculo do diâmetro econômico é preciso considerar as recomendações feitas pela norma Comité Européen de la Chaudronnerie et de la Tolerie (STAHLHOEFER 2013, p.28):

- Máxima perda de carga para uma dada vazão;
- Custo capitalizado por metro de perda de carga;
- Parâmetros que determinam o custo por metro de perda de carga:
  - Eficiência da instalação;
  - Custo do kW/hora;
  - Taxa de capitalização/taxa de interesse;
  - Tabela dos fatores de operação;
  - Número de horas no qual a instalação é usada na potência P;
- Adicionalmente, se necessário:
  - Custo por metro cúbico de escavação de túnel;
  - Custo por metro cúbico de revestimento de concreto;
  - Custo por metro cúbico de conduto de aço.

Antes de tudo é preciso calcular em primeiro plano a perda de carga do circuito para um diâmetro D. Isso é possível através da equação universal de Darcy-Weisbach:

$$\Delta h = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (18)$$

Faz-se necessário apresentar o cálculo do coeficiente de atrito, para isso é preciso da equação proposta por L.Levin (1968, p. 7) para o regime turbulento integralmente rugoso.

$$\lambda = \frac{1}{(2 \log_{10} \frac{3,7 \cdot D}{\epsilon})^2} \quad (19)$$

Por consequência da perda de carga a energia é perdida anualmente, pode ser calculado pela equação:

$$E_p = g \cdot Q \cdot \Delta h \cdot F_{calc} \cdot 9,81 \cdot (L \cdot 1000) \quad (20)$$

Obtém-se

$$F_{\text{calc}} = F_{\text{cap}} \cdot F_{\text{disp}} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{\text{cx.eng}} \cdot \eta_{\text{transf}} \cdot 8760 \quad (21)$$

E ainda deve ser calculado o custo de energia perdida.

$$C_{\text{ep}} = E_p \cdot VE \quad (22)$$

Finalmente é calculado o valor da energia anual para um período de vida econômica do aproveitamento (n) e para uma taxa de retorno (i).

$$VPC_{\text{ep}} = VP(C_{\text{ep}}, i, n) \quad (23)$$

Em primeiro plano foi preciso calcular perda de carga do circuito para um diâmetro D, agora em segunda estância é necessário o cálculo dos custos decorrente da construção de um conduto de diâmetro D. Assim esses custos são definidos como:

$$C_{\text{const}} = C_{\text{cond}} \quad (24)$$

Para definir o custo do conduto deve calcular a massa unitária de um trecho e multiplicar pelo seu custo unitário.

$$C_{\text{cond}} = C_{\text{ucond}} \cdot M_{\text{cond}} \quad (25)$$

Portanto para realizar o cálculo do diâmetro econômico que se deseja é necessário o valor mínimo das somas ( $VPC_{\text{ep}} + C_{\text{const}}$ ) calculadas para diferentes diâmetros.

### 2.13.3 Espessura do conduto

- Sob pressão Interna:

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

$$e = \frac{P_i D}{2\sigma_f} \quad (26)$$

Onde:

e = espessura da parede (mm);

$P_i$  = pressão hidrostática máxima interna (kgf/cm<sup>2</sup>);

D = diâmetro interno (mm);

$\sigma_f$  = tensão admissível de resistência à tração do material (kgf/cm<sup>2</sup>).

No caso de tubulação em aço tem-se a seguinte formula segundo ELETROBRÁS (2000, p.119):

$$e = \frac{P_i D}{2\sigma_f k_f} + e_s \quad (27)$$

Onde:

$e_s$  = sobre-espessura p/ corrosão = 1,0 mm;

$k_f$  = eficiência das soldas.

Os valores de  $k_f$  são apresentados na tabela abaixo:

**Tabela 6 – Valores de  $k_f$ .**

Tubulação	$k_f$
Sem costura	1,0
Com costura	
Sem radiografia e alivio de tensões	0,80
Com radiografia ou com alivio de tensões	0,90
Com radiografia e com alivio de tensões	1,00
Padronizada de fabricação normal	
Costura com solda por fusão elétrica	0,80
Costura com solda por resistência elétrica (*)	1,00

**Fonte: Eletrobrás (2000).**

(\*) Costura com solda por resistência elétrica são relativa ao aço ABNT EB 255 CG 30 (ASTM-A283, Grau C), onde apresentam as características abaixo, ELETROBRÁS (2000, p.120):

$\sigma_e$  = tensão de escoamento 2.110 kgf/cm<sup>2</sup>;

$\sigma_r$  = tensão de ruptura 3.870 a 4.570 kgf/cm<sup>2</sup>.

Para essa classe de aço a tensão admissível de resistência à tração será:  
 $0,33 \times 4.220 \text{ 1.400 kgf/cm}^2$ .

Segundo a ELETROBRÁS (2000) recomenda-se por questão de segurança, aderir para tubulação de baixa pressão a espessura mínima, constata-se:

Recomenda-se, por segurança, adotar para a tubulação de baixa pressão a espessura mínima de parede dos condutos forçados, tendo em vista que qualquer defeito de laminação ou efeitos de corrosão afetam o valor da espessura percentualmente. Esse reflexo é maior nas chapas mais finas e é mais difícil a elaboração de uma boa solda nessas chapas. Além disso, a adoção da espessura mínima é recomendada por motivos construtivos, de montagem e de transporte. (ELETROBRÁS, 2000, p.120).

Segundo o Bureau of Reclamation apud ELETROBRÁS (2000) a fórmula para essa espessura é determinada pela fórmula abaixo:

$$e_{min} = \frac{D+500}{400} \geq 6,35 \text{ mm (1/4)"} \quad (28)$$

- Sob pressão Externa:

Em alguns casos o conduto pode render-se a pressão externa sobre seu perímetro inteiro, como por exemplo:

(...) quando é esvaziado sem os cuidados necessários ou quando não funciona a aeração. A ocorrência de uma depressão parcial, ou total (vácuo), do nível do gradiente dinâmico que ultrapasse a cota inferior do piso da tubulação, poderá causar uma deformação (afundamento) na chapa e o colapso da parede da tubulação. (ELETROBRÁS, 2000, p.120).

Dessa forma pode-se calcular a pressão externa pela fórmula:

$$P_c = \frac{2E}{1-\nu^2} \frac{e}{D}^3 \quad (29)$$

Onde:

$P_c$  = pressão externa, ou de colapso (kgf/cm<sup>2</sup>);

$E$  = módulo de elasticidade do aço (kgf/cm<sup>2</sup>);

$\nu$  = fator de contração transversal;

$e$  = espessura da chapa do conduto;

$D$  = diâmetro interno do conduto;

Sendo “e” e “D” com as mesmas dimensões

Ao considerarmos as características de aço obtém-se:

$$P_c = 882.500 \frac{e}{D}^3 \quad (30)$$

Assim, se a espessura da chapa for maior que 0,6% do diâmetro interno do conduto, será suficiente a rigidez da chapa para sustentar o vácuo interno. (ELETROBRÁS, 2000, p.121).

## 2.14 PERDAS DE CARGA

No momento em que o líquido escoar pelas tubulações, válvulas, conexões e órgãos de máquinas, “cede energia para vencer as resistências que se oferecem ao seu escoamento, devido à atração molecular no próprio líquido e às resistências próprias aos referidos dispositivos. Esta energia despendida pelo líquido para que possa escoar entre duas seções chama-se perda de carga”. (MACINTYRE, 1983, apud ALVES, 2007, p.40).

### 2.14.1 Perdas de carga em canais

Os projetos que apresentam seção uniforme com escoamento em superfície livre, sem curvas, pode ser apurado somente a perda de carga em consequência do atrito. Pode ser calculada através da fórmula de Chézy:

$$S = \frac{V^2}{C^2 R_h} \quad (31)$$

S declividade da linha de energia = perda de carga unitária (m/km),

V velocidade média (m/s),

C coeficiente calculado utilizando-se a fórmula de Guanguillet e Kutter,  
 $R_h$  raio hidráulico (m), que é igual a relação entre a área molhada e o  
 perímetro molhado

Para calcular canais de seção e declividade uniformes, o valor numérico da  
 perda de carga unitária por consequência do atrito utilizará a seguinte equação:

$$h_a = LxS \quad (32)$$

$L$  comprimento do canal (km)

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \frac{n}{R_h} \left( 23 + \frac{0,00155}{S} \right)} \quad (33)$$

Dado essa perda a figura abaixo mostra o coeficiente de rugosidade do  
 canal:

**Tabela 7 – Natureza das paredes e coeficiente de rugosidade do canal.**

Natureza das Paredes	$n$
Cimento liso	0,010
Argamassa de cimento	0,011
Pedras e tijolos rejuntados	0,013
Tijolos rugosos	0,015
Alvenaria ordinária	0,017
Canais com pedregulhos finos	0,020
Canais com pedras e vegetação	0,030
Canais em mau estado conservação	0,035

**Fonte: Eletrobrás (2000).**

#### 2.14.2 Perda na entrada do conduto

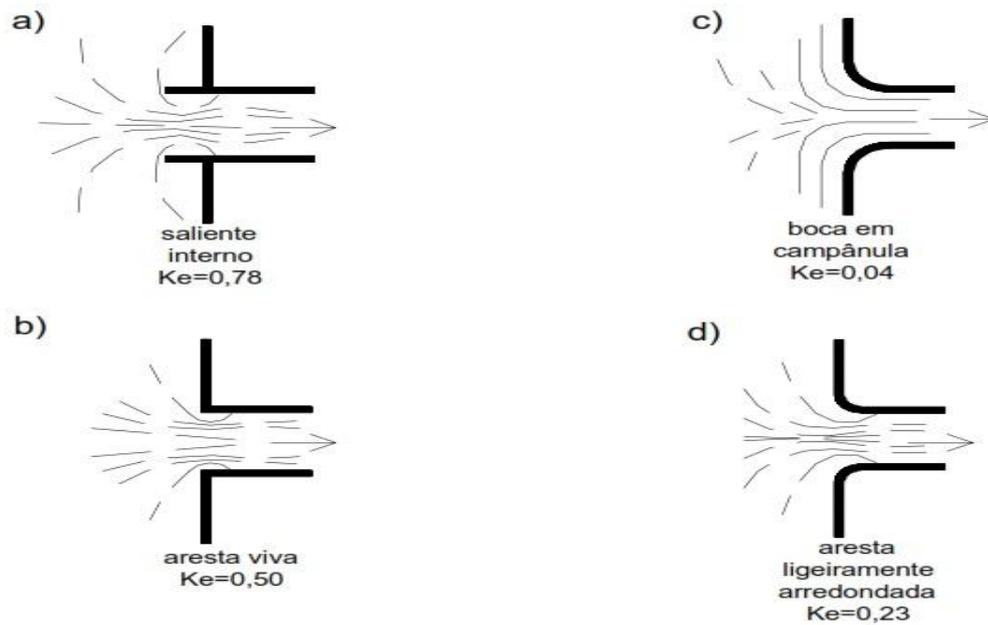
É estabelecida a perda na entrada do conduto por meio da seguinte fórmula:

$$h_c = k_c \frac{V^2}{2g} \quad (34)$$

$V$  velocidade média imediatamente a jusante da entrada (m/s);

$k_e$  coeficiente variável em função da forma da boca do conduto.

Pode-se exemplificar essa perda nos tipos de boca na entrada da tubulação através da figura a seguir:



**Figura 23 – Perda de carga na entrada da tubulação**  
**Fonte: ELETROBRÁS (2000).**

### 2.14.3 Perda por atrito

Para calcular a perda de carga por atrito desprezando as demais é necessário utilizar a fórmula de Scobey:

$$j = 410K_a \frac{V^{1,9}}{D_i^{1,1}} \quad (35)$$

$j$  perda de carga unitária (m/km);

$L_{cf}$  comprimento do conduto;

$K_a$  coeficiente que varia com o tipo de tubulação ( ver tabela a seguir);

$D_i$  diâmetro interno do conduto (cm).

**Tabela 8 – Valores de  $K_a$**

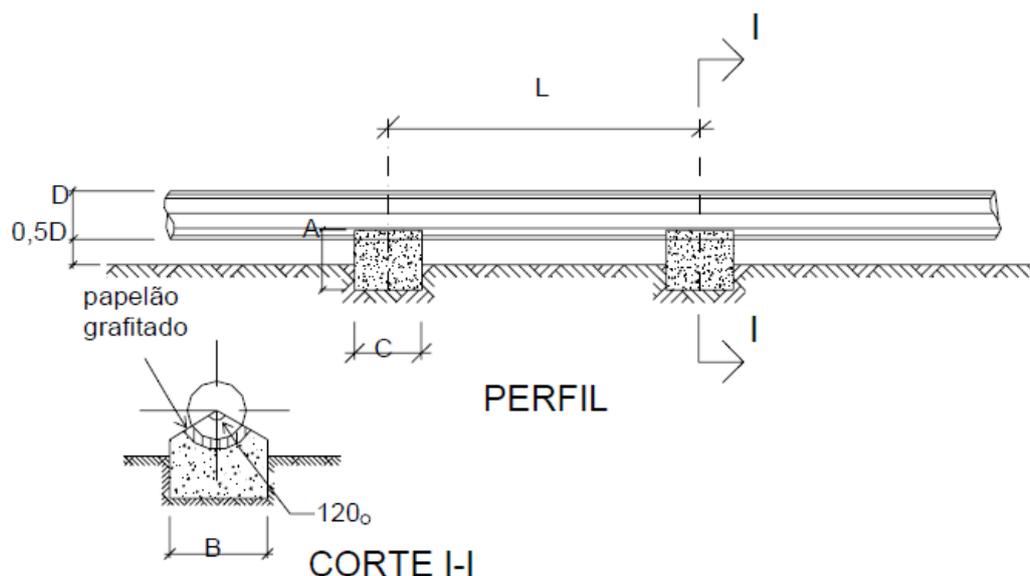
Conduto	$k_a$
Aço	0,32
Cimento-amianto	0,34
Concreto armado	0,38

**Fonte: Eletrobrás (2000).**

## 2.15 BLOCOS DE APOIO

- Tubulações de aço:

Segundo ELETROBRÁS (2000) as tubulações de aço devem ser apoiadas sobre blocos, ou selas, em concreto, conforme figura abaixo:



**Figura 24 – Tubulação de aço apoiadas em blocos ou selas**  
**Fonte: ELETROBRÁS (2000).**

$L \leq 6D \leq 5 \text{ m}$  = espaçamento máximo entre selas;

$A = 1,2 D$  = altura normal da sela (m);

$B = 1,6 D =$  largura normal da sela (m);

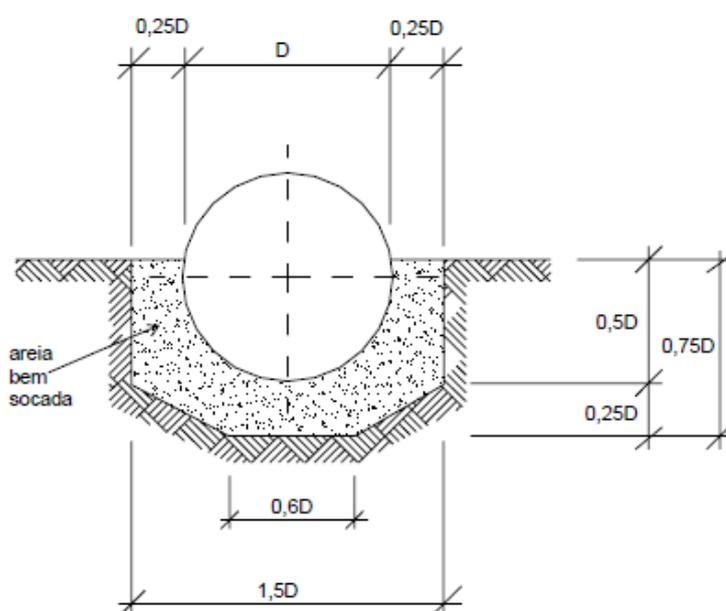
$C = 1,7 D =$  comprimento da sela (m).

Os valores acima são correspondentes para qualquer tipo de terreno, com valor admissível de compressão maior que  $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ , onde são encontradas comumente nos solos de areia grossa compacta e argila dura.

Uma outra alternativa são os “anéis estruturais de aço”, onde são apropriados a uma base de concreto (ELETROBRÁS, 2000, p.122).

- Tubulações de Concreto ou Cimento- Amianto:

Conforme a figura abaixo é possível constatar que as tubulações de concreto poderão ser fixadas diretamente sobre o terreno:



**Figura 25 – Tubulação de Concreto ou Cimento-Amianto**  
**Fonte: Eletrobrás (2000).**

### 2.15.1 Distância entre Blocos:

Segundo SCHREIBER (1977, p.279), a distância entre as faces dos blocos de ancoragem -  $L_{af}$  (m) pode-se considerar a dilatação linear do conduto:

$$L_{af} = \frac{\Delta_a}{\alpha \cdot \Delta_t}$$

(36)

Sendo:

$\Delta_a$  = dilatação permitida pela junta;

$\alpha$  ( $^{\circ}\text{C}$ )<sup>-1</sup> = coeficiente de dilatação linear do conduto  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$  ;

$\Delta_t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) = diferença máxima de temperatura entre parede e conduto.

Dessa forma com a tabela abaixo é permitido verificar vários valores de distância entre blocos de ancoragem.

**Tabela 9 – Distância entre Blocos de Ancoragem**

$\Delta_a$ (cm)	$L_{af}$ (m)		
	20°C	30°C	40°C
1	42	28	21
2	84	56	42
3	125	84	63
4	167	111	84
5	208	139	104

Fonte: Schreiber (1977).

O Manual da ELETROBRÁS/DNAEE apud Schreiber (1977, p.280) delimita a distância máxima entre blocos de ancoragem  $L_{af} = 70 \text{ m}$ .

Recomenda-se em questões de volume, custo e problemas para construção:

$L_{af} < 150 \text{ m}$  – Para condutos forçados

$L_{af} < 300 \text{ m}$  – Para conduto de baixa pressão.

Segundo Schreiber (1977) explica que nos casos que essas distâncias sejam ultrapassadas, é necessário a colocação de um bloco de ancoragem reto, intermediário.

## 2.16 CASA DE MÁQUINAS

A casa de máquinas é a estrutura que abriga as máquinas responsáveis pela geração de energia elétrica. Deve ser levada em consideração sua localização, pois é importante que a cheia do rio não a alcance. ALVES (2007) citando ELETROBRÁS; DNAEE, (1985) diz que a casa de máquinas é uma “edificação que abriga os grupos geradores destinados à produção de energia elétrica, bem como os equipamentos auxiliares necessários ao funcionamento da central hidrelétrica” (ELETROBRÁS; DNAEE, 1985, apud ALVES, 2007, p.44).

Por se tratar de custos faz-se necessário que a casa de máquinas esteja localizada num local onde as condições topográficas do terreno possibilite a otimização da queda útil da usina. Por isso é essencial a análise da posição da casa de máquinas em função da câmara de carga, canal de fuga e distância do consumidor, pois abrange altos custos para a implantação desta.

Alves (2007) explica o que deve ser realizado após a determinação do local da casa de máquinas:

Após determinar seu posicionamento e a posição da turbina e de seu tipo, avalia-se a disposição dos equipamentos eletromecânicos, deixando o espaço necessário ao redor dos equipamentos para futura manutenção, incluindo possível desmontagem. Após estabelecer o espaço físico em planta e em elevação, a próxima etapa é dimensionar o aspecto estrutural, considerando que qualquer sofisticação terá como consequência custos adicional. (ALVES, 2007, p.44).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 TOPOGRAFIA

Tendo em vista as características topográficas da MCH de Rio Branco do Sul, foi possível realizar o estudo de campo de três localizações para câmara de carga e conduto forçado, no intuito de comparar qual das três posições proporcionará melhor viabilidade técnica.

Dessa forma com as três posições definidas serão realizadas os cálculos hidráulicos da câmara de carga e suas respectivas distâncias, alturas, incluindo golpe de aríete.

Nessa mesma ênfase também apresentará os cálculos hidráulicos para conduto forçado abrangendo as três posições explicitando o diâmetro econômico, perdas de cada localização e bloco de apoio.

##### 3.1.1 1ª LOCALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E CONDUTO FORÇADO



Figura 26 – 1ª localização da câmara de carga e conduto forçado já existente da MCH de Rio Branco do Sul  
Fonte: Autoria Própria (2015).

A figura 26 apresenta uma Localização já existente, onde funcionou por vários anos, a câmara de carga encontra-se em cima de um barranco em que constantemente sofre com erosões e deslizamentos, ligada a uma tubulação de baixa pressão ao canal de adução. Seu local é de difícil acesso para construção e manutenção. Dimensões:

- Distância Horizontal: 46,613m;
- Distância Vertical: 18,408m;
- Inclinação: 49,531m;
- $\varnothing = 19,761^\circ$ .

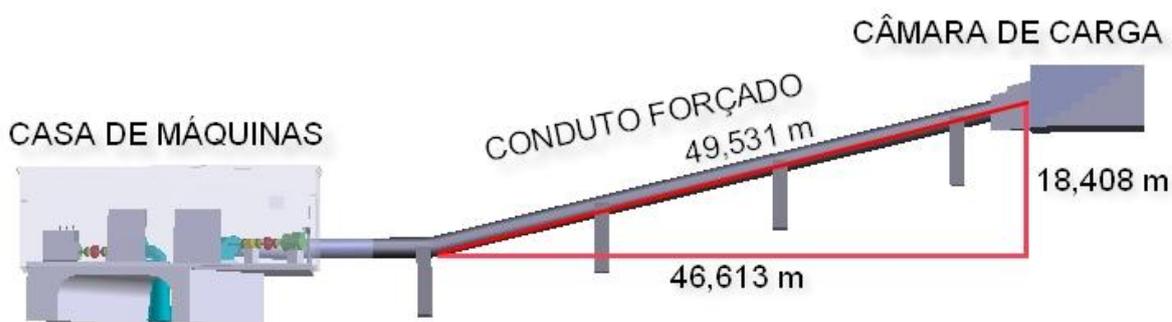


Figura 27 – Representação das medidas feita em campo da 1ª localização  
Fonte: Autoria Própria (2015).

### 3.1.2 2ª LOCALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E CONDUTO FORÇADO



**Figura 28 – 2ª localização da câmara de carga e conduto forçado da MCH de Rio Branco do Sul**  
**Fonte: Aatoria Própria (2015).**

Já na figura 28 encontra-se a câmara de carga no fim do canal de adução, em uma área plana visualmente, de fácil acesso para futura construção e instalação da câmara de carga e conduto forçado, sem a necessidade da tubulação de baixa pressão. Dimensões:

- Distância Horizontal: 27,960m;
- Distância Vertical: 17,551m;
- Inclinação: 33,003m;
- $\varnothing = 29,485^\circ$ .

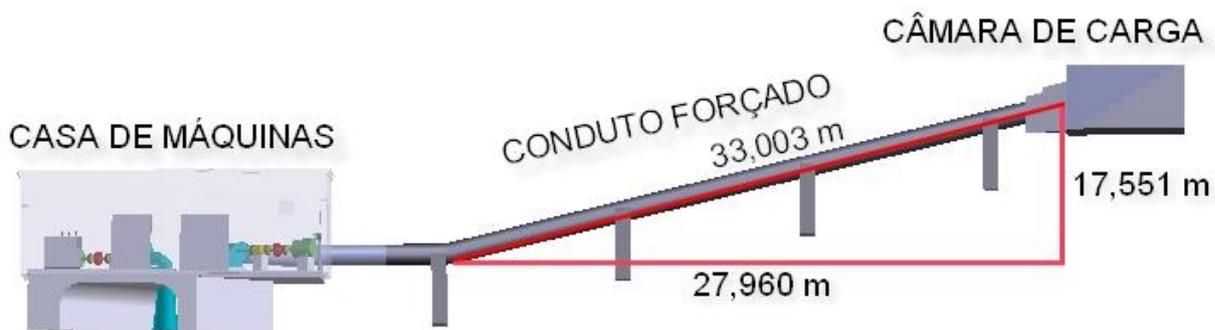


Figura 29 – Representação das medidas feita em campo da 2ª localização  
 Fonte: Autoria Própria (2015).

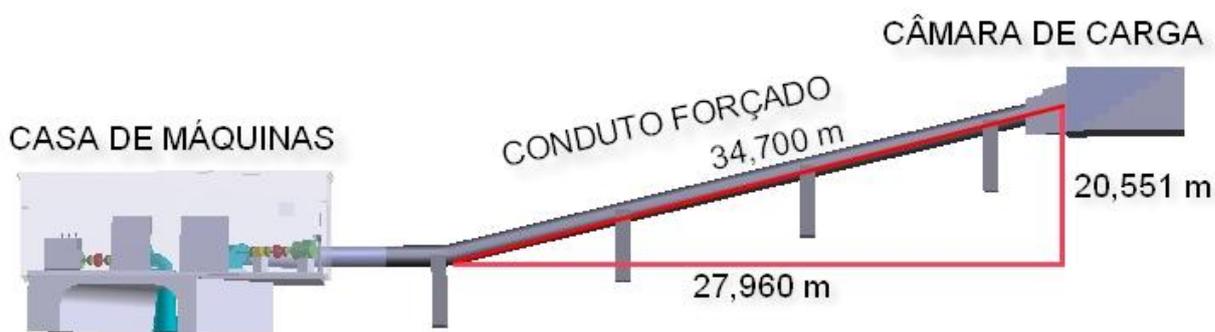
### 3.1.3 3ª LOCALIZAÇÃO DA CÂMARA DE CARGA E CONDUTO FORÇADO



Figura 30 – 3ª localização da câmara de carga e conduto forçado da MCH  
 de Rio Branco do Sul  
 Fonte: Autoria Própria (2015).

A posição da figura 30 encontra-se no mesmo local da figura 27, são as mesmas posições, porém, foi considerado mais 3 m de distância vertical com o rebaixamento do solo na área da casa de máquinas. Assim como a 2ª Localização, é uma área plana, de fácil acesso para futura construção e instalação da câmara de carga. Dimensões:

- Distância Horizontal: 27,960m;
- Distância Vertical: 20,551m;
- Inclinação: 34,700m;
- $\varnothing = 36,316^\circ$ .



**Figura 31 – Representação das medidas feita em campo da 3ª localização**  
**Fonte: Autoria Própria (2015).**

### 3.2 VAZÃO DA MCH DE RIO BRANCO DO SUL

Um trabalho inicial foi desenvolvido por SILVA, JUNIOR e ORTEGA (2014) onde efetuaram as medições da vazão da MCH de Rio Branco do Sul pelo método do vertedor retangular, trapezoidal e triangular, que apresenta erros de até 3% para a medição da vazão. Como a MCH de Rio Branco do Sul está desativada há mais de cinquenta anos, informações sobre dados hidrométricos (cotas, vazão, chuva,

evaporação, perfil do rio, qualidade da água e sedimentos) não foram inserido no sistema ANA - Agência Nacional de Águas (2014).

Em decorrência da necessidade dessas informações e a indisponibilidade no site da Agência Nacional de Águas (ANA), para o alcance da série histórica de vazões da MCH de Rio Branco do Sul foi necessário à transposição de vazões, ou seja, obteve-se a relação entre a vazão em um curso d' água com série conhecida. Tal procedimento somente foi possível pelo fato de ambos cursos d' água estarem em uma mesma bacia hidrográfica (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p 100).

Para essa referida transposição de vazões foi utilizada os dados do reservatório da Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza (Usina GPS), localizado no Rio Capivari.

Com as medições da vazão e a transposição da vazão do Rio Capivari, obtiveram os valores de vazão na tabela abaixo:

**Tabela 10 – Vazão do Rio Rancharia**

Condição da Vazão	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
Mínimo	0,0760
Médio	0,1315
Máximo	0,4378
Firme 78%	0,1638
Firme 90%	0,2067

**Fonte: Silva, Junior e Ortega (2014).**

Medições realizadas entre o período de 15/05/2014 a 18/08/2014. Segundo o laudo aprovado pelo Instituto de Águas do Paraná (2014) a vazão média é de 0,19091 m<sup>3</sup>/s e pelos resultados obtidos pelo método do vertedor chegou-se a uma vazão média de 0,13155 m<sup>3</sup>/s. De acordo com SILVA, JUNIOR e ORTEGA (2014 p 90), o desvio relativo máximo da vazão apresentado no trabalho foi de apenas 0,17356%.

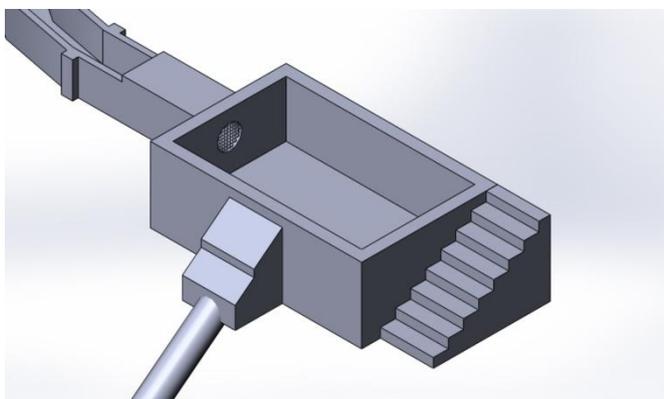
### 3.3 CÂMARA DE CARGA

Um dos objetivos do trabalho é a revitalização da câmara de carga e não a construção de uma nova câmara. Assim os cálculos referentes o seu dimensionamento não foram efetuado, tendo em vista que vamos usar as mesmas

dimensões como comprimento (5m), largura (2,4m) e altura (1,9m). A câmara de carga tem várias aplicações, dentre elas manter o regime contínuo na alimentação da turbina do gerador e diminuir o impacto do fenômeno golpe de aríete.

O dimensionamento do volume da câmara de carga é de importante valia devida a capacidade de fornecer água para a turbina por no mínimo 60s, suprindo assim a ocorrência de uma partida bruta, e dissipar as ondas de choque da tubulação quando ocorre a parada brusca e o golpe de aríete. Outro fator imprescindível é construir a câmara de carga em que seu nível seja 0.3m acima do nível do reservatório.

A figura 32 reproduz a câmara de carga da MCH de Rio Branco do Sul.



**Figura 32 – Desenho em 3D da câmara de carga  
Fonte: Autoria Própria (2015).**

### 3.3.1 Golpe de Aríete

Ao fenômeno de variação da pressão  $\Delta H+$  ou  $\Delta H-$  que resultam, seja de manobras de fechamento, abertura de um registro, manobras de partida ou de parada de uma bomba, dá-se o nome de “golpe de aríete”.

#### 3.3.1.1 Aspectos Conceituais

Celeridade (c): refere-se à velocidade com que a onda de pressão se desloca em uma tubulação. A velocidade de propagação da onda pode ser calculada através da fórmula de Allievi, em que:

$$c = \frac{9900}{48,3 + k \times \frac{D}{e}} \frac{m}{s} \quad (37)$$

Onde:

c: celeridade da onda de pressão (m/s);

D: diâmetro da tubulação (m);

e: espessura da tubulação (m);

k: coeficiente que leva em consideração o módulo de elasticidade do material.

**Tabela 11 - Valores do coeficiente k em função do material**

Material da Tubulação	Valor de k
Aço	0,5
Ferro Fundido	1,0
Concreto	5,0
Cimento-amianto	4,4
PCV	18,0
Madeira	5,0

Fonte: Gomes (1999).

$$T = \frac{2L}{c} \quad (38)$$

Onde:

L: comprimento da tubulação (m);

T: intervalo de tempo em (s);

c: celeridade da onda de pressão (m/s).

### 3.3.1.2 Duração da Manobra de Fechamento.

O tempo de fechamento do registro (RG) pode ser maior, igual ou menor que o tempo T, que é igual ao período da tubulação. Chamando de t, o tempo de fechamento de RG, as manobras podem ser classificadas em:

Manobra rápida: quando  $t < T = 2L/C$ ., isto é, o tempo de fechamento é menor que o período da tubulação;

Manobra lenta: quando  $t > T = 2L/C$ ., isto é, o tempo de fechamento do RG é maior que o período do conduto elástico.

Cálculo do tempo ( $\Delta t$ ) de parada do escoamento, conforme Mendiluce. O valor do tempo  $\Delta t$  é obtido através de fórmulas experimentais ou empíricas. Uma das fórmulas mais usadas é a fórmula empírica de Mendiluce:

$$\Delta t = 1 + \frac{K \times L \times V}{g \times H_{man}} \quad (39)$$

sendo:

L : Comprimento do conduto em m;

V : Velocidade do escoamento permanente em m/s;

H<sub>m</sub> : Altura manométrica da bomba, em m.c.a.;

K : Um coeficiente, tal que:

K = 2, quando L < 500m;

K = 1,5, quando 500 < L < 1500m;

K = 1,0, quando L > 1500m.

Escolha da fórmula a ser adotada fica na dependência do cálculo de  $\frac{\Delta t \cdot c}{2}$  e L.

Quando:  $L < \frac{\Delta t \cdot c}{2}$  escolhe a formula de Michaud, tubulações curtas.

Michaud:

$$\Delta H_1 = \frac{2 \times L \times V}{g \times \Delta t} \quad (40)$$

sendo:

L: comprimento do conduto em m;

V: velocidade do escoamento permanente em m/s;

$\Delta t$ : parada do escoamento;

g: aceleração gravitacional.

Quando:  $L > \frac{\Delta t \cdot c}{2}$  , escolhe a formula de Allievi, tubulações longas.

Allievi:

$$\Delta H_2 = \frac{c \times V}{g} \quad (41)$$

sendo:

L: comprimento do conduto em m;

V: velocidade do escoamento permanente em m/s;

g: aceleração gravitacional.

### 3.3.1.3 Cálculos do Golpe de Aríete

Utiliza-se a equação 37:

$$c = \frac{9900}{48,3 + 18 \times \frac{.429}{0,0172}}$$

$$c = 443,96 \text{ m/s}$$

Resolve-se a equação 39:

$$\Delta t = 1 + \frac{2 \times 49,551 \times 3,48}{9,81 \times 18,408}$$

$$\Delta t = 2,91 \text{ s}$$

Em seguida a equação 38:

$$T = \frac{2 \times 49,551}{443,96}$$

$$T = 0,223 \text{ s}$$

$$\frac{\Delta t * c}{2}$$

$$\frac{9,21 \times 443,96}{2} = 646,40$$

Como  $L < \frac{\Delta t * c}{2}$  adota-se a fórmula de Michaud:

$$\Delta H1 = \frac{2 \times L \times V}{g \times \Delta t}$$

$$\Delta H1 = \frac{2 \times 49,551 \times V}{9,81 \times 2,91}$$

$$\Delta H1 = 12,085 \text{ m}$$

Pressão máxima = 30,49 m

Pressão mínima = 6,32 m

### 3.4 CONDUTO FORÇADO

A situação atual em que se encontra o conduto forçado é de completa deterioração. As tubulações estão completamente oxidadas e flambadas, sendo assim impossível a utilização dos condutos forçados. O diâmetro nominal do conduto medido é de 500 mm, feito de aço em toda sua extensão, não foi possível identificar os apoios utilizados, pois esses se encontravam quebrados. Será necessário revitalizar o conduto forçado e os blocos de apoio.



**Figura 33 – Conduto forçado de Rio Branco do Sul**  
**Fonte: Aatoria Própria (2015).**

### 3.4.1 Diâmetro econômico – Método Gráfico

O método do gráfico estima qual seria o melhor diâmetro, em relação ao custo de instalação, manutenção, vazão e tipo de material utilizado.

Os parâmetros utilizados para o cálculo do diâmetro econômico do trecho unitário estão apresentados na tabela 12. Entende-se como trecho unitário aquele que inicia na tomada d'água, chega até a câmara de carga e desta até o patamar da casa de máquinas.

Na tabela estão presentes as possíveis posições que podem ser utilizadas para instalação do conduto forçado, 1ª Localização, 2ª Localização e 3ª Localização.

Para os cálculos do diâmetro econômico foi levado em consideração três posições diferentes e três tipos de materiais, PVC, Aço e Concreto.

**Tabela 12 – Dados de entrada para o programa de cálculo do diâmetro econômico PVC**

Dados	Valores		
	1ª Localização	2ª Localização	3ª Localização
Q	0,4378 m <sup>3</sup> /s	0,4378 m <sup>3</sup> /s	0,4378 m <sup>3</sup> /s
Hb	18,408 m	17,551 m	20,551 m
g	9,81 m/s <sup>2</sup>	9,81 m/s <sup>2</sup>	9,81 m/s <sup>2</sup>
ε	0,00006 m	0,00006 m	0,00006 m
η <sub>t</sub>	90 %	90 %	90 %
η <sub>g</sub>	87,1%	87,1%	87,1%
η <sub>cx.eng</sub>	96 %	96 %	96 %
η <sub>tranf.</sub>	99 %	99 %	99 %
F <sub>cap</sub>	0,6	0,6	0,6
F <sub>disp</sub>	0,7	0,7	0,7
T <sub>ma</sub>	10%	10%	10%
n	30 Anos	30 Anos	30 Anos
Valor Energia	237,01 R\$/MW	237,01 R\$/MW	237,01 R\$/MW
<b>Cu.PVC</b>	<b>3,25 R\$/kg</b>	<b>3,25 R\$/kg</b>	<b>3,25 R\$/kg</b>

Fonte: Aatoria própria (2015).

O diâmetro econômico calculado para o trecho unitário é de 575 mm conforme mostra o gráfico 3.

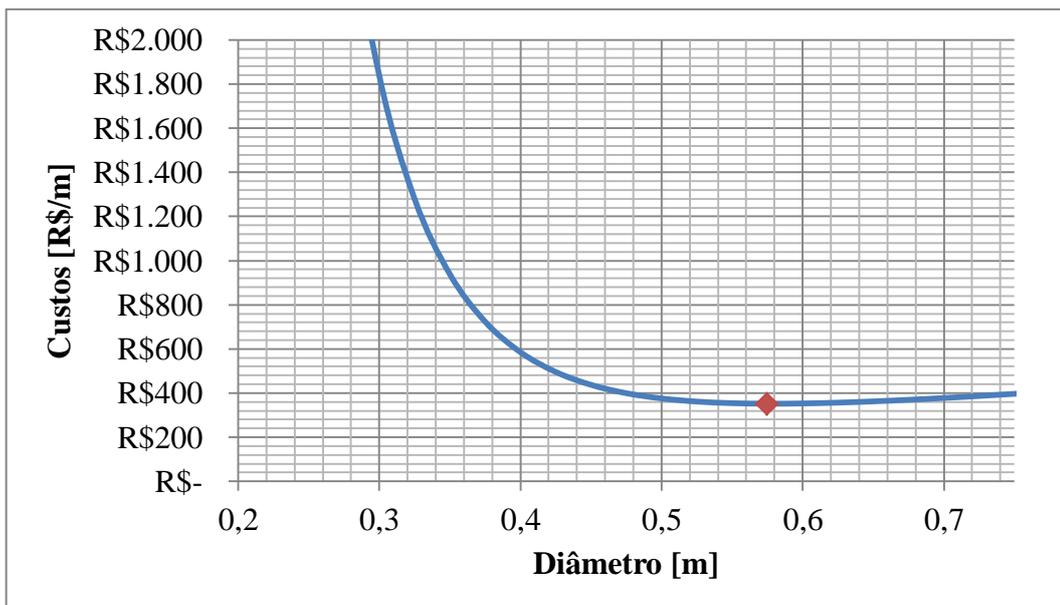


Gráfico 3 – Diâmetro econômico material PVC

Fonte: Autoria própria.

Cálculo do diâmetro utilizando aço como material.

Tabela 13 – Dados de entrada para o programa de cálculo do diâmetro econômico Aço

Dados	Valores		
	1ª Localização	2ª Localização	3ª Localização
Q	0,4378 m <sup>3</sup> /s	0,4378 m <sup>3</sup> /s	0,4378 m <sup>3</sup> /s
Hb	18,408 m	17,551 m	20,551 m
g	9,81 m/s <sup>2</sup>	9,81 m/s <sup>2</sup>	9,81 m/s <sup>2</sup>
ε	0,000015 m	0,000015 m	0,000015 m
η <sub>t</sub>	90 %	90 %	90 %
η <sub>g</sub>	87,1%	87,1%	87,1%
η <sub>cx.eng</sub>	96 %	96 %	96 %
η <sub>tranf.</sub>	99 %	99 %	99 %
F <sub>cap</sub>	0,6	0,6	0,6
F <sub>disp</sub>	0,7	0,7	0,7
T <sub>ma</sub>	10%	10%	10%
n	30 Anos	30 Anos	30 Anos
Valor Energia	237,01 R\$/MW	237,01 R\$/MW	237,01 R\$/MW
<b>Cu.Aço</b>	<b>14,00 R\$/kg</b>	<b>14,00 R\$/kg</b>	<b>14,00 R\$/kg</b>

Fonte: Autoria própria (2015).

O diâmetro econômico calculado para o trecho unitário é de 450 mm conforme mostra o gráfico 4.

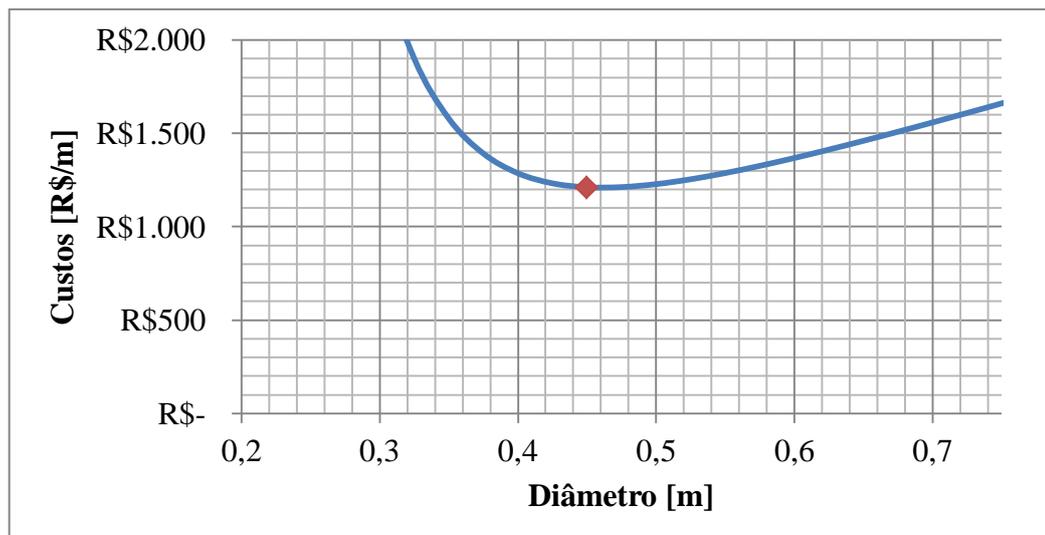


Gráfico 4 – Diâmetro econômico material aço  
Fonte: Autoria própria (2015).

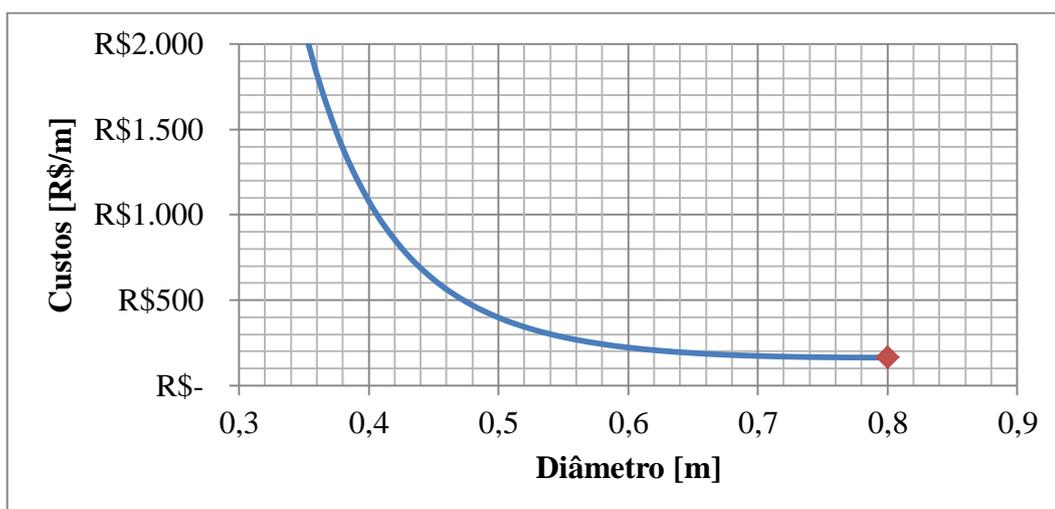
Cálculo do diâmetro utilizando concreto como material.

Tabela 14 – Dados de entrada para o programa de cálculo do diâmetro econômico concreto

Dados	Valores		
	1ª Localização	2ª Localização	3ª Localização
Q	0,4378 m <sup>3</sup> /s	0,4378 m <sup>3</sup> /s	0,4378 m <sup>3</sup> /s
Hb	18,408 m	17,551 m	20,551 m
g	9,81 m/s <sup>2</sup>	9,81 m/s <sup>2</sup>	9,81 m/s <sup>2</sup>
ε	0,001 m	0,001 m	0,001 m
η <sub>t</sub>	90 %	90 %	90 %
η <sub>g</sub>	87,1%	87,1%	87,1%
η <sub>cx.eng</sub>	96 %	96 %	96 %
η <sub>tranf.</sub>	99 %	99 %	99 %
F <sub>cap</sub>	0,6	0,6	0,6
F <sub>disp</sub>	0,7	0,7	0,7
T <sub>ma</sub>	10%	10%	10%
n	30 Anos	30 Anos	30 Anos
Valor Energia	237,01 R\$/MW	237,01 R\$/MW	237,01 R\$/MW
<b>Cu.Concreto</b>	<b>1,10 R\$/kg</b>	<b>1,10 R\$/kg</b>	<b>1,10 R\$/kg</b>

Fonte: Autoria própria (2015).

O diâmetro econômico calculado para o trecho unitário é de 800 mm conforme mostra o gráfico 5.



**Gráfico 5 – Diâmetro econômico material concreto**

Fonte: Autoria própria (2015).

Nessa fase dos estudos não foi levado em conta o custo bloco de apoio para sustentação do conduto, pois os mesmos não existem no local e será necessário um estudo para viabilizar a construção dos blocos de apoio.

A partir dos resultados foi possível montar uma tabela com os respectivos valores dos diâmetros econômicos e seus materiais.

**Tabela 15 – Tabela com cálculos De, (Diâmetro econômico) mm.**

Dados	Valores		
	PVC	AÇO	CONCRETO
De	575 mm	450 mm	800 mm
Q	0,4378 m <sup>3</sup> /s	0,4378 m <sup>3</sup> /s	0,4378 m <sup>3</sup> /s
V	1,68 m/s	2,75 m/s	0,87 m/s
<b>Custo min</b>	<b>351,9 R\$</b>	<b>1211,6 R\$</b>	<b>164,2 R\$ m<sup>3</sup></b>

Fonte: Autoria própria (2015).

De acordo com a tabela levando em consideração a velocidade e diâmetro do conduto, a melhor opção seria o aço. Contra posto esses fatores, têm o valor alto e a dificuldade do layout, de difícil acesso para instalação e manutenção das tubulações.

Para outro método de dimensionamento do conduto forçado, será utilizado o método indicado pelas Diretrizes para Projeto de PCH (ELETROBRÁS, 2015). Tal dimensionamento é realizado com o diâmetro econômico que, teoricamente, proporciona a maior relação custo-benefício.

### 3.4.2 Diâmetro econômico – Método Eletrobrás

A determinação do diâmetro econômico do conduto forçado é calculada pela equação 42, de Bondschu:

$$D_e = 127 \cdot \sqrt[7]{Q^3 Hb} \quad (42)$$

Sendo:

$D_e$  = diâmetro econômico, em cm;

$Q$  = descarga máxima na tubulação, em m<sup>3</sup>/s;

$H$  = queda bruta, em m.

**Tabela 16 – Tabela com cálculos  $D_e$ , (Diâmetro econômico) mm.**

Dados	Valores		
	1ª Localização	2ª Localização	3ª Localização
$D_e$	587,9 mm	591,9 mm	597,3 mm
$Q$	0,4378 m <sup>3</sup> /s	0,4378 m <sup>3</sup> /s	0,4378 m <sup>3</sup> /s
$V$	1,16 m/s	1,59 m/s	1,562 m/s
$H_b$	18,408 m	17,551 m	20,551 m

Fonte: Autoria própria (2015).

Segundo GOMES (1999), a grande vantagem do PVC é seu baixo peso que torna menor seu custo de transporte e instalação. Outra vantagem é sua resistência a corrosão, sua resistência ao ataque químico de águas impuras e a baixa rugosidade das paredes do tubo. GOMES (1999) cita como desvantagens a resistência mecânica dos tubos, que diminui com o tempo e com o aumento da temperatura. A vida útil dos tubos diminuem para aqueles que são instalados sobre o terreno e expostos ao sol, quando comparados com os que são instalados enterrados, sem contar com certa facilidade de rompimento dos engastes rápidos das tubulações portáteis.

Por meio da equação da continuidade, sabe-se que no transporte de uma determinada vazão ( $Q$ ) por uma tubulação, que quanto maior for a velocidade do fluxo, menor será o diâmetro necessário do tubo, e conseqüentemente, uma tubulação com custo baixo. Entretanto, ao aumentar a velocidade de circulação da

água, pode ocorrer maior perda de carga e as tubulações poderão ser danificadas pelos golpes de aríete, haverá maiores desgastes nos tubos e nas peças.

Para AZEVEDO NETO (1998), a velocidade máxima da água nos encanamentos depende dos determinados fatores: condições econômicas, limitação da perda de carga, condições relacionadas ao bom funcionamento dos sistemas, controle da corrosão, ruídos desagradáveis e desgaste das tubulações.

Os limites de velocidade máxima vêm sendo extrapolados por diversos pesquisadores. Cada um apresentando valores máximos próprios, entretanto, o mais utilizado são os valores dos dados a seguir.

**Tabela 17 – Velocidade máxima para dimensionamento.**

Material do tubo	Velocidade máxima (m/s)
Plásticos	4,5
Ferro fundido	4,0 a 6,0
Cimento amianto	4,5 a 5,0
Aço	6,0
Concreto	4,5 a 5,0

**Fonte: Melo (1996).**

Os valores da velocidade média, segundo ÁVILA (1975) são mostrados na tabela 18.

**Tabela 18 - Velocidade média econômica para tubulações.**

Tipo de tubo	Velocidade (m/s)
Tubulação de sucção em bombas	0,5 a 1,0
Tubo de descarga em bombas	1,5 a 2,0
Redes de distribuição para água potável	
Tubulação principal	1,0 a 2,0
Tubulação lateral	0,5 a 0,7
Tubos de grandes diâmetros	1,5 a 3,0
Tubulações em usinas hidrelétricas	
Inclinação e diâmetros pequenos	2,0 a 4,0
Inclinação e diâmetros grandes	3,6 a 8,0
Horizontais e grandes extensões	1,0 a 3,0

**Fonte: Ávila (1975).**

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

**Tabela 19 – Tabela com cálculos De, (Diâmetro econômico) mm.**

Material	De mm	Q m <sup>3</sup> /s	V m/s
PVC	400 mm	0,4378 m <sup>3</sup> /s	3,484 m/s

Fonte: Autoria própria (2015).

Os valores apresentados estão em conformidades segundo os cálculos e tabelas de especificações de velocidade.

O valor de 400 mm foi utilizado devido o fácil acesso do diâmetro no mercado, visando facilitar a manutenção das tubulações e por não extrapolar os limites de velocidades admissíveis nos condutos segundo as tabelas 18 e 19.

### 3.4.3 Memorial de Cálculos do Conduto Forçado

A seguir serão demonstrados os cálculos realizados para o dimensionamento do conduto forçado com múltiplas saídas, à realização dos cálculos foi de acordo com a norma da ABNT NBR 10132 - Cálculos de Condutos Forçados, e os livros de resistências dos materiais de Beer, Johnston Jr., DeWolf e Hibbeler.

#### 3.4.3.1 Dados técnicos

Diâmetro interno  $\rightarrow D_i = 400$  mm;

Material do conduto  $\rightarrow$  PVC;

Tensão de escoamento  $\rightarrow \sigma_e = 44,8$  Mpa;

Tensão de ruptura  $\sigma_r = 51,7$  Mpa;

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

Densidade da água  $\rho_a = 1000$  kgf/m<sup>3</sup>;

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

Queda bruta  $\Delta H$ ;

1ª Localização = 18,408 m;

2ª Localização = 17,551 m;

3ª Localização = 20,551 m;

Comprimento do conduto  $c$ ;

1ª Localização = 49,531 m;

2ª Localização = 33,003 m;

3ª Localização = 34,700 m;

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

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

Altura da tomada d'água  $\rightarrow h = 0,95 \text{ m}$ ;

Velocidade de escoamento da água  $\rightarrow V$ ;

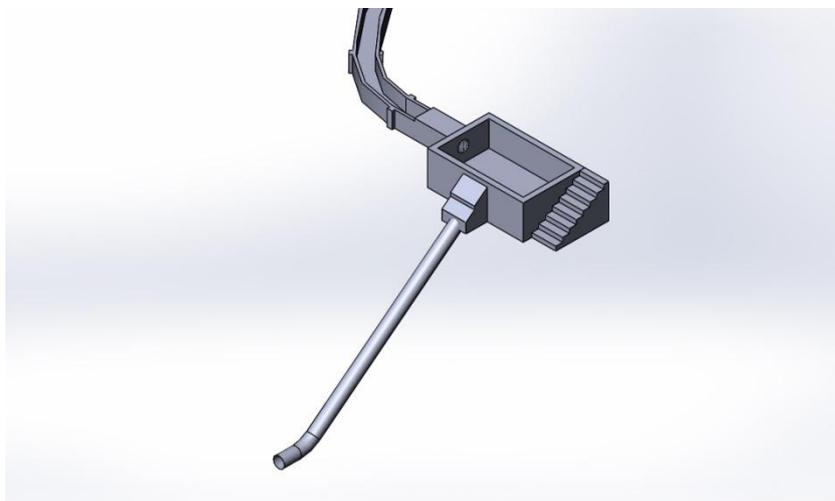
Área da secção do conduto  $\rightarrow A$ ;

Peso específico da água  $\rightarrow \rho$ ;

Pressão da água na tomada d'água  $\rightarrow Z$ ;

Tensão devido à pressão  $\rightarrow \gamma$ .

A figura 31 mostra o desenho projetado pelo *software SolidWorks* em 3D para o conduto forçado, a unidade de medida utilizada nos desenhos foi milímetro:



**Figura 34 – Desenho em 3D do conduto forçado**  
Fonte: Autoria Própria (2015).

### 3.4.3.2 Pressão Estática Máxima

A partir da equação 43, é possível encontrar a pressão estática máxima que o conduto suporta:

$$P = \rho a \times g \times h \text{ Pa} \quad (43)$$

$$P = 1000 \times 9,812 \times 0,95 \text{ Pa}$$

$$P = 9321,4 \text{ Pa}$$

Como 1mca (metros de coluna d'água) equivale a 10000Pa, a pressão estática pode ser expressa desta maneira:

$$P = 0,9321 \text{ mca}$$

### 3.4.3.3 Pressão Dinâmica Máxima

Para encontrar a pressão dinâmica máxima, expressa na equação 46, é necessário encontrar a área da secção do conduto e a velocidade de escoamento da água com as equações 44 e 45.

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} m^2 \quad (44)$$

$$A = \frac{\pi \times 0,400^2}{4},$$

$$A = 0,125664 m^2$$

$$Q = V \times A \frac{m^3}{s}$$

$$V = \frac{Q \text{ m}}{A \text{ s}} \quad (45)$$

$$V = \frac{0,4378}{0,125666},$$

$$V = 3,48 \frac{m}{s}$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \times \rho a \times V^2 \frac{kg}{m^2} \quad (46)$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \times 1000 \times 3,48^2 ,$$

$$\Delta p = 6068,78 \text{ Pa}$$

#### 3.4.3.4 Pressão Total

Para encontrar a pressão total, expressa na equação 47, deve-se somar a pressão dinâmica máxima com a pressão exercida na tomada d'água.

$$P = \frac{1}{2} \times \rho a \times V^2 + \gamma \times Z \frac{kg}{ms^2} \quad (47)$$

$$P = \frac{1}{2} \times 1000 \times 3,48^2 + 1000 \times 9,812 \times 0,95$$

$$P = 15388,29 \frac{kg}{ms^2}$$

$$P = 15388,29 \text{ Pa}$$

#### 3.4.3.5 Tensão Devido à Pressão

Para encontrar a tensão total ou combinada equação 50, é preciso calcular a tensão circunferencial equação 48 e a tensão longitudinal equação 49, encontrando as tensões é possível calcular o coeficiente de segurança para os condutos forçados equação 51.

Para calcular as tensões devido à pressão circunferencial e longitudinal é preciso multiplicar a pressão total pelo raio do conduto, divididos pela espessura do material do conduto.

Tensão Devido à Pressão Circunferencial:

$$\sigma_{circ} = \frac{P \times r}{t} \frac{kg}{ms^2} \quad (48)$$

$$\sigma_{circ} = \frac{15388,29 \times 0,200}{0,0172},$$

$$\sigma_{circ} = 178,955 \frac{kg}{ms^2}$$

$$\sigma_{circ} = 17833,6 \text{ Pa}$$

Tensão Devido à Pressão Longitudinal:

$$\sigma_{long} = \frac{P \times r}{2t} \frac{kg}{ms^2} \quad (49)$$

$$\sigma_{long} = \frac{15388,29 \times 0,200}{2 \times 0,0172},$$

$$\sigma_{long} = 89466,78 \frac{kg}{ms^2}$$

$$\sigma_{long} = 89466,78 \text{ Pa}$$

Tensão Devido à Pressão Combinada:

$$\sigma_{comb} = \sqrt{(\sigma_{long}^2 \times \sigma_{circ}^2 - (\sigma_{long} \times \sigma_{circ}))} \frac{kg}{ms^2} \quad (50)$$

$$\sigma_{comb} = \sqrt{(89466,78^2 \times 17833,6^2 - (89466,78 \times 17833,6))}$$

$$\sigma_{comb} = 16 \text{ MPa}$$

Coefficiente de Segurança:

$$Sg = \frac{\sigma_e}{\sigma_{circ}} \quad (51)$$

$$Sg = \frac{44,8}{0,178933},$$

$$Sg = 250,03414$$

De acordo com a norma da ABNT NBR 10132, o coeficiente de segurança para condutos ao ar livre, deve ser maior que 1,7. Sendo que todas as pressões exercidas sobre o conduto estão acima deste valor.

### 3.5 BLOCO DE APOIO

#### 3.5.1 Bloco de Apoio – *software* FTOOL

O bloco de apoio ou sela é a estrutura de concreto onde o conduto se apoia simplesmente, sendo permitido o seu deslizamento sobre o mesmo (ELETROBRÁS, 2000).

Para dimensionar as distâncias dos blocos de apoio, de acordo com os métodos, foi realizado a análise computacional através do *software* FTOOL, utilizado para análise de estruturas em engenharia civil, AFLON (Catálogo Técnico) e por final ELETROBRÁS.

#### 3.5.2 Peso do conduto e Peso da Água

Para determinação das cargas atuantes sobre o conduto, é necessário calcular o peso do conduto e o peso da água. Para encontrar o peso do conduto se multiplica o diâmetro externo do conduto, pela densidade do material PVC e pela espessura.

$$P_c = \pi \times D_e \times d_c \times e_{min} \frac{kg}{m} \quad (52)$$

$$P_c = \pi \times 0,429 \times 1400 \times 0,0172,$$

$$P_c = 32,45 \frac{kg}{m}$$

$$P_a = A_{int} \times \rho_a \frac{kg}{m} \quad (53)$$

$$P_a = 0,125668 \times 1000,$$

$$P_a = 125,6637 \frac{kg}{m}$$

$$P_t = P_c + P_a \frac{kg}{m} \quad (54)$$

$$P_t = 32,45 + 125,66, P_t = 158,1174 \frac{kg}{m}$$

$$P_t = 1,581174 \frac{kN}{m}$$

### 3.5.3 Cálculo das Tensões Devido aos Pesos do Conduto e da Água

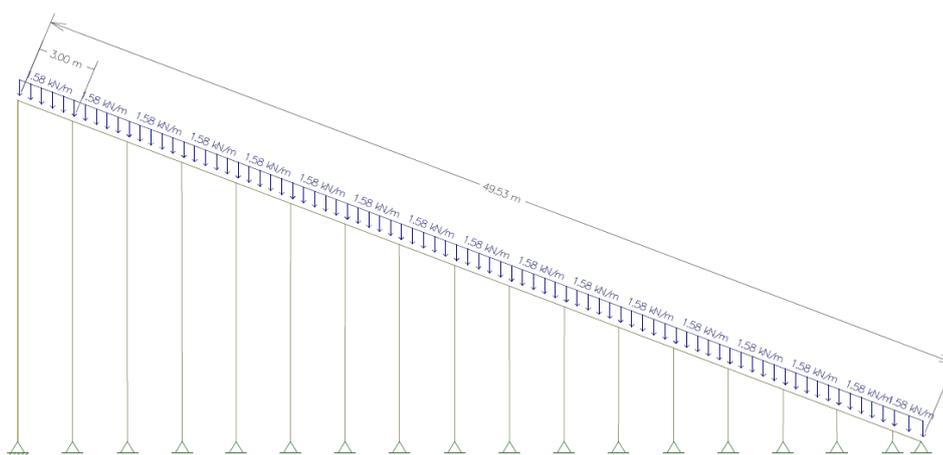
Calculado os pesos do conduto e da água, é possível encontrar as cargas atuantes sobre o conduto através do *software* FTOOL, que fornece os esforços cortantes e os momentos fletores. Na figura 35 são demonstradas as cargas atuantes sobre o conduto depois de distribuídos os blocos de apoio, foram colocados apoios, um a cada 3 m. Nas figuras a seguir, é possível a verificar os esforços cortantes, os momentos fletores e deformação do material sofrido devido às forças atuantes, das três localizações calculados pelo *software* FTOOL.

**Tabela 20 – Medidas dos condutos forçados.**

Dados	1ª Localização	2ª Localização	3ª Localização
Distância Vertical	18,408 m	17,551 m	20,551 m
Distância Horizontal	46,612 m	27,950 m	27,950 m
Distância Inclinada	49,531 m	33,003 m	36,316 m

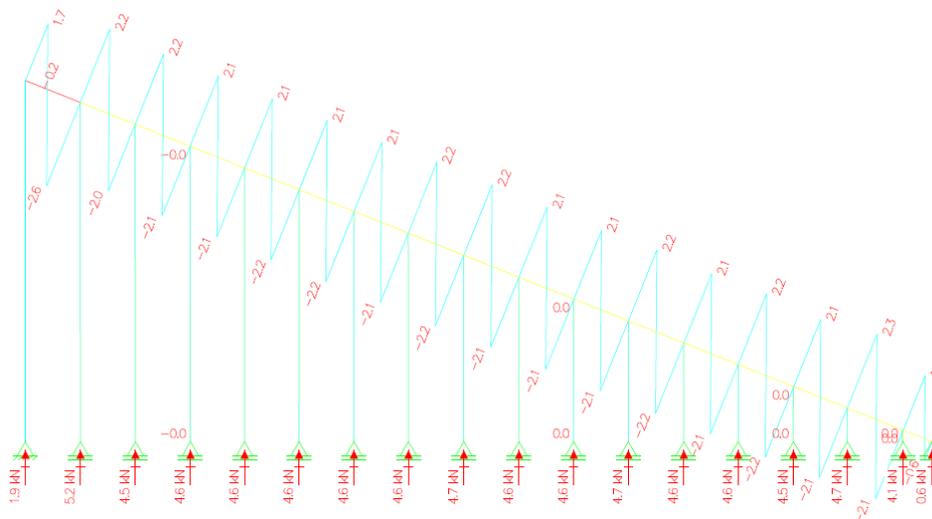
Fonte: Autoria própria (2015).

#### 3.5.3.1 Cálculo das Tensões da 1ª Localização

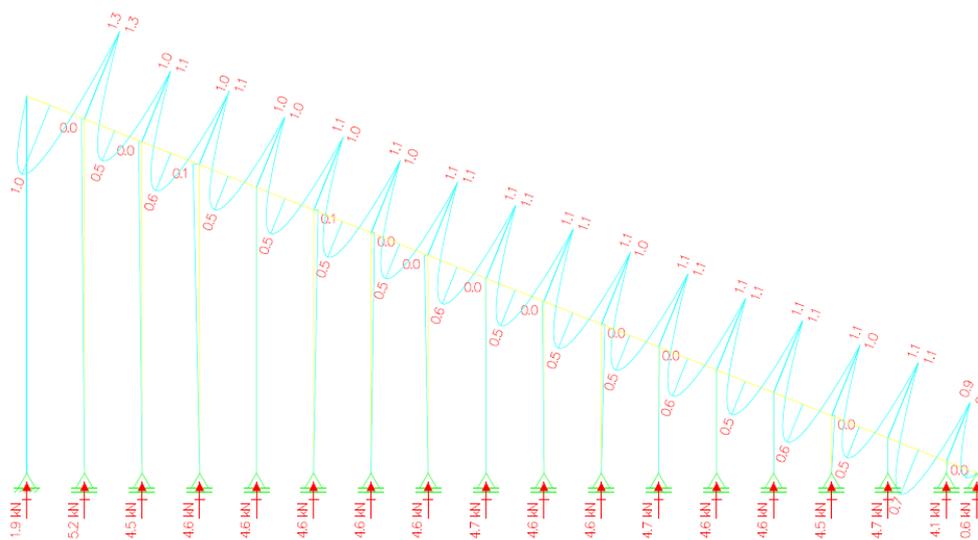


**Figura 35 – 1ª Localização com cargas atuantes.**

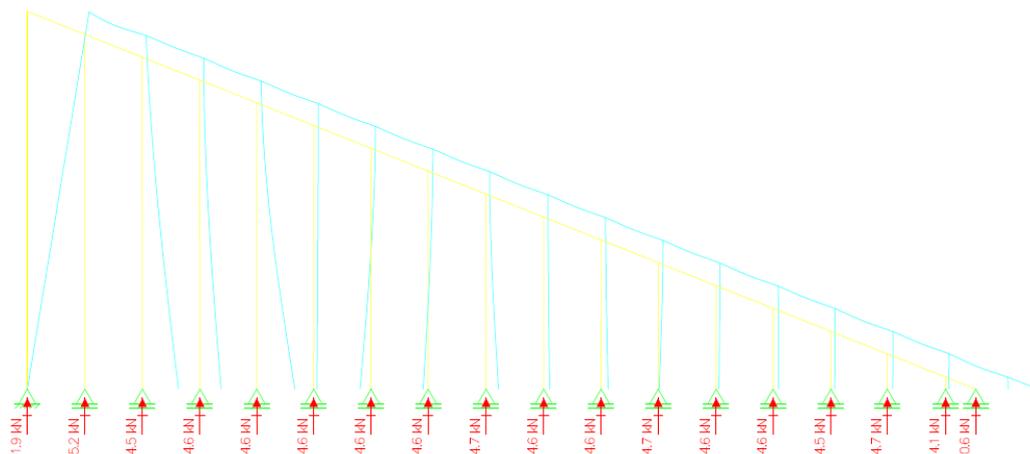
Fonte: Autoria Própria (2015).



**Figura 36 – 1ª Localização com esforços cortantes.**  
**Fonte: Autoria Própria (2015).**

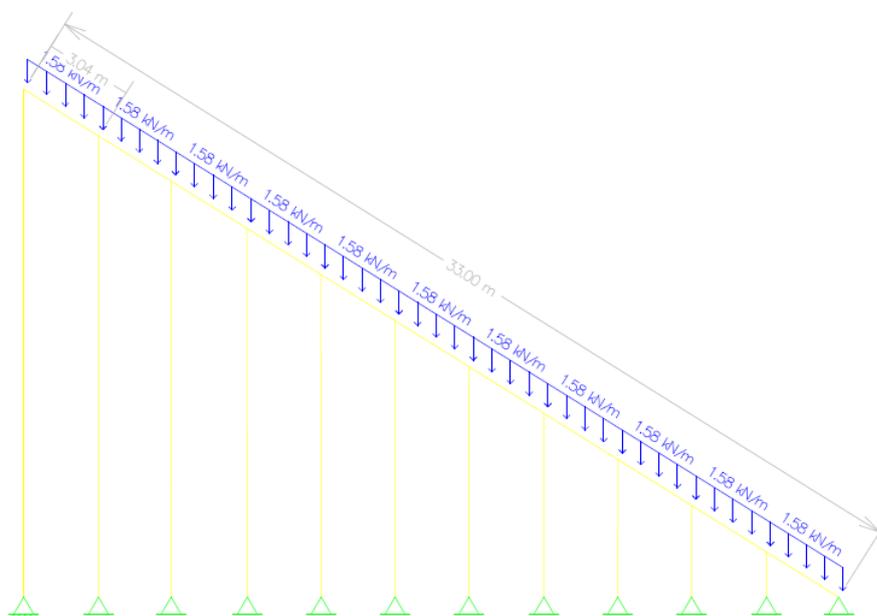


**Figura 37 – 1ª Localização com momento fletor.**  
**Fonte: Autoria própria (2015).**



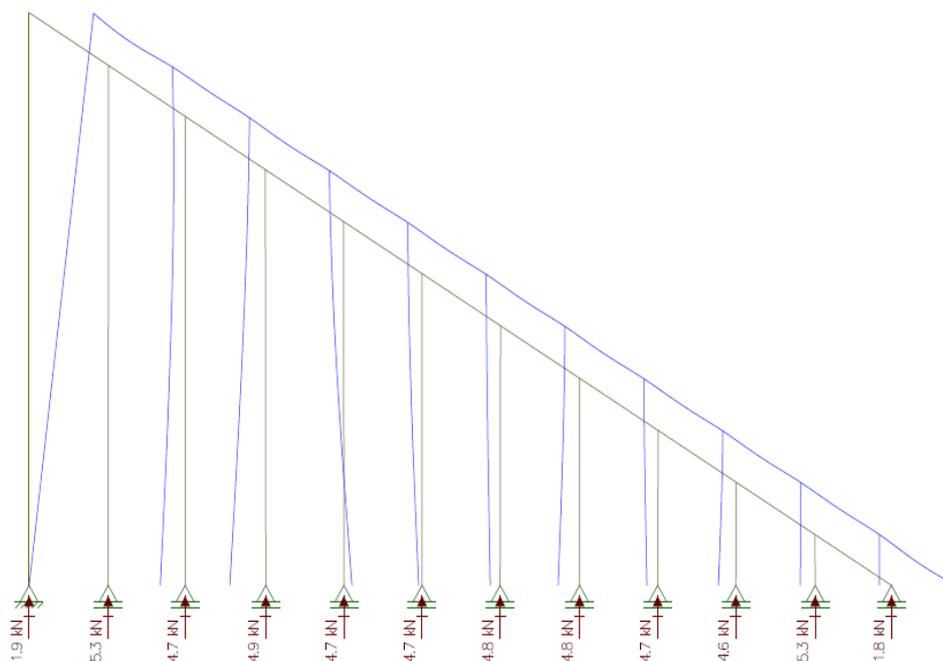
**Figura 38 – 1ª Localização com deformação do PVC.**  
 Fonte: Autoria própria (2015).

### 3.5.3.2 Cálculo das Tensões da 2ª Localização



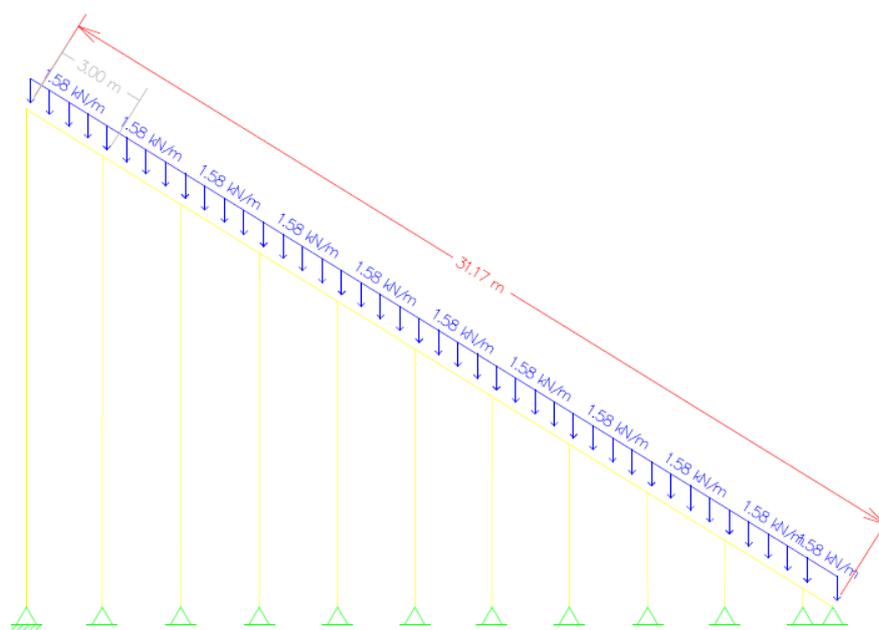
**Figura 39 – 2ª Localização com cargas atuantes.**  
 Fonte: Autoria própria (2015).



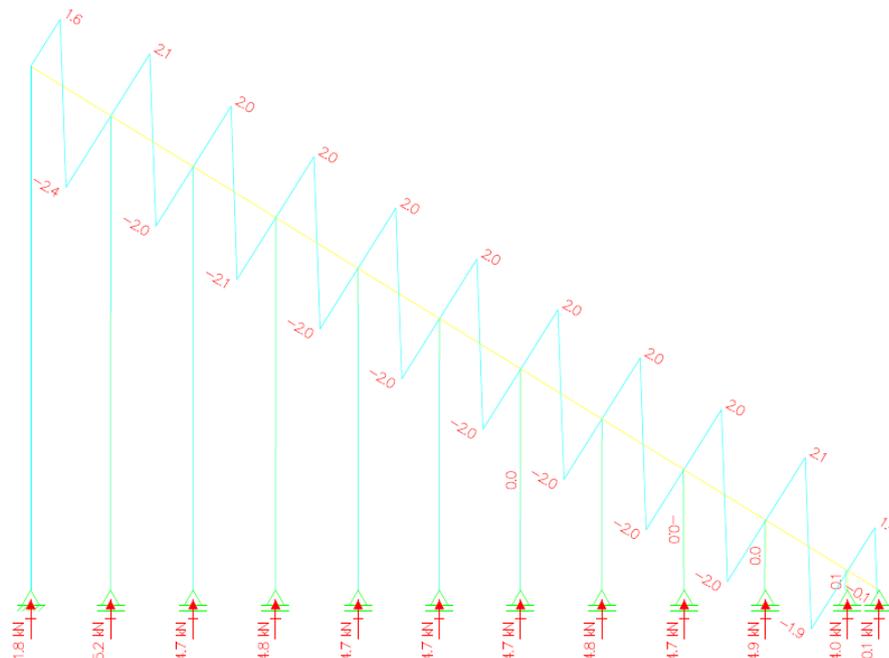


**Figura 42 – 2ª Localização com deformação do PVC.**  
**Fonte: Autoria própria (2015).**

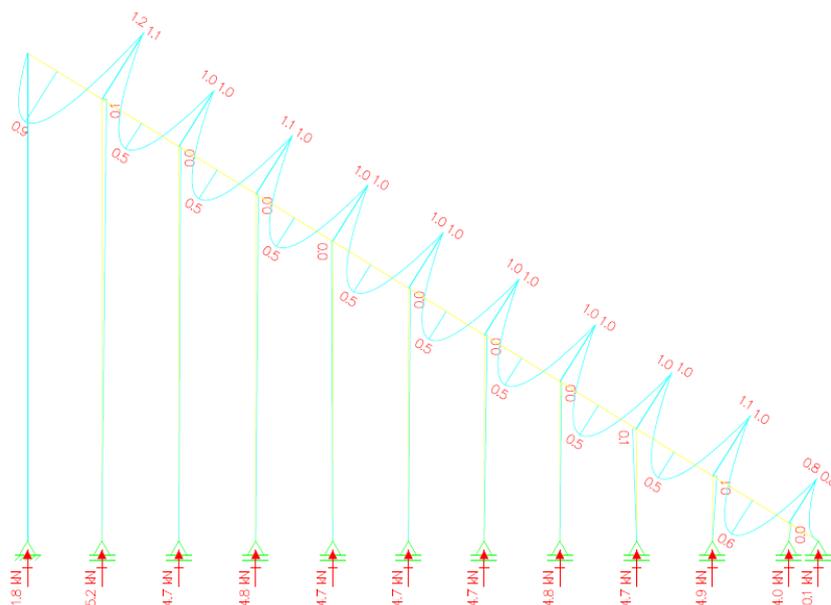
### 3.5.3.3 Cálculo das Tensões da 3ª Localização



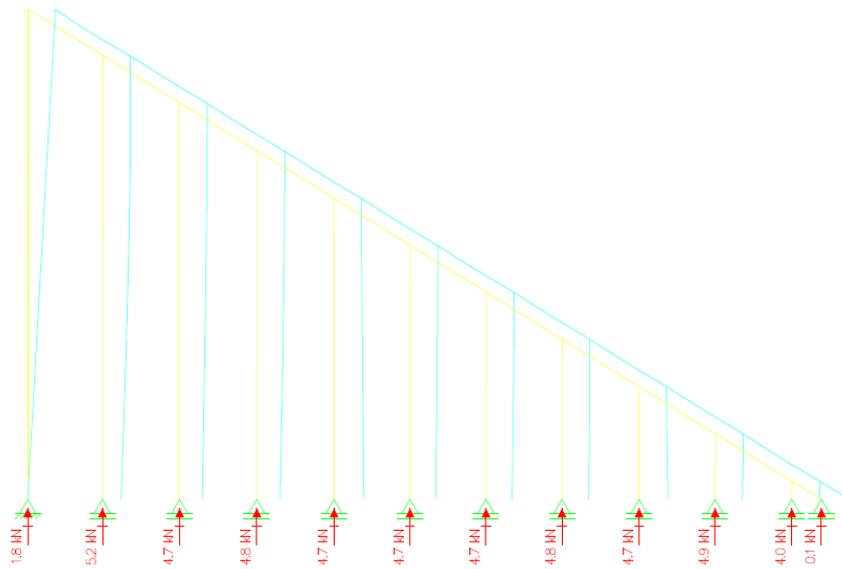
**Figura 43 – 3ª Localização com cargas atuantes.**  
**Fonte: Autoria própria (2015).**



**Figura 44 – 3ª Localização com esforços cortantes.**  
**Fonte: Autoria própria (2015).**



**Figura 45 – 3ª Localização com momento fletor.**  
**Fonte: Autoria própria (2015).**



**Figura 46 – 3ª Localização com deformação do PVC.**  
**Fonte: Autoria própria (2015).**

### 3.5.4 Cálculo do Momento de Inércia

Esforço cortante máximo →  $Q_{máx}$

Momento fletor máximo →  $M_{f máx}$

Momento de inércia:

$$I = \frac{\pi \times (R^4 - r^4)}{64} \quad (55)$$

$$I = \frac{\pi \times (0,429^4 - 0,400^4)}{64} = 0,00041$$

$$W = \frac{I}{c} \quad (56)$$

$$W = \frac{0,00041}{0,400} = 0,00102 \text{ m}^3$$

$$A = \pi \times R e^2 - \pi \times R i^2 \quad (57)$$

$$A = \pi \times 0,2145^2 - \pi \times 0,200^2$$

$$A = 0,0188 \text{ m}^2$$

$$\sigma_p = \frac{Mf_{m\acute{a}x}}{W} \quad (58)$$

$$\tau = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{A} \quad (59)$$

$$Sg = \frac{\sigma_e}{\sigma_p} \quad (60)$$

$I$  → Momento de inercia;

$c$  → Seção circular;

$A$  → Área da coroa;

$Re$  → Raio externo;

$Ri$  → Raio interno.

**Tabela 21 – Tabela com cálculos De, (Diâmetro econômico) mm.**

Dados	Resultados		
	1ª Localização	2ª Localização	3ª Localização
$Q_{m\acute{a}x}$	2,6kN	2,4kN	2,4kN
$Mf_{m\acute{a}x}$	1,3kNm	1,3kNm	1,2kNm
$\sigma_p$ → Tensão flexão	0,069 Mpa	0,069 Mpa	0,063 Mpa
$\tau$ → Tensão cisalhamento	0,138 Mpa	0,127 MPa	0,127 MPa
$Sg$ → Coeficiente de segurança	647,885	647,885	701,974

Fonte: **Autoria própria (2015).**

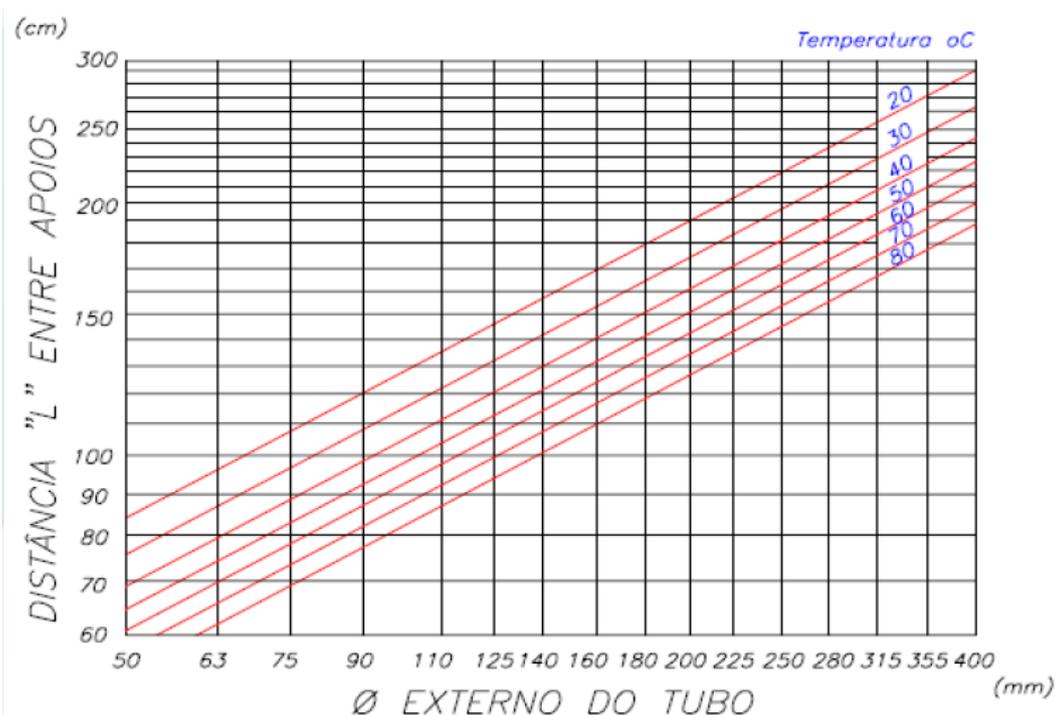
### 3.5.5 Bloco de Apoio – AFLON (Catálogo Técnico)

O *software* FTOOL, se mostra de grande valia para análise estrutural do conduto forçado, estimando com valores precisos os fenômenos que atuam sobre a estrutura, porém é importante levar em consideração outros métodos utilizados para o dimensionamento dos blocos de apoio. O catálogo da AFLON estima os valores de acordo com tabelas e gráficos que são gerados a partir de testes mecânicos realizados nas tubulações, com isso é possível obter o espaçamento máximo entre os apoios mensurando o diâmetro do conduto e sua faixa de operação térmica.

### 3.5.5.1 Distância Mínima Recomendada para Apoios dos Tubos

De modo a se evitar uma deflexão e elevada tensão de flexão em tubulações apoiadas, deve ser adotado um distanciamento mínimo entre os apoios, este distanciamento varia em função dos diâmetros dos tubos utilizados e também da temperatura de operação, sendo necessário realizar um cálculo para obtenção desta distância máxima para a aplicação específica. Abaixo é apresentado um gráfico orientativo para distâncias máximas entre apoios para tubulações de polietileno de alta densidade nas classes de pressão PN6 e PN10. Para polietileno de alta densidade na classe de pressão PN3,2 e polipropileno na classe de pressão PN4 deve-se multiplicar o valor obtido para  $L$  por 0,8, e para polipropileno na classes de pressão PN6 e PN10 deve-se multiplicar o valor obtido para  $L$  por 1,4.

Para os cálculos abaixo foi considerada uma tubulação cheia d'água.



**Gráfico 6 – Relação entre a Distância do Conduto e do Bloco de Apoio**

Fonte: AFLON (2015).

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

### 3.5.5.2 Espaçamento Máximo entre Suportes de Fixação

Em tubulações fixas por suportes, têm-se em decorrência da deformação térmica do tubo, uma tensão de compressão crítica de flambagem e colapso, provocadas pelo bloqueio da expansão térmica, portanto torna se necessário para o projeto o dimensionamento do espaçamento máximo destes suportes, para qual deve ser adotado o seguinte cálculo:

$$L \leq 0,357\pi \times \frac{\overline{D^2+d^2}}{\alpha \times \Delta T} \quad (61)$$

Onde:

L → Máximo comprimento admissível;

D → Ø externo do tubo;

d → Ø interno do tubo;

$\alpha$  → Coeficiente expansão térmica linear:

$$PEAD = 2,0 * 10^{-4} * ^\circ k^{-1};$$

$$PP = 1,8 * 1,0^{-4} * ^\circ k^{-1};$$

$$PVDF = 1,4 * 1,0^{-4} * ^\circ k^{-1};$$

$\Delta T$  → Temperatura de operação – Temperatura de instalação.

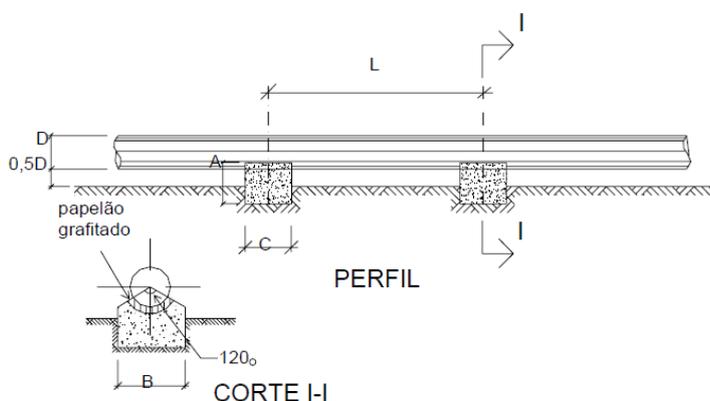
$$L \leq 0,357\pi \times \frac{\overline{0,429^2+0,400^2}}{0,00014 \times 293,15} \quad (62)$$

$$L \leq 3,25m$$

Calculando o valor de L, a máxima distância entre suportes, concluímos que o comprimento entre apoios pode estar na faixa de:  $2,7m \leq L \leq 3,25m$ .

### 3.5.6 Bloco de Apoio - Eletrobrás

Segundo ELETROBRÁS (2000) as tubulações devem ser apoiadas sobre blocos, ou selas, em concreto, conforme figura abaixo:



**Figura 47 – Tubulação de aço apoiadas em blocos ou selas**  
**Fonte: ELETROBRÁS (2000).**

$L \leq 6D \leq 5 \text{ m}$  = espaçamento máximo entre selas;

$A = 1,2 D$  = altura normal da sela (m);

$B = 1,6 D$  = largura normal da sela (m);

$C = 1,7 D$  = comprimento da sela (m).

$L \leq 6D \leq 5 \text{ m}$

$L \leq 6 * 0,429 \leq 5 \text{ m} = 2,57 \text{ m}$

$A = 1,2 D$

$A = 1,2 * 0,429 = 0,5148 \text{ m}$

$B = 1,6 D$

$B = 1,6 * 0,429 = 0,6864 \text{ m}$

$C = 1,7 D$

$C = 1,7 * 0,429 = 0,7293 \text{ m}$

Os resultados da Eletrobrás são muito divergentes dos outros dois métodos da AFLON e FTOOL, a maneira simples de estimar os valores não se enquadra com a realidade do projeto, devido à topografia ter varias irregularidades.

### 3.6 PERDAS

#### 3.6.1 Perdas de carga em canais de adução

A fórmula de Hazen-Willians é uma das mais utilizadas nos países de influência americana. Ela originou-se de um trabalho experimental com grande número de tratamentos (vários diâmetros, vazões e materiais) e repetições. Ela deve ser utilizada para escoamento de água à temperatura ambiente, para tubulações com diâmetro maior ou igual a 2" ou 50mm e para regime turbulento. Ela possui várias apresentações:

$$J = \frac{10,641 \times Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}} \quad (63)$$

V - velocidade, m s-1;

D - diâmetro da canalização, m;

Q - vazão, m<sup>3</sup> s-1;

J - perda de carga unitária, m m-1;

C - coeficiente que depende da natureza das paredes e estado de conservação de suas paredes internas. Esta relacionada com a rugosidade relativa do material e independe de Re para  $D \geq 50$  mm. A Tabela 23 apresenta alguns valores para o coeficiente C.

**Tabela 22 - Valores do coeficiente C da fórmula de Hazen-Willians**

Tipo de conduto	C
Aço corrugado	60
Aço com juntas "loc-bar", novas	130
Aço galvanizado	125
Aço rebitado, novo	110
Aço rebitado, usado	85-90
Aço soldado, novo	130
Aço soldado, usado	90-100
Aço soldado com revestimento especial	130
Aço zincado	140-145
Alumínio	140-145

Cimento-amianto	130-140
Concreto, com bom acabamento	130
Concreto, com acabamento comum	120
Ferro fundido, novo	130
Ferro fundido, usado	90-100
Plástico	140-145
PVC rígido	145-150
Vidro	140

Fonte: Gomes (1999).

$$J = \frac{10,641 \times 0,4378^{1,85}}{150^{1,85} \times 0,429^{4,87}}$$

$$J = 0,0134 \text{ m}$$

Através da fórmula de Chézy, pode ser calculada a perda no canal de adução:

$$S = \frac{V^2}{C^2 R_h} \quad (64)$$

$$S = \frac{3,48^2}{18,81^2 * 0,21445}$$

$$S = 0,1595 \text{ m/km}$$

S → declividade da linha de energia = perda de carga unitária (m/km);

V → velocidade média (m/s);

C → coeficiente calculado utilizando-se a fórmula de Guanguillet e Kutter;

$R_h$  → raio hidráulico (m), que é igual a relação entre a área molhada e o perímetro molhado.

Para calcular canais de seção e declividade uniformes, o valor numérico da perda de carga unitária por consequência do atrito utilizará a seguinte equação:

$$h_a = L \times S \quad (65)$$

$$h_a = 0,05 \times 0,1595$$

$$h_a = 0,007975 \text{ m}$$

$$h_a = 0,00862 \text{ m}$$

L comprimento do canal (km)

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \frac{n}{R_h} \left( 23 + \frac{0,00155}{S} \right)} \quad (66)$$

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{0,0134} + \frac{1}{0,035}}{1 + \frac{0,035}{0,21445} \left( 23 + \frac{0,00155}{0,0134} \right)}$$

$$C = 18,81$$

Dado essa perda a tabela 24 abaixo mostra o coeficiente de rugosidade do canal:

**Tabela 23 – Natureza das paredes e coeficiente de rugosidade do canal.**

Natureza das Paredes	<i>n</i>
Cimento liso	0,010
Argamassa de cimento	0,011
Pedras e tijolos rejuntados	0,013
Tijolos rugosos	0,015
Alvenaria ordinária	0,017
Canais com pedregulhos finos	0,020
Canais com pedras e vegetação	0,030
Canais em mau estado conservação	0,035

**Fonte: Eletrobrás (2000).**

**Tabela 24 – Valores adotados e resultados da perda no canal de adução.**

Variáveis	Perdas
<b>J</b>	0,0134 m
<b>S</b>	0,1595 m/km
<b>ha</b>	0,0079 m

**Fonte: Autoria própria (2015).**

ha → perda de carga unitária por consequência do atrito m;

S → declividade da linha de energia m/km;

J - perda de carga unitária, m m<sup>-1</sup>;

### 3.6.2 Perdas na entrada do conduto forçado

É estabelecida a perda na entrada do conduto por meio da seguinte fórmula:

$$h_c = k_c \frac{v^2}{2g} \quad (67)$$

$V \rightarrow$  Velocidade média imediatamente a jusante da entrada (m/s);

$k_e \rightarrow$  Coeficiente variável em função da forma da boca do conduto.

$$h_c = 0,78 \frac{1,366^2}{2 * 9,81}$$

$$h_c = 0,074 \text{ m}$$

### 3.6.3 Perdas de carga no conduto forçado

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

$$J = \frac{64 \times n^2 \times Q^2}{\pi^2 \times D^5} \quad (68)$$

Onde:

$j \rightarrow$  Perda de carga unitária;

$n \rightarrow$  Coeficiente de Manning;

$V \rightarrow$  Velocidade;

$D \rightarrow$  Diâmetro interno da tubulação (m).

**Tabela 25 - Coeficiente de atrito de Manning**

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

**Fonte: Gomes (1999).**

$$J = \frac{64 \times 0,010^2 \times 0,4378^2}{\pi^2 \times 0,400^5}$$

$$J = 0,01214 \text{ m}$$

### 3.7 POTÊNCIA DA USINA EM CADA LOCALIZAÇÃO

Para calcular a potência instalada em cada trecho, utiliza-se a seguinte equação:

$$P = g \cdot \eta_t \eta_g \cdot Q \cdot H \quad (69)$$

Onde:

$P$  → Potência em kW;

$g$  → Força de aceleração gravitacional ( $9,81\text{m/s}^2$ );

$\eta_t$  → Rendimento da turbina (0,90);

$\eta_g$  → Rendimento do gerador (0,90);

$Q$  → Vazão de engolimento em  $\text{m}^3/\text{s}$  (0,4378);

$H$  → Altura líquida em metros.

**Tabela 26 – Valores potência da usina em cada localização**

Local	Potência (kW)
1ª Localização	62,896
2ª Localização	59,968
3ª Localização	69,416

Fonte: Autoria própria (2015).

### 3.8 ESTIMATIVA DE CUSTO

O cálculo da estimativa de custo para revitalização da câmara de carga e do conduto forçado da MCH de Rio Branco do Sul é fundamental, pois através desses cálculos será realizada a análise de viabilidade econômica do empreendimento. Dessa forma por abranger três localizações o tamanho do comprimento do PVC do conduto forçado e o número de blocos de apoio são diferentes, com isso os valores divergem. Os valores apresentados na tabela 27 são referentes a junho de 2015.

**Tabela 27 – Estimativa de custo**

Item	Quantidade	Preço
PVC 400mm	6 metros	R\$ 740,54
PVC 100mm	1 metro	R\$ 163,42
Conexão PVC	-	R\$ 72,45
Bloco de Apoio Concreto	-	R\$ 144,34
Câmara de Carga	22,8 m <sup>3</sup>	R\$ 2.123,50
Impermeabilização Câmara de Carga	-	R\$ 843,00
Transporte/Frete	34 km	R\$ 156,54
Mão de Obra/Instalação 1ª e 2ª Localização	-	R\$ 5.350,00
Mão de Obra/Instalação 3ª Localização	-	R\$ 7.750,00
<b>Custo Total Estimado para 1ª Localização</b>		<b>R\$ 13.375,05</b>
<b>Custo Total Estimado para 2ª Localização</b>		<b>R\$ 12.994,84</b>
<b>Custo Total Estimado para 3ª Localização</b>		<b>R\$ 15.919,15</b>

Fonte: Aatoria Própria (2015).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho mostra a importância que a revitalização da câmara de carga e do conduto forçado da Micro central hidrelétrica (MCH) de Rio Branco do Sul-PR, trará para o proprietário da propriedade rural.

Esta MCH atenderá as necessidades da propriedade rural de forma sustentável, refletindo em uma fonte de energia segura e de qualidade.

Quando se trata de uma micro central hidrelétrica o mais difícil é obter um local adequado e de potencial para gerar energia. A antiga USIMAR apresenta local apropriado e potencial sem causar grandes impactos ambientais. Por já existir a barragem o impacto ambiental é minimizado.

Dessa forma, após os estudos das três localizações verificou-se que a terceira posição é viável as demais, pois em relação à primeira localização apresenta uma instalação viável visualmente, pois tem uma área limpa para o rebaixamento do solo, de fácil construção e manutenção, apesar da viabilidade econômica ser superior. A terceira posição em relação à segunda posição, o rebaixamento de 3 m do solo é significativo, visto em uma MCH qualquer kW ganho é de grande valia e com esse ganho de potência o retorno financeiro é rápido.

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

Por fim, após análise do *software* FTOOL e do catálogo técnico AFLON, obteve para o bloco de apoio uma distância de 2,7m a 3m um do outro. Essa distância é suficiente para manter sua funcionalidade.

Portanto este projeto tem a preocupação de ser tecnicamente viável, seguro e principalmente ambiental, abrangendo toda legalidade cabível a esse empreendimento, onde o objetivo seja gerar energia elétrica de qualidade, trazendo benefícios não somente ao proprietário da fazenda, mas também um acréscimo científico para os alunos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pois através dessa reativação foi possível proporcionar aos alunos uma gama de conhecimentos didáticos e técnicos.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10132. Cálculos de Conduitos Forçados – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1987.

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.

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

ÁGUASPARANA – Instituto de Águas do Paraná. **Vazões em Pequenas Bacias**. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/mp13.pdf>>. Acesso em: 01/08/2014.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **HidroWeb**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 20/10/2014.

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

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

AVILA, G.S. **Hidráulica General**, Vol. 1; Editora Limusa; México, 1975.

ALQUÉRES, José Luiz. **Energia para gerações**. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <[http://www.shell.com/home/content/bra/aboutshell/media\\_centre/annual\\_reports\\_and\\_publications/book\\_energy/](http://www.shell.com/home/content/bra/aboutshell/media_centre/annual_reports_and_publications/book_energy/)> Acesso em: 26/05/2014.

AZEVEDO NETO, J. M. de. **Manual de Hidráulica**. 8ed. Atualizada. Editora Blucher, 1998.

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

BALARIM, Carlos Roberto. **Estimativa de custo das estruturas e equipamentos de micro centrais hidrelétricas**. Tese (doutorado em Agronomia). UNESP-Botucatu, SP, 1999.

BEER, F. P., JOHNSTON JR., E. R., DEWOLF, J. T. **Resistência dos Materiais**. 4ed Porto Alegre – RS: AMGH Editora Ltda, 2010.

BRASIL. Decreto nº 47.015 de 13 de Outubro de 1959. **Autoriza a Usina Siderúrgica Marumby Ltda - Usimar - a lavrar minério de ferro no município de Rio Branco do Sul, Estado do Paraná**. Rio de Janeiro, 138º da Independência e 71º da República. Diário Oficial da União - Seção 1 - 16/10/1959, Página 22036.

\_\_\_\_\_. Decreto nº 2.003 de 10 de Setembro de 1996. **Regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor e dá outras providências**. Brasília, 175º da Independência e 108º da República.

\_\_\_\_\_. Decreto nº 5.163 de 30 de Julho de 2004. **Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências**. Brasília, 183º da Independência e 116º da República.

BRASIL. Lei nº 9.427 de 26 de Dezembro de 1996. **Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências**. Brasília, 26 de dezembro de 1996; 175º da Independência e 108º da República.

\_\_\_\_\_. Lei nº 10.848 de 15 de Março de 2004. **Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nos 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências**. Brasília, 183º da Independência e 116º da República.

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

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

ELETROBRÁS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA.

**Manual de microcentrais hidrelétricas.** Rio de Janeiro: 1982.

\_\_\_\_\_. **Manual de minicentrais hidrelétricas.** Rio de Janeiro: [sn], 1985. 584p.

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

ELETROBRÁS. **Diretrizes para projetos de PCH.** Disponível em <<http://www.portalpch.com.br>> Acesso em 11/03/2015.

FTOOL – Versão Educacional 3.0 para Windows. **Engenharia e Construção,** 2014.

GOOGLE. **Programa GOOGLE EARTH.** Versão 7.1.2.2041, 2013

HIBBLER, R, C. **Resistencia dos Materiais.** 5 ed. Pearson – Prentice Hall, 2006.

GOMES, H, P.. **Engenharia de Irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento.** Editora Universitária da UFPB, 3ed, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1999.

IDER. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis. **Energias Renováveis.** Disponível em <<http://www.ider.org.br/energiasrenovaveis/energias-renovaveis>>. Acesso em 27/05/2014.

LEVIN, L. **Formulaire dès Conduites Forcées Oléoducs et Conduits D' Aération.** 1 ed. Paris: Dunos, 1968.

MELO, J. R.C.. **Sistemas de Abastecimento de Água.** Apostila do curso de graduação em engenharia civil. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, João Pessoa, 1996.

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

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

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

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

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

Disponível em

[http://energiarenovavel.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=50&Itemid=142](http://energiarenovavel.org/index.php?option=com_content&task=view&id=50&Itemid=142)>. Acesso em 27/05/2014.

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

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

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

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

STAHLHOEFER, Marcelo. **ESTUDO ECONÔMICO PARA REPOTENCIALIZAÇÃO DA MCH RONCADOR**. 2013. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.



## APÊNDICE B – DIÂMETRO ECONÔMICO (PVC)

DIÂMETRO ECONÔMICO - 1ª LOCALIZAÇÃO				DIÂMETRO ECONÔMICO - 2ª LOCALIZAÇÃO				DIÂMETRO ECONÔMICO - 3ª LOCALIZAÇÃO				
<i>1 - Dados de Entrada</i>				<i>1 - Dados de Entrada</i>				<i>1 - Dados de Entrada</i>				
Q=	0,4378	m³/s.....	Vazão de projeto	Q=	0,4378	m³/s.....	Vazão de projeto	Q=	0,4378	m³/s.....	Vazão de projeto	
H <sub>BR</sub> =	18,408	m.....	Queda bruta	H <sub>BR</sub> =	17,551	m.....	Queda bruta	H <sub>BR</sub> =	20,551	m.....	Queda bruta	
L=	49,531	m.....	Comprimento do conduto	L=	33,003	m.....	Comprimento do conduto	L=	12,519	m.....	Comprimento do conduto	
Φ <sub>i</sub> =	0,1	m.....	Diâmetro Inicial	Φ <sub>i</sub> =	0,1	m.....	Diâmetro Inicial	Φ <sub>i</sub> =	0,1	m.....	Diâmetro Inicial	
ΔΦ=	0,025	m.....	Incremento no diâmetro	ΔΦ=	0,025	m.....	Incremento no diâmetro	ΔΦ=	0,025	m.....	Incremento no diâmetro	
ρ=	1000	kg/m³.....	Massa específica da água	ρ=	1000	kg/m³.....	Massa específica da água	ρ=	1000	kg/m³.....	Massa específica da água	
P <sub>AC</sub> =	0,23	MPa.....	Pressão da coluna d'água	P <sub>AC</sub> =	0,22	MPa.....	Pressão da coluna d'água	P <sub>AC</sub> =	0,25	MPa.....	Pressão da coluna d'água	
σ <sub>e</sub> =	44,80	Mpa.....	Tensão de escoamento do PVC	σ <sub>e</sub> =	44,80	Mpa.....	Tensão de escoamento do PVC	σ <sub>e</sub> =	44,80	Mpa.....	Tensão de escoamento do PVC	
η <sub>sol</sub> =	0,90	.....	Eficiência da solda	η <sub>sol</sub> =	0,90	.....	Eficiência da solda	η <sub>sol</sub> =	0,90	.....	Eficiência da solda	
Cu.PVC=	3,25	RS/kg.....	Custo unitário do PVC	Cu.PVC=	3,25	RS/kg.....	Custo unitário do PVC	Cu.PVC=	3,25	RS/kg.....	Custo unitário do PVC	
			D <sub>econômico</sub> =	0,575			D <sub>econômico</sub> =	0,575			D <sub>econômico</sub> =	0,575
			C <sub>usto mínimo</sub> =	351,9			C <sub>usto mínimo</sub> =	351,9			C <sub>usto mínimo</sub> =	351,9
ε=	0,00001	m.....	Rugosidade do material	ε=	0,00001	m.....	Rugosidade do material	ε=	0,00001	m.....	Rugosidade do material	
F.CAP=	0,6	.....	Fator de capacidade	F.CAP=	0,6	.....	Fator de capacidade	F.CAP=	0,6	.....	Fator de capacidade	
F.DISP=	0,7	.....	Fator de disponibilidade	F.DISP=	0,7	.....	Fator de disponibilidade	F.DISP=	0,7	.....	Fator de disponibilidade	
η <sub>t</sub> =	0,9	%.....	Rendimento da turbina	η <sub>t</sub> =	0,9	%.....	Rendimento da turbina	η <sub>t</sub> =	0,9	%.....	Rendimento da turbina	
η <sub>G</sub> =	0,871	%.....	Rendimento do gerador	η <sub>G</sub> =	0,871	%.....	Rendimento do gerador	η <sub>G</sub> =	0,871	%.....	Rendimento do gerador	
η <sub>ex.eng</sub> =	0,99	%.....	Redimento da caixa e engrenagens	η <sub>ex.eng</sub> =	0,99	%.....	Redimento da caixa e engrenagens	η <sub>ex.eng</sub> =	0,99	%.....	Redimento da caixa e engrenagens	
η <sub>TRANSF</sub> =	0,96	%.....	Rendimento transformador	η <sub>TRANSF</sub> =	0,96	%.....	Rendimento transformador	η <sub>TRANSF</sub> =	0,96	%.....	Rendimento transformador	
FCALC=	2741,072286			FCALC=	2741,072286			FCALC=	2741,072286			
T <sub>ma</sub> =	10,00%	.....	Taxa de média atratividade	T <sub>ma</sub> =	10,00%	.....	Taxa de média atratividade	T <sub>ma</sub> =	10,00%	.....	Taxa de média atratividade	
n=	30	anos.....	Tempo de amortização	n=	30	anos.....	Tempo de amortização	n=	30	anos.....	Tempo de amortização	
Valor Ener=	237,01	RS/MW.....	Valor pago pela energia	Valor Ener=	237,01	RS/MW.....	Valor pago pela energia	Valor Ener=	237,01	RS/MW.....	Valor pago pela energia	



## APÊNDICE D – DIÂMETRO ECONÔMICO (CONCRETO)

DIÂMETRO ECONÔMICO - 1ª LOCALIZAÇÃO				DIÂMETRO ECONÔMICO - 2ª LOCALIZAÇÃO				DIÂMETRO ECONÔMICO - 3ª LOCALIZAÇÃO			
<i>1 - Dados de Entrada</i>				<i>1 - Dados de Entrada</i>				<i>1 - Dados de Entrada</i>			
Q=	0,4378	m³/s.....	Vazão de projeto	Q=	0,4378	m³/s.....	Vazão de projeto	Q=	0,4378	m³/s.....	Vazão de projeto
H <sub>BR</sub> =	18,408	m.....	Queda bruta	H <sub>BR</sub> =	17,551	m.....	Queda bruta	H <sub>BR</sub> =	20,551	m.....	Queda bruta
L=	49,531	m.....	Comprimento do conduto	L=	33,003	m.....	Comprimento do conduto	L=	12,519	m.....	Comprimento do conduto
Φ <sub>i</sub> =	0,1	m.....	Diâmetro Inicial	Φ <sub>i</sub> =	0,1	m.....	Diâmetro Inicial	Φ <sub>i</sub> =	0,1	m.....	Diâmetro Inicial
ΔΦ=	0,025	m.....	Incremento no diâmetro	ΔΦ=	0,025	m.....	Incremento no diâmetro	ΔΦ=	0,025	m.....	Incremento no diâmetro
ρ=	1000	kg/m³.....	Massa específica da água	ρ=	1000	kg/m³.....	Massa específica da água	ρ=	1000	kg/m³.....	Massa específica da água
P <sub>AC</sub> =	0,23	MPa.....	Pressão da coluna d'água	P <sub>AC</sub> =	0,22	MPa.....	Pressão da coluna d'água	P <sub>AC</sub> =	0,25	MPa.....	Pressão da coluna d'água
σ <sub>e</sub> =	40,00	Mpa.....	Tensão de escoamento do CC	σ <sub>e</sub> =	40,00	Mpa.....	Tensão de escoamento do CC	σ <sub>e</sub> =	40,00	Mpa.....	Tensão de escoamento do CC
η <sub>sol</sub> =	0,90	.....	Eficiência da solda	η <sub>sol</sub> =	0,90	.....	Eficiência da solda	η <sub>sol</sub> =	0,90	.....	Eficiência da solda
Cu.CC=	1,10	R\$/kg.....	Custo unitário do AÇO	Cu.CC=	1,10	R\$/kg.....	Custo unitário do AÇO	Cu.CC=	1,10	R\$/kg.....	Custo unitário do AÇO
			D <sub>econômico</sub> = 0,800				D <sub>econômico</sub> = 0,800				D <sub>econômico</sub> = 0,800
			C <sub>usto mínimo</sub> = 164,2				C <sub>usto mínimo</sub> = 164,2				C <sub>usto mínimo</sub> = 164,2
ε=	0,001	m.....	Rugosidade do material	ε=	0,001	m.....	Rugosidade do material	ε=	0,001	m.....	Rugosidade do material
F.CAP=	0,6	.....	Fator de capacidade	F.CAP=	0,6	.....	Fator de capacidade	F.CAP=	0,6	.....	Fator de capacidade
F.DISP=	0,7	.....	Fator de disponibilidade	F.DISP=	0,7	.....	Fator de disponibilidade	F.DISP=	0,7	.....	Fator de disponibilidade
η <sub>T</sub> =	0,9	%.....	Rendimento da turbina	η <sub>T</sub> =	0,9	%.....	Rendimento da turbina	η <sub>T</sub> =	0,9	%.....	Rendimento da turbina
η <sub>G</sub> =	0,871	%.....	Rendimento do gerador	η <sub>G</sub> =	0,871	%.....	Rendimento do gerador	η <sub>G</sub> =	0,871	%.....	Rendimento do gerador
η <sub>ex.eng</sub> =	0,99	%.....	Redimento da caixa e engrenagens	η <sub>ex.eng</sub> =	0,99	%.....	Redimento da caixa e engrenagens	η <sub>ex.eng</sub> =	0,99	%.....	Redimento da caixa e engrenagens
η <sub>TRANSF</sub> =	0,96	%.....	Rendimento transformador	η <sub>TRANSF</sub> =	0,96	%.....	Rendimento transformador	η <sub>TRANSF</sub> =	0,96	%.....	Rendimento transformador
FCALC=	2741,072286			FCALC=	2741,072286			FCALC=	2741,072286		
T <sub>ma</sub> =	10,00%	.....	Taxa de média atratividade	T <sub>ma</sub> =	10,00%	.....	Taxa de média atratividade	T <sub>ma</sub> =	10,00%	.....	Taxa de média atratividade
n=	30	anos.....	Tempo de amortização	n=	30	anos.....	Tempo de amortização	n=	30	anos.....	Tempo de amortização
Valor Ener=	237,01	R\$/MW.....	Valor pago pela energia	Valor Ener=	237,01	R\$/MW.....	Valor pago pela energia	Valor Ener=	237,01	R\$/MW.....	Valor pago pela energia

## APÊNDICE E – TENSÃO E FLEXÃO

		1Localização		2Localização		3Localização	
		Qmáx kN	Mfmáx kN.m	Qmáx kN	Mfmáx kN.m	Qmáx kN	Mfmáx kN.m
		2,6	1,3	2,4	1,3	2,4	1,2
A (m <sup>2</sup> )	0,0188						
1 Tf	69,14894 kN/m <sup>2</sup>		0,069148 Mpa		7051,23 kgf/m <sup>2</sup>		
TQ	138,2979 kN		0,1382 MPa/m <sup>2</sup>		14102,46 kgf		
2 Tf	69,14894 kN/m <sup>2</sup>		0,069148 Mpa		7051,23 kgf/m <sup>2</sup>		
TQ	127,6596 kN		0,12765 MPa/m <sup>2</sup>		13017,66 kgf		
3 Tf	63,82979 kN/m <sup>2</sup>		0,06382 Mpa		6507,82 kgf/m <sup>2</sup>		
TQ	127,6596 kN		0,127652 MPa/m <sup>2</sup>		13017,6 6 kgf		
1 sg	647,8857						
2 sg	647,8857						
3 sg	701,9743						



## APÊNDICE G – MEMORIAL DE CÁLCULO DO CONDUTO FORÇADO

Peso do conduto		PVC		Aço		concreto	
$Pc = \pi \times De \times dc \times emin \frac{kgf}{m}$		Pc	30,2598204 Kg/m	Pc	59,1876 Kg/m	Pc	169,646 Kg/m
Densida do material dc		PVC		AÇO		FERRO	
espesura do material emin		dc	1400	dc	7850	dc	4500
		emin	0,0172	emin	0,006	emin	0,03
Peso da água		Pa		125,663706 Kg/m			
$Pa = Aint \times \rho a \frac{kgf}{m}$							
Peso total		Pt		Pt		Pt	
$Pt = Pc + Pa \frac{kgf}{m}$		155,923527 Kg/m		184,851 Kg/m		295,31 Kg/m	
		Pt		Pt		Pt	
		1,5296098 kN		1,81339 kN		2,89699 KN	

## APÊNDICE H – ESPAÇAMENTO MÁXIMO ENTRE BLOCOS DE APOIO

ESPAÇAMENTO MÁXIMO ENTRE SUPORTES DE FIXAÇÃO					
$L \leq 0,357\pi \times \sqrt{\frac{D^2 + d^2}{\alpha \times \Delta T}}$		L ≤ 3,193231 m			
L → Máximo comprimento admissível					
D → Ø externo do tubo		D	0,429	$\Delta T$	303,15
d → Ø interno do tubo		d	0,4		
$\alpha$ → Coeficiente expansão térmica linear:		$\alpha$	0,00014		
$\Delta T$ → temperatura de operação – Temperatura de instalação		$\Delta T$	30		

## APÊNDICE I – POTÊNCIA EM CADA LOCALIZAÇÃO

Potência instalada					
Variáveis	g=	9,81			
P= Potência instalada kW	ng=	0,9			$P = 9,81 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot Q \cdot H$
g= gravidade	nt=	0,9			
ng= Rendimento Gerador	Q=	0,43			
nt= Rendimento Turbina	H=	18,408	1º Caso	P= 62,89688	
Q= Vazão m³/s		17,551	2º Caso	59,96866	2º Caso
H= Altura Líquida m		20,316	3º Caso	69,41618	3º Caso