

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA**  
**HÍDRICA**

**Implantação de Soleira de Admitância como Estrutura de Vertimento  
em Pequenos Reservatórios Hidrelétricos**

**Flávia Cristina Barbosa e Silva**

**Itajubá, Junho de 2020.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA**  
**HÍDRICA**

**Flávia Cristina Barbosa e Silva**

**Implantação de Soleira de Admitância como Estrutura de Vertimento  
em Pequenos Reservatórios Hidrelétricos**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para  
obtenção do Título de Mestre em Engenharia Hídrica.**

**Área de Concentração: Geração Hidrelétrica**

**Orientador: Prof. Dr. Arthur Benecdito Ottoni**

**Itajubá, Junho de 2020.**

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho aos meus pais, por tanto  
esforço, tanta fé e todo amor.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por me conduzir ao caminho do aprendizado e me abençoar com o privilégio de poder realizar esse curso e essa pesquisa.

Agradeço ao meu orientador, Arthur Benecdito Ottoni, não apenas pela enorme contribuição neste trabalho, mas por acreditar em mim e no meu trabalho, desde que nos conhecemos.

Aos coordenadores e professores do Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica, agradeço pelo conhecimento transmitido e pela dedicação ao ensino.

Ao meu marido Denis, obrigada pelo incentivo, encorajamento e colaboração neste trabalho.

Também foram fundamentais os incentivos e concessões feitas pela empresa DAC Engenharia que proporcionaram que eu pudesse cursar esse Mestrado em paralelo às atividades na empresa. Destaco aqui o incentivo e apoio do amigo Aloisio, que me auxiliou com ideias e sua vivência técnica.

Aos meus colegas de graduação, agora colegas de mestrado e grandes amigos da vida, André e Diego, obrigado por permanecerem sempre ao meu lado e por tornarem a minha vida acadêmica mais divertida.

## EPÍGRAFE

*Seja você quem for, seja qual for sua posição na vida, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.*

*Ayrton Senna*

## RESUMO

A soleira de admitância é uma estrutura de barramento e vertimento, executada majoritariamente em madeira, composta por degraus e cavidades que permitem a passagem de água pela estrutura. Este estudo apresenta uma alternativa de arranjo hidráulico utilizando a soleira de admitância como estrutura de barramento para projetos de Centrais de Geração Hidrelétrica (CGHs). Foi desenvolvido um estudo energético, hidráulico e de custos, a partir de um estudo de caso. Os resultados indicaram que além dos benefícios ambientais e da funcionalidade técnica, a utilização da soleira de admitância como barramento em CGHs para rios de planalto/montanha se mostra economicamente viável, comparada ao custo de um barramento comum (perfil Creager). Tem-se como contribuição o desenvolvimento dos estudos na área de soleiras de admitância, relacionando uma estrutura de controle de vazões a uma estrutura de geração de hidroeletricidade. Foi concluído que há viabilidade econômica na implantação das soleiras de admitância para geração, sendo indicado, no entanto o estudo em modelo reduzido para garantia da segurança estrutural do sistema.

**Palavras Chaves:** Soleira de Admitância, Centrais Hidrelétricas Geradoras (CGHs), Estrutura de Madeira.

## **ABSTRACT**

The admittance threshold is a barrier and pouring structure, made mostly of wood, consisting of steps and cavities that allow water to pass through the structure. This study presents an alternative of hydraulic arrangement using the admittance threshold as a bus structure for projects of Hydroelectric Generating Station (CGHs). An energy, hydraulic and cost study was developed based on a case study. The results indicated that in addition to the environmental benefits and technical functionality, the use of the admittance threshold as a bus in CGHs for plateau / mountain rivers is economically viable, compared to the cost of a common bus (Creager profile). Contribution is made to the development of studies in the area of admittance sills, relating a flow control structure to a hydroelectricity generation structure. It was concluded that there is economic viability in the implementation of admittance thresholds for generation, however, the study in a reduced model is indicated to guarantee the structural safety of the system.

**Keywords:** Admission threshold, Hydroelectric Generating Station, Wooden Structure.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista Superior do Modelo Reduzido da Soleira de Admitância	14
Figura 2 - Gráfico de Participação das Fontes na Matriz Energética até 2027	18
Figura 3 - Seção esquemática da UHE Capivari/Cachoeira	20
Figura 4 - Seção esquemática da UHE Itaipu	21
Figura 5 - UHE Pereira Passos, UE Santa Cecília e UE Vigário	22
Figura 6 – Reservatório UHE Serra da Mesa	22
Figura 7 - Principais componentes de uma usina.	24
Figura 8 – Barragem de Concreto com contraforte em Roselend - França	25
Figura 9 – Barragem de Terra em Lajoie - Canadá	25
Figura 10 – Junta de dilatação.	26
Figura 11 – Junta de Vedação.	27
Figura 12 – Desenho esquemático de um vertedouro tipo sifão	28
Figura 13 – Desenho esquemático de um vertedouro tipo soleira dentada	28
Figura 14 – Esquema de bacia de dissipação Tipo II (a), TIPO III (b) e TIPO IV (c)	29
Figura 15 – Canal de Adução PCH Buriti – Rio Sucuriú /MT	30
Figura 16 – Casa de Força – PCH Garganta da Jararaca – Rio Sangue / MT	31
Figura 17 – Esquema em 3D da Câmara de Carga MCH de Rio Branco do Sul.	32
Figura 18 - Chaminés de Equilíbrio PCH Cavaleiras	32
Figura 19- Esquema do golpe de aríete: (a) Fechamento da válvula e compressão do líquido; (b) Reflexão da onda de pressão; (c) Variação de pressão negativa, propagação da onda à montante; (d) Cargas não balanceadas, escoamento no sentido de jusante, a e V0 no mesmo sentido, final do ciclo	33
Figura 20 - Canal de Fuga	34
Figura 21 – Comporta de Translação do tipo deslizamento - Ensecadeira	35
Figura 22 – Comporta de rotação do tipo segmento	36
Figura 23 – Válvula tipo Borboleta para Centrais	37
Figura 24 – Instalação de grade na Usina de Itaipu	37
Figura 25 – Turbina Pelton	39
Figura 26 – Turbina Francis	39
Figura 27 – Turbina Kaplan	40
Figura 28 – Turbina Bulbo	40

Figura 29 – Sistemas de controle são aplicados a sistemas hidrelétricos	41
Figura 30 – Instalação típica de uma turbina tubular – Item 2 – Multiplicador de velocidade	42
Figura 31 – Conduto Forçado – PCH Garganta da Jararaca – Rio Sangue / MT	42
Figura 32 – Comporta Stop Log	43
Figura 33 – Interior de um gerador de Usina Hidrelétrica	44
Figura 34 – Disjuntor HRV – 63	44
Figura 35 – Pannel de medição	45
Figura 36 – Para-raios de Carboneto de Silício	46
Figura 37 – Transformador Elevador	46
Figura 38 – Principais componentes da LT	47
Figura 39 – Redes de distribuição e seu posicionamento	47
Figura 40 – Subestação de energia	48
Figura 41 – Vertedouro tipo perfil Creager	50
Figura 42 – Vertedouro Tulipa	51
Figura 43 – Representação Típica de Salto de esqui	53
Figura 44 – Dissipador Salto de Esqui da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho	53
Figura 45 – Diferentes configurações do regime de escoamento em quedas sucessivas: a) com o ressalto hidráulico plenamente desenvolvido; b) com ressalto hidráulico parcialmente desenvolvido e c) sem a formação de ressalto hidráulico.	55
Figura 46 – Tipos de escoamento deslizante sobre turbilhões: a) Sub-regime de interferência camada cisalhante-degrau; b) Sub-regime de interferência camada cisalhante- camada cisalhante; c) Sub-regime de recirculação nos degraus.	56
Figura 47 – Planta do vertedor em labirinto da barragem Ciwadas, na Indonésia	57
Figura 48 - Aspectos construtivos do vertedor com soleira de admitância	61
Figura 49 – Modelo em Funcionamento.	62
Figura 50 – Arranjo da Alternativa 1	65
Figura 51 – Alternativa 2	66
Figura 52 – Alternativa 3	67
Figura 53 – Arranjo da Alternativa 4	68
Figura 54 – Arranjo da Alternativa 5 (final).	69
Figura 55 – Curva de duração de potência	77
Figura 56 – Curva de energia versus potência instalada	77
Figura 57 – Vertedouro Perfil Creager – Vista lateral	78
Figura 58 – Perfil da Soleira Vertente	79

Figura 59 – Rio Carangola	81
Figura 60 - Localização do aproveitamento – Cachoeira do Boi – Carangola – MG Fonte: Google Maps (2020)	82
Figura 61 - Bacia do Aproveitamento	82
Figura 62 – Localização Tomada D’água e Canal de Fuga	83
Figura 63 – Dados da estação pluviométrica utilizada no estudo.	84
Figura 64 – Bacia do Posto Fluviométrico.	84
Figura 65 – Localização da Estação Pluviométrica em relação a Bacia da CGH em Estudo	85
Figura 66 – Curva de permanência de vazão.	86
Figura 67 – Curva de Permanência de potência	87
Figura 68 – Curva de energia	87
Figura 69 - Determinação da Potência e Energia Ótima	88
Figura 70 – Vertedouro com perfil tipo Creager – Área: 31,18 m <sup>2</sup>	93
Figura 71 – Relações entre o comprimento da bacia de dissipação e o número de Froud	95
Figura 72 – Soleira com perfil tipo Creager e bacia de dissipação.	95
Figura 73 – Curva Característica – Modelo Físico Alternativa 5.	97
Figura 74 – Soleira de Admitância Dimensionada – Vista Superior	97
Figura 75 – Alternativa selecionada para geração	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Campo de Aplicação das Turbinas Hidráulicas, (LUIZ, 2005).....	38
Tabela 2 - Dados utilizados para transposição de vazões.....	86
Tabela 3 - Valores ótimos.....	88
Tabela 4 – Dados da CGH em estudo .....	88
Tabela 5 – Vazões Máximas anuais .....	89
Tabela 6 – Vazões máximas de tempos de retornos determinados .....	92
Tabela 7 – Coordenadas do perfil Crager .....	93
Tabela 8 – Vazões características mais frequentes do Rio Carangola .....	96
Tabela 9 – Parâmetros iniciais de dimensionamento.....	96
Tabela 11 – Investimento Necessário para a Implantação da Soleira de Admitância.....	99
Tabela 12 – Investimento Necessário para a Implantação da perfil Creager .....	100

## SUMÁRIO

<u>1</u>	<u>INTRODUÇÃO .....</u>	<u>14</u>
<u>2</u>	<u>OBJETIVOS .....</u>	<u>16</u>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<u>3</u>	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	<u>17</u>
3.1	CENÁRIO DA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA NO BRASIL.....	17
3.2	TIPOS DE ARRANJOS E COMPONENTES DE UMA CENTRAL HIDRELÉTRICA.....	19
3.2.1	ARRANJOS HIDROENERGÉTICOS .....	19
3.2.2	FUNCIONALIDADE DOS COMPONENTES DE UMA CENTRAL HIDRELÉTRICA.....	23
3.3	ESTRUTURAS DE VERTIMENTO CONVENCIONAIS DOS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS .....	49
3.3.1	VERTEDOIRO CREAGER.....	49
3.3.2	VERTEDOIRO TULIPA .....	50
3.3.3	VERTEDOIRO COM SALTO EM ESQUIL.....	52
3.4	ESTRUTURAS DE VERTIMENTO NÃO CONVENCIONAIS DOS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS	54
3.4.1	VERTEDOIRO EM DEGRAUS.....	54
3.4.2	VERTEDOIRO LABIRINTO .....	57
3.5	SOLEIRA DE ADMITÂNCIA COMO ESTRUTURA DE VERTIMENTO EM PEQUENOS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS A FIO D'ÁGUA.....	58
3.5.1	CONCEPÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA SOLEIRA DE ADMITÂNCIA.....	59
3.5.1.1	PESQUISAS EXPERIMENTAIS DESENVOLVIDAS.....	62
3.5.1.2	COMPARAÇÃO COM OS VERTEDOUROS CONVENCIONAIS.....	70
<u>3.6</u>	<u>CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS - CGHS.....</u>	<u>71</u>
<u>4</u>	<u>METODOLOGIA .....</u>	<u>75</u>
4.1	ESCOLHA DO LOCAL PARA ESTUDO CASO .....	75
4.2	POTENCIAL HIDROENERGÉTICO DA CGH EM ESTUDO.....	76
4.3	DIMENSIONAMENTO DO BARRAMENTO COM PERFIL CREAGER .....	78
4.4	DIMENSIONAMENTO DO BARRAMENTO COM SOLEIRA DE ADMINTÂNCIA .....	79
4.5	LEVANTAMENTO DE CUSTOS BÁSICOS DE IMPLANTAÇÃO DOS BARRAMENTOS EM ESTUDO....	80
<u>5</u>	<u>RESULTADOS.....</u>	<u>81</u>
5.1	LOCAL DE ESTUDO .....	81
5.2	POTENCIAL HIDROENERGÉTICO DA CGH EM ESTUDO .....	85
5.3	DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DA SOLEIRA PERFIL TIPO CREAGER .....	89
5.4	DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO UTILIZANDO VERTEDOIRO SOLEIRA DE ADMITÂNCIA.....	95
5.5	VIABILIDADE ECONÔMICA .....	98
5.5.1	CUSTOS BÁSICOS DA SOLEIRA DE ADMITÂNCIA .....	98

5.5.2	CUSTOS BÁSICOS DA SOLEIRA TIPO CREAGER.....	99
<u>6</u>	<u>CONCLUSÃO .....</u>	<u>101</u>
	<u>ANEXO A – CURVAS CARACTERÍSTICAS .....</u>	<u>103</u>
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	<u>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</u>

# 1 INTRODUÇÃO

O presente estudo apresenta uma nova alternativa de arranjo hidráulico utilizando a soleira de admitância como estrutura de barramento para projetos de Centrais de Geração Hidrelétrica (CGHs).

A solução consiste na implantação de soleiras de calha fluvial como estrutura de vertimento com alturas reduzidas, que poderiam ser implantadas em cursos d'água com menores vazões de calha fluvial, sem gerar grandes áreas alagadas de reservatórios, especialmente para os cursos d'água com vazões compatíveis à CGHs (Mini Centrais Hidrelétricas, onde  $1,0 \text{ Mw} \leq P \leq 3,0 \text{ Mw}$ ).

A soleira de admitância é uma estrutura de barramento e vertimento desenvolvida por Ottoni (2002). Consiste numa estrutura de madeira com degraus e cavidades que permitem a passagem de água pela estrutura, conforme modelo reduzido apresentado na Figura 1 abaixo.



**Figura 1 – Vista Superior do Modelo Reduzido da Soleira de Admitância**

Fonte: Ottoni, 2002.

Para analisar a viabilidade de utilização da soleira de admitância na geração hidrelétrica, foi desenvolvido um estudo energético e econômico para um curso d'água de baixa vazão. Tendo em vista que a madeira, estrutura da soleira, é um recurso natural e

renovável, seu uso se torna ambientalmente mais atrativo. A queda dos impactos ambientais negativos gera aumento na oferta de energia limpa no sistema e assim uma maior aceitação dos projetos hidrelétricos no mercado.

No estudo de caso foi realizado o estudo do potencial de geração de hidroeletricidade, o dimensionamento hidráulico do barramento com a soleira de admitância e o dimensionamento hidráulico do barramento com perfil creager (barramento comumente utilizado). Posteriormente, foi realizado o levantamento da estimativa dos custos de implantação dos dois tipos de barramentos, tendo assim a comparação de custos das estruturas.

A solução de arranjo hidráulico deste estudo se mostrou viável tecnicamente para geração de energia hidrelétrica e com menor impacto ambiental negativo, notadamente em relação as vantagens do material renovável utilizado como insumo, a menor influência hidrosedimentológica e de nutrientes do curso d'água, assim como da ictiofauna local, devido aos orifícios que compõem o corpo do Barramento.

Além das vantagens economicas, o custo de implantação da soleira de admitância em madeira é menor que a implantação de uma estrutura comum em concreto (perfil Creager).

Desta forma, o presente trabalho contribuiu para difundir o conhecimento na área de soleiras de admitância, bem como na proposição de novas soluções de engenharia para geração de hidroeletricidade.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar a viabilidade técnica, econômica e ambiental na utilização da Soleira de Admitância como estrutura de vertimento em reservatórios das Mini e Pequenas Usinas de Geração Hidrelétrica.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Descrever o atual Cenário de Geração Hidrelétrica no Brasil;
- Apresentar os tipos de arranjo e componentes de uma Central Hidrelétrica;
- Desenvolver sobre as estruturas de vertimento convencionais e não convencionais dos reservatórios hidrelétricos;
- Analisar a Soleira de Admitância como estrutura de vertimento no arranjo hidráulico das Centrais Hidrelétricas de pequeno porte de geração de energia;
- Caracterizar o arranjo hidráulico das Centrais de Geração Hidrelétrica (CGHs);
- Realizar Estudo de Caso contendo as seguintes etapas:
  - Seleção de trecho fluvial para a seção de encaixamento do arranjo da Central Hidrelétrica onde será desenvolvido o Estudo de Caso;
  - Propor arranjo hidráulico de geração de hidroenergia usando a Soleira de Admitância como estrutura de vertimento;
  - Elaborar estudos hidrológicos em relação a bacia hidrográfica da seção selecionada para a Central Hidrelétrica;
  - Dimensionar hidráulicamente a “Soleira de Admitância” da Central estudada;
  - Dimensionar hidráulicamente a soleira Creager para a Central estudada;
  - Comparar as Soleiras de Admitância e Creager dimensionadas, quanto ao custo de implantação;
  - Analisar viabilidade de implantação do Vertedouro Soleira de Admitância.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Cenário da Geração Hidrelétrica no Brasil**

O Brasil é o terceiro maior produtor hidrelétrico do mundo, ficando atrás apenas de Canadá e Estados Unidos. Também ocupa a terceira posição em potencial hidráulico ficando atrás de Rússia e China, conforme a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2017).

Segundo a ANEEL (2018), o Brasil possui em um total de 7.101 empreendimentos de geração de energia em operação, totalizando 159.728.740 kW de potência instalada, onde a maior parte dessa geração é proveniente da geração hidrelétrica, sendo 102.146.991 kW. Com isso, a participação da energia hidrelétrica na matriz energética brasileira é da ordem de 64% de toda a geração de energia do Brasil.

A primeira hidrelétrica brasileira foi construída em 1884 no município de Diamantina, utilizando as águas do Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, com 0,5 MW (megawatt) de potência e linha de transmissão de dois quilômetros, mas foi após a Segunda Grande Guerra Mundial (1939-1945) que a adoção de hidrelétricas passou a ser relevante na produção de energia brasileira.

O Atlas de Energia Elétrica, fornecido pela ANEEL (2018), mostra que o potencial hidrelétrico brasileiro é da ordem de 260 GW. Do potencial de energia disponível na rede hidrográficas do Brasil, cerca de 61% está em operação ( $P=102\text{GW}$ ), e os 39% restante encontra-se em fase de inventário e projeto de viabilidade. Entre as bacias com maior potencial hidro energético destacam-se as do Rio Amazonas e do Rio Paraná.

Atualmente, o investimento nacional para o crescimento da geração de eletricidade proveniente de hidrelétricas está concentrado na região amazônica, onde há projetos em andamento para expandir a matriz hidrelétrica brasileira (LAVADO, 2009).

No âmbito dos investimentos do setor energético, a hidroeletricidade divide o espaço da energia limpa com a energia fotovoltaica e eólica. As hidrelétricas já representaram 80% da capacidade instalada no país, mas hoje representam cerca de 60%, redução ocorrida após a década de 90, quando o país passou a investir mais em termelétricas, seguido por novas fontes renováveis, como usinas eólicas e fotovoltaicas.

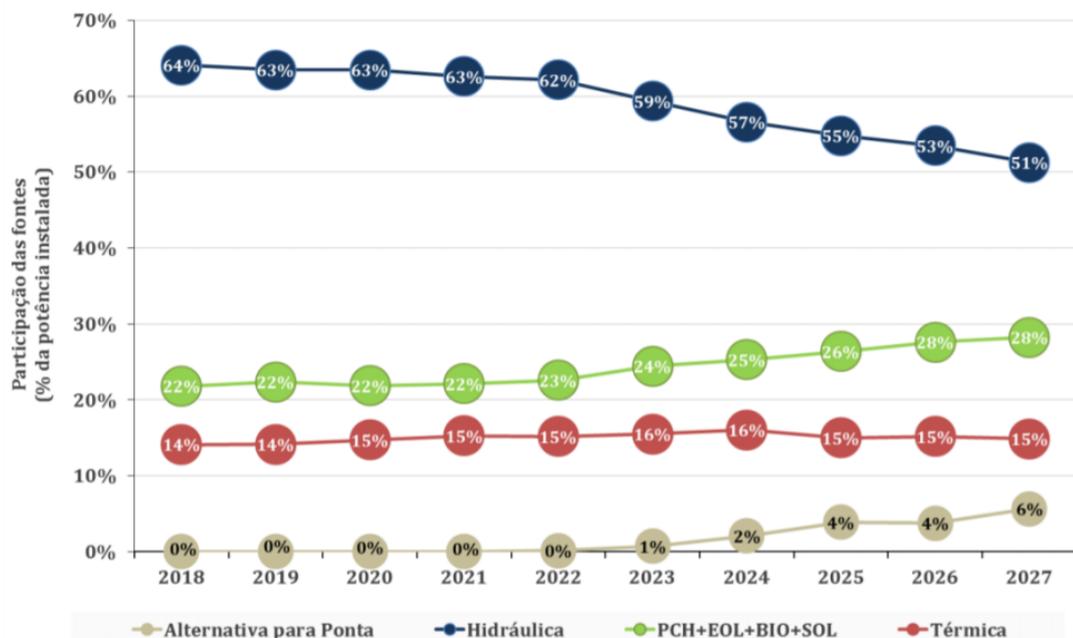
O Estado é responsável por estabelecer as condições de valorização dos recursos naturais e, por consequência, do volume e ritmo de investimentos no setor energético (ALMEIDA, 2013).

O segmento de geração era considerado um segmento competitivo no Brasil até 2012, pois a maioria absoluta dos geradores era livre para negociar seus preços, seja diretamente com consumidores livres, seja por meio de leilões regulados. A partir de 2013, muitas usinas hidroelétricas antigas passaram a ter seus preços controlados pela ANEEL, pois essa foi a condição para a renovação antecipada de seus contratos de concessão (ALMEIDA, 2013).

A introdução de mudanças frequentes nas orientações políticas e nas regulamentações acomete constantes revisões tarifárias, modificações dos leilões e de operações no setor elétrico. Cada mudança afeta diretamente a viabilidade de novos projetos (ALMEIDA, 2013).

Além disso, dificuldades no licenciamento ambiental, em especial a partir da década de 1990, contribuíram para a redução do ritmo de construção de hidrelétricas, dando incentivo para construções sob o modelo "Usinas a fio d'água", sem reservatórios de regularização anual ou plurianual o que reduz a chamada "capacidade de regularização" do sistema e assim minimiza o interesse de investidores no setor hidroenergético (REUTERS, 2019).

No último plano decenal de expansão de energia, que apresenta as diretrizes de expansão no setor elétrico até 2027, as hidrelétricas terão uma redução em sua representatividade na matriz energética, de 64% para 51%, enquanto as fontes eólica e fotovoltaica devem saltar de 22% para 28% (EPE, 2018) como apresenta a Figura 2.



**Figura 2** - Gráfico de Participação das Fontes na Matriz Energética até 2027  
Fonte: EPE (2018)

Mesmo com a perda de representatividade na futura matriz energética, a hidrelétrica é a principal fornecedora de energia do país e a opção mais econômica. Os números mostrados no gráfico acima apontam que a fonte hídrica contava com 63,9% da capacidade instalada no início de 2019, mas gerou até 30/04/19, 79,4% da energia elétrica consumida no Brasil. Nos últimos 8 anos conseguiu gerar um percentual da energia sempre maior que sua participação na matriz e ainda a um custo menor. Assim, é a hidrelétrica que tem assegurado a energia no país (ABRAPCH, 2019).

Nos últimos 8 anos, o custo médio direto da energia no país por fonte, aquele efetivamente pago pelo consumidor, foi de R\$ 212,00 por MWh para Pequenas Centrais Hidrelétricas; a eólica custou R\$ 327,00 por MWh; a biomassa, R\$ 445,00/MWh; o carvão, R\$ 256,00/MWh; o óleo pesado, R\$ 912,00/MWh; e o Diesel, R\$ 5.542,00/MWh (ABRAPCH, 2019).

## **3.2 Tipos de Arranjos e Componentes de uma Central**

### **Hidrelétrica**

A construção de uma usina hidrelétrica se inicia selecionando uma área onde quedas e/ou volumes d'água sejam representativos. A área é selecionada a partir do arranjo hidráulico da Central Hidrelétrica, que caracteriza como seus componentes estão distribuídos, sempre considerando uma análise de viabilidade técnica-econômica e questões ambientais. Fatores topográficos e geotécnicos, associados ao regime hidrológico do rio, são atrativos para quem deseja implantar uma central hidrelétrica.

Qualquer um dos dispositivos apresentados a seguir possui uma variedade de tipologias que se adequa melhor a uma determinada central. Assim, quando feito o estudo do local de implantação da usina, levanta-se todos os dados necessários e, de forma coletiva ou individual, é feito a análise de qual modelo do componente deve ser utilizada para se ter o melhor desempenho e funcionalidade na geração hidrelétrica.

#### **3.2.1 Arranjos Hidroenergéticos**

O arranjo estrutural, qualquer que seja a aplicação hidrelétrica, vai ser determinado pelos aspectos naturais do local de implantação (seção de encaixamento), tais como a topografia, hidrologia, a geologia (materiais de construção), e a geotecnia da região. As características ambientais também são de grande importância para definir o arranjo geral (hidráulico e estrutural) do que será aproveitado, pois, dependendo da magnitude dos

impactos ambientais negativos a ser gerado pela Usina, a mesma pode ser inviabilizada (ELETROBRÁS, 2000).

Os arranjos podem ser classificados de três maneiras:

- Locais com Queda Natural Localizada (Usina de Desvio)

O arranjo favorável a este tipo de queda consiste em um barramento a montante da queda, onde é locado o vertedouro e a tomada d'água na mesma seção do barramento. A certa distância a jusante, com queda, se posiciona a casa de força.

O circuito hidráulico de adução, em uma das ombreiras, é composto por dois trechos, sendo um de baixa pressão e outro de alta pressão. O trecho de baixa pressão, em função dos aspectos topográficos e geológico-geotécnicos locais, é constituído por canal ou conduto. O trecho de alta pressão é constituído por conduto(s) forçado(s). Entre esses dois trechos prevê-se, a partir do desnível entre a Tomada D'Água e a Casa de Força, e do comprimento da adução, uma câmara de carga e/ou chaminé de equilíbrio, conforme representado a seguir pelo item 7 da Figura 3. A jusante do(s) conduto(s) forçado (s) posicionam-se a casa de força e o canal de fuga (ELETROBRÁS, 2000).

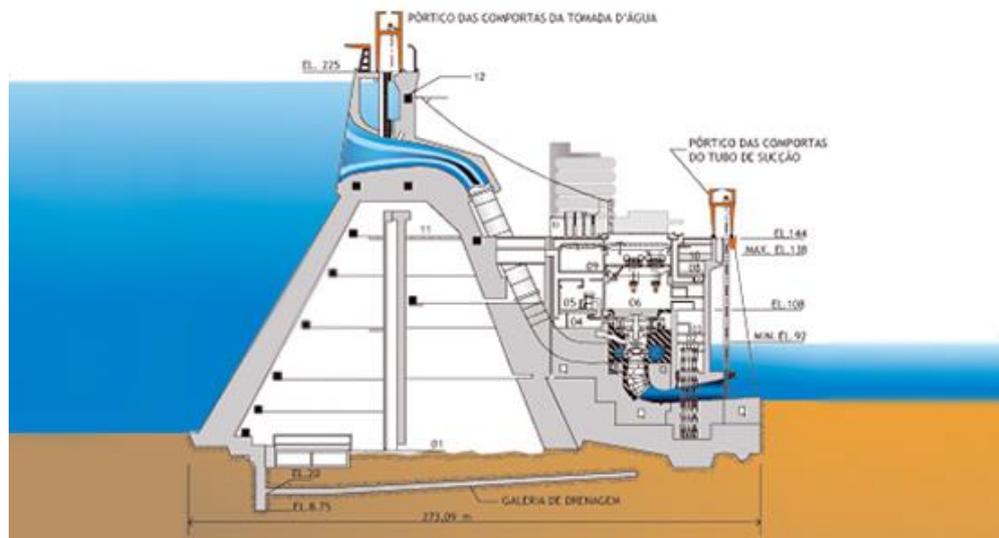


**Figura 3** - Seção esquemática da UHE Capivari/Cachoeira  
Fonte: A História das Barragens no Brasil CBDB (2011)

- Locais sem Queda Natural Localizada (Usina de Represamento)

Em locais de queda natural localizada a barragem é responsável pela criação do desnível (pelo reservatório criado pelo barramento do rio), e apresenta-se na forma de um arranjo compacto entre as estruturas do barramento e da captação d'água e tem suas estruturas alinhadas no arranjo hidráulico. A casa de força é posicionada no pé da barragem. A adução é

feita por uma estrutura convencional para tomada d'água, anexadas ao barramento e a casa de força, como mostra a Figura 4.

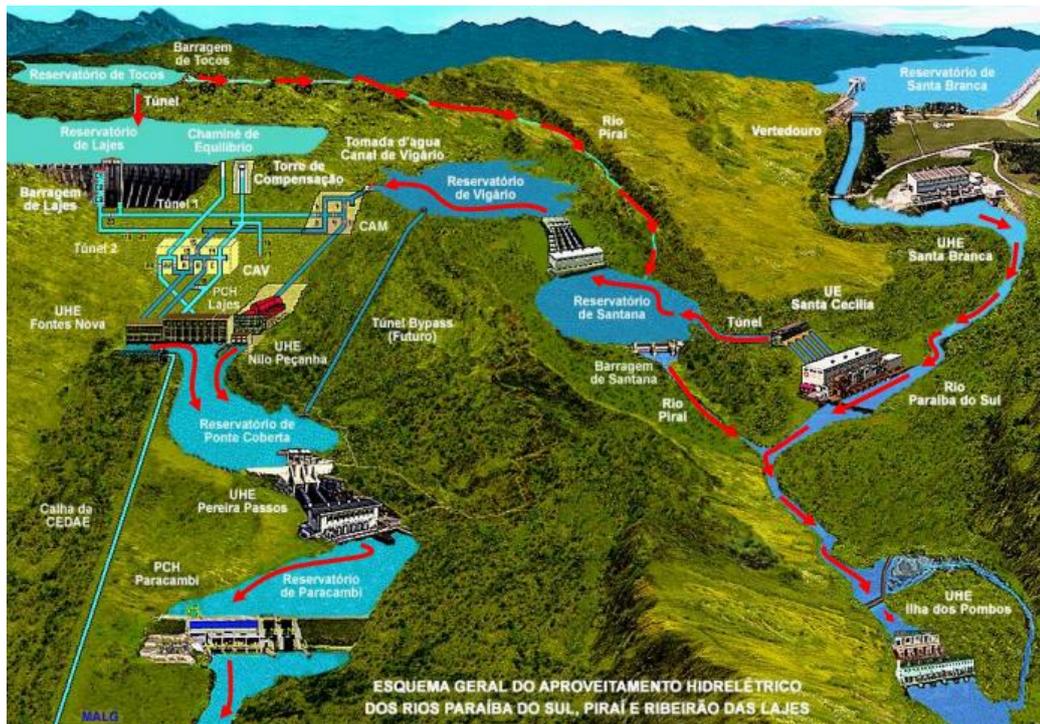


**Figura 4** - Seção esquemática da UHE Itaipu  
Fonte: Itaipu (2020)

- Locais com vazões abaixo das requeridas (Usina de Derivação)

Neste aproveitamento são desviadas vazões de outras bacias para completar a potência requerida pela usina. Faz-se necessário uma ou mais usinas elevatórias nesse tipo de arranjo. Segundo Canales *et al.* (2015), esse arranjo pode causar impactos ambientais que não ocorreriam nos outros arranjos citados anteriormente, como a morte do zooplâncton durante sua passagem pela bomba, maior área inundada devido à necessidade de se ter mais de um reservatório e a possibilidade da contaminação da bacia onde se encontra o aproveitamento por meio de poluentes advindos da água derivada de uma outra bacia.

Um exemplo desse arranjo no Brasil é a UHE Pereira Passos (Figura 5), localizada no município de Piráí – RJ. Nesse arranjo estão presentes duas usinas elevatórias: a de Vigário, responsável por elevar o nível de água à uma altura de 35 metros e a de Santa Cecília, a qual possibilita um recalque de 15 metros.



**Figura 5** - UHE Pereira Passos, UE Santa Cecília e UE Vigário  
Fonte: Light (2016)

Outras alternativas de arranjo geral que pareçam atrativas, como, por exemplo, aquelas nas quais a estrutura da tomada d'água, os condutos forçados e a casa de força ficam longe do barramento, num ponto qualquer do reservatório, em função de aspectos geomorfológicos da bacia (rio com meandros) - o que não é raro, podem ser também estudadas (ELETROBRÁS, 2000), como a Usina Hidrelétrica de São Félix (Serra da Mesa) localizada no rio Tocantins (Figura 6).



**Figura 6** – Reservatório UHE Serra da Mesa  
Fonte: Furnas (2010)

“Os impactos ambientais devem ser mínimos, para não inviabilizar o empreendimento” (ELETROBRÁS, 2000). Para que isso seja possível, os seguintes pontos devem ser criteriosamente analisados:

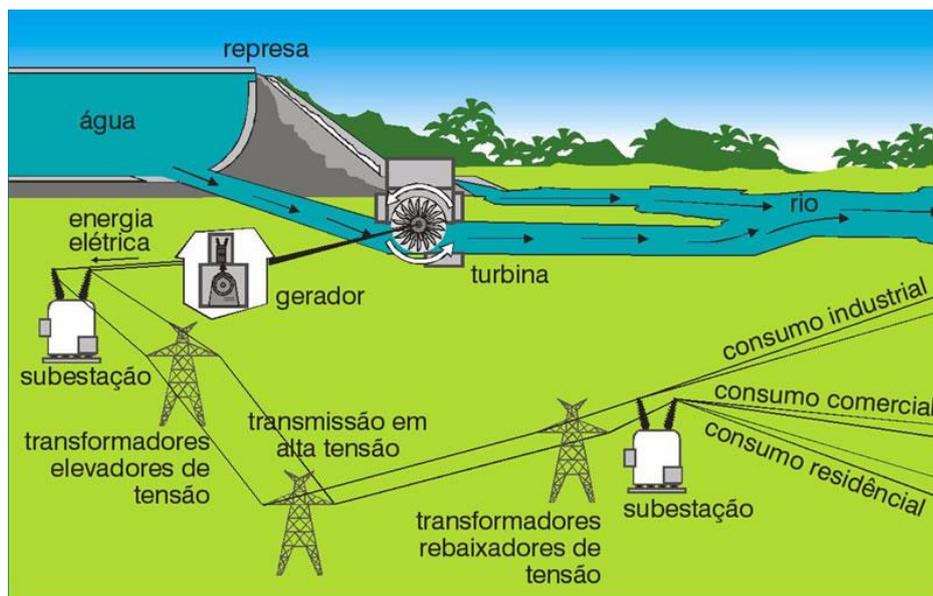
- A resolução 395 da ANEEL, de 04/12/98, diz que, para PCHs, em qualquer tipo de local, a área de inundação deve ser menor que 3 km<sup>2</sup>;
- Devem ser avaliados os impactos que serão causados à fauna e à flora (locais e regionais).
- A vazão residual (ou sanitária) mínima a ser liberada para jusante, da mesma forma, deve ser cuidadosamente avaliada, em função da legislação e das características de cada aproveitamento. Este aspecto é particularmente importante no caso dos aproveitamentos de derivação, nos quais os arranjos preveem a casa de força a jusante do barramento (ELETROBRÁS, 2000).

A experiência na elaboração do arranjo hidráulico nos estudos dessa natureza, com a qualidade requerida pelo Setor Elétrico, demonstra que duas ou três alternativas de arranjo, no máximo, são suficientes para a completa definição do arranjo geral final do aproveitamento. As análises topográficas, geológicas (materiais construtivos), geotécnicas, hidrológicas, energéticas e ambientais, associadas aos estudos de viabilidade econômica, é que definirão o melhor arranjo hidráulico a ser selecionado para o Aproveitamento.

“Os estudos de alternativas deverão ser registrados em desenhos simplificados, contendo plantas e cortes típicos, plantas de situação e de interferências, suficientes para a plena compreensão dos estudos e para o levantamento de quantidades.” (ELETROBRÁS, 2000).

### **3.2.2 Funcionalidade dos Componentes de uma Central Hidrelétrica**

Após a definição das alternativas de arranjo geral das Centrais Hidrelétricas, devem-se definir os tipos de estruturas e componentes das mesmas, que podem ser divididos em três grupos principais, sendo eles componentes em civis, hidromecânicos e eletromecânicos, conforme ilustrado na Figura 7 e descrito a seguir.



**Figura 7** - Principais componentes de uma usina.  
Fonte: Sindenergia (2016)

### 3.2.2.1 Componentes Cíveis

Dentro dos componentes cíveis tem-se: a barragem e juntas de dilatação e expansão, o vertedouro, o dissipador de energia, o circuito de adução (se o escoamento de adução se der em canal), a casa de força, a câmara de carga, os blocos de apoio dos condutos forçados, a chaminé de equilíbrio, o canal de fuga, além das estruturas temporárias, tais como o canteiro de obras e acampamento (áreas de empréstimo e de bota-fora, que devem ser definidos previamente, de maneira que estas possam ser pré-dimensionadas para efeito de estudos das alternativas), e as estruturas de desvio do rio (ensecadeiras, canal de desvio, túneis). Descrevemos a seguir de forma sucinta os componentes cíveis:

- ✓ A estrutura de barragem, responsável por “armazenar” as vazões afluentes ao aproveitamento, criando os reservatórios, pode ser em terra, enrocamento, mista ou em concreto, e, assim como o arranjo estrutural, varia em função dos aspectos topográficos, geológicos (jazida de materiais) e geotécnicos. Nos vales topograficamente encaixados em forma de “V”, as barragens deve ser de concreto, como exemplo da Figura 8. Já em planícies, com pouca ondulação (maior frequência de áreas planas), o tipo de barragem utilizado é o de terra, como exemplo da Figura 9, podendo ser também mista ou de enrocamento, dependendo da disponibilidade de materiais - estudo de jazidas locais (ELETROBRÁS, 2000);



**Figura 8** – Barragem de Concreto com contraforte em Roselend - França  
Fonte: Sayão (2009)



**Figura 9** – Barragem de Terra em Lajoie - Canadá  
Fonte: Sayão (2009)

✓ As juntas de expansão, também chamadas de dilatação, são aberturas feitas na estrutura do barramento, que possibilitam a dilatação e movimentação da barragem, minimizando riscos de sua ruptura. Nos reservatórios (Usinas de repesamento) são

utilizadas para impedir impactos derivados da deformação térmica dos materiais, contração e tração, do cisalhamento, do movimento combinado, da rotação e do recalque diferencial (UNIONTECH, 2018). Um exemplo desse elemento é apresentado na Figura 10.



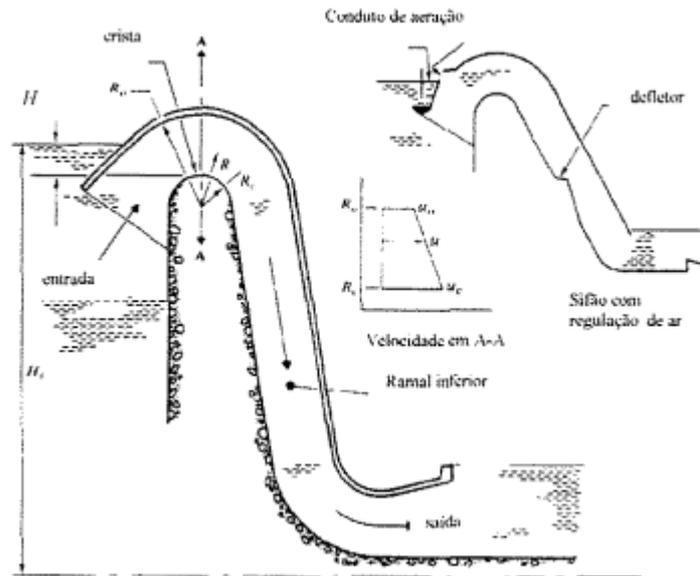
**Figura 10** – Junta de dilatação.  
Fonte: Uniontech (2017)

✓ As juntas de vedação (Figura 11) são peças projetadas com a finalidade de impedir o vazamento de fluídos de um meio para o outro na barragem, de maneira estática ou dinâmica. O processo de vedação preenche os espaços no corpo da barragem, oferecendo uma fixação / vedação que impossibilita o vazamento dentro da estrutura.

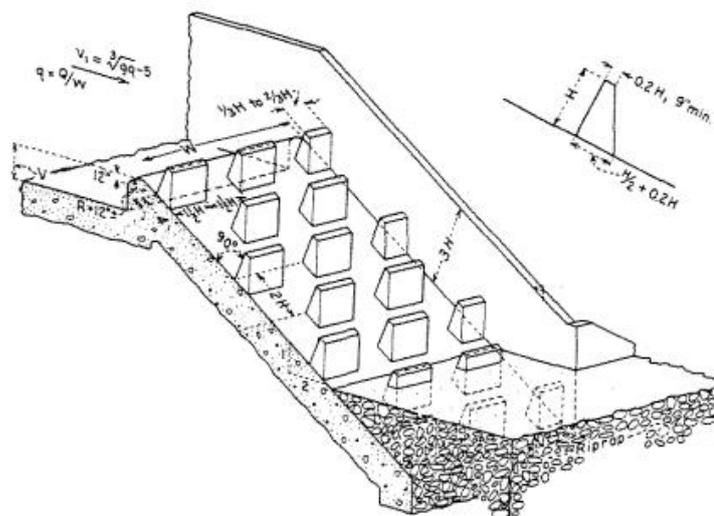


**Figura 11** – Junta de Vedação.  
Fonte: Fugenband

✓ A estrutura de vertimento representa a segurança do aproveitamento, pois a partir dela as vazões extremas de enchente são escoadas para jusante com segurança para o empreendimento (minimização dos riscos de rompimento da barragem). O perfil do vertedouro do tipo “Creager” é o mais comumente utilizado para todos os arranjos hidráulicos (Represamento, Desvio, Derivação), dependendo a sua utilização de questões topográficas, hidrológicas (vazões extremas de enchente), geotécnicas, ambientais e de análise dos custos. O vertedouro Creager apresenta todo seu miolo compacto em concreto, e o escoamento vertente sobre o mesmo pode ser com ou sem controle de comportas, em função de restrições da área alagada criada pelo reservatório (restrições ambientais). Outra estrutura de vertimento é o Canal Lateral Vertedouro, mais comum para verter as vazões de enchente em arranjos de Desvio e para Usinas CGHs e PCHs. Exemplos de vertedouros são apresentados nas Figuras 12 e 13.



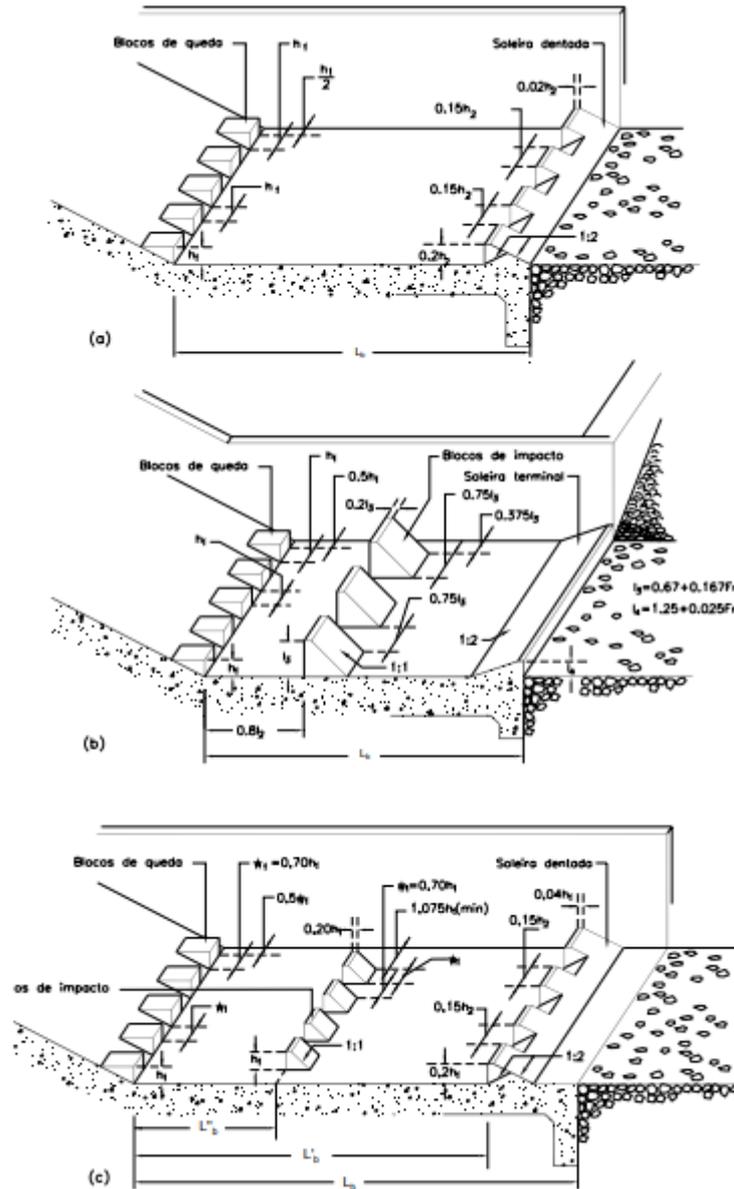
**Figura 12** – Desenho esquemático de um vertedouro tipo sifão  
Fonte: Genovez (1999)



**Figura 13** – Desenho esquemático de um vertedouro tipo soleira dentada  
Fonte: Bureau of Reclamation (1987)

✓ A dissipação da energia tem por objetivo tornar o escoamento efluente ao vertedouro de torrencial para fluvial, minimizando processos erosivos da calha fluvial a jusante. O escoamento vertente das UHEs (Usinas de Represamento) é feita normalmente a partir de estruturas dissipadoras de energia, como nas Bacias de Dissipação de Energia do USBR (United State Bureau Reclamations) dos Tipo II, III, IV, estas compostas por laje plana, e, sobre esta, a disposição de blocos de queda e de amortecimento, e ao final da laje, uma Soleira Terminal, todos de concreto (Figura 14). Já nas CGHs e PCHs, com arranjo hidráulico de desvio, a

dissipação de energia se dá para o escoamento efluente ao canal lateral vertedouro a partir de uma soleira de enrocamento na extremidade de jusante do canal e logo a seguir de uma escada dissipadora de energia;



**Figura 14** – Esquema de bacia de dissipação Tipo II (a), TIPO III (b) e TIPO IV (c)  
Fonte: Thompson, et al. (2006)

✓ O circuito de adução é o componente responsável por captar e aduzir as vazões turbinadas na seção de encaixamento da Central até a casa de força, em geral para arranjos de Desvio, especialmente para PCHs e CGHs. O circuito típico é composto de tomada d'água e gradeamento, registro para controle das vazões, canal (ou tubulação de baixa pressão), chaminé de equilíbrio (ou câmara de carga), e

condutos forçados. O seu projeto varia em função dos estudos hidroenergéticos (vazões turbinadas) e dos aspectos topográficos, geológicos e geotécnicos locais. Sempre que possível, a solução em canal é a mais econômica (ELETROBRÁS, 2000), especialmente se for em terreno natural (canal sem revestimento). A Figura 15 mostra um exemplo de canal revestido com pedra argamassada.



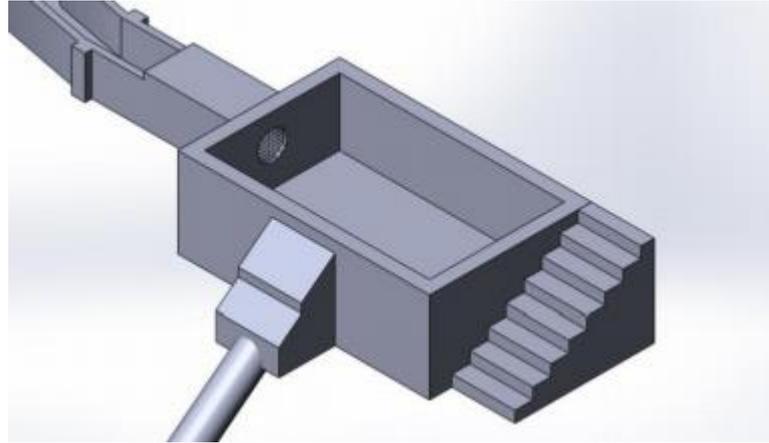
**Figura 15** – Canal de Adução PCH Buriti – Rio Sucuriú /MT  
Fonte: Atiaia Energisa S/A (2014)

- ✓ A casa de força é o local destinado para geração de hidro energia, em quaisquer arranjos de Central. A casa de força pode ser abrigada (“indoor”), como exemplo da Figura 16, ou desabrigada (“outdoor”), o que é definido em função das particularidades de cada sítio(topografia) e arranjo da Central, e ainda, das características dos equipamentos eletromecânicos (ELETROBRÁS, 2000).



**Figura 16** – Casa de Força – PCH Garganta da Jararaca – Rio Sangue / MT  
Fonte: Atiaia Energisa S/A (2014)

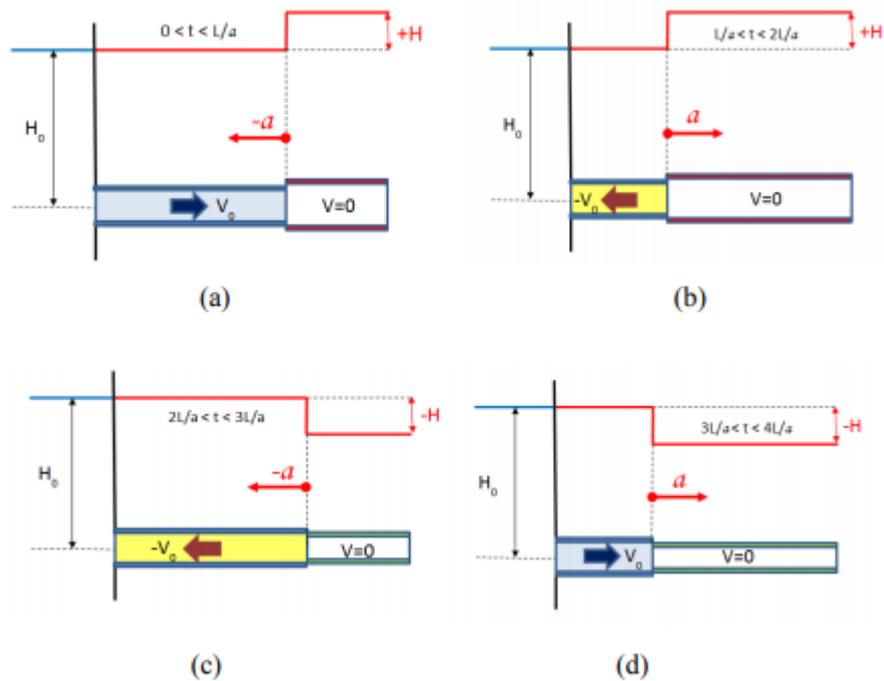
- ✓ A câmara de carga (Figura 17) é uma estrutura utilizada nas PCHs e CGHs em arranjos de desvio e tem por finalidade minimizar as oscilações em massa da água entre esta e o reservatório, assim como a ocorrência de variações elevadas de pressões (golpe de aríete) no conduto forçado localizado a jusante que aduz as vazões turbinadas até a casa de força. Também tem a função de abastecer os condutos forçados de água, especialmente quando de um fechamento inesperado das vazões turbinadas (fechamento do distribuidor das turbinas), amortecendo as alterações próprias da operação da Central. Quando o canal de adução é substituído pela tubulação de baixa pressão, é comum termos a chaminé de equilíbrio no lugar da câmara da carga, esta (chaminé de equilíbrio) sendo utilizada para CGHs, PCHs e UHEs, dependendo da vazão turbinada. A chaminé de equilíbrio (Figura 18) também possibilita a oscilação em massa da água entre a chaminé e o reservatório e a ocorrência de variações elevadas de pressões, golpe de aríete, Figura 19.



**Figura 17** – Esquema em 3D da Câmara de Carga MCH de Rio Branco do Sul.  
Fonte: Coelho e Xavier (2015)



**Figura 18** - Chaminés de Equilíbrio PCH Cavaleiras  
Fonte: Eletrobrás (2000)



**Figura 19-** Esquema do golpe de aríete: (a) Fechamento da válvula e compressão do líquido; (b) Reflexão da onda de pressão; (c) Variação de pressão negativa, propagação da onda à montante; (d) Cargas não balanceadas, escoamento no sentido de jusante, a e  $V_0$  no mesmo sentido, final do ciclo

Fonte: Mattiello (2017)

- ✓ O canal de fuga, como exemplo a Figura 20, tem por objetivo restabelecer as velocidades do escoamento efluente (vazões turbinadas) a casa de força (tubulação de sucção das turbinas) de regime torrencial para regime fluvial, minimizando processos erosivos da calha fluvial a jusante. É um componente utilizado para todos arranjos e Centrais Hidrelétricas. A redução da velocidade devido ao canal de fuga pode se dar pelo aumento da área do canal, ou por soleiras implantadas no canal, ou ainda pelas duas formas de controle operando juntas, como é o caso da UHE de Tucuruí.



**Figura 20** - Canal de Fuga  
Fonte: Stano (2008)

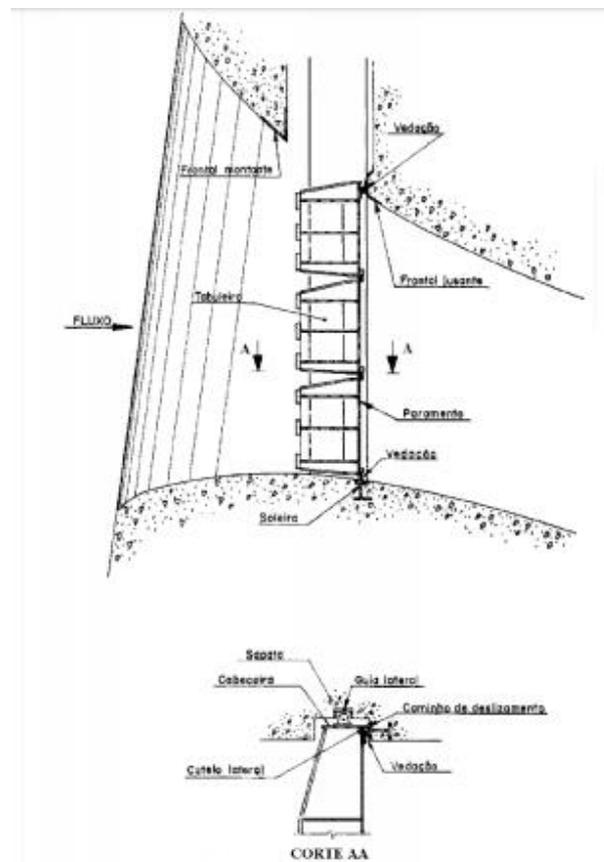
### 3.2.2.2 Componentes Hidromecânicos

A função dos equipamentos hidromecânicos em uma Central Hidrelétrica é servir como elemento de fechamento e efetuar o controle da passagem de água, visando à geração de energia e a manutenção do nível do reservatório. Além desta funcionalidade, eles atuam na condução das vazões turbinadas.

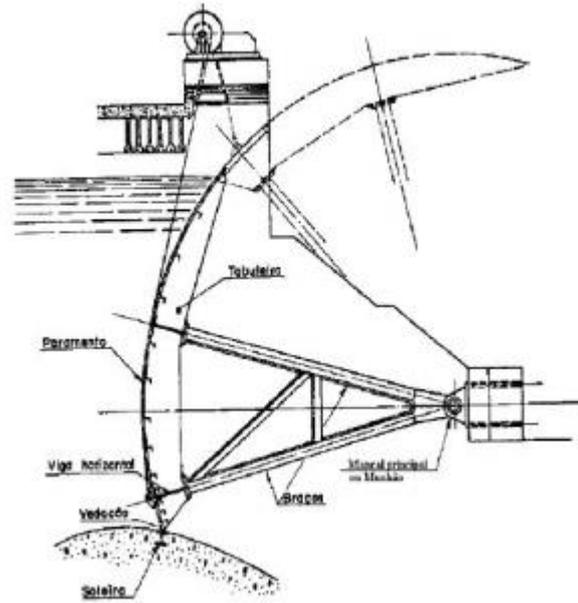
Dentre os elementos hidromecânicos têm-se as válvulas, as comportas, as grades, as turbinas hidráulicas, os reguladores de velocidade, os multiplicadores de velocidade, os acoplamentos, os condutos forçados e os stop logs, como descrito de forma sucinta a seguir:

- ✓ A comporta hidráulica em uma Central é definida por Souza et al (2009) como um dispositivo mecânico cujo objetivo é controlar as vazões em escoamentos livres. As comportas são classificadas por seu tipo de movimento quando em operação, podendo ser de translação, rotação ou translo-rotação.
- ✓ As comportas de translação podem ser do tipo deslizantes, que “aquelas em que a estrutura principal (tabuleiro) se movimenta em suas guias ou peças fixas, simplesmente vencendo o atrito de deslizamento entre as partes fixas e móveis” (ABNT, 2001), como a comporta gaveta e ensecadeira. O outro tipo são as de rolamento, que são “aquelas que a estrutura principal (tabuleiro) se movimenta em suas guias ou peças fixas, vencendo o atrito entre as partes fixas e móveis por meio de rodas ou rolos” (ABNT, 2001), como a Stoney e a vagão.

- ✓ Já as comportas de rotação são “aquelas que executam um movimento de rotação em torno de um eixo fixo” (ABNT, 2001). Exemplos desse modelo são as comportas segmento e basculante.
- ✓ Quando se tem uma comporta que executam os dois movimentos, ou seja, rotação e translação, denomina-se de comportas de translo- rotação. Um exemplo desse tipo de comporta, é a rolante.
- ✓ Nas Figuras mostradas a seguir são ilustradas as comportas mais utilizadas em centrais.



**Figura 21** – Comporta de Translação do tipo deslizamento - Enescadeira  
 Fonte: Alyne Siguel (2012)



**Figura 22** – Comporta de rotação do tipo segmento  
Fonte: NBR 7259 (2001)

- ✓ As válvulas em uma Central liberam, interrompem e regulam a vazão e pressão do escoamento, a exemplo da válvula de purga nos arranjos de represamento em UHEs (que produz a purga dos sedimentos no reservatório), ou da válvula que regula as vazões afluentes ao canal de adução para os arranjos de desvio (CGHs e PCHs) (SOUZA *et al*, 2009).



**Figura 23** – Válvula tipo Borboleta para Centrais  
Fonte: Asvotec (2015)

- ✓ As grades das tomadas d'água (Figura 24) das centrais, para todos os arranjos e tipos de Usinas, têm a função de impedir a entrada de detritos naturais e objetos de tamanho tal que possam provocar prejuízos e danos às turbinas, prejudicando a operação da Usina.



**Figura 24** – Instalação de grade na Usina de Itaipu  
Fonte: Itaipu (2010)

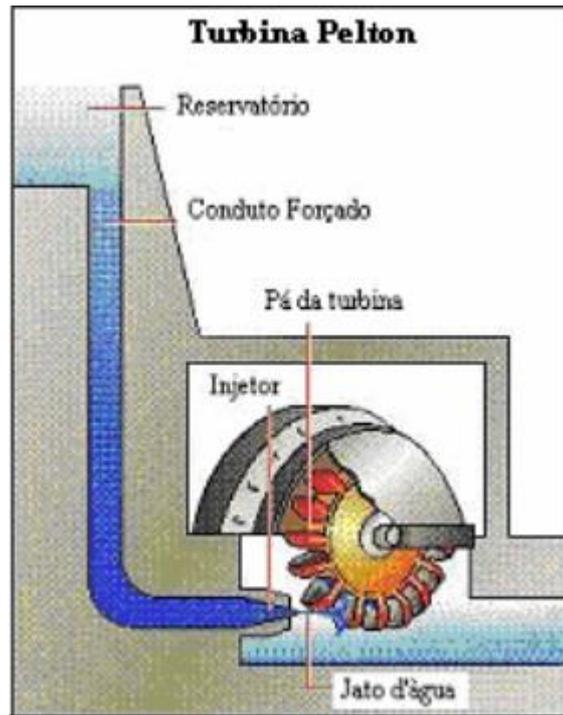
- ✓ As turbinas hidráulicas nas Centrais são responsáveis por transformar energia gravitacional do escoamento na seção da Central em energia mecânica e está em energia elétrica através da força eletromotriz induzida do gerador (AMORIM, 2010). As turbinas são classificadas em função do desnível (quedas baixas ou elevadas) e da vazão turbinada característicos da Central em

Pelton (Figura 25), Francis (Figura 26), Kaplan (Figura 27), e Bulbo (Figura 28).

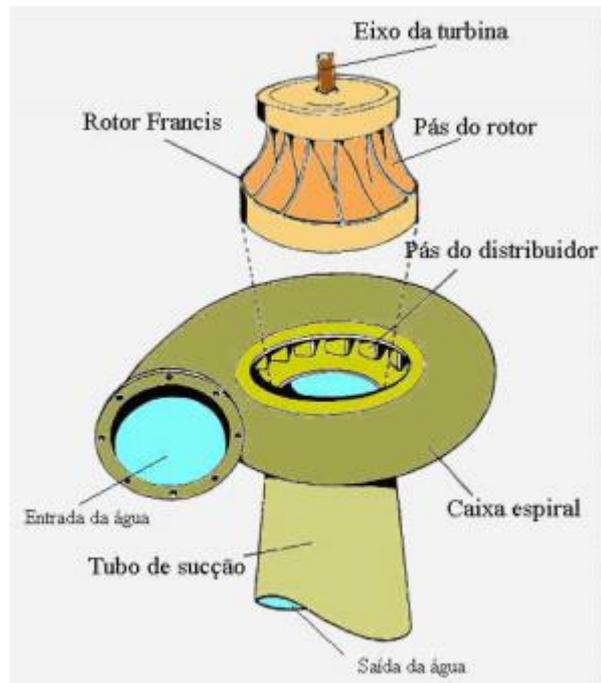
Todas as turbinas são abastecidas de água por um reservatório (ou canal) com nível mais elevado, que escoam as vazões turbinadas para um canal localizado em nível inferior, sendo este fluxo de água dirigido através de um conduto forçado até um conjunto palhetas, que transferem a energia da água para o rotor do gerador, sendo as vazões turbinadas efluentes encaminhadas até o tubo de sucção da turbina, e deste até o reservatório ou canal inferior (canal de fuga) (AMORIM, 2010).

**Tabela 1** - Campo de Aplicação das Turbinas Hidráulicas, (LUIZ, 2005)

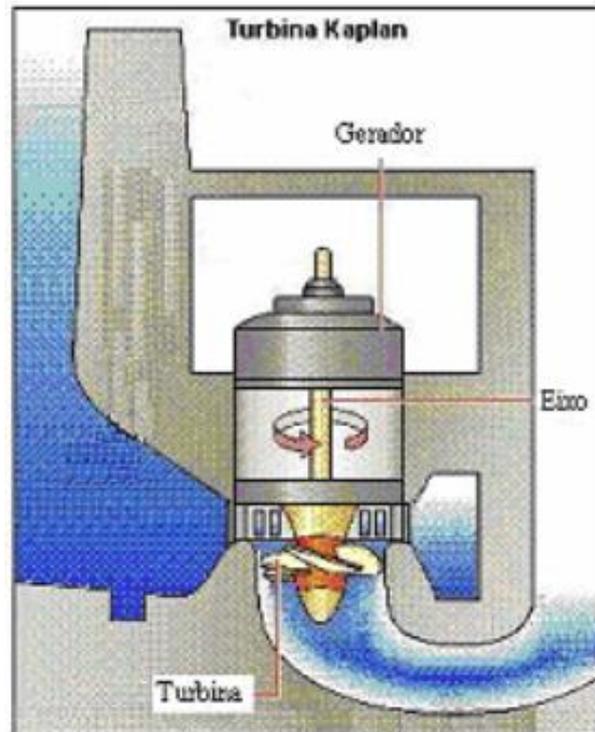
<b>Tipo de Turbinas</b>		<b>Rotação r.p.m.</b>	<b>Altura H (m)</b>
Pelton	1 jato	18 – 25	800 – 400
	2 jatos	26 – 35	800 – 400
	4 jatos	40 – 50	400 – 100
	6 jatos	72 – 90	400 – 100
Francis	Muito lenta	55 – 70	600 – 200
	Lenta	71 – 120	200 – 100
	Normal	121 – 200	100 – 70
	Rápida	201 – 300	70 – 25
	Extra-Rápida	301 – 450	25 – 15
Kaplan, Bulbo, Tubulares, Straflo	8 pás	250 – 320	70 – 50
	7 pás	321 – 430	50 – 40
	6 pás	431 – 530	40 – 30
	5 pás	534 – 620	30 – 20
	4 pás	624 e acima	30



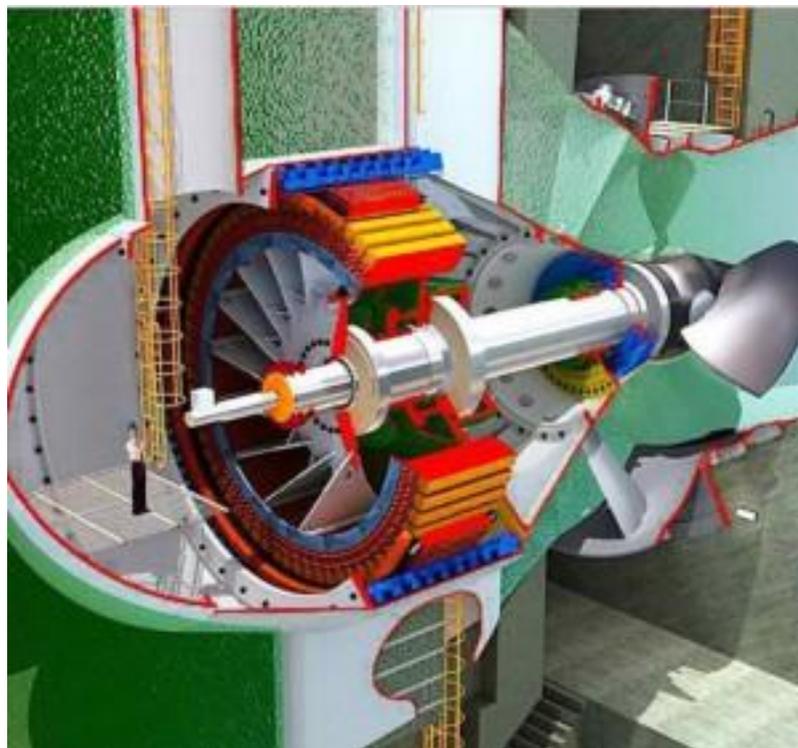
**Figura 25** – Turbina Pelton  
Fonte: ENCINA (2006)



**Figura 26** – Turbina Francis  
Fonte: Júnior (2006)



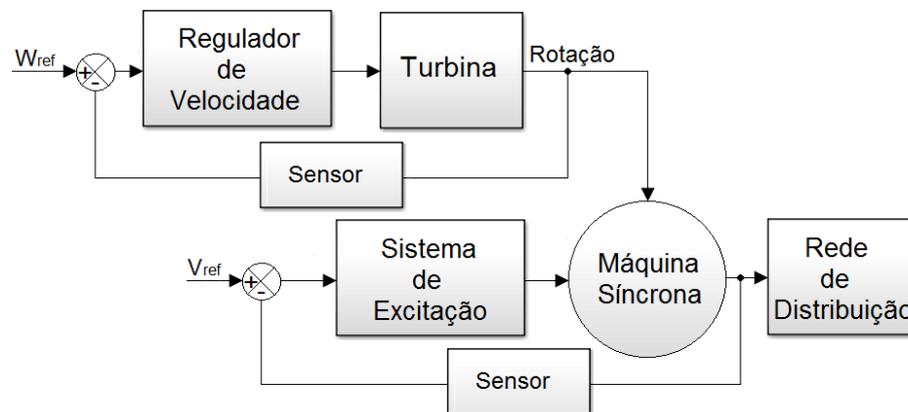
**Figura 27** – Turbina Kaplan  
Fonte: ENCINA (2006)



**Figura 28** – Turbina Bulbo  
Fonte: Santo Antônio Energia (2016)

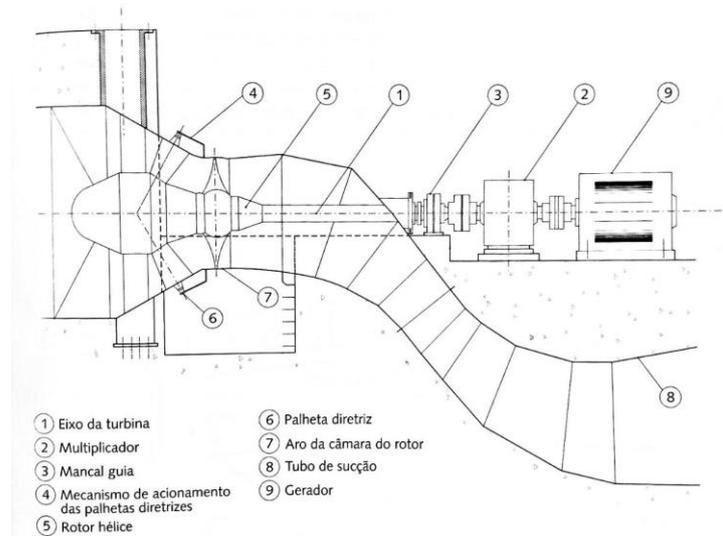
- ✓ Os reguladores de velocidade em uma Central têm como principal função a regulação do fluxo da vazão de água no conduto forçado quando da redução das vazões turbinadas, devido a alterações no regime hidrológico do rio, tendo em vista manter uma rotação constante nas unidades geradoras, conforme a carga desejada.

Os reguladores de velocidades podem ser encontrados com concepção hidromecânica, analógica, digital ou microprocessado. A principal vantagem de usar sistemas eletrônicos mais modernos, como o microprocessado, é a possibilidade de ajustes e alterações dos parâmetros, incorporando limitadores e funções ao sistema (MELQUIADES, 2017).



**Figura 29** – Sistemas de controle são aplicados a sistemas hidrelétricos  
Fonte: Alver (2018)

- ✓ Os multiplicadores de velocidade – item 2 da Figura 30 – são utilizados em casos de velocidades mais baixas que as exigidas entre a interface das pás da turbina e o gerador elétrico, aumentando assim a rotação de saída das mesmas para o intervalo de rotação compatível ao necessário para a utilização do gerador, com o propósito de reduzir os custos referentes aos geradores (SOUZA, 2011).



**Figura 30** – Instalação típica de uma turbina tubular – Item 2 – Multiplicador de velocidade  
 Fonte: ABNT (1987)

- ✓ O conduto forçado (Figura 31), também denominado de conduto de alta pressão já que o líquido no seu interior se encontra sob uma pressão distinta a atmosférica, transporta o fluido de trabalho até a turbina. Diferente do conduto de adução, as seções desses condutos são sempre fechadas. São tubulações executadas em aço e fixadas através dos blocos de apoio e ancoragem, executados em concreto armado (ELETROBRÁS, 2000).



**Figura 31** – Conduto Forçado – PCH Garganta da Jararaca – Rio Sangue / MT  
 Fonte: Atiaia Energisa S/A (2014)

- ✓ Stop logs: Também denominada de ensecadeira, essa comporta é acionada quando é feita manutenção ou troca de equipamentos dentro da tomada d'água, por exemplo. Pode ser formada por vários elementos, como retratado na Figura 32, denominados painéis de comporta ensecadeira (Bastos, 2018).



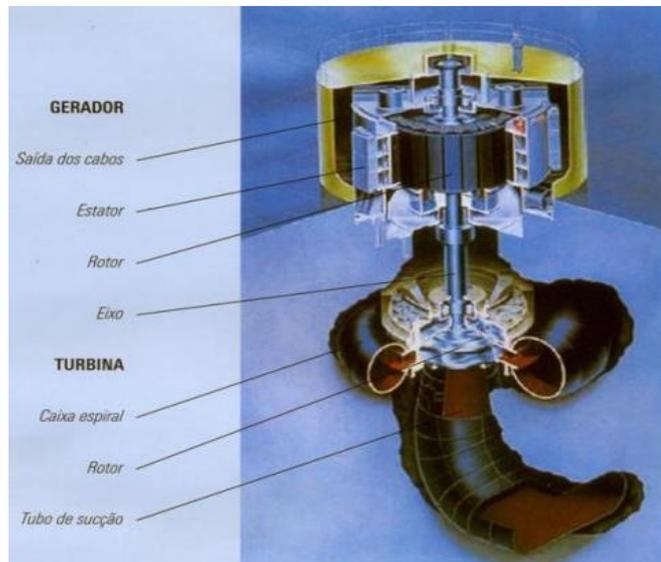
**Figura 32** – Comporta Stop Log  
Fonte: Alstom (2009)

### 3.2.2.3 Componentes Eletromecânicos

Dentre os dispositivos eletromecânicos usuais de uma Central temos os geradores elétricos, disjuntor, gerador, equipamentos de medição elétricos, equipamento de proteção, transformador elevador e as linhas de transmissão e de distribuição e as subestações transformadoras e redutoras/elevadoras de tensão. A seguir é feita de forma sucinta a explicações de tais componentes:

- ✓ Os geradores elétricos (Figura 33) em uma Central transformam energia mecânica das turbinas em energia elétrica e seu funcionamento é baseado a indução eletromagnética, onde, através da rotação das palhetas da turbina, que tem acoplado em seu eixo um gerador de eletricidade, geram uma força eletromotriz induzida, sendo está variação necessária para o surgimento de tensão elétrica. Conforme Souza *et al* (2009), os geradores elétricos podem ser síncronos ou assíncronos. Os geradores elétricos síncronos, de maior aceitação e utilização, trabalham com a velocidade constante e igual a velocidade síncrona, enquanto os geradores elétricos assíncronos, chamado

também de geradores por indução, trabalham com rotação levemente diferentes da rotação síncrona.



**Figura 33** – Interior de um gerador de Usina Hidrelétrica  
Fonte: SEVÁ (2005)

- ✓ O disjuntor do gerador das Centrais Elétricas (Figura 34), assim como aqueles residenciais, tem a função de proteger o equipamento contra danos causados por curto-circuito e sobrecargas elétricas, a exemplo de energização acidental, sobre excitação, perda de sincronismo, dentre outros.



**Figura 34** – Disjuntor HRV – 63  
Fonte: ABB (2020)

- ✓ Os equipamentos de medição elétricos são dispositivos capazes de mensurar a quantidade de energia elétrica produzida pelas Unidades Geradoras de Energia Elétrica em um determinado local da rede de distribuição. São geralmente ligados entre a rede de distribuição e a carga, ou através de transformadores de acoplamento de tensão, e/ou corrente. Usualmente as usinas contam com painéis (Figura 35) para a realização de todas as medições necessárias, como o mostrado a seguir (ANEEL, 2010).



**Figura 35** – Painel de medição  
Fonte: ERZEG (2020)

- ✓ Os equipamentos de proteção do Sistema de Energia Elétrica têm a função de proteger o mesmo contra as descargas elétricas não previstas. O para raio (Figura 36) é um exemplo de equipamento que está incluso em um sistema de proteção.



**Figura 36** – Para-raios de Carboneto de Silício  
Fonte: PALLARO (2013)

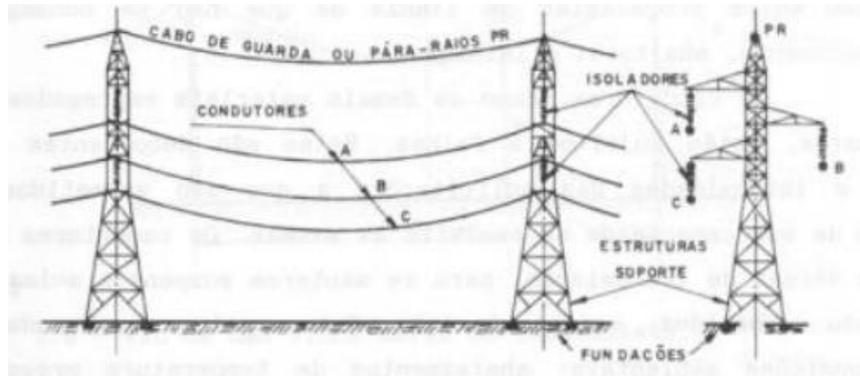
- ✓ O transformador elevador (Figura 37) no Sistema Elétrico tem a função de receber a tensão dos terminais do estator e em seguida aumentar para níveis de transmissão a fim de reduzir as perdas causadas pelo aquecimento dos condutores, por exemplo (ANEEL, 2010).



**Figura 37** – Transformador Elevador  
Fonte: RVA (2020)

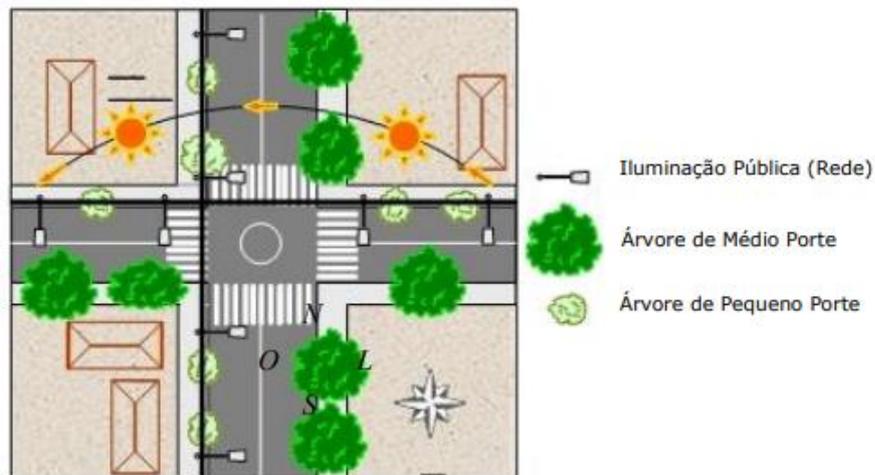
- ✓ As linhas transmissão no Sistema Elétrico tem a função de transportar a energia elétrica da unidade geradora até às subestações de alteração de tensão elétrica, onde a eletricidade se encontra próxima as subestações responsáveis por diminuir a tensão elétrica e posteriormente distribuí-la. Essa

transmissão ocorre através dos cabos aéreos fixados em torres metálicas, conforme Figura 38 (ANEEL, 2010).



**Figura 38** – Principais componentes da LT  
Fonte: LABEGALINI, P. R. et al. (1992)

- ✓ As linhas distribuição no Sistema Elétrico tem a função de distribuir energia elétrica para os consumidores através de um conjunto de estruturas (Figura 39), condutores e equipamentos elétricos, podendo ser dispostos em redes aéreas ou subterrâneas, sendo sua faixa de operação baixa, media e/ou alta tensão de distribuição (limite superior de 230 KV) (ANEEL, 2010).



**Figura 39** – Redes de distribuição e seu posicionamento  
Fonte: Eletrobras Amazonas Energia (2012)

- ✓ Subestações transformadoras (Figura 40) são os locais onde o nível de tensão de suprimento é convertido. Essas subestações são classificadas em elevadoras ou redutoras.

Em função da alta potência das geradoras, é necessário aumentar a tensão para transmitir essa energia, caso contrário haverá altas perdas por efeito joule. O aumento da tensão é feito nas subestações elevadoras, localizadas nas proximidades da usina, que elevam a tensão para valores padronizados: 69kv, 88 kv, 138 kv, 230 kv, 345 kv, 440 kv, 500 kv, 600 kv (em CC), 750 kv.

Antes da energia ser distribuída para os consumidores, se faz necessário reduzir a sua tensão. Esta modificação é realizada nas subestações redutoras, localizada no final das linhas de transmissão e próximas aos centros de consumos. Sendo assim, é desse local que se inicia o processo de distribuição da energia. (ANEEL, 2010).



**Figura 40** – Subestação de energia  
Fonte: Portal do eletrícista (2015)

### **3.3 Estruturas de Vertimento Convencionais dos Reservatórios Hidrelétricos**

O vertedouro é um “grande orifício” cuja aresta no topo foi suprimida “vão livre” ou “com o controle do escoamento através de comportas”, de forma que, a parte superior da veia líquida que flui sobre a estrutura, fica submetida à pressão atmosférica. É instalado na direção perpendicular ao fluxo, fazendo elevar o nível d’água a montante até que se forme uma lâmina sobre a estrutura, que é a carga hidráulica da vazão da cheia de projeto, descarregando a vazão correspondente a altura desta lâmina (PORTO, 2004).

O vertedouro pode ser usado para se estimar as vazões afluentes ao barramento da Central, mas sua função principal em um aproveitamento é a segurança no vertimento das vazões extremas ao reservatório, e portanto de toda Usinadas, visto que são responsáveis por conduzir para jusante, sem riscos para o empreendimento, as afluências de vazões geradas por eventos fluviométricos extremos, podendo ou não ser dotados de dispositivos de controle dos níveis d’água na sua crista.

Os vertedouros de extravasamento das vazões mais utilizados nas obras hidráulicas das Centrais são descritos nos itens que se seguem.

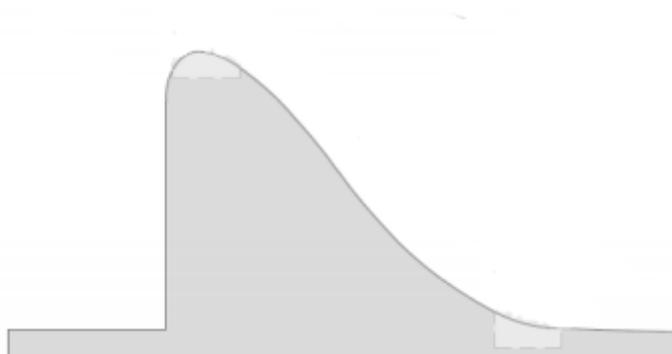
#### **3.3.1 Vertedouro Creager**

Segundo Turella (2010) os vertedouros com perfil tipo Creager são projetados de maneira a permitir o assentamento da lâmina vertente sobre toda a soleira, com a finalidade de gerar um coeficiente máximo de descarga ao vertedouro e prevenir o aparecimento de zonas de pressão negativas (sub pressão), que podem causar danos futuros ao concreto devido ao processo de cavitação.

Porto (2006) cita que a soleira do vertedouro em perfil Creager é definida como normal, quando para uma determinada vazão  $Q$  o seu perfil verifica a pressão atmosférica local ao longo de todo o vão da soleira e a carga de projeto deve ser medido em relação a crista do vertedouro (ponto mais alto do perfil).

Os vertedouros tipo Creager possuem a sua superfície inclinada, de modo que o início do ressalto a jusante do vertedouro varie de acordo com relação entre a altura de água sobre o fundo da bacia e a altura conjugada lenta. Portanto, devem ser previstos bacias de dissipação para garantir que o início do ressalto aconteça de preferência no pé da estrutura (TURELLA, 2010).

É salientado por Oliveira (2004) que no estudo deste tipo de vertedouro, podem ser desprezados os efeitos de viscosidade e tensão superficial, por meio dos princípios físicos de balística e equações da cinemática.



**Figura 41** – Vertedouro tipo perfil Creager  
 Fonte: Adaptado de BAPTISTA e COELHO, (2010)

Os vertedouros com esse perfil podem ser em soleira retilínea baixa e soleira retilínea alta. O primeiro modelo é mais utilizado em usinas de pequena queda. Nele a velocidade de aproximação é habitualmente mais elevada, resultando um menor tirante d'água e conseqüentemente uma menor área molhada. Já o segundo modelo é usualmente utilizado em arranjos de regularização anual ou plurianual. Segundo Ottoni (2002) “são estruturas hidráulicas que controlam o nível d'água a uma curta distância um paralelismo, de modo que, na seção de controle, haja uma adequada distribuição das pressões hidrostáticas”.

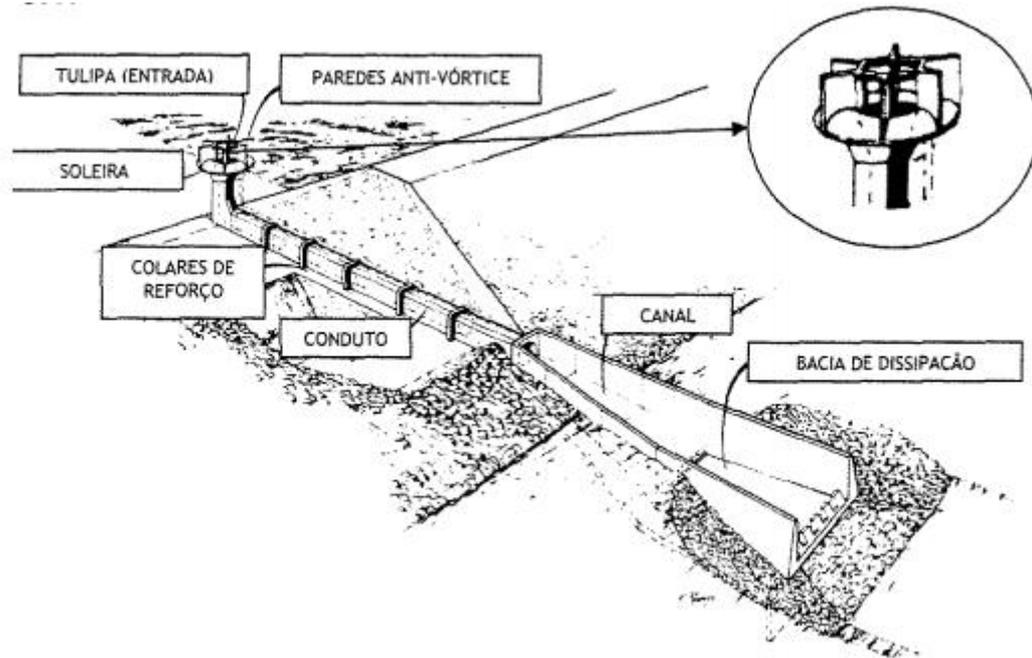
### 3.3.2 Vertedouro Tulipa

O vertedouro do tipo Tulipa pode ser caracterizado por possuir a sua estrutura independente do corpo da barragem, o que é o mais adequado para projetos de barragens de terra e de enrocamento, e onde a geotecnia favorece, por um “túnel em rocha”, a sua instalação. Quando visto em corte, o vertedouro tulipa se assemelha ao perfil Creager, isso acontece para que as pressões na superfície do vertedor sejam próximas a pressão atmosférica (TURELLA, 2010).

De acordo com Oliveira (2004), o fluxo do escoamento no vertedouro tulipa passa por uma soleira horizontal, conforme mostrado na Figura 42 normalmente circular em planta, design semelhante a um funil, seguido por um poço vertical ou inclinado que é conectado por uma curva ao túnel de descarga, que geralmente possui uma estrutura para a dissipação de energia no final do túnel. A estrutura de dissipação pode ser uma bacia convencional ou outra que lance o escoamento e reduza seu nível energético. Deve também ser elaborado um

anteparo na soleira horizontal (entrada do vertedouro) com a finalidade de impedir a formação de vórtice.

A função dos dissipadores de energia é promover a desaceleração do escoamento de água em descarga intensa pelo vertedouro, transformando esse escoamento de supercrítico para subcrítico. Essa desaceleração é justificada pela necessidade de promover a restituição do escoamento ao curso d'água a jusante da barragem como uma energia residual que não gere tanto a erosão no leito do rio quanto danificação da estrutura em si (ONCKEN, 2016)



**Figura 42** – Vertedouro Tulipa  
Fonte: Oliveira, (2004)

A tulipa (entrada) preferencialmente é circular, por permitir grandes vazões para menores extensões de crista. Soleiras planas podem também ser utilizadas para projetos simplificados. No término do perfil há um trecho de transição geométrica até a seção regular da galeria vertical, mantendo o fluxo colado às suas paredes.

Segundo FERREIRA (2007), “o poço é projetado de modo que sua seção transversal permita a passagem da vazão líquida de projeto, sem a ocorrência de depressões inaceitáveis, podendo ser vertical ou inclinado”.

A ligação do poço ao túnel horizontal é feita por meio de uma curva, que pode ser de vários tipos, sendo comum a do tipo circular simples de raio constante.

Um aspecto interessante a ser considerado é a possibilidade de reutilização da galeria de desvio, empregada no desvio do rio na fase de construção da barragem, como o túnel do vertedor. Para isto, o túnel de desvio deve ter sido projetado já com esta finalidade.

Com relação ao escoamento na seção transversal o mesmo deve ser apenas de um tipo ao longo do túnel, ou seja, ou o escoamento deve se dar à seção plena ou à seção livre. Caso ocorra uma transição entre estas duas condições ondas são propagadas pela estrutura, provocando vibrações indesejáveis.

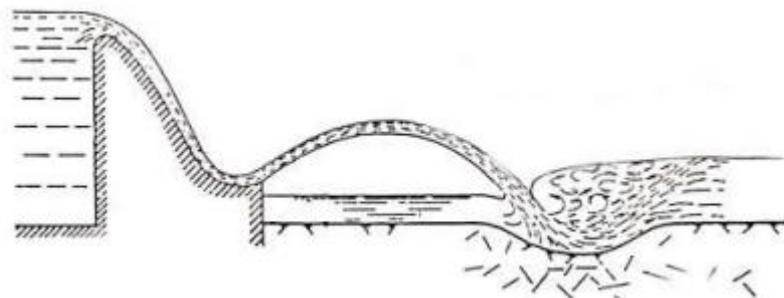
A decisão de implantação deste sistema deve estar vinculada a algumas situações específicas, como (TURELLA, 2010):

- Em casos que exista a possibilidade de aproveitar o canal de desvio, em empreendimentos com espaço limitado para o vertedor convencional;
- Na presença de uma geotcnia favorável (presença de rocha mais superficiais) na área do reservatório;
- Quando possuir galeria de descarga com comprimentos moderados; e,
- Quando a quantidade material flutuante for desprezível.

### **3.3.3 Vertedouro com Salto em Esqui**

O vertedouro com salto em esqui, é uma associação do vertedouro em perfil Creager, tenso na sua extremidade de jusante um ângulo  $\alpha$  que deflete o jato fluente em forma de um “salto esqui” na saída. Este vertedouro destaca-se por possuir uma estrutura altamente econômica em locais com condições morfológicas favoráveis (rochas a jusante), visto que dispensa um sistema de dissipação de energia tradicional, pois a dissipação de energia do escoamento vertente é proporcionada pela resistência do ar e pelo interior do colchão d’água formado pelo lançamento do jato a jusante do vertedouro, e mantendo bom desempenho hidráulico do projeto.

De acordo com Ferreira (2011), o salto de esqui tem como objetivo realizar a dissipação de energia longe da estrutura do vertedouro. Assim, utiliza-se uma concha no fim da calha do vertedouro, que lança o jato para longe, impactando o tirante d’água ou, na ausência deste, diretamente o maciço rochoso (Figura 43).



**Figura 43** – Representação Típica de Salto de esqui  
Fonte: Palauro, (2017)



**Figura 44** – Dissipador Salto de Esqui da UHE Luiz Carlos Barreto de Carvalho  
Fonte: Palauro (2017)

O vertedouro salto esqui pode ser uma alternativa muito econômica quando dispensa a construção de uma bacia de dissipação convencional a jusante do lançamento do jato d'água, o que depende do arranjo da estrutura, caracterizado pela necessidade de condições topográficas e geotécnicas favoráveis ao lançamento do jato longe da estrutura (BORJA *et al*, 2013).

A preocupação básica nos projetos desse tipo de dissipador, principalmente para maciços rochosos fraturados, “é a avaliação da profundidade da fossa de erosão - “cratera de coesão” - que pode ser criada, na região de impacto do jato, pela ação da energia residual do escoamento turbulento” (PEREIRA; BRITO; GONÇALVES, 2007).

Vale ressaltar que segundo Borja *et al* (2013) se a coluna de água que recebe o jato d'água do vertedor esqui não for expressiva, a energia que deveria ser dissipada pela mesma será transferida ao leito, conseqüentemente aprofundará ainda mais a fossa, podendo a cratera alcançar a fundação das estruturas no eixo do aproveitamento. A maneira que o maciço absorve a energia pode ocasionar pressões dinâmicas elevadas, provocando fossas de erosão

profundas e instáveis à jusante do vertedor, podendo assim originar em consequências nocivas ao empreendimento.

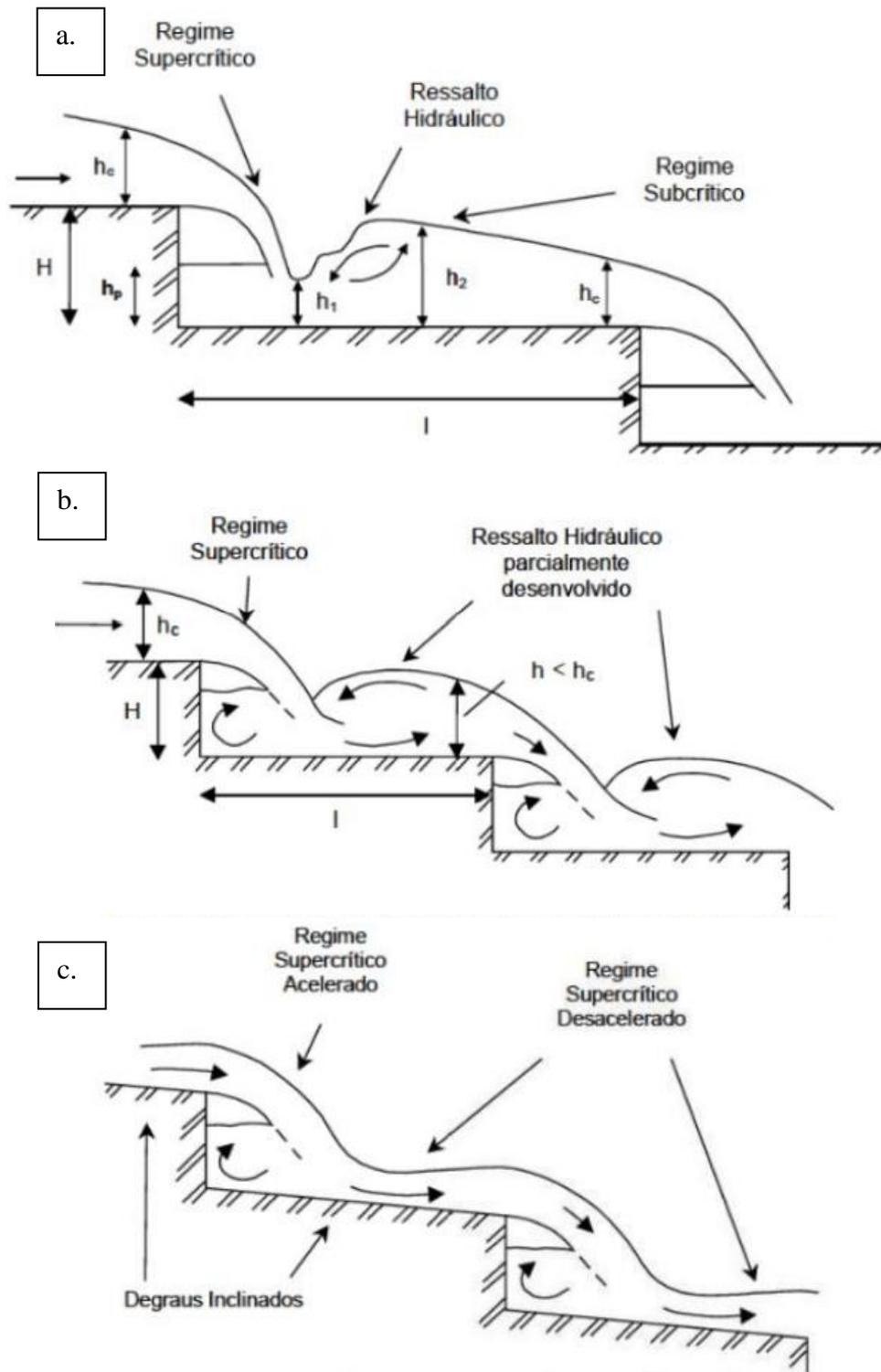
### **3.4 Estruturas de Vertimento Não Convencionais dos Reservatórios Hidrelétricos**

Além dos vertedouros convencionais citados acima, que são amplamente utilizados na maioria das centrais hidrelétricas, foram desenvolvidos, ao longo do tempo, outros dispositivos de vertimento em função de aspectos econômicos, de espaços disponíveis no eixo do aproveitamento e das demandas inerentes a diferentes tipos de implantação, os chamados “vertedouros não convencionais”, tais como o vertedouro em degraus e o vertedouro labirinto, os quais são descritos a seguir.

#### **3.4.1 Vertedouro em Degraus**

Para Sanagiotto (2003) o fluxo sobre os vertedouros em degraus pode ser dividido em dois esquemas: o primeiro sendo o regime de escoamento em quedas sucessivas (nappe flow) e o outro o regime de escoamento deslizante (skimming flow). Existe ainda, uma zona de transição entre os dois esquemas, caracterizando em um regime misto, que ainda não é muito bem definido. Os esquemas estão mostrados na Figura 45.

O regime de escoamento em quedas sucessivas é marcado por uma série de quedas livres seguidas por um ressalto hidráulico pleno ou parcialmente desenvolvido, observados na Figura 46. Este tipo de regime ocorre em estruturas com menores declividades e pequenas vazões, a sua dissipação de energia é concebida na quebra do jato de água no ar e pela formação de ressalto hidráulico ao longo dos degraus.

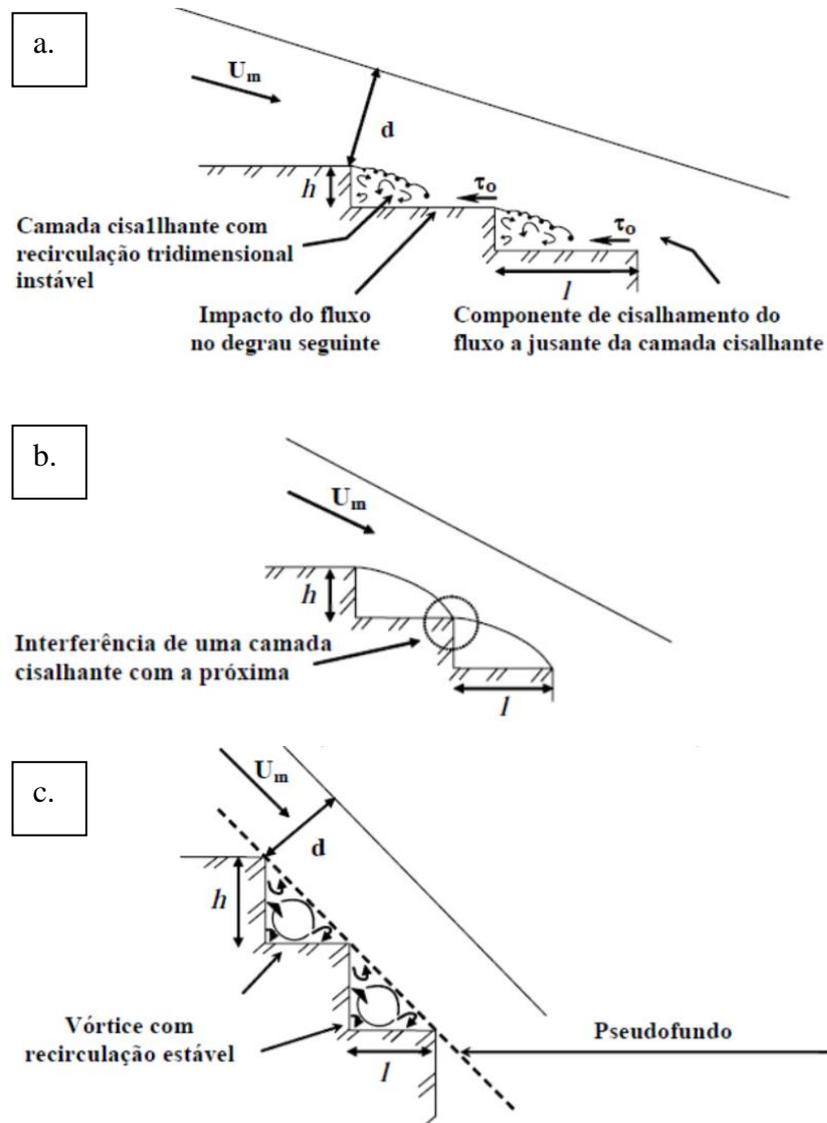


**Figura 45** – Diferentes configurações do regime de escoamento em quedas sucessivas: a) com o ressalto hidráulico plenamente desenvolvido; b) com ressalto hidráulico parcialmente desenvolvido e c) sem a formação de ressalto hidráulico.

Fonte: Sanagiotto (2003)

O regime de escoamento deslizante destaca-se por seu fluxo acontecer praticamente sem tocar nos degraus. Isso ocorre devido à formação de um pseudofundo desenvolvido pelos cantos externos dos degraus e abaixo do fluxo d'água formam-se vórtices, vórtices que

são mantidos pela transmissão de esforços cortantes do escoamento principal a zona turbilhonar. Este modelo de regime é utilizado geralmente em locais com calhas de maiores declividades e grandes vazões específicas.



**Figura 46** – Tipos de escoamento deslizante sobre turbilhões: a) Sub-regime de interferência camada cisalhante-degrau; b) Sub-regime de interferência camada cisalhante- camada cisalhante; c) Sub-regime de recirculação nos degraus.

Fonte: Gomes (2006)

Segundo a Agência Nacional de Água - ANA (2016), o vertedor tipo degrau possui algumas implicações para a sua implementação:

- Só pode ser aplicado em barragens do modelo CCR – Concreto Compactado a Rolo;
- É aconselhável para vazões específicas vertentes baixas ( $q < 12 \text{ m}^3/\text{s.m}$ ).

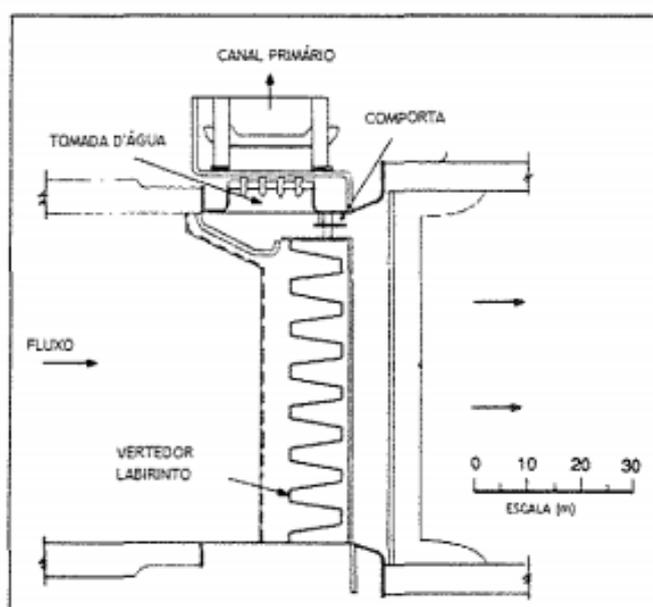
Como os vertedouros tipo salto em esqui, este modelo também dispensa a utilização de dissipadores de energia, pois ao longo do vertimento nos degraus é realizada a dissipação de energia.

### 3.4.2 Vertedouro Labirinto

O vertedouro em labirinto caracteriza-se por possuir uma infinidade de variações de formato, podendo possuir geometria em planta em forma de V ou U alocados lado a lado, com isso apresenta o desenvolvimento da crista maior do que um vertedor frontal (tipo creager), ocupando a mesma largura (Oliveira, 2004).

Para Oliveira (2004) mesmo com a variedade de formas e distribuições do vertedouro tipo labirinto, o mais viável é o vertedor trapezoidal simétrico, devido a sua simplicidade construtiva em relação aos outros tipos.

Na Figura 47 é possível visualizar em planta o formato de um vertedouro Labirinto:



**Figura 47** – Planta do vertedor em labirinto da barragem Ciwadas, na Indonésia  
Fonte: Oliveira (2004)

Os vertedouros tipo labirinto são econômicos, pois o comprimento da crista pode ser comprimido em um estreito trecho disponível para o vertimento, reduzindo a altura vertente para uma grande descarga, a altura do próprio vertedor possibilita o armazenamento no reservatório como uma estrutura de comportas. Em momentos de baixo fluxo d'água, existem problemas com a oscilação da lâmina vertente uma vez que não existe aeração, acarretando em colamentos e descolamentos sucessivos (Oliveira, 2004).

Oliveira (2004) afirma que para amenizar os problemas citados é recomendado instalar pilares de arejamento para que se evitem instabilidades no escoamento.

### **3.5 Soleira de Admitância como Estrutura de Vertimento em Pequenos Reservatórios Hidrelétricos a Fio D'Água**

Para compreender o conceito da soleira de admitância, é necessário contextualizar a pesquisa realizada por Ottoni (2002). O ponto nevrálgico da pesquisa foi a regularização de cotas fluviométricas do escoamento da calha fluvial, com a minimização da estrutura de dissipação de energia a jusante, ou seja, buscava-se na pesquisa uma estrutura de regularização dos NA's, cujo seu perfil vertente fosse auto dissipador da energia do escoamento efluente a soleira.

O fundamento clássico de projetos para regularização de cotas e vazões fluviométricas está de acordo com as seguintes metodologias (regularização pontual de vazões):

- Implantação de barragem com menor altura, com operação a fio d'água, formando menores reservatórios com reduzida área alagada, com regularização de vazões diárias, tendo como estrutura de vertimento as soleiras retilíneas baixas de perfil Creager, em geral com controle do escoamento vertente das vazões extremas de enchente a partir e comportas de segmento.
- Implantação de barragens com maiores alturas que formam grandes reservatórios de regularização anual ou plurianual de vazões, visando armazenar água nos períodos úmidos para garantir disponibilidade hídrica à jusante nos períodos de estiagem.

Nos projetos de regularização pontual de vazões, as estruturas hidráulicas de vertimento do arranjo a fio d'água, são escolhidas apenas pelo critério da eficiência hidráulica. Por isto escolhe-se para esse arranjo o vertedouro de soleira retilínea baixa com perfil Creager como obra de vertimento das vazões extremas.

A pesquisa de Ottoni (2002) objetivou propor uma estrutura hidráulica que integrasse a eficiência hidráulica com os aspectos ambientais, construtivos, e de custos. A estrutura proposta e testada em modelo físico hidrodinâmico no seu trabalho é a soleira de admitância.

O objetivo original da soleira de admitância idealizado na pesquisa, operando de forma isolada, foi o de controlar o nível d'água do escoamento de calha fluvial, por exemplo, pra afogar uma tomada d'água de abastecimento.

A instalação do vertedouro tipo soleira retilínea baixa com perfil Creager para o vertimento das vazões de enchente das Centrais a fio d'água apresenta as seguintes desvantagens:

- Interrompe o fluxo de sedimentos e nutrientes, e o fluxo das espécies de peixes (ictiofauna), no estirão fluvial de sua influência, sendo, portanto, ambientalmente desfavorável.
- Trata-se de uma estrutura compacta e pesada, de alto custo, sendo, portanto, desfavorável economicamente.
- A execução da obra é demorada, e exige condições específicas da geomorfologia do leito para suportar o peso da estrutura, sendo, portanto, desfavorável no aspecto construtivo.
- Tem baixa capacidade de dissipar a energia do fluxo, avaliada em aproximadamente 30% para vazões mais frequentes, necessitando de obras a jusante para tal, encarecendo ainda mais a obra.
- A bacia hidráulica formada pelo barramento torna o balanço hídrico desfavorável na medida em que tende a favorecer a evaporação.

A presente dissertação propõe utilizar a estrutura da soleira de admitância e sua configuração como de vertimento das vazões extremas para pequenos reservatórios hidrelétricos que operam a fio d'água, como será descrito nos capítulos a seguir.

### **3.5.1 Concepção e Características da Soleira de Admitância**

A concepção da soleira de admitância tem as seguintes características mais sugestivas da estrutura (Ottoni, 2002), conforme Figura 47:

- Por se tratar de uma estrutura vazada (orifícios no perfil e ranhuras no fundo), ela não interfere o fluxo biológico e sedimentológico do estirão fluvial sob sua influência.
- Os orifícios localizados no corpo da estrutura, e as ranhuras de fundo, garantem o escoamento controlado nas águas baixas e médias, retendo com maior frequência, escoamentos mais duráveis na calha.

- Pelo fato de estrutura não ser inteiriça, a acumulação é mais flexível. É possível otimizar as acumulações, obturando-se os orifícios quando for conveniente.
- A bacia hidráulica formada pela instalação da estrutura tende a ser de área reduzida, diminuindo as perdas evaporativas.
- A composição entre os escoamentos impostos pela estrutura, quais sejam os : escoamentos pelos orifícios de fundo, pelas ranhuras verticais, e sobre o seu perfil, tem a função dupla de manejar as vazões a jusante e dissipar energia.
- O tempo necessário à obra é menor, assim como os custos, pois a estrutura não é compacta, tendo seu perfil vazado. É uma estrutura mais leve, e com menores exigências quanto as condições geotécnicas relacionadas a fundação estrutural.

A Figura 48 mostra o perfil do vertedouro tipo soleira de admitância, a qual foi chamada de alternativa inicial (“alternativa zero”). Trata-se de uma configuração inicial do trabalho de Ottoni (2002) para caracterizar os aspectos construtivos da estrutura, ainda sem os ajustes desenvolvidos para outros componentes justificados pelos estudos em modelo reduzido, como a seguir descrito.



### 3.5.1.1 Pesquisas Experimentais desenvolvidas

A seguir tem-se uma explicação sucinta dos ensaios desenvolvidos por Ottoni (2002) para aprimorar a performance operacional da soleira de admitância.

Para pesquisa de desenvolvimento tecnológico da soleira de admitância Ottoni (2002) utilizou a ferramenta do Modelo Físico bidimensional na escala 1:10, considerando a alternativa inicial do perfil da Soleira de Admitância, projeto idealizado apresentado na Figura 47. A Figura 49 apresenta a imagem do modelo em funcionamento.



**Figura 49 – Modelo em Funcionamento.**

Fonte: Ottoni, 2002.

Neste projeto, Ottoni (2002) realizou otimizações no arranjo hidráulico e construtivas, com o objetivo de definir a configuração de layout final do arranjo, caracterizar diferentes condições de controle do escoamento efluente a soleira de admitância, e avaliar as características relacionadas a performance hidráulica e operativa do arranjo.

Foram pesquisadas 5 alternativas de arranjos, todas elas em meio vão de estruturas de leito fluvial, e também meio vão de ombreira marginal (simulando somente a ombreira esquerda). Os ensaios tiveram por objetivo analisar as condições de dissipação de energia no perfil vertente da soleira de admitância, pois a estrutura é auto dissipadora, e pesquisar possibilidades de obras a jusante de otimização desta dissipação de energia do escoamento

efluente que minimizem processos erosivos da calha fluvial a jusante da estrutura. A cota de referência para as estruturas hidráulicas nos estudos foi o leito fluvial, e está na cota zero.

- Arranjo da alternativa 1 (Figura 50): Soleira de admitância, acrescido de bacia de dissipação a jusante constituída de pedras soltas com  $D= 30$  cm no leito do rio (cota zero), a uma extensão de cerca de 12 m, e logo a seguir uma soleira de pedras com o mesmo diâmetro, está com a cota de coroamento de 0,5 m, tendo esta soleira de pedras o objetivo de formar um “colchão d’água” que amortecesse o escoamento efluente a estrutura de vertimento da soleira de admitância. A dissipação de energia neste arranjo para as vazões ensaiadas ficou entre 61 e 65%;
- Arranjo da alternativa 2 (Figura 51): Soleira de admitância - substituição das pedras a jusante da soleira de admitância no nível do leito do rio (cota zero) por uma bacia de turbulência junto ao pé de jusante da soleira de admitância, também no fundo do rio(cota zero), essa composta por laje com extensão de 5 m, sobre esta a execução de blocos de amortecimento frontais aos orifícios de fundo da soleira de admitância com cota do coroamento de 0,5 m e uma soleira terminal na sua extremidade, também com cota do coroamento de 0,5 m, todos em concreto. Manteve-se as pedras com  $D=0,3$  m a uma extensão de 7 m. Realizou-se também com tamponamento de alguns dos orifícios de fundo (último degrau) da soleira de admitância. Manteve-se a soleira terminal de pedras com  $D = 30$  cm a jusante com a cota do coroamento de 0,5 m, esta localizada cerca de 12 m da soleira de admitância. Neste arranjo obteve-se uma melhora na dissipação de energia para as vazões ensaiadas, que ficou entre 64% e 68%;
- Arranjo da Alternativa 3 (Figura 52): idêntico a Alternativa 2, com redução da altura dos blocos de amortecimento e da soleira terminal (cota do coroamento de 0,3 m) das estruturas de turbulência, tendo em vista uma redução no custo das obras. Tamponamento de mais dois orifícios do penúltimo degrau. As demais configurações da Alternativa 2 foram mantidas. Esta Alternativa foi desenvolvida com o objetivo de verificar a performance do conjunto de obras quanto a eficiência na dissipação de energia, e ao mesmo tempo, desejava-se observar os processos erosivos a jusante da

estrutura, bem como o arraste das pedras na Soleira de jusante (de pedras soltas) com a redução da altura dos Blocos de Amortecimento e da Soleira Terminal, e ao fim dos ensaios ,para o trem de vazões simuladas, observou-se arraste das pedras da Soleira de jusante (de pedras soltas ), porém assim com o um aumento na eficiência de dissipação de energia da configuração final do Arranjo , que ficou entre 64 e 68%;

- Arranjo da Alternativa 4 (Figura 53)Para a alternativa 4 foi elevada a altura do coroamento dos Blocos de Amortecimento e da Soleira Terminal da bacia de turbulência para 0,5 m, e constatou-se que a eficiência na dissipação de energia foi melhorada, elevando-se para uma faixa entre 67% a 69%, ressaltando-se a necessidade em se proteger a Soleira de Pedras a jusante de processos de arraste das pedras no seu coroamento e talude de jusante. Ottoni (2002);
- Alternativa 5 (Figura 54): buscou então uma configuração que desse ao sistema hidráulico uma boa eficiência na dissipação de energia e evitasse o deslocamento das pedras da soleira de jusante, desenvolvendo assim a Alternativa 5 (Alternativa Final), a qual apresenta a configuração da alternativa 4, e que substitui as pedras da soleira de jusante por estruturas de Gabiões com blocos de pedra com  $D = 10$  cm. A dissipação de energia neste arranjo ficou entre 67 e 69%, como apresentado na Figura 48 que se segue:

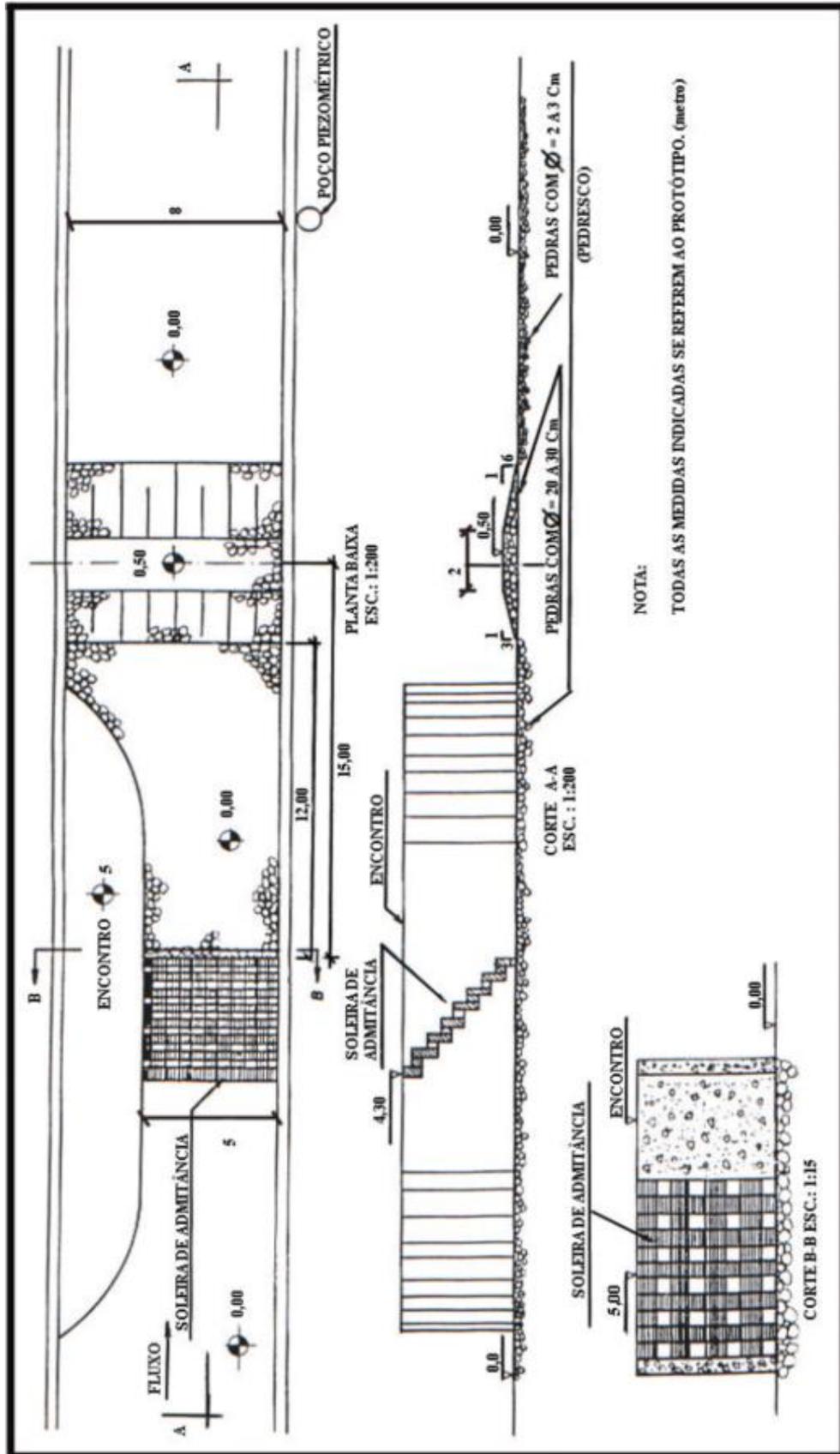


Figura 50 – Arranjo da Alternativa 1  
 Fonte: Ottoni (2002)

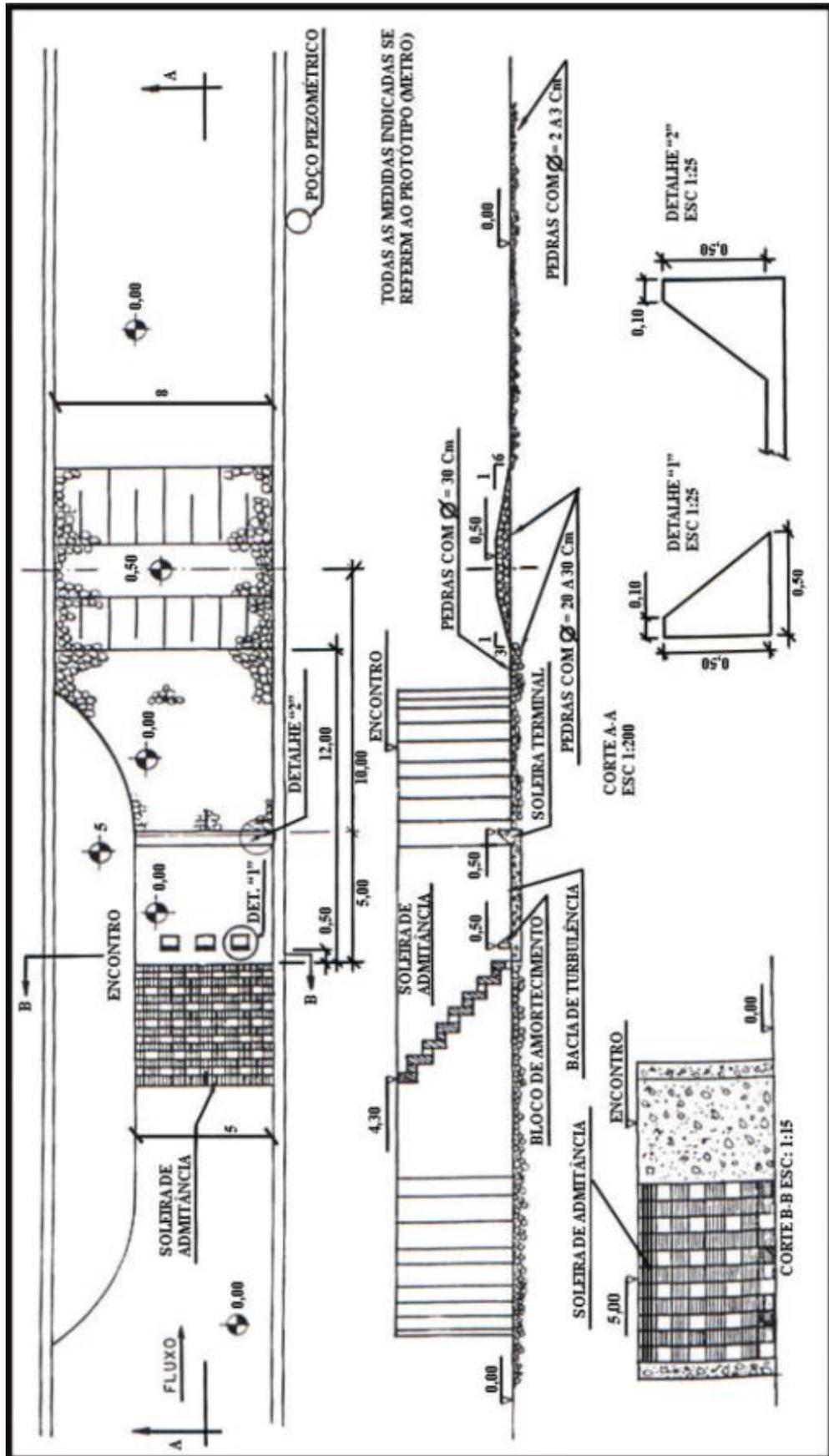


Figura 51 – Alternativa 2

Fonte: Ottoni (2002)

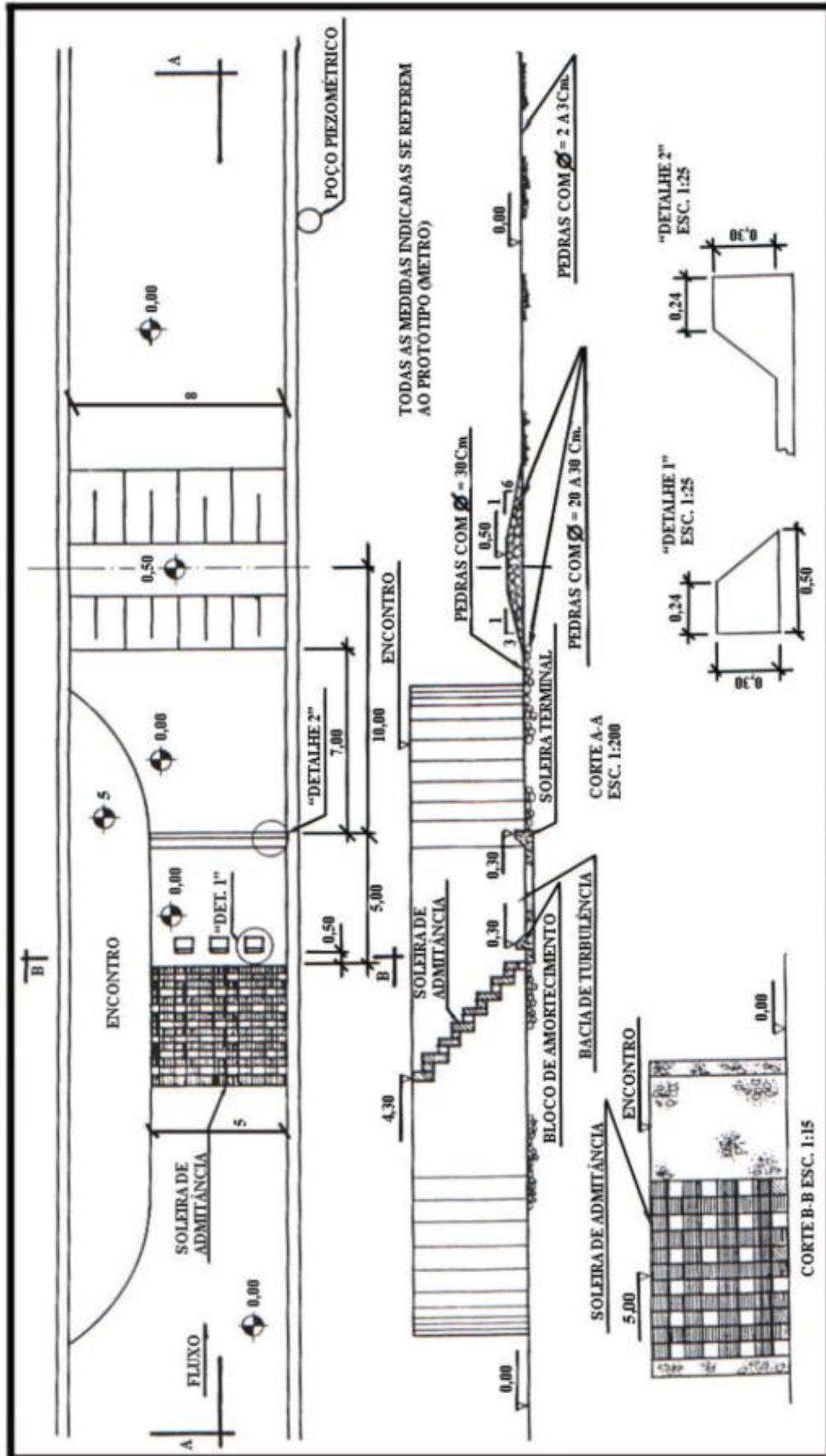


Figura 52 – Alternativa 3  
Fonte: Ottoni (2002)

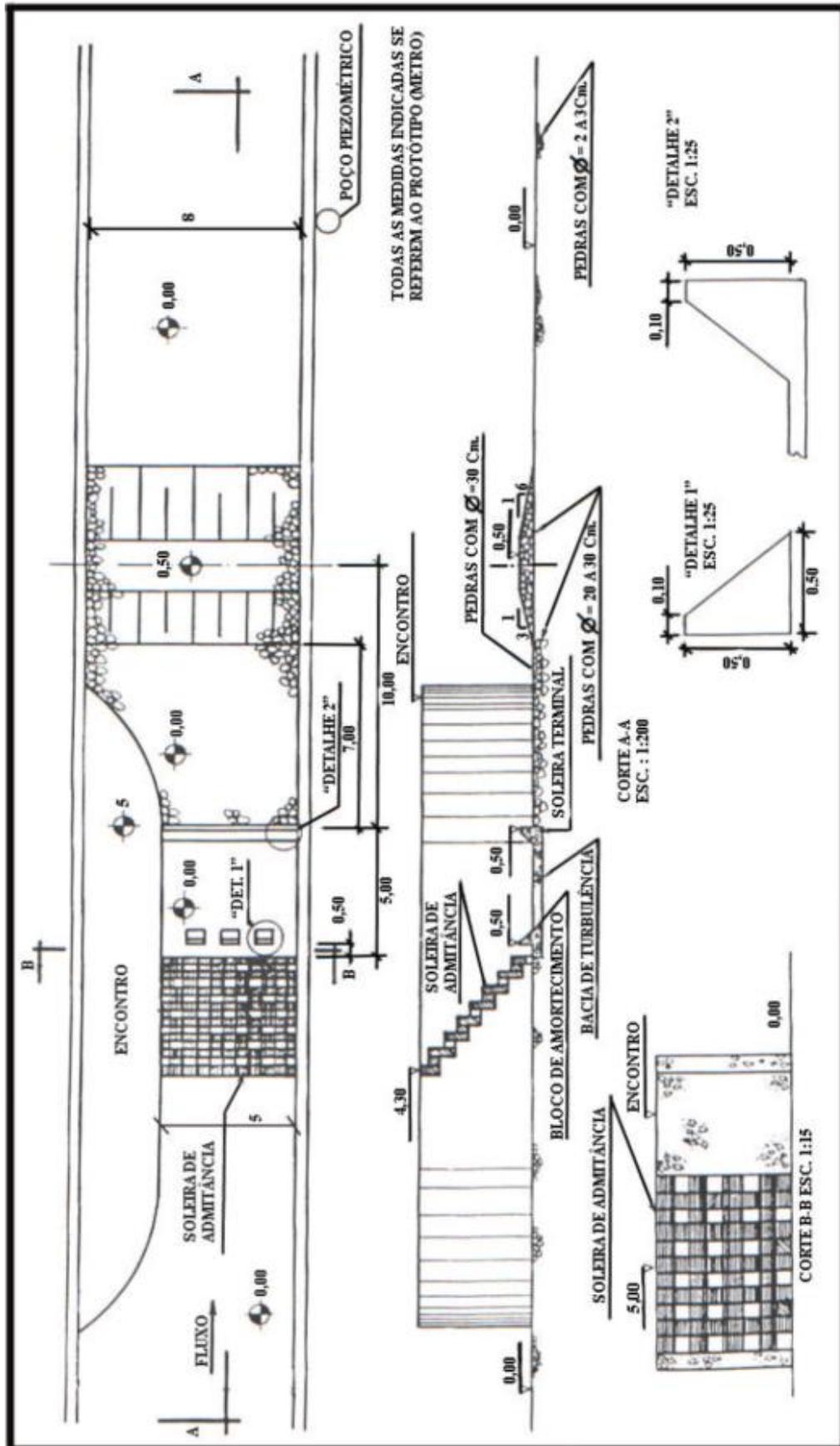


Figura 53 – Arranjo da Alternativa 4  
 Fonte: Ottoni (2002)



Com a análise comparativa das alternativas, Ottoni (2002) concluiu:

a) que a estrutura hidráulica da Soleira de Admitância, por si só (alternativa zero), apresenta elevada capacidade de dissipação de energia.

b) que é importante ser mantido o conjunto de obras representado pela Bacia de Turbulência (Blocos de Amortecimento, Soleira Terminal e Laje de Fundo).

c) que o tamponamento dos Orifícios da Soleira tende a elevar os N.A's a montante e a aumentar a velocidade do escoamento vertical ( $eR$ ) que eflui ao longo dos Orifícios da Soleira de Admitância, favorecendo o processo de dissipação da energia do conjunto de obras (por turbulência maior);

d) que é importante que o escoamento de fundo efluente da Soleira de Admitância seja amortecido através de um “colchão d'água” criado pela Soleira de Pedras localizada a jusante. Tal estrutura localizada a jusante tende a facilitar as características na dissipação de energia;

e) que os Gabiões localizados superficialmente no coroamento e ao longo do talude de jusante da Soleira de Pedras (Alternativa 5) eliminou por completo os processos de arraste oriundos do escoamento que se choca contra a mesma.

### **3.5.1.2 Comparação com os Vertedouros Convencionais**

A concepção da estrutura da soleira de admitância integra em si mesma os aspectos construtivos, econômico, e hidráulico, ao aspecto ambiental. Diferentemente dos vertedouros usuais compactos de concreto utilizados em projetos de regularização das vazões, em especial o da soleira retilínea baixa, esta estrutura não é maciça. Esta característica da sua concepção acarreta na flexibilização dos aspectos construtivo e estrutural, na medida em que se torna mais leve, exige menos das condições geotécnicas do leito sobre a qual será instalada, e reduz o tempo de obra e os custos de implantação (OTTONI, 2002).

Flexibiliza ainda o aspecto hidráulico, pois as ranhuras podem ser obstruídas conforme a conveniência da demanda por regularização; a estrutura é auto dissipadora de energia; pouco alterando o escoamento natural quanto aos sedimentos e a ictiofauna por ser uma estrutura vazada; a bacia hidráulica formada é pequena, reduzindo as perdas hídricas por evaporação (OTTONI, 2002).

A concepção dos vertedouros tradicionais contempla a eficiência hidráulica demandada nos projetos de regularização, porém, não contempla a otimização de aspectos construtivos, financeiros e ambientais. Nisto reside a originalidade da chamada soleira de admitância no contexto da regularização pontual de vazões, especialmente quando aplicada

nos menores reservatórios da Usinas ao fio d'água de regularização de vazões diária (OTTONI, 2002).

A soleira de Admitância foi originalmente estudada para ser uma estrutura de controle dos Níveis de Água, neste trabalho, o objetivo foi simular a soleira como sistema de vertimento de pequenos reservatórios hidrelétricos.

### **3.6 CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS - CGHS**

A produção de hidroeletricidade é, fundamentalmente, resultante da combinação entre disponibilidade de volume de água, que é variável no tempo, e desnível, que pode ser natural ou artificial. A potência gerada em uma usina hidrelétrica, qualquer que seja o seu porte, é diretamente proporcional a vazão turbinada e a diferença de cota entre o nível d'água a montante da turbina e a linha de eixo da máquina.

A estrutura física da usina, por sua vez, é composta basicamente por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força, e vertedouro. Estes dispositivos funcionam de forma integrada, embora cada um tenha sua função própria.

O propósito da barragem é o de reservar água objetivando resguardar a garantia de geração de energia, uma vez que esta é sempre sujeita a sazonalidade da vazão disponível. Porém esta não é a sua única função. A construção da barragem pode formar artificialmente o desnível, incrementando a potência. O armazenamento de água é uma forma indireta de armazenamento energético, que ainda pode cumprir a função de regularizar a vazão a sua jusante, na medida em que armazena água no período úmido para garantir disponibilidade no período de estiagem.

De acordo com a ANA (2020), o Brasil possui diversos empreendimentos no setor hidrelétrico, classificados em três tipos, de acordo com a capacidade de geração de energia: Central Geradora Hidrelétrica (CGH), com menor capacidade de geração; Pequena Central Hidrelétrica (PCH) e Usina Hidrelétrica (UHE), com maior capacidade produtiva de energia.

Segundo a ABRAPCH (2020) as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) são usinas hidrelétricas de tamanho e potência ainda menores que as PCHs. De acordo com a classificação da Agência Nacional de Energia Elétrica, esses empreendimentos podem ter o potencial de gerar de 0 até 5MW de energia. O Brasil conta com 703 unidades de CGHs em operação instaladas em todo seu território, que representam 717.223 kilowatts (kW) de potência instalada.

Conforme o Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2000) estabelece em suas diretrizes para projetos de Centrais Hidrelétricas de pequeno porte, estas podem ser classificadas em função da capacidade de regularização associada ao reservatório, havendo três tipificações: usinas de acumulação com regularização mensal do reservatório, usinas de acumulação com regularização diária do reservatório, e usinas a fio d'água.

Esta última, ainda conforme o manual da Eletrobrás (2000) é uma configuração de usina empregada quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou superiores à necessária para atender a potência demandada. Neste caso o volume represado pela barragem é desprezível, e o sistema de adução é dimensionado na medida da vazão necessária a potência pretendida, de modo que na maior parte do tempo haverá vertimento de água excedente ao propósito de geração. A maioria dos arranjos conhecidos de CGHs, devido ao seu porte pequeno, se dá na forma a fio d'água

Segundo Gomez (2012) as usinas hidrelétricas a fio d'água utilizam a vazão natural dos rios para a geração de energia elétrica, com capacidade de regularização mínima ou nenhuma de armazenamento de água, fornecendo assim, características de fonte intermitente para este modelo de empreendimento. O cenário nacional atual priorizou o incremento de usinas a fio d'água no sistema interligado nacional, devido às fortes barreiras socioambientais impostas pela legislação brasileira.

As CGHs a fio d'água apresentam algumas simplificações na parte dos estudos, e de projetos. Conforme o Guia do empreendedor de pequenas centrais hidrelétricas da ANEEL (2003) podem-se elencar:

- Segundo ANEEL (2020), a Lei n. 9.074/1995 determina que os empreendimentos de capacidade reduzida (com potência igual ou inferior a 5.000 kW ) não dependem de autorização da ANEEL, então somente após a sua implantação é que devem ser comunicados ao Poder Concedente para serem registrados.
- O fato de não haver variação significativa no nível d'água leva a algumas vantagens de projeto:
  - Não é necessário que a tomada d'água seja projetada para atender deplecionamento do nível d'água.
  - Quando a adução primária é feita por meio de canal aberto, este pode ser feito na menor profundidade possível, reduzindo escavação.
  - Caso seja necessária a instalação de chaminé de equilíbrio, esta será feita na menor altura possível, uma vez que o nível de deplecionamento do reservatório que entra no cálculo desta estrutura é desprezível.

- As barragens serão necessariamente baixas, pois sua única função será desviar a água para o sistema de adução.
- Os valores despendidos com indenizações são menores, uma vez que a área alagada será reduzida.

O conceito da CGH a fio d'água se faz presente na maioria das centrais geradoras de pequeno porte. Uma usina a fio d'água, é aquela que não possui reservatório, ou o possui, mas reservando um volume baixo de água se comparado a vazão natural do rio.

Segundo Gomez (2012), a usina a fio d'água pode ser caracterizada por possuir volumes mínimo e máximo iguais, não existindo diferença entre as cotas máxima e mínima. Com isso, os valores de evaporação também são constantes, pois as áreas alagadas permanecem inalteradas.

A geração de energia elétrica a partir de usinas CGH's a fio d'água podem sofrer variações consideráveis diárias, mensais ou sazonais dependendo da intensidade pluviométrica dentro da bacia hidrográfica. Isto ocorre devido ao seu processo de geração de eletricidade ser altamente dependente do fluxo incontável do rio (IPCC, 2009).

Tais incrementos de CGHs a fio d'água no sistema interligado nacional, contribuem significativamente para o crescimento da geração de energia elétrica no país, porém a sua colaboração na capacidade de armazenamento é desprezível, independentemente, estas colaboram para a diversificação da matriz energética e portanto com o aumento da segurança energética do país.

A maior vantagem de CGHs construídas no arranjo a fio d'água residem nas simplificações de estudo e de projeto, mas, sobretudo no fato de gerarem pequenas áreas alagadas pelo barramento.

No âmbito do licenciamento ambiental, menores estruturas e áreas de reservatório representam menor impacto social e ambiental, e dessa forma menos entraves a emissão da licença para operar o empreendimento.

Do ponto de vista do empreendedor, apesar de facilitar o licenciamento, a usina CGH a fio d'água também representa menos energia firme, portanto menor possibilidade de venda da energia produzida no mercado, porém atualmente tal perda foi minimizada com a possibilidade de inclusão da operação da CGH como Geração Distribuída (GD).

Segundo o Instituto nacional de eficiência energética – INEE (2020), Geração Distribuída (GD) é uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia. As tecnologias de GD têm evoluído para incluir potências cada vez menores. Com a Resolução

Normativa N°482 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a qual entrou em vigor em 17 de abril de 2012, foi regulamentada a possibilidade de compensação energética onde o preço da energia gerado ficaria equivalente ao preço aplicado ao consumidor final.

Essa possibilidade de compensação energética deu um folego novo ao mercado de CGH's, onde empreendimentos com potenciais menores de 1 MW que não eram atrativos passaram a ser um dos investimentos mais atraentes no mercado de energia.

## 4 METODOLOGIA

Para avaliar a viabilidade técnica e econômica de implantação de uma soleira de admitância foi realizado um estudo comparativo com a implantação de barramento com o perfil Creager, por ser o mais comumente utilizado.

A validação da pesquisa através de um estudo de caso tem por objetivo apresentar os cálculos para um projeto hidráulico de uma soleira de admitância.

A seguir apresentam-se as descrições das etapas realizadas pelo presente trabalho, referentes ao dimensionamento de um barramento utilizando-se a soleira de admitância e ao dimensionamento de um barramento em perfil Creager, bem como a comparação entre ambos.

### 4.1 Escolha do local para estudo caso

A primeira etapa do presente trabalho é a escolha de um curso d'água, que apresente potencial para a implantação de uma PCH e que possua uma série histórica de vazões médias mensais de no mínimo quinze anos, que se encontre na mesma bacia e que relação das áreas varie entre 0,25 e 4,00, seguindo-se assim recomendações das Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas Eletrobrás (2000).

O local deve também se enquadrar nas seguintes características citadas por Ottoni (2001):

- Características topo-morfológicas da calha fluvial bem definidas, sem divagação do seu leito. A calha fluvial deverá ser encaixada, com o leito menor preferencialmente alto e estreito (seção estrangulada);
- Características geomorfológicas da calha fluvial estáveis, com o material do leito fluvial apresentando boa capacidade de suporte para apoio da estrutura (rocha, areia compacta; etc.);
- Características topográficas da rede potamográfica, notadamente perfil longitudinal, adequadas à implantação progressiva de estruturas em “cascata” (de acordo com planejamento prévio; regularização espacial), com a regularização sendo feita de montante para jusante;
- As margens da calha fluvial, na seção de implantação e na área de influência da estrutura, deverão ser ao máximo desobstruídas, prevendo-se a intervenção por vegetação ciliar nativa da região;

- Facilidades de acesso (para eventuais manutenções);
- Proximidades a locais de jazidas de materiais (pedra, areia, argila);
- Localização a jusante da confluência de um contribuinte maior (aumento da produtividade hidrológica), em compatibilidade com o perfil longitudinal da rede potamográfica.

## 4.2 Potencial Hidroenergético da CGH em Estudo

Segundo Tiago Filho et al. (2008) uma das técnicas utilizada para estudos hidrológicos de uma região é a transposição. Quando se tem dados de uma bacia com área de drenagem, relevo, solo e cobertura vegetal semelhante à bacia a ser estudada, pode-se fazer a transposição de vazões. As vazões da bacia que não possuem dados são obtidos pela Equação 1.

$$Q_1 = \frac{Ad_1}{Ad_2} \cdot Q_2$$

**Equação 1**

Onde:

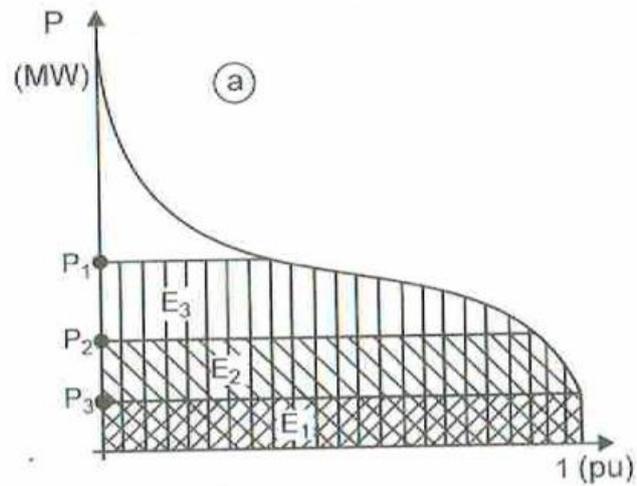
$Ad_1$  – Área de drenagem da bacia em análise (km<sup>2</sup>).

$Ad_2$  – Área de drenagem da bacia com série histórica de dados (km<sup>2</sup>).

$Q_1$  - Vazão da bacia em análise (m<sup>3</sup>/s).

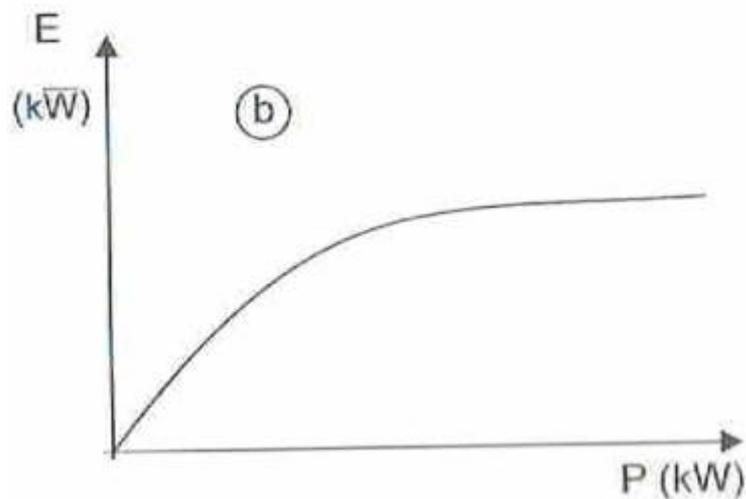
$Q_2$  – Vazão da bacia com série histórica de dados (m<sup>3</sup>/s).

Com a série de vazões calculada, é possível estimar o comportamento do local de interesse, além das curvas de duração ou de permanência (TIAGO FILHO *et al.*, 2008). Através dos dados da curva de permanência de vazão, é obtido a chamada curva de permanência de potência. Tal curva é obtida multiplicando-se a vazão pela queda bruta, rendimento adotado para o grupo gerador e pela aceleração da gravidade.



**Figura 55** – Curva de duração de potência  
 Fonte: SOUZA; SANTOS; BORTONI, (2009)

A área da curva de permanência de potência representa a energia possível de ser gerada. A curva de energia é obtida pela soma da área para cada potência, admitindo-se que para cada potência instalada seja possível calcular qual a potência gerada (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009).



**Figura 56** – Curva de energia versus potência instalada  
 Fonte: SOUZA; SANTOS; BORTONI, (2009)

Feito isso, é possível determinar da vazão de projeto, fazendo-se necessário traçar junto à curva de energia uma curva cujo fator de capacidade seja igual a 1, ou seja, a energia gerada, em kWh/h, corresponde à potência instalada.

O ponto de intercessão entre a curva do fator de capacidade igual a 1 e a energia máxima gerada, projetado sobre a curva de energia, nos fornece a energia e potência ótimas de projeto da Central.

### 4.3 Dimensionamento do Barramento com Perfil Creager

Segundo Pinto (1987), o traçado do vertedouro tipo Creager visa representar a trajetória de um jato livre da lâmina d'água. O comprimento da crista do vertedouro é calculado com a seguinte Equação 2:

$$h_{ex} = \left( \frac{Q_{cp}}{k_{ex} \cdot L_x} \right)^{2/3} \quad \text{Equação 2}$$

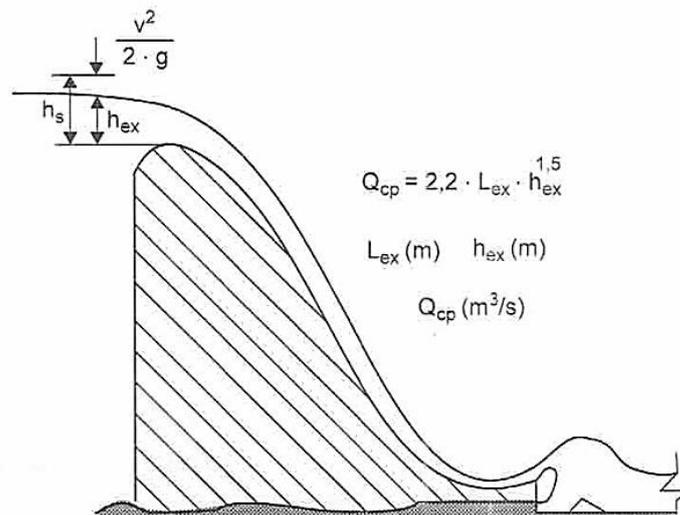
Onde:

$Q_{cp}$  ( $m^3/s$ ) - Vazão estabelecida para obras permanentes.

$k_{ex}$  - Coeficiente que leva em conta a forma da crista – 2,2 para perfil Creager.

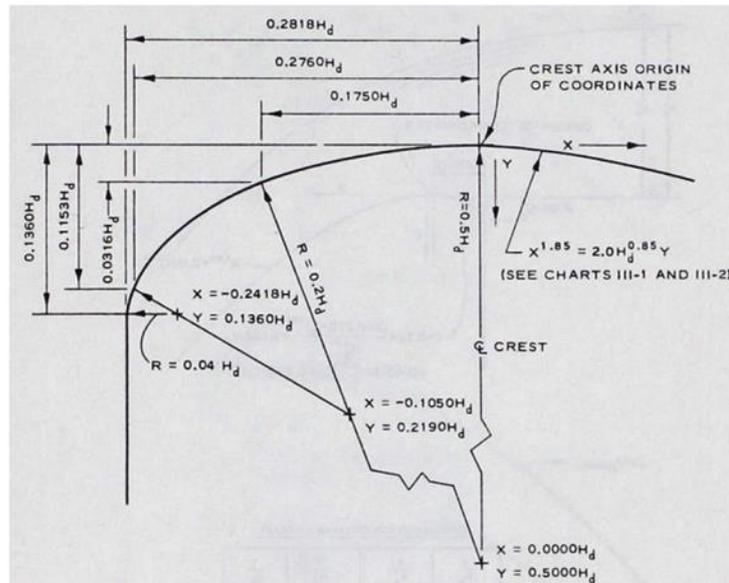
$L_x$  (m) – Comprimento da crista do vertedouro.

$h_{ex}$  (m) – Altura máxima da crista do extravasor.



**Figura 57** – Vertedouro Perfil Creager – Vista lateral  
Fonte: SOUZA; SANTOS; BORTONI, (2009)

Na Figura 58 a seguir é mostrado como deve ser o dimensionamento do perfil deste vertedouro.



**Figura 58** – Perfil da Soleira Vertente  
 Fonte: Hydraulic Design Criteria Sheets, (1987)

#### 4.4 Dimensionamento do Barramento com Soleira de Admintância

Foi utilizado o método desenvolvido por Ottoni (2002), no qual o dimensionamento hidráulico é feito com base nas informações hidrológicas e topo-batimétricas, bem como nas curvas características de vazão (Anexo A). Assim, tal dimensionamento terá por referência:

- a) as informações hidrológicas resumidas na Curva de Permanência das Vazões Médias Mensais;
- b) a expressão que correlaciona o tempo de recorrência (TR) com as vazões de enchente a fim de caracterizar o afogamento da Soleira para vazões de maior porte;
- c) as características topo-geológicas e de configuração topográfica do estirão fluvial que contém a Seção de Encaixamento da Soleira;
- d) a Curva-Chave do curso d'água (a jusante) que controla os escoamentos que transitam na Seção de Encaixamento (reposição de deflúvios);
- e) as Curvas Características de natureza hidráulica determinadas nos estudos de Ottoni (2000) em Modelo Reduzido da Soleira.

## **4.5 Levantamento de Custos Básicos de Implantação dos Barramentos em estudo**

Para os barramentos desenvolvidos foi elaborado orçamento estimado em base de preços, tais como SICRO, SINAPI, SETOP, dentre outras fontes disponíveis que expressem a composição de todos os seus custos unitários.

Na hipótese de a tabela referencial principal (SICRO ou SINAPI, conforme o caso) não oferecer determinado custo unitário, este foi apurado por meio de pesquisa de mercado e justificado.

## 5 RESULTADOS

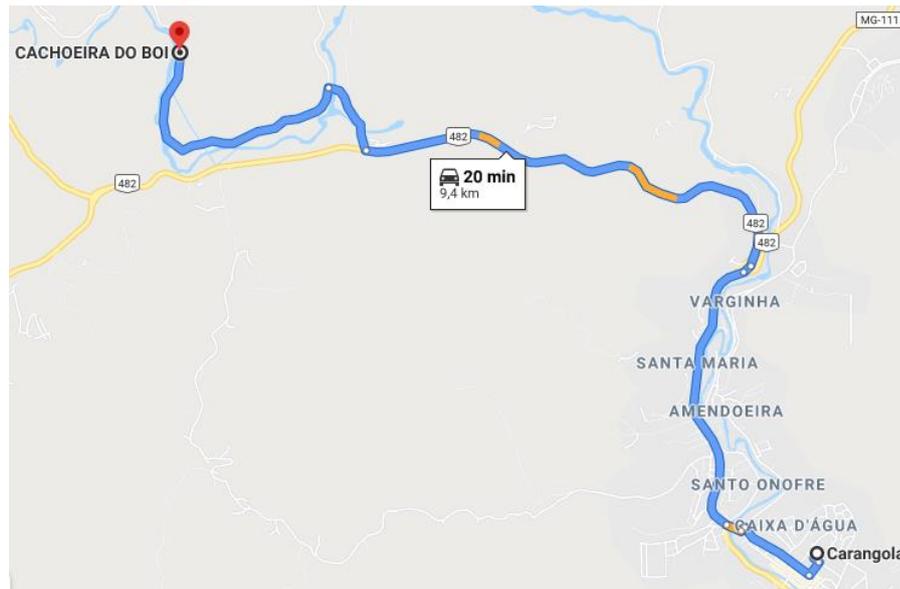
### 5.1 Local de Estudo

O curso d'água escolhido foi o Rio Carangola (Figura 59), inserido na bacia do rio Muriaé, que nasce no município de Orizônia – MG a uma altitude de aproximadamente 1500 m e desemboca pela margem esquerda do rio Muriaé no município de Itaperuna – RJ, possuindo 130 km de extensão. Segundo a ANEEL (1999), a superfície total da sub-bacia do Rio Carangola possui cerca de 1.418 km<sup>2</sup>.



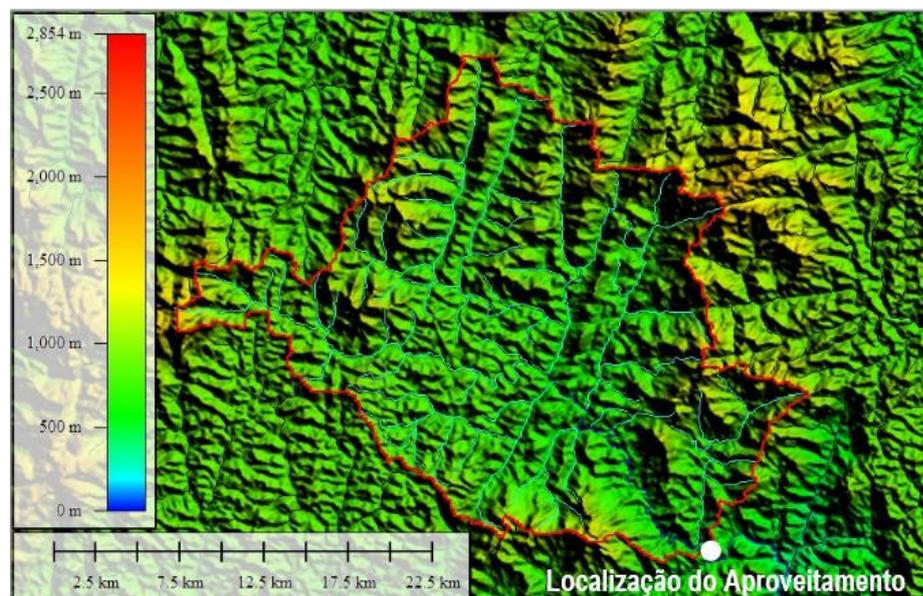
**Figura 59** – Rio Carangola  
Fonte: Google Maps (2020)

O aproveitamento Cachoeira do Boi está em operação desde 1989 e está localizado no município de Carangola nas coordenada 20°41'58''S e 42°04'30''W, estando a 9,4 km da região urbana, como mostra a Figura 60.



**Figura 60** - Localização do aproveitamento – Cachoeira do Boi – Carangola – MG  
 Fonte: Google Maps (2020)

Para a determinação da vazão do aproveitamento se faz necessário determinar a área da bacia e a queda bruta do mesmo. Com o auxílio do software QGIS®, foi possível delimitar a área da bacia do aproveitamento, a qual possui 523 km<sup>2</sup>. Pela ausência do levantamento topográfico local, obteve-se uma queda bruta, em torno de 50 m, através das curvas de nível traçadas no software Global Mapper (Figura 61). A distância entre o local de instalação da tomada d'água e o canal de fuga da casa de máquinas possui aproximadamente 817,3 m.



**Figura 61** - Bacia do Aproveitamento  
 Fonte: Imagens SRTM processadas no Qgis® (2020)



**Figura 62** – Localização Tomada D'água e Canal de Fuga

Fonte: Google Earth

A seção de encaixamento está encunhada em material rochoso, sendo assim, favorável ao estudo.

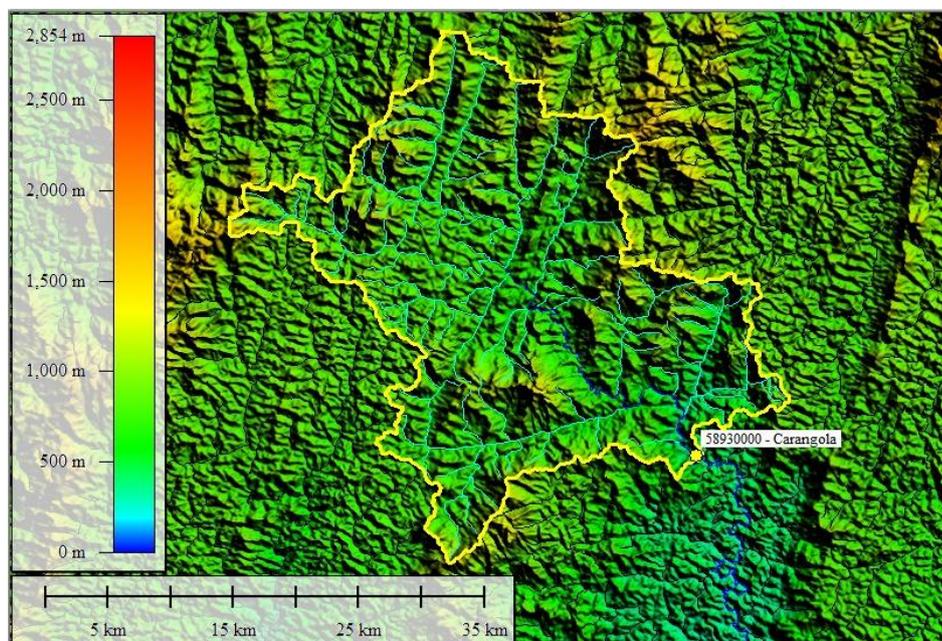
Na seleção de estações fluviométricas do banco de dados da Agência Nacional de Águas - ANA (no Sistema de Informações Hidrológicas - Hidroweb) encontrou-se um posto do Rio Carangola cujo a bacia do mesmo (Figura 64) se assemelhava, tanto no aspecto da variação temporal quanto espacial, à bacia do aproveitamento. A estação 58930000 apresenta dados coletados desde 1935 até 2020 (Figura 63).

### Dados Estação

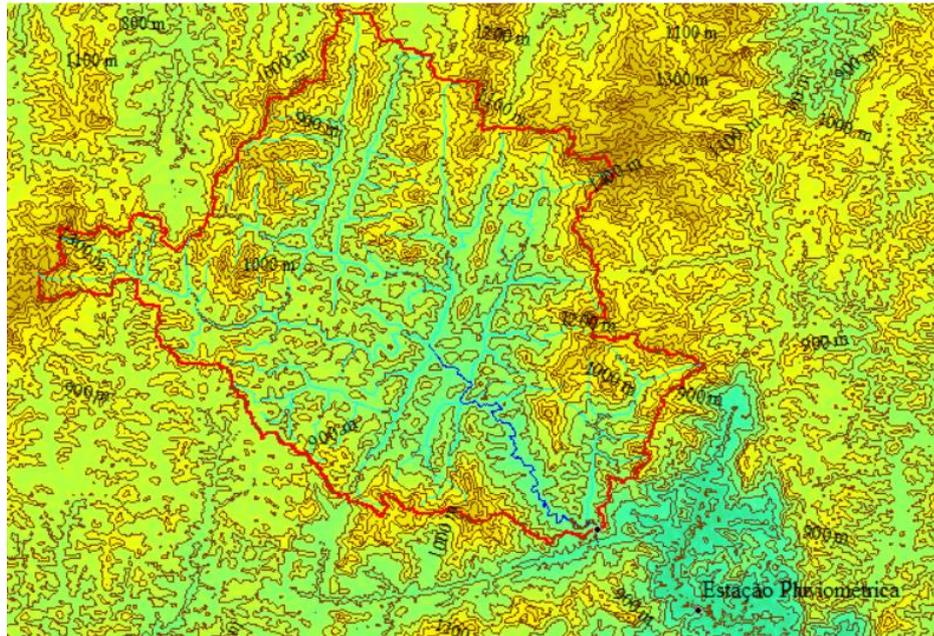
<b>Código</b>	58930000
<b>Nome Estação</b>	CARANGOLA
<b>Código Adicional</b>	
<b>Bacia</b>	5 - ATLÂNTICO, TRECHO LESTE
<b>SubBacia</b>	58 - RIO PARAÍBA DO SUL
<b>Rio</b>	RIO CARANGOLA
<b>Estado</b>	MINAS GERAIS
<b>Município</b>	CARANGOLA
<b>Responsável</b>	ANA
<b>Operadora</b>	CPRM
<b>Latitude</b>	-20.74
<b>Longitude</b>	-42.0239
<b>Altitude (m)</b>	399
<b>Área de Drenagem (Km<sup>2</sup>)</b>	773

**Figura 63** – Dados da estação pluviométrica utilizada no estudo.  
Fonte: Agência Nacional de Águas

A bacia do posto fluviométrico foi delimitada no software QGIS ® para verificação do mesmo dado informado pela ANA como mostrada na Figura 64 abaixo. A área encontrada foi de 771 km<sup>2</sup>, apresentando uma diferença de 0,3 %, valor relativamente baixo.



**Figura 64** – Bacia do Posto Fluviométrico.  
Fonte: Imagens SRTM processadas no Qgis®.



**Figura 65** – Localização da Estação Pluviométrica em relação a Bacia da CGH em Estudo  
 Fonte: Imagens SRTM processadas no Qgis®.

## 5.2 Potencial Hidroenergético da CGH em estudo

Apesar de já existir um aproveitamento no local, foi realizado um estudo de potencial tendo em vista a otimização hidroenergética.

Cardoso, Almeida e Nogueira (2011) citam a determinação da vazão de projeto como o primeiro passo para o projeto de uma CGH, reproduzindo o conhecimento da potência a ser instalada e a energia a ser gerada; “em última análise, relacionando-se aos custos, benefícios e à viabilidade econômica da central”. Citam ainda que a vazão ótima ou recomendada em projeto depende do contexto de custos e tarifas, mas é possível estimar preliminarmente seu valor utilizando o Método Expedito, que se baseia em dados hidrológicos do sítio.

A transposição de séries de vazões é utilizada para se estimar a série de vazões num curso d’água com base em séries conhecidas de cursos semelhantes. As condições básicas para transposição são:

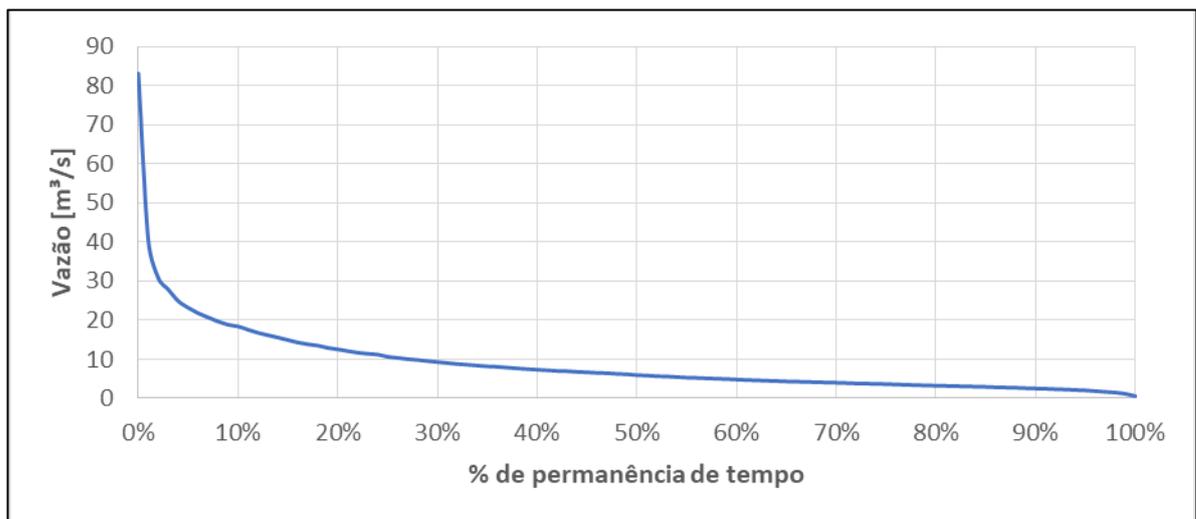
- Semelhança das áreas de drenagem:  $\frac{A2}{A1} \approx 0,25$  a 4,00;
- Semelhança de clima, relevo, solo e vegetação;
- Distância entre eixos de até 80 km;

Como todos os critérios acima foram atendidos calculou-se o fator de transposição. Os dados utilizados estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Dados utilizados para transposição de vazões**

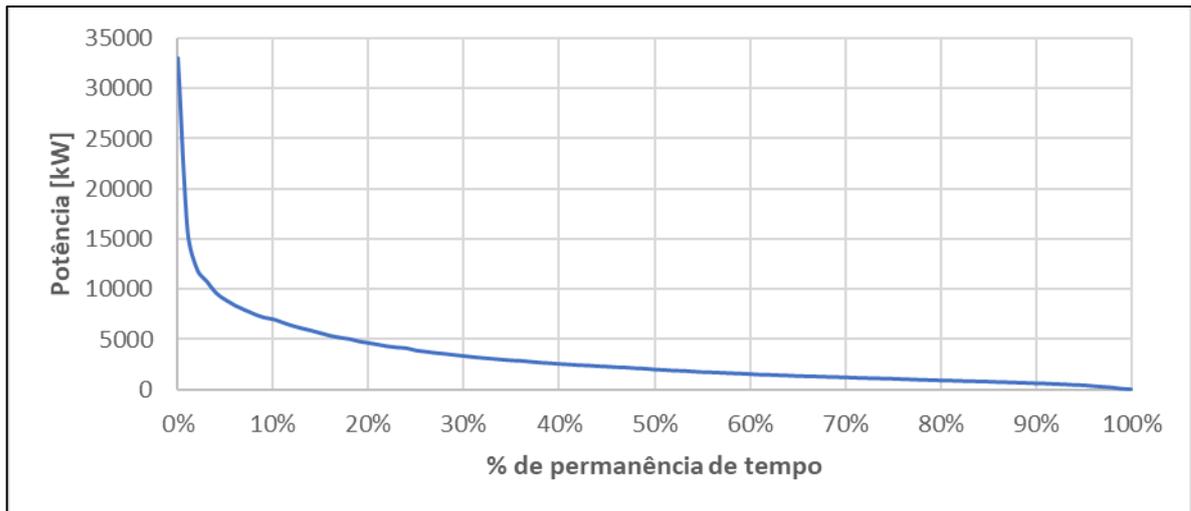
<b>Área de drenagem do aproveitamento (<math>A_A</math>)</b>	<b>523 km<sup>2</sup></b>
<b>Área de drenagem do Posto Fluviométrico (<math>A_P</math>)</b>	<b>773 km<sup>2</sup></b>
<b>Fator de Transposição (<math>A_A/A_P</math>)</b>	<b>0,677</b>

Através da equação 1, calcula-se as vazões do barramento utilizando os valores de áreas informados acima e as vazões contidas no banco de dados do posto fluviométrico. Em seguida, procede-se ao levantamento da CPV, que relaciona a permanência dos valores de vazão ao longo do tempo, assim para o referido local tem-se a sua CPV representada na Figura 66.



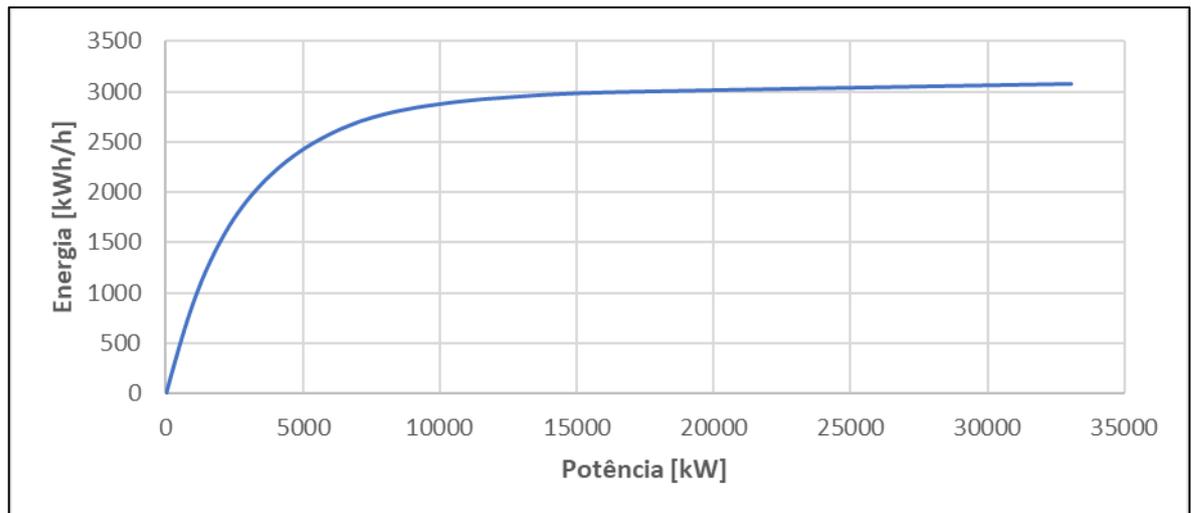
**Figura 66** – Curva de permanência de vazão.

Da curva de permanência de vazão, gera-se a curva de permanência de potência, conforme Figura 67. Tal curva é obtida multiplicando-se a vazão pela queda bruta, rendimento adotado para o grupo gerador e pela aceleração da gravidade.



**Figura 67** – Curva de Permanência de potência

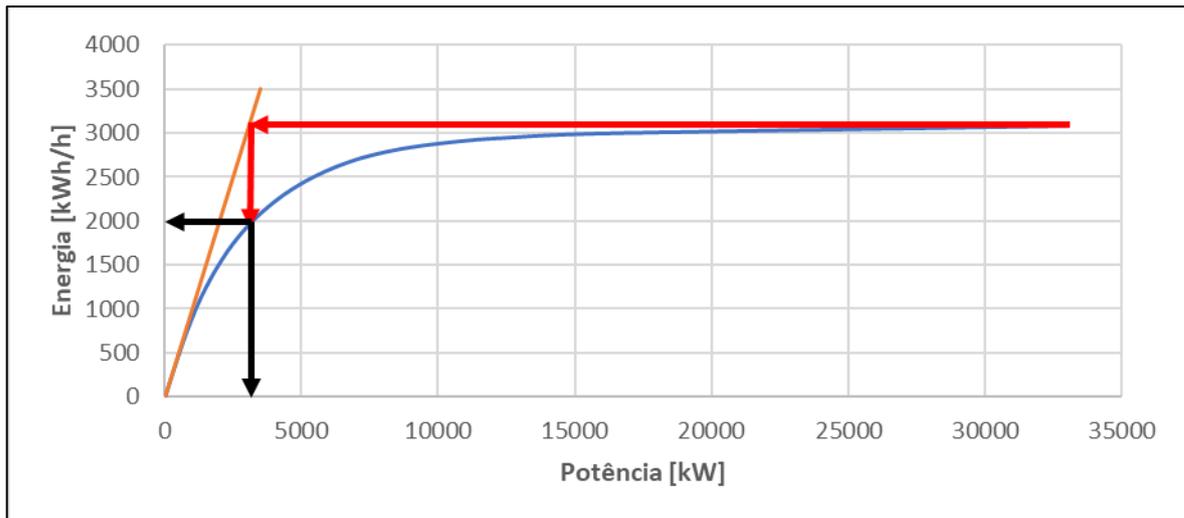
A área da curva de permanência de potência representa a energia possível de ser gerada. A curva de energia é obtida pela soma da área para cada potência, conforme Figura 68.



**Figura 68** – Curva de energia

Para a determinação da vazão de projeto, é necessário traçar junto à curva de energia uma curva cujo fator de capacidade seja igual a 1, ou seja, a energia gerada, em kWh/h, corresponde à potência instalada.

O ponto de intercessão entre a curva do fator de capacidade igual a 1 e a energia máxima gerada, projetado sobre a curva de energia, nos fornece a energia e potência ótimas de projeto. A Figura 69 ilustra a obtenção desses pontos ótimos.



**Figura 69** - Determinação da Potência e Energia Ótima

Encontrados o valor de energia e potência ótimas, determina-se a vazão de projeto dividindo-se a potência ótima pela gravidade, pela queda bruta e pelo rendimento do grupo gerador. Os valores estão dispostos na Tabela 3.

**Tabela 3** - Valores ótimos

<b>Energia ótima</b>	2001	kWh/h
<b>Potência ótima</b>	3082	kW
<b>Vazão ótima</b>	7,66	m <sup>3</sup> /s
<b>Fator de capacidade</b>	0,649	-

Essas são as condições ótimas para instalação da CGH em estudo. Entretanto, segundo o Ministério de Minas e Energia (2016), a potência instalada é de 1,25 MW com 0,96 MW médios o montante de garantia física de energia. Usando-se dos mesmos rendimentos e a mesma queda bruta de 50m e tomando a potência instalada de 1,25 MW, tem-se os valores da Tabela 4.

**Tabela 4** – Dados da CGH em estudo

<b>Energia</b>	1089	kWh/h
<b>Potência instalada</b>	1250	kW
<b>Vazão</b>	3,10	m <sup>3</sup> /s
<b>Fator de capacidade</b>	0,871	-

De fato, segundo a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (2013) indicava que a vazão do grupo gerador a ser instalada seria de 3,12 m<sup>3</sup>/s.

Em resumo, para uma vazão de 3,12 m<sup>3</sup>/s e queda bruta de 50 metros, adotando-se valores típicos de perda de carga e rendimento do grupo gerador, respectivamente, 4% e 85%, têm-se 1,25 MW de potência instalada.

### 5.3 Dimensionamento Hidráulico da soleira perfil tipo Creager

Para o dimensionamento do vertedouro, conforme mostrado na Equação 2, se faz necessário determinar da vazão para obras permanentes e para isso usou-se a distribuição de Gumbel. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Vazões Máximas anuais

Ano	Q max	Log Q max	Ln Q max
1936	11,37	1,06	2,43
1937	35,75	1,55	3,58
1938	30,06	1,48	3,40
1939	20,98	1,32	3,04
1940	12,73	1,10	2,54
1941	17,07	1,23	2,84
1942	37,13	1,57	3,61
1943	47,89	1,68	3,87
1944	29,22	1,47	3,37
1945	26,86	1,43	3,29
1946	17,31	1,24	2,85
1947	13,16	1,12	2,58
1948	17,19	1,24	2,84
1949	47,68	1,68	3,86
1950	19,58	1,29	2,97
1951	21,14	1,33	3,05
1952	31,19	1,49	3,44
1953	18,66	1,27	2,93
1954	15,88	1,20	2,77

<b>Ano</b>	<b>Q max</b>	<b>Log Q max</b>	<b>Ln Q max</b>
1955	7,22	0,86	1,98
1956	7,26	0,86	1,98
1957	16,20	1,21	2,79
1958	18,81	1,27	2,93
1959	9,52	0,98	2,25
1960	28,62	1,46	3,35
1961	25,51	1,41	3,24
1962	15,72	1,20	2,76
1963	18,22	1,26	2,90
1964	13,80	1,14	2,63
1965	21,91	1,34	3,09
1966	20,84	1,32	3,04
1967	20,72	1,32	3,03
1968	24,16	1,38	3,18
1969	16,67	1,22	2,81
1970	22,04	1,34	3,09
1971	11,47	1,06	2,44
1972	29,07	1,46	3,37
1973	15,16	1,18	2,72
1974	15,33	1,19	2,73
1975	20,40	1,31	3,02
1976	13,46	1,13	2,60
1977	16,72	1,22	2,82
1978	25,63	1,41	3,24
1979	83,07	1,92	4,42
1980	23,68	1,37	3,16
1981	14,25	1,15	2,66
1982	23,48	1,37	3,16
1983	16,83	1,23	2,82
1984	21,07	1,32	3,05
1985	50,79	1,71	3,93
1986	16,17	1,21	2,78
1987	13,53	1,13	2,60

<b>Ano</b>	<b>Q max</b>	<b>Log Q max</b>	<b>Ln Q max</b>
1988	18,03	1,26	2,89
1989	7,77	0,89	2,05
1990	12,21	1,09	2,50
1991	21,80	1,34	3,08
1992	11,15	1,05	2,41
1993	21,59	1,33	3,07
1994	21,97	1,34	3,09
1995	6,36	0,80	1,85
1996	22,68	1,36	3,12
1997	44,36	1,65	3,79
1998	22,79	1,36	3,13
1999	15,57	1,19	2,75
2000	15,55	1,19	2,74
2001	22,74	1,36	3,12
2002	18,20	1,26	2,90
2003	58,38	1,77	4,07
2004	17,94	1,25	2,89
2005	42,83	1,63	3,76
2006	26,13	1,42	3,26
2007	39,77	1,60	3,68
2008	15,75	1,20	2,76
2009	55,68	1,75	4,02
2010	15,85	1,20	2,76
2011	37,83	1,58	3,63
2012	27,42	1,44	3,31
2013	10,50	1,02	2,35
2014	21,37	1,33	3,06
2015	7,14	0,85	1,97
2016	6,15	0,79	1,82
2017	14,86	1,17	2,70
2018	20,31	1,31	3,01
2019	9,33	0,97	2,23
2020	29,35	1,47	3,38

Ano	Q max	Log Q max	Ln Q max
média	22,44	1,33	3,06
desv padrão	12,95	0,21	0,49
Coef. Assimetria		-0,18	

Para o cálculo da vazão com estabelecidos tempos de retorno, utiliza-se a seguinte equação:

$$Q_{10000} = \mu + y \cdot \alpha$$

**Equação 3**

Em que:

$y = -\ln(\ln(1-(1/TR)))$ .

TR (anos) – Tempo de retorno.

$\mu$  (m<sup>3</sup>/s) – Média das vazões máximas.

$\alpha = 0,78 \cdot \sigma$ .

$\sigma$  (m<sup>3</sup>/s) – Desvio padrão das vazões.

Os resultados das vazões máximas do tempo de retorno são apresentados na Tabela 6.

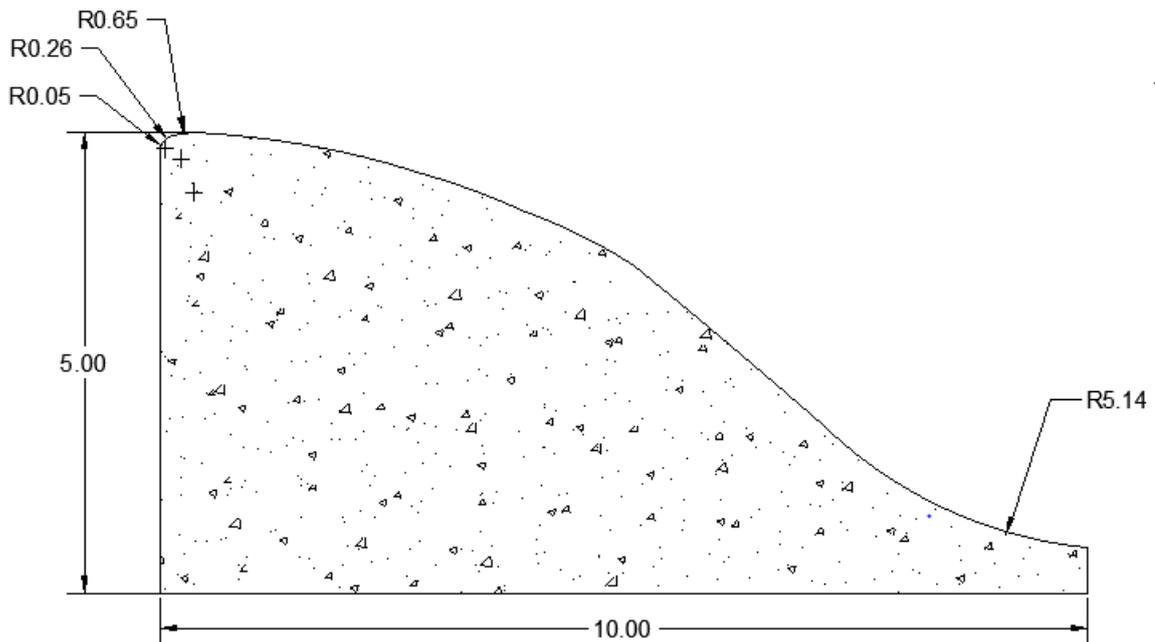
**Tabela 6 – Vazões máximas de tempos de retornos determinados**

DISTRIBUIÇÃO GUMBEL		
TR	y	Q max
10000	9,21	115,45
1000	6,91	92,19
500	6,21	85,19
100	4,60	68,90
90	4,49	67,83
80	4,38	66,63
70	4,24	65,27
60	4,09	63,70
50	3,90	61,84
40	3,68	59,57

30	3,38	56,62
20	2,97	52,44
14	2,60	48,72
10	2,25	45,17
9	2,14	44,04
8	2,01	42,77
7	1,87	41,32
6	1,70	39,63
5	1,50	37,59
4	1,25	35,02
3	0,90	31,56
2	0,37	26,14

Utilizando a vazão de 85,19 m<sup>3</sup>/s (tempo de retorno de 500 anos) e adotando uma largura de 54 m, a lâmina d'água terá 0,80 m.

O perfil Creager, traçado seguindo os parâmetros da Figura 58 está ilustrado na Figura 70 a seguir. Considerou-se para o desenho do perfil que a altura da barragem seria de 5m.



**Figura 70** – Vertedouro com perfil tipo Creager – Área: 31,18 m<sup>2</sup>

**Tabela 7** – Coordenadas do perfil Crager

X [m]	Y [m]
0	0
2.880444	-0.5

X [m]	Y [m]
4.189656	-1
5.216303	-1.5
6.093928	-2
6.875133	-2.5
7.587204	-3
8.246491	-3.5
8.863724	-4
9.446398	-4.5
10	-5

Logo abaixo da soleira se encontra a bacia de dissipação do sistema, cujo dimensionamento é dado pela Equação 4 a seguir.

$$Dn = \frac{q^2}{gh^3} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

Dn: número de queda;

q: vazão por unidade de largura, em m<sup>3</sup>/s.m;

h: queda, em m

Após o cálculo do número de queda, 0,002, é possível obter a profundidade da água na parte posterior da queda,  $y_1$ , o número de Froud e a profundidade conjugada jusante do ressalto,  $y_2$ , através das Equações 5, 6 e 7 que se seguem:

$$\frac{y_1}{h} = 0,51 \cdot Dn^{0,425} = 0,19 \text{ m} \quad \text{Equação 5}$$

$$Fr = \sqrt{\frac{v}{g \cdot y_1}} = 6,4844 \quad \text{Equação 6}$$

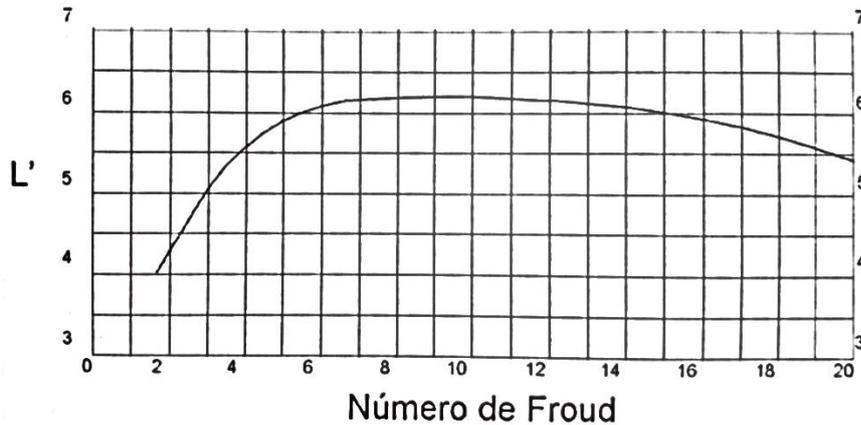
Onde:

v – velocidade, relação entre a vazão e área (comprimento da soleira x  $y_1$ ), em m/s;

g – gravidade, 9,81 m/s<sup>2</sup>.

$$y_2 = 0,5 y_1 \cdot (\sqrt{1 + 8Fr^2} - 1) = 1,58 \text{ m} \quad \text{Equação 7}$$

Com o número de Froude, obtido através do diagrama abaixo, obteve-se o valor de  $L'$  que é de 5,9 metros, sendo possível então calcular o comprimento da bacia de dissipação,  $L$ , através da Equação 8.

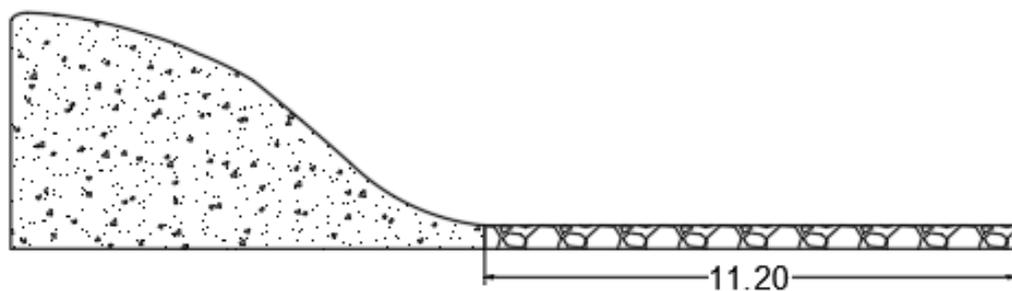


**Figura 71** – Relações entre o comprimento da bacia de dissipação e o número de Froude  
Fonte: Tiago Filho et al. (2008).

$$L = 1,2 \cdot y_2 \cdot L' = 11,20 \text{ m}$$

**Equação 8**

A Figura 72 a seguir mostra a bacia de dissipação (enrocamento) juntamente com o perfil da soleira creager dimensionada.



**Figura 72** – Soleira com perfil tipo Creager e bacia de dissipação.

## 5.4 Dimensionamento Hidráulico utilizando Vertedouro Soleira de Admitância

Da Curva de Permanência de Vazões são destacadas e selecionadas as seguintes vazões características do rio Carangola no município de Carangola, que se trata das vazões características mais frequentes do rio.

**Tabela 8** – Vazões características mais frequentes do Rio Carangola

Q (m <sup>3</sup> /s)	F (%)	OBS.
1,49	98	Qm. Minim.
1,64	97	-
2,02	95	Qmin
2,91	85	-
3,64	75	-
4,30	65	-
5,29	55	-
5,92	50	Qmediana
7,18	41	Qmedia
7,32	40	-
9,27	30	-
12,51	20	-
18,39	10	-
23,16	5	Qmáx
40,31	1	Qm máxim

Para o desenvolvimento do dimensionamento hidráulico da soleira de admitância foram utilizados a inter-relação do estudo hidrológico desenvolvido para o rio Carangola, os dados do estudo energético e as curvas características de natureza hidráulica (Anexo A) determinadas nos estudos de Ottoni (2000) em Modelo Reduzido da Soleira.

Como a Soleira de admitância se apresenta como uma estrutura de barramento vazada, onde parte da vazão do rio continua seu fluxo natural, optou-se para o dimensionamento das cavidades da soleira utilizar o valor da vazão residual disponível no rio, ou seja, garantiu-se a vazão turbinada necessária para a geração de energia da CGH e com a vazão residual dimensionou-se hidráulicamente as cavidades.

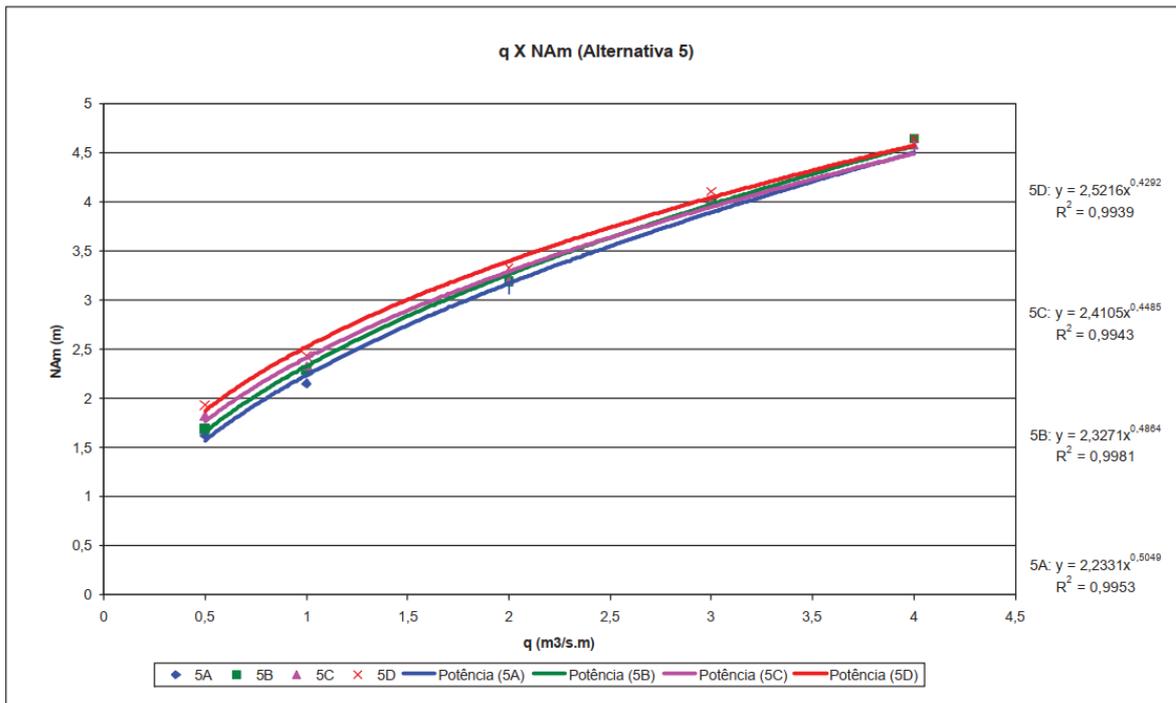
A Tabela 9 a seguir apresenta os parâmetros iniciais do dimensionamento:

**Tabela 9** – Parâmetros iniciais de dimensionamento

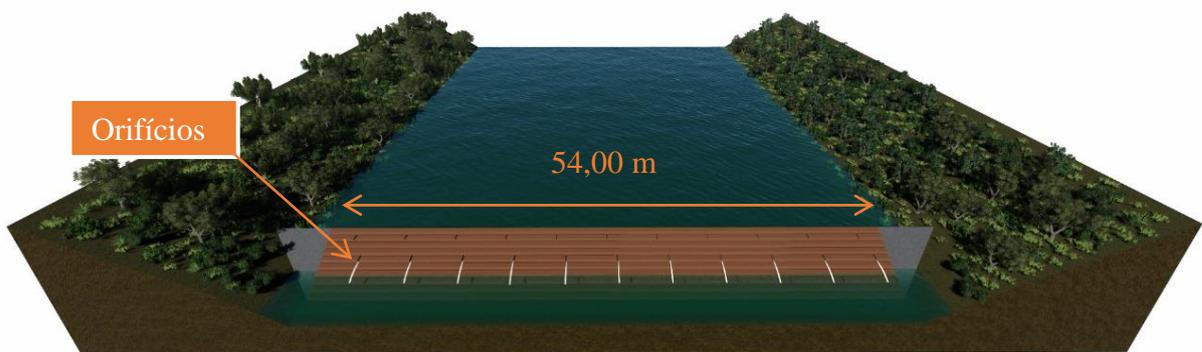
Altura da barragem	Hb =	5,0	[m]
Comprimento da barragem	Lb =	82,57	[m]
Comprimento da soleira	Ls =	54	[m]
Vazão máxima de cheia	Qmax =	85,19	[m <sup>3</sup> /s]
Vazão Média Mensal	Qmed =	8,55	[m <sup>3</sup> /s]
Vazão Turbinada	Qt	3,12	[m <sup>3</sup> /s]
Vazão Residual	Qr	5,43	[m <sup>3</sup> /s]

Para o dimensionamento da soleira foram utilizadas as “Curvas Características de natureza hidráulica” determinadas nos estudos de Ottoni (2000) em Modelo Reduzido da Soleira de Admitância (Anexo A).

Analisando as curvas características que são baseadas nos modelos físicos ensaiados, tendo em vista a altura de 5,0 m e a vazão de 3,12 m<sup>3</sup>/s, a alternativa a ser usada é a alternativa 5, conforme Figura 73.



**Figura 73 – Curva Característica – Modelo Físico Alternativa 5.**



**Figura 74 – Soleira de Admitância Dimensionada – Vista Superior**

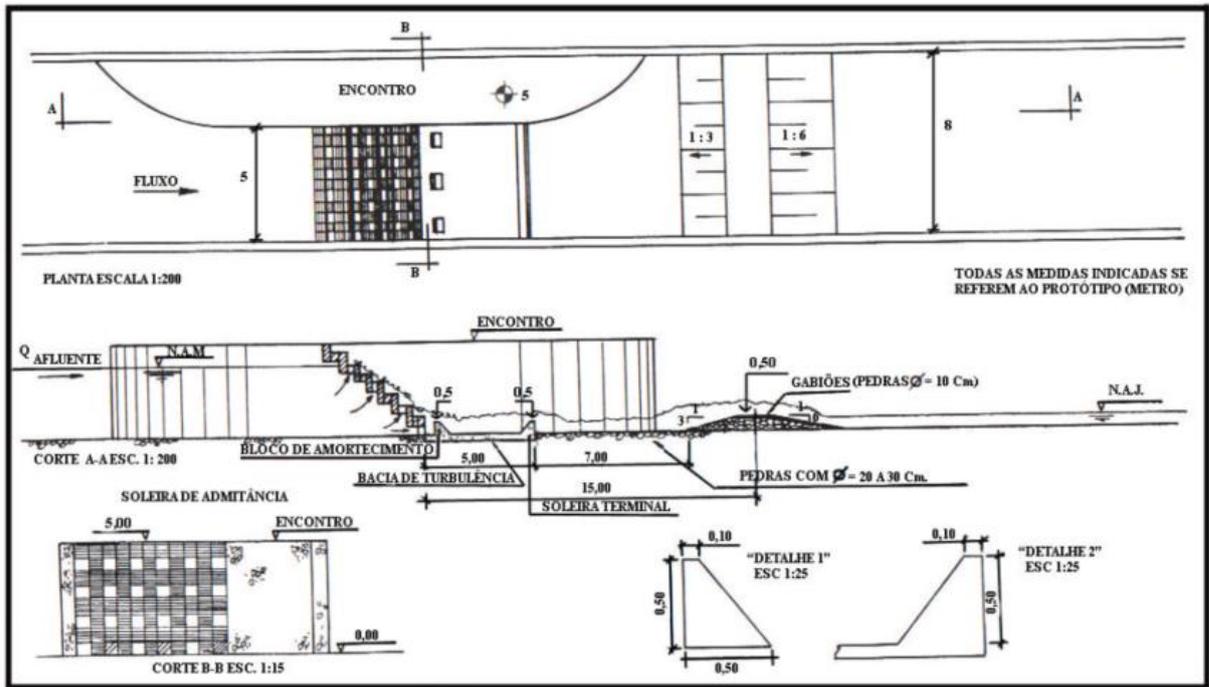


Figura 75 – Alternativa selecionada para geração

## 5.5 Viabilidade Econômica

### 5.5.1 Custos Básicos da Soleira de admitância

Para a construção da Soleira de Admitância os materiais básicos a serem utilizados serão madeira e concreto.

A madeira adotada para a soleira em estudo foi a Cumaru, que se destaca por sua alta resistência à deterioração por exposição à água, vento e luz natural.

A precificação foi obtida através da planilha de composição de custos unitários SINAPI, na modalidade desonerada, com data base de abril de 2020. A planilha de composição da SINAPI já leva em consideração a mão de obra e os equipamentos necessários para a execução de cada item.

O custo da madeira foi obtido através da Lista de Preços Mínimos para os produtos oriundos da Indústria Florestal e Extrativa Vegetal, instituída pela portaria 143/2006 pela Secretaria da Fazenda. O custo por metro cúbico da referida madeira em 2006 era de 933,33 reais (MATO GROSSO, 2006). Para ajustar ao valor atual, foi realizado o reajuste em função da inflação (IPCA) através da Calculadora do Cidadão, disponibilizada pelo Banco Central do Brasil e o valor corrigido calculado foi de 1.904,87 reais.

O valor total básico para a implantação da soleira é de R\$1.573.617,97, conforme apresentado na Tabela 10.

**Tabela 10 – Investimento Necessário para a Implantação da Soleira de Admitância**

ITEM	DESCRIÇÃO	ITEM	REF.	UNID.	QUANT.	PREÇO UNIT.	PREÇO TOTAL
1	CONCRETO USINADO (CLASSE DE RESISTENCIA C35) – OMBREIRA + BACIA DE TURBULÊNCIA	11145	SINAPI	M3	460,35	R\$ 312,42	R\$ 175.017,68
2	MADEIRA CUMARU SOLEIRA	143/2006	SEFAZ-MT	M3	110,7	R\$ 1.904,87	R\$ 210.869,11
3	ENROCAMENTO COM PEDRAS DE MÃO	92755	SINAPI	M2	378,00	R\$ 146,87	R\$ 55.516,86
3	GABIÃO	92743	SINAPI	M3	191,70	R\$ 421,21	R\$ 80.745,96
<b>CUSTO BÁSICO TOTAL</b>				<b>R\$522.149,61</b>			

### 5.5.2 Custos Básicos da Soleira tipo Creager

A soleira do tipo Creager é composta inteira e unicamente por concreto e o preço foi obtido através da planilha de composição de custos unitários SINAPI, na modalidade desonerada, com data base de abril de 2020. Foi ainda orçada a bacia de dissipação em pedra argamassada.

O valor total básico para a implantação do perfil creager proposto é de R\$758.677,33, conforme apresentado na Tabela 11.

**Tabela 11 – Investimento Necessário para a Implantação da perfil Creager**

ITEM	DESCRIÇÃO	ITEM	REF.	UNID.	QUANT.	PREÇO UNIT.	TOTAL
1	CONCRETO USINADO (CLASSE DE RESISTENCIA C35)	11145	SINAPI	M3	2144,07	R\$ 312,42	R\$ 669.850,35
3	ENROCAMENTO COM PEDRAS DE MÃO	92755	SINAPI	M2	378,00	R\$ 146,87	R\$ 88.826,98
<b>CUSTO BÁSICO TOTAL</b>				<b>R\$758.677,33</b>			

Não foram previstos os custos que seriam iguais para ambos os arranjos, tais como os custos do canal de adução, ensecadeira, casa de força, etc., tendo em vista que não seriam relevantes para a comparação.

Por último, foi determinado o valor de venda da energia e verificada a viabilidade econômica do projeto através do cálculo do período de retorno do investimento pelo método payback:

$$\text{Payback} = \text{Investimento/Economia}$$

Tomando a potência instalada de 1,25 MWh, com fator de capacidade de 0,87, e considerando o valor médio de venda de energia do ano de 2019 que foi de R\$ 176/MWh, o custo do sistema de barramento da referida usina se pagaria em 5 meses no caso da utilização da soleira de admitância enquanto para a utilização do barramento em perfil creager com concreto seria de 7 meses.

## 6 CONCLUSÃO

A soleira de admitância é uma obra hidráulica que reflete vantagens notadamente, ambientais, podendo ser uma alternativa para o vertimento de pequenas centrais hidrelétricas como mostrou este trabalho.

Assim, como concluiu Ottoni (2002) as Soleiras de Admitância atuam como obra de calha fluvial que buscam a correção do regime hídrico. Por utilizar um recurso renovável como estrutura, tendem à reproduzir gradativamente, juntamente com as intervenções de encosta e planície da bacia, as características hidrológicas do ecossistema original, conforme suas condições naturais.

Outro quesito ambiental importante é que a soleira de admitância não influencia de forma representativa nas características hidrosedimentológicas e de nutrientes do curso d'água, assim como na ictiofauna local, devido aos orifícios que compõem o corpo do Barramento; as perdas d'água por evaporação tendem a ser reduzidas, já que a bacia hidráulica é de pequeno porte (apenas leito fluvial).

Um ponto negativo da tecnologia da soleira de admitância seria a necessidade constante de limpeza das cavidades onde os orifícios seriam facilmente entupidos por matérias que vem se deslocando junto com o rio (galhos, aguapés, lixo, etc.).

Do ponto de vista econômico, a soleira de admitância se mostrou mais oportuna, uma vez que o tempo de retorno do investimento é menor.

Há que se considerar que a soleira de admitância dispensa o uso da bacia de dissipação de grande dimensão, o que traz maior economicidade ao sistema.

Do tempo de execução, a concretagem do perfil creager é mais rápida, porém exige maior controle tecnológico em sua execução.

O presente trabalho tem sua contribuição no desenvolvimento dos estudos na área de soleiras de admitância, relacionando uma estrutura de controle de vazões a uma estrutura de geração de hidroeletricidade.

Foi efetuado um estudo de caso a partir de dados reais, cujos resultados indicam que além dos benefícios ambientais e da funcionalidade técnica, a utilização da soleira de admitância como barramento em CGHs para rios de planalto/montanha se mostra economicamente atrativa comparada a uma estrutura tradicional (perfil Creager).

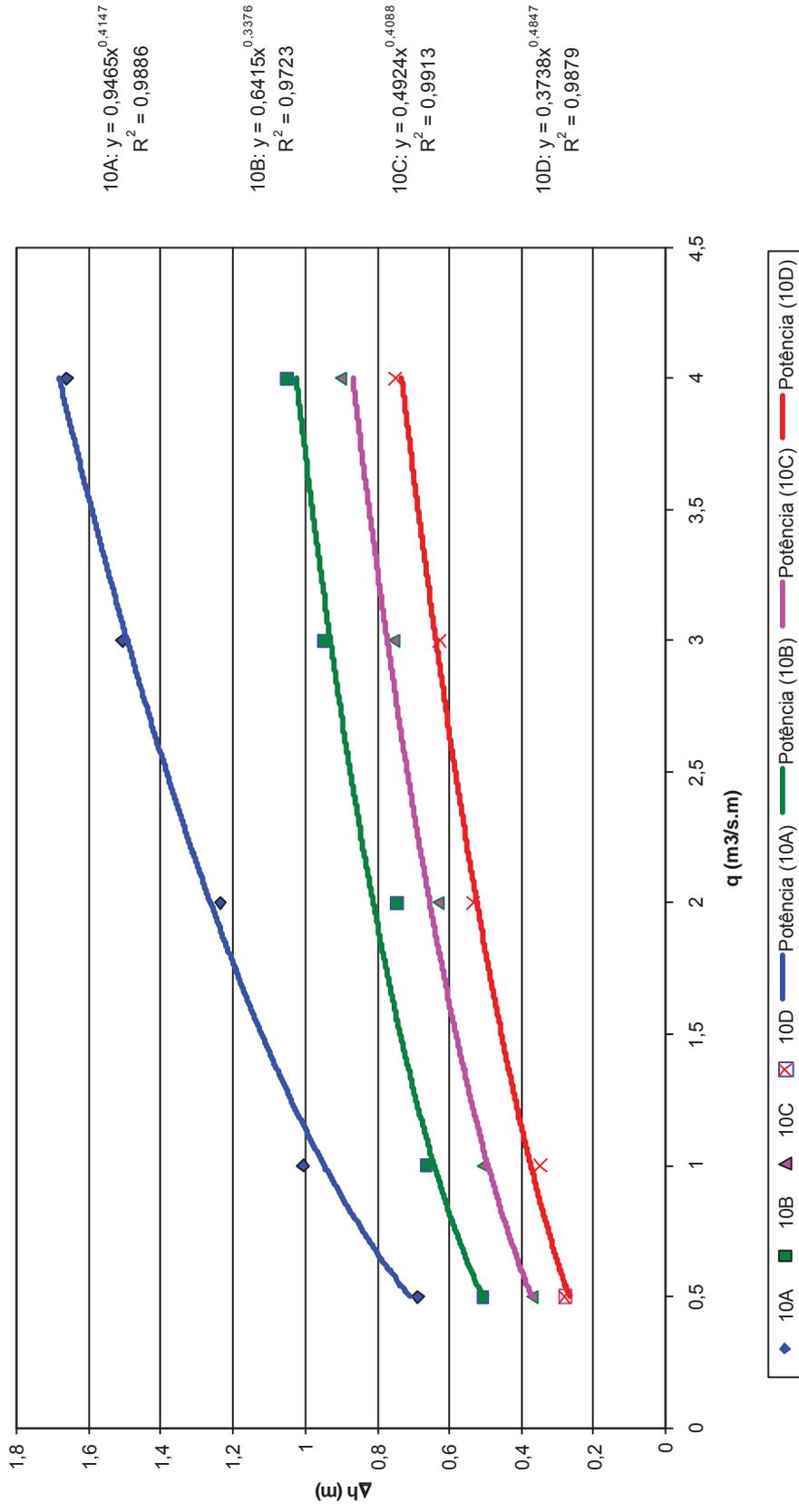
Há que se propor que para futuros estudos seja elaborado um modelo físico reduzido visando identificar as possíveis necessidades estruturais do sistema, buscando ainda analisar o

fechamento dos orifícios através de tamponamentos móveis para os períodos de estiagem de forma que apenas a vazão sanitária passe pelo barramento, garantindo a geração hidroenergética.

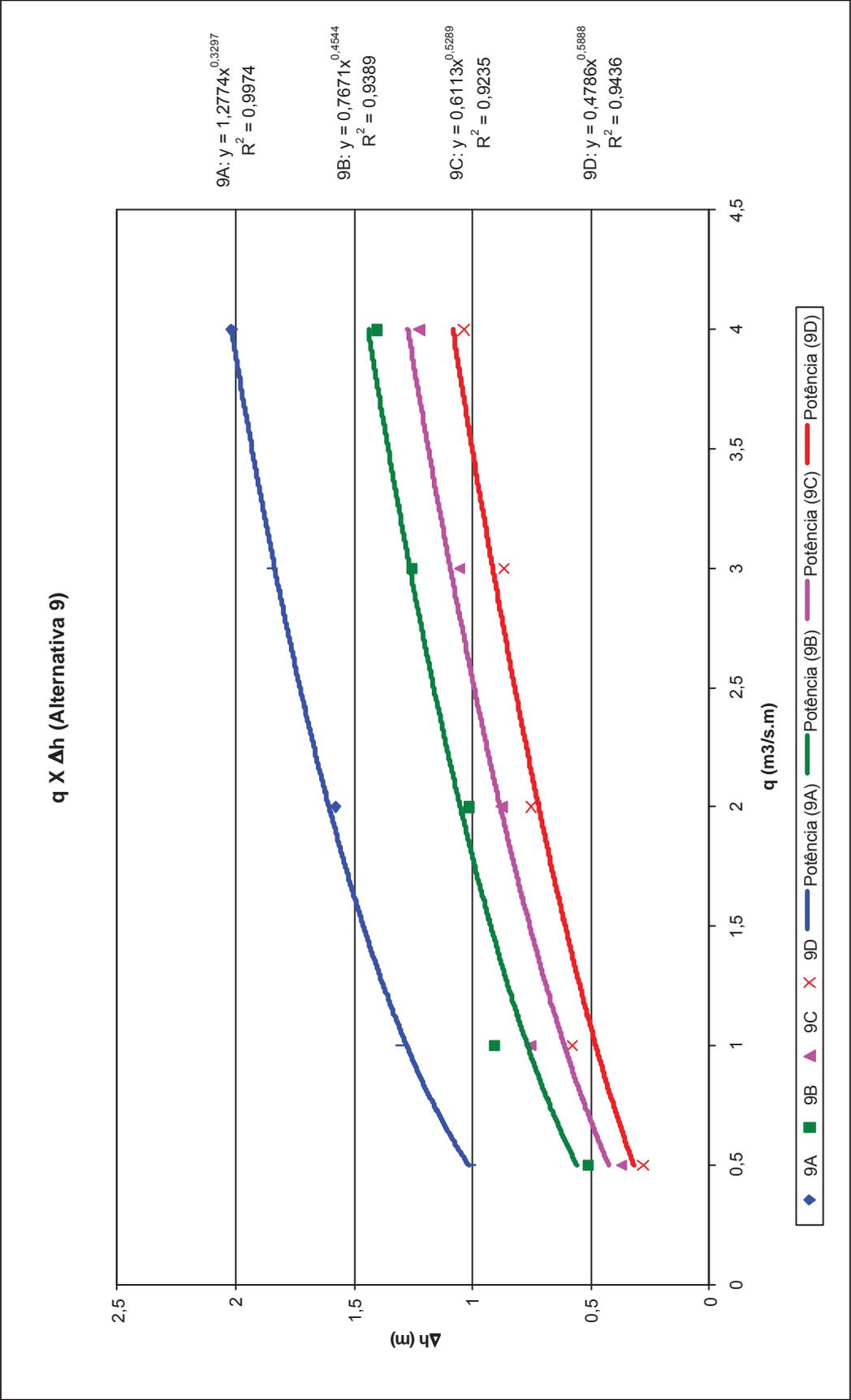
## **ANEXO A – CURVAS CARACTERÍSTICAS**



### q X Δh (Alternativa 10)

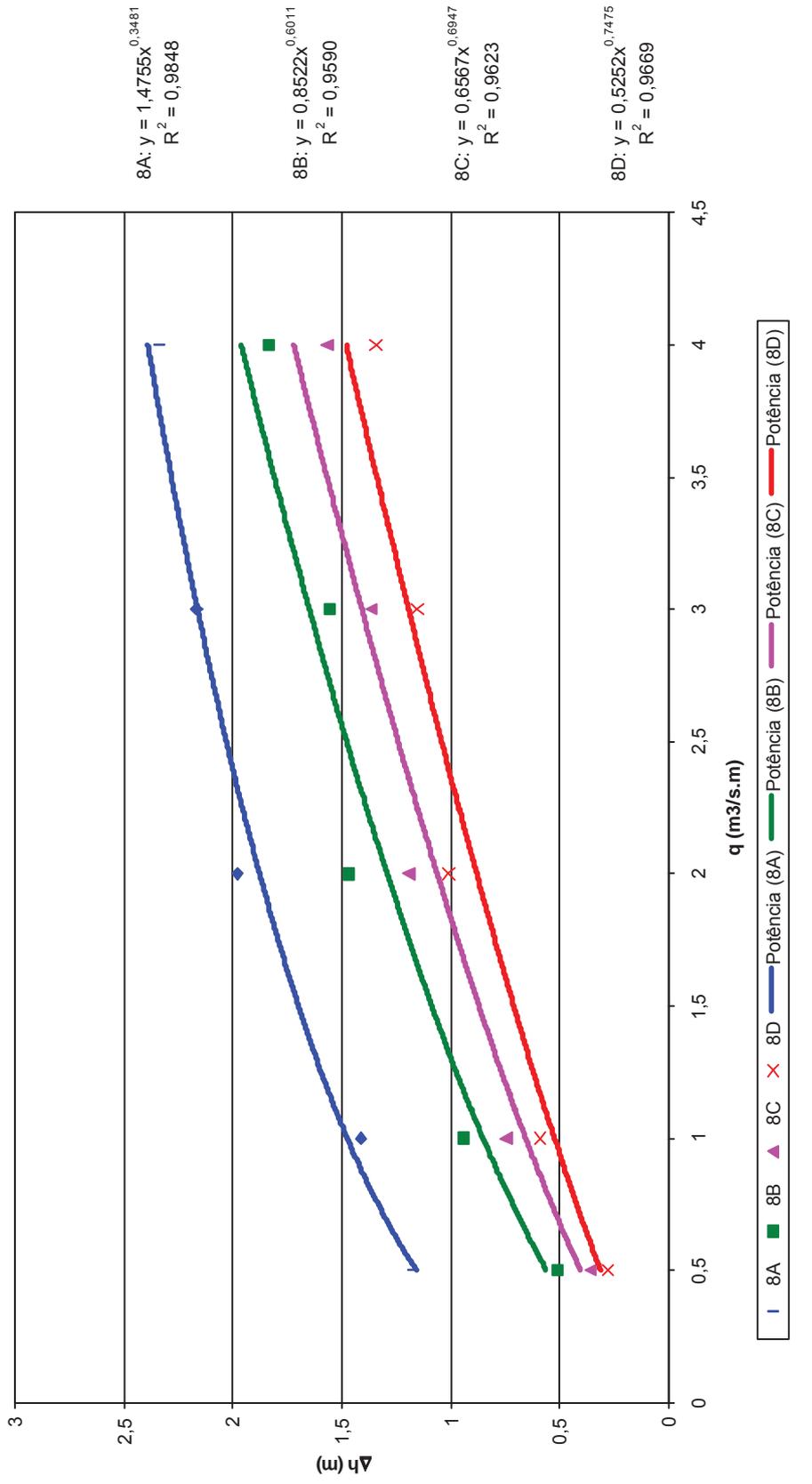


APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .



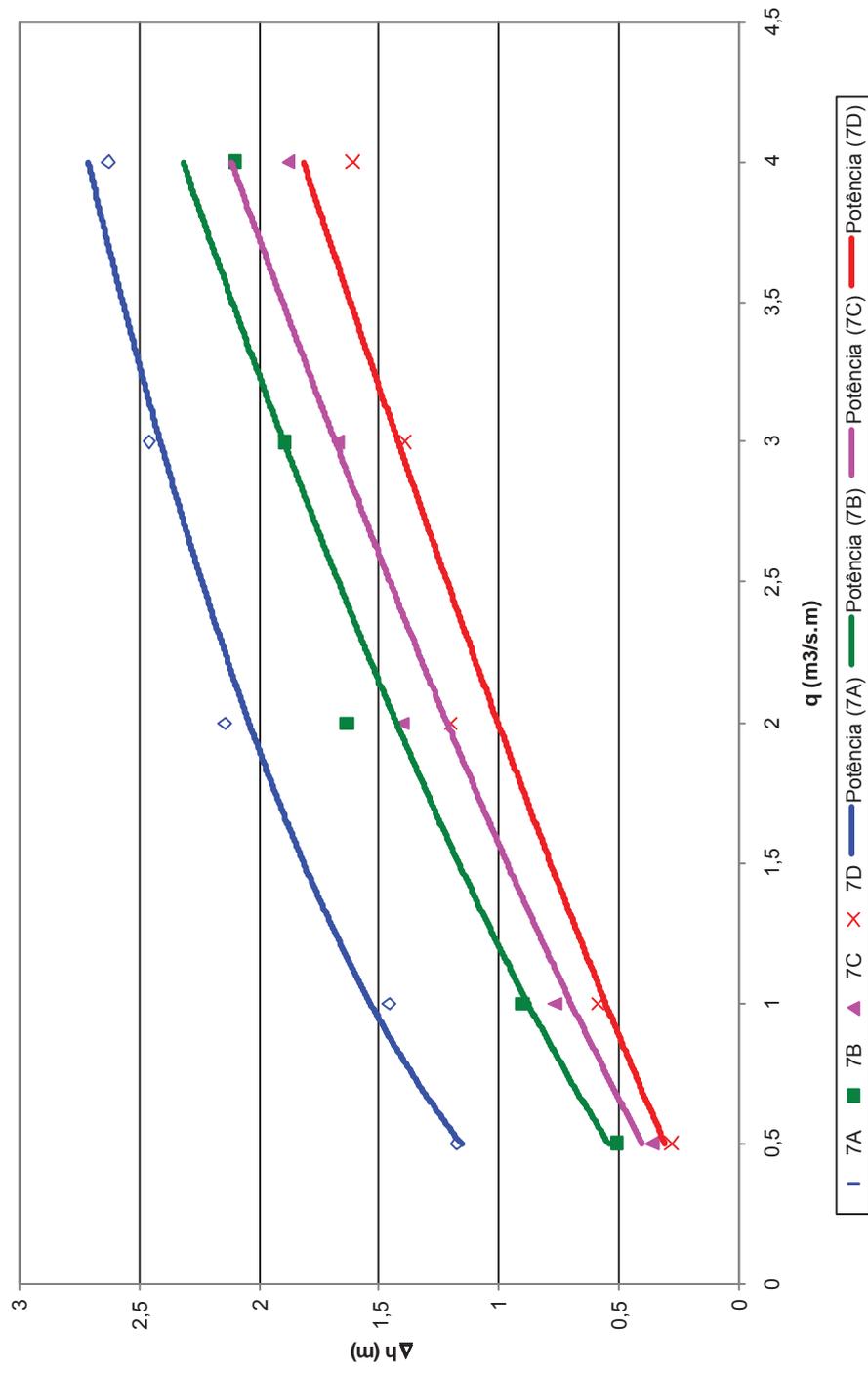
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

### q X Δh (Alternativa 8)



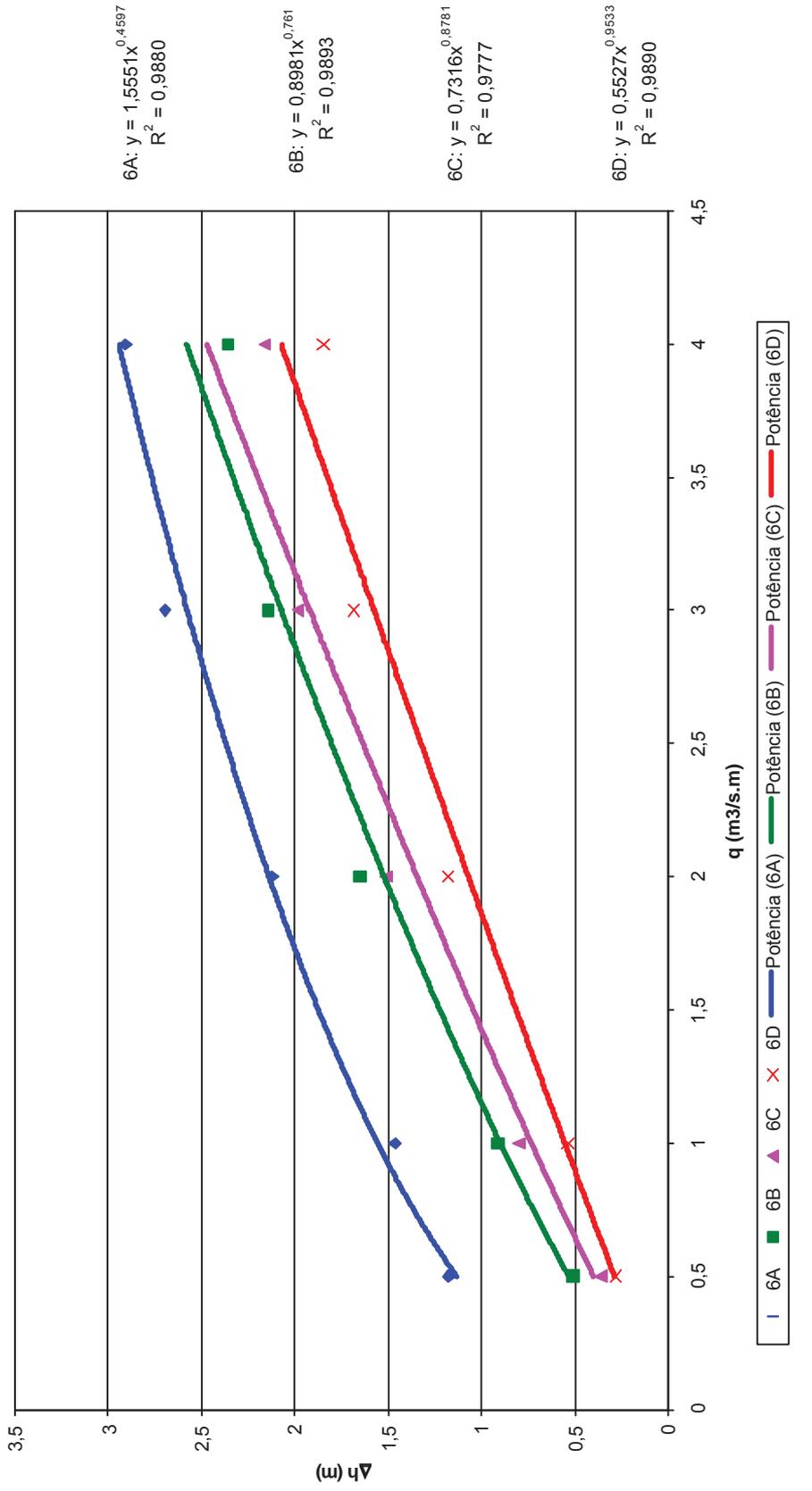
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

### q X Δh (Alternativa 7)



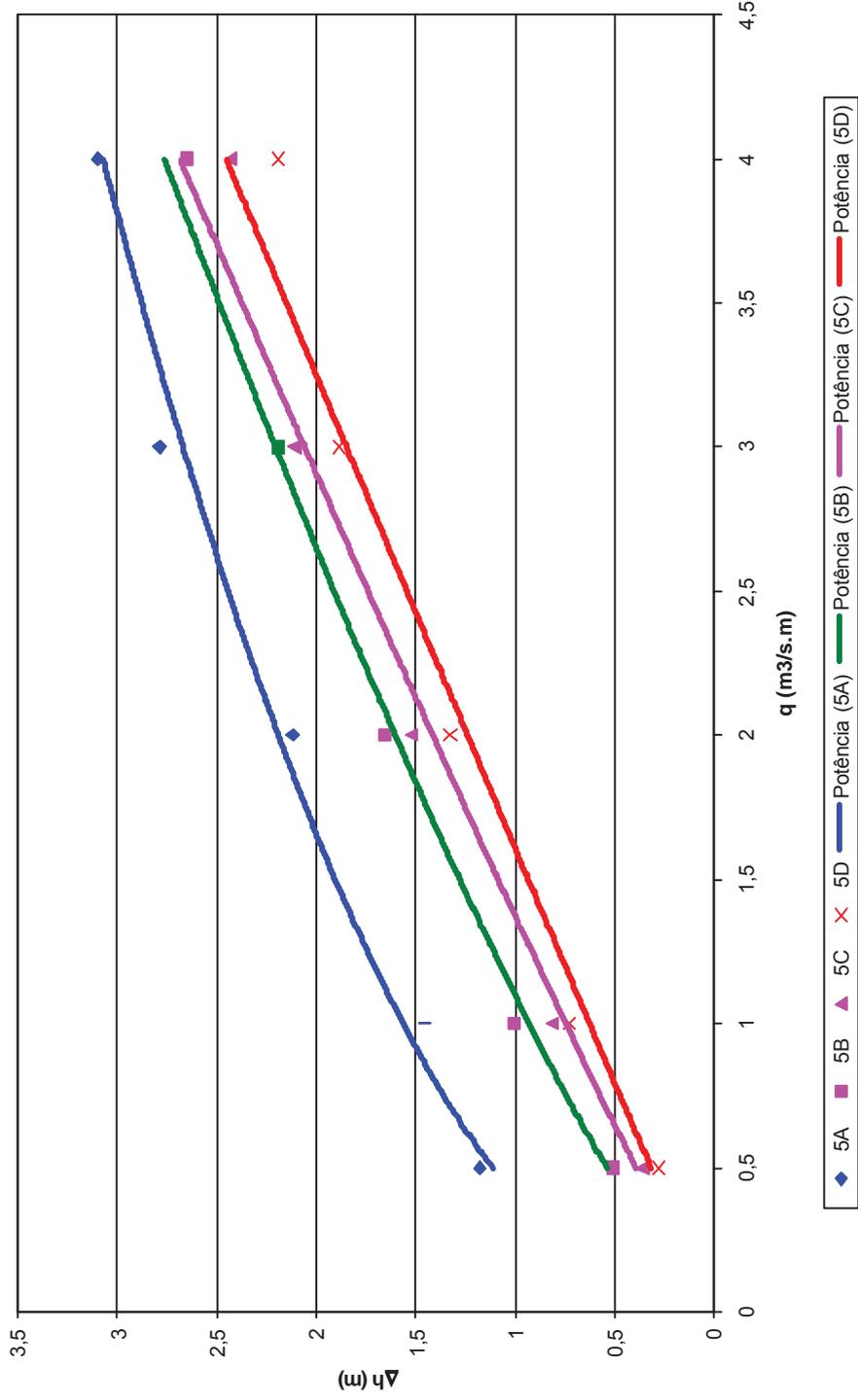
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

q X Δh (Alternativa 6)



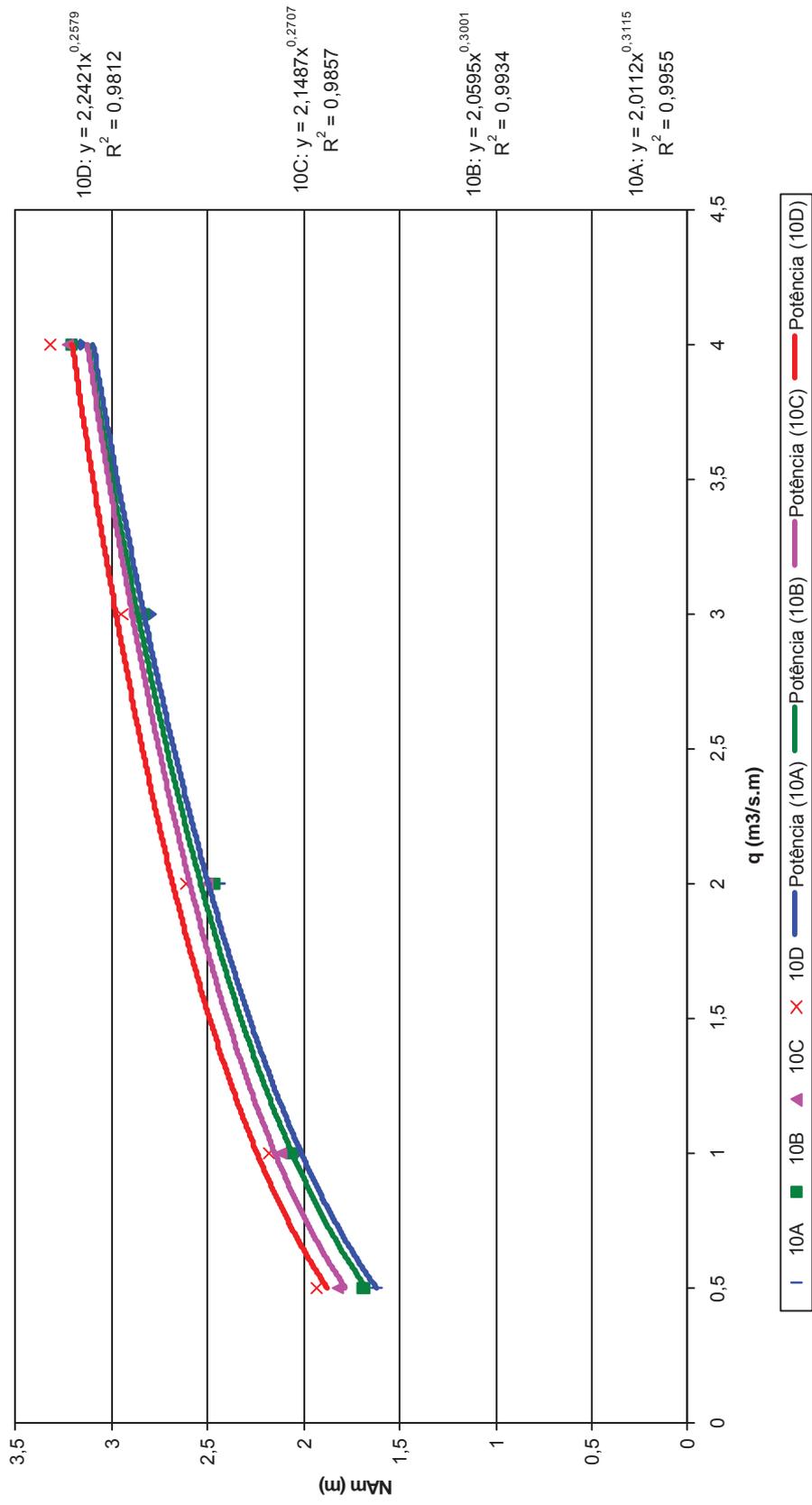
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª H hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

q X Δh (Alternativa 5)



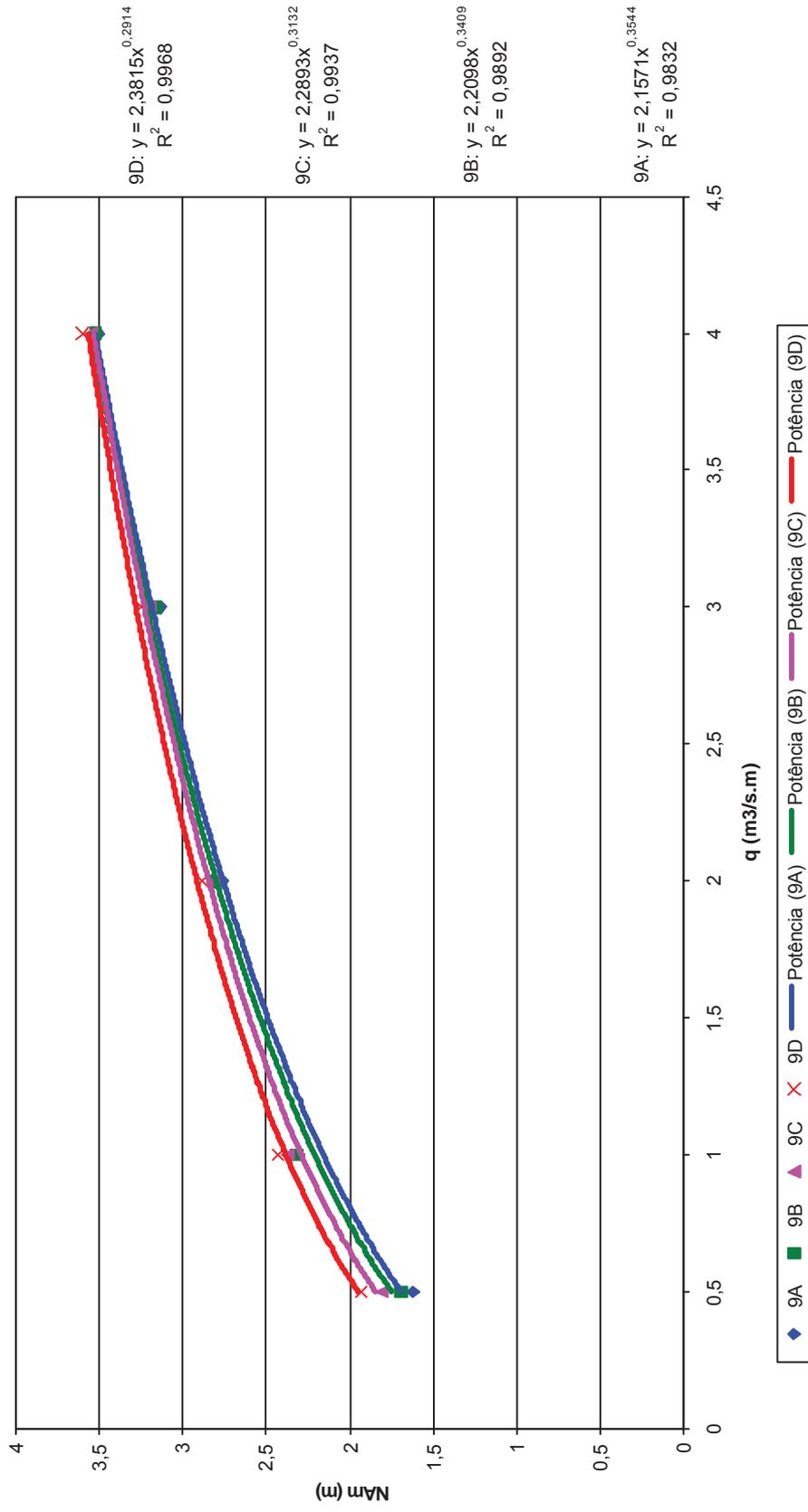
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

### q X NAm (Alternativa 10)



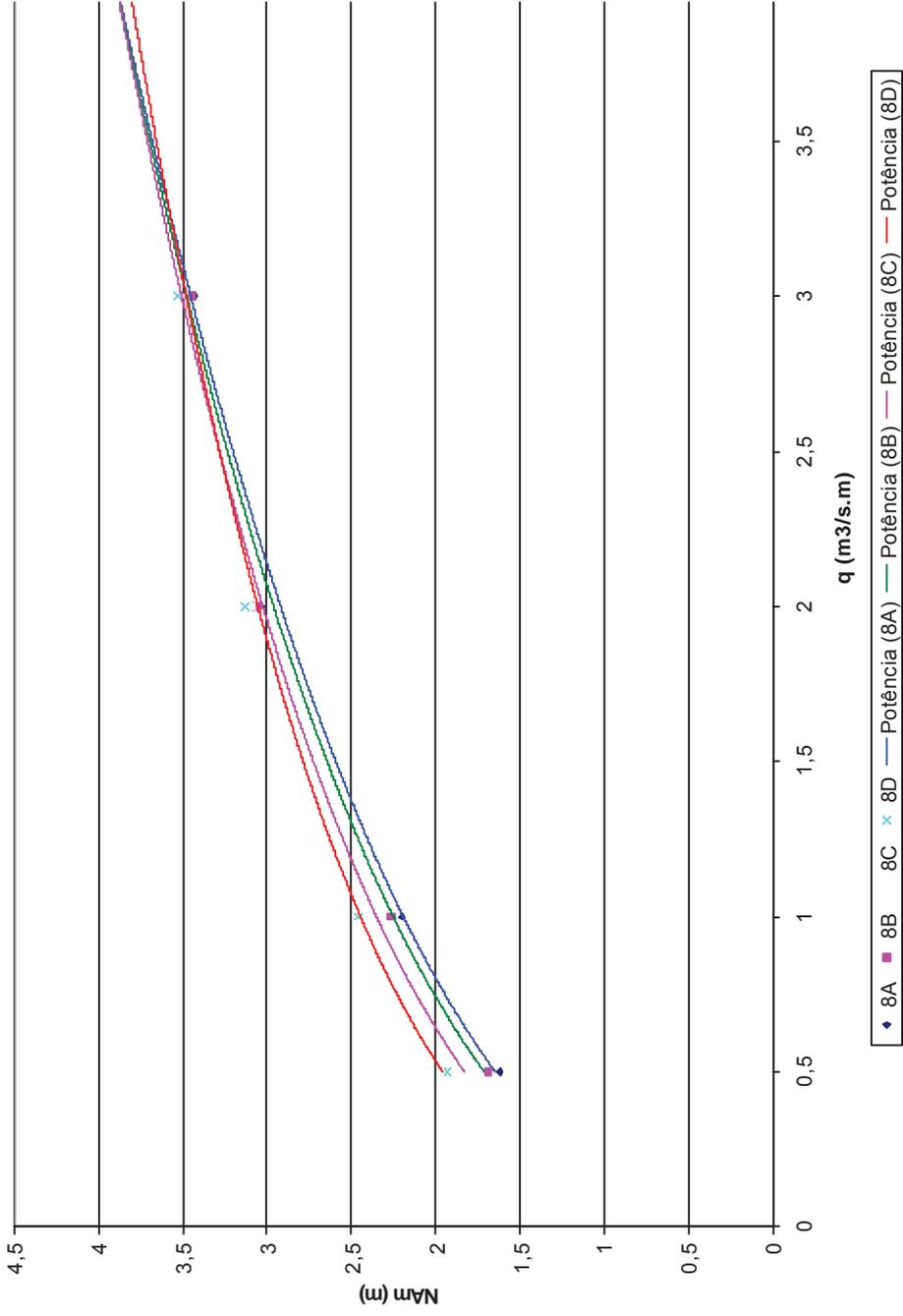
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª H hipótese: Comparação das Grandezas Hidraulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

### q X Nam (Alternativa 9)

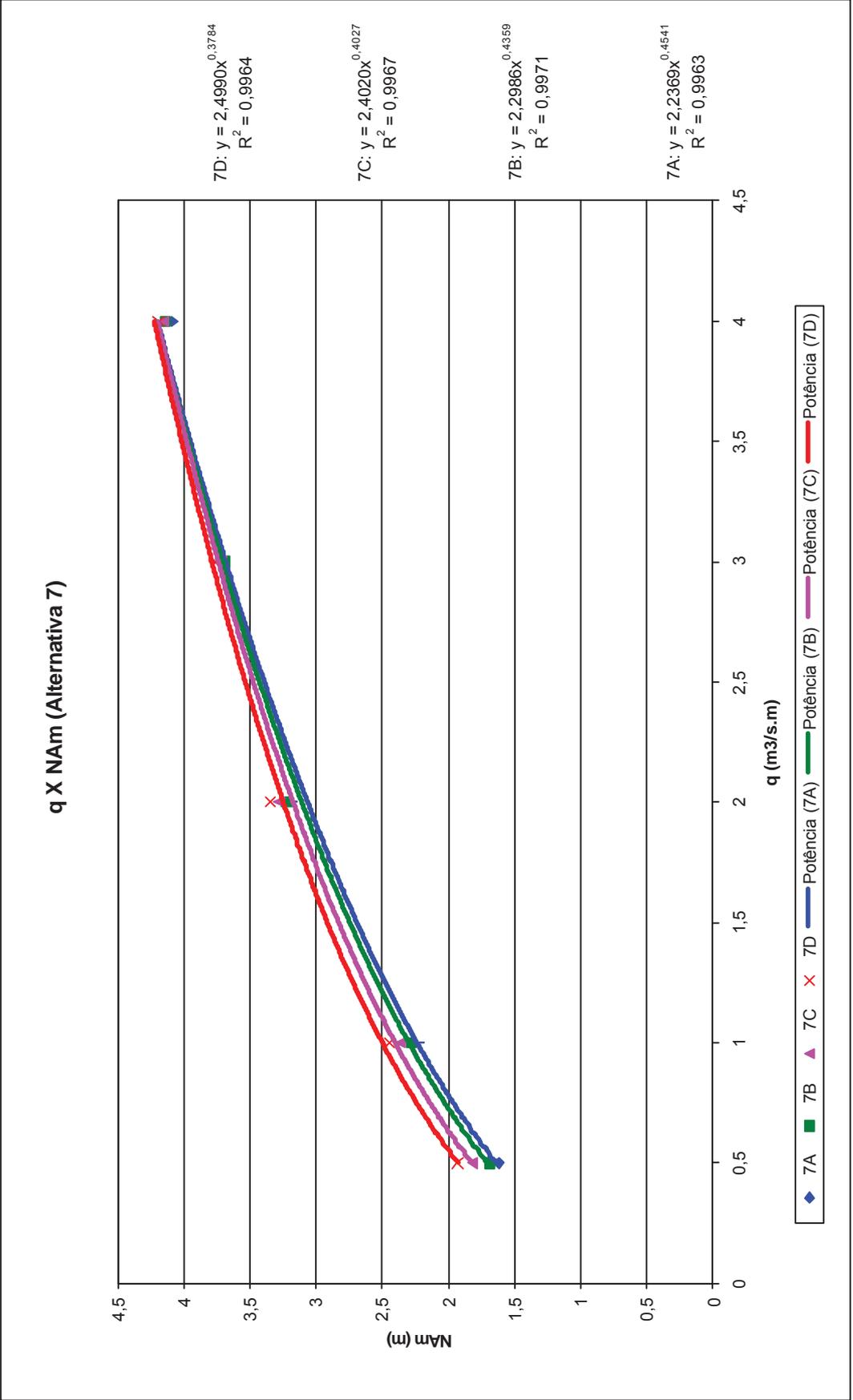


APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

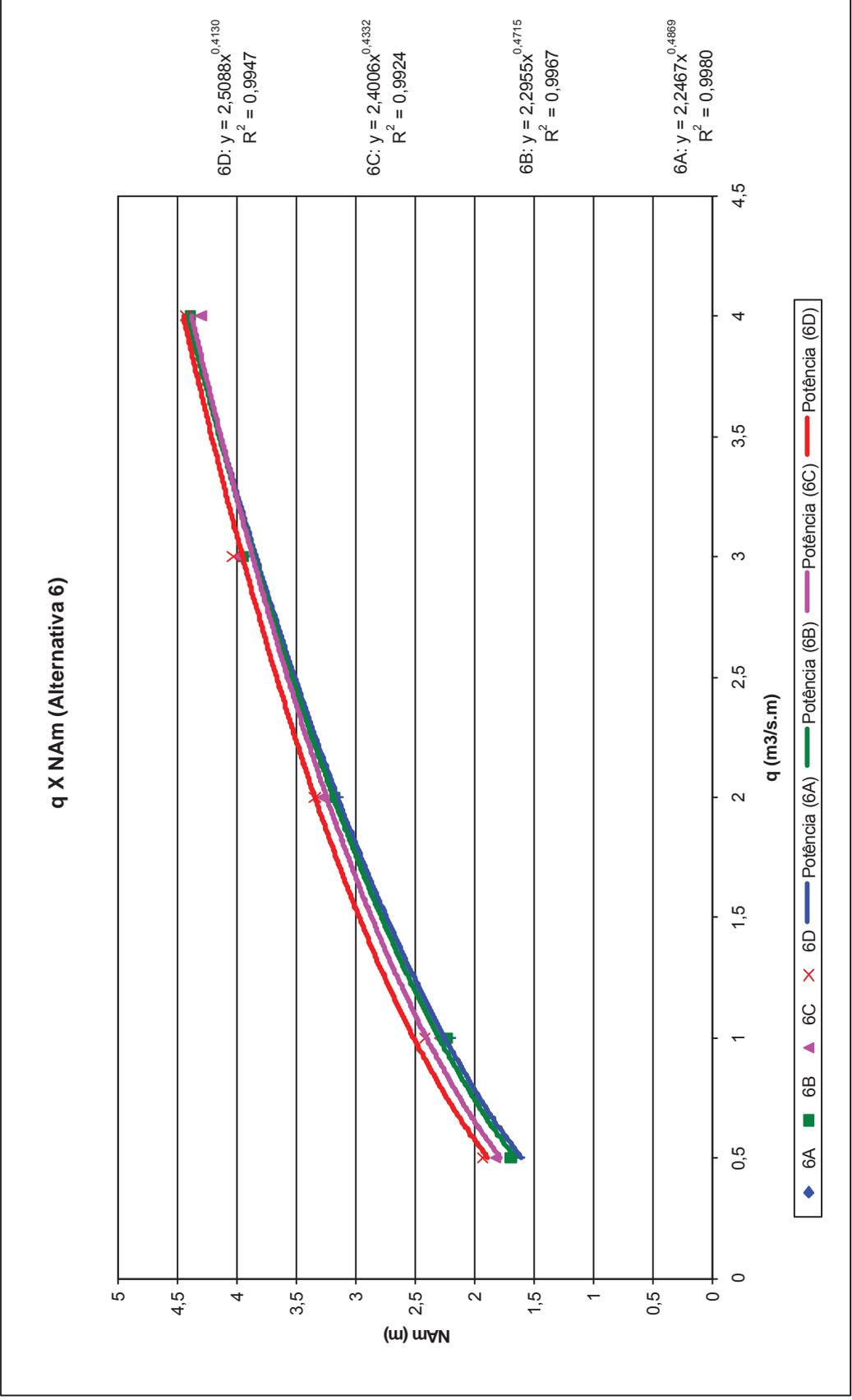
### q X NAM (Alternativa 8)



APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva -Chave de Jusante .

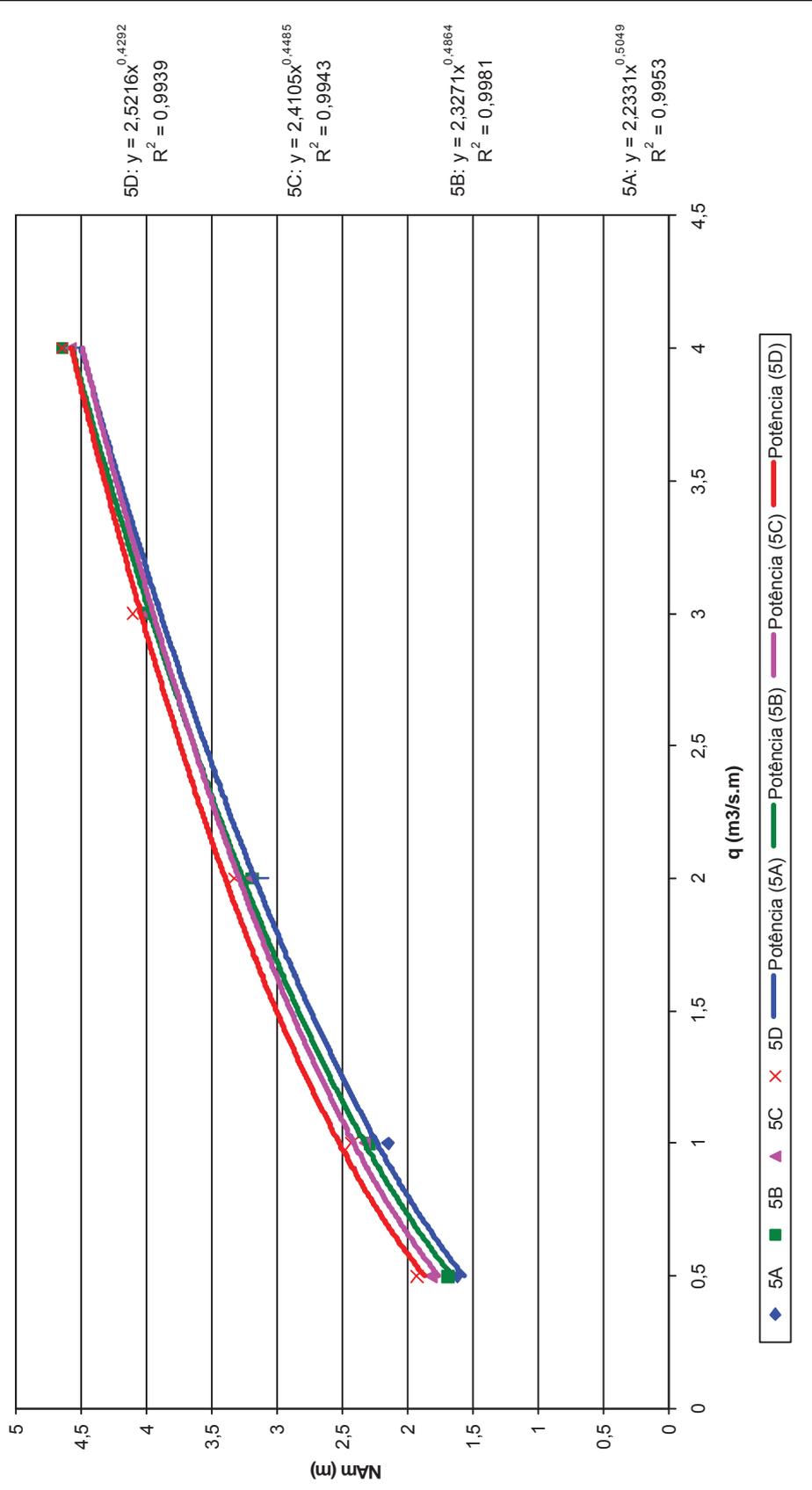


APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .



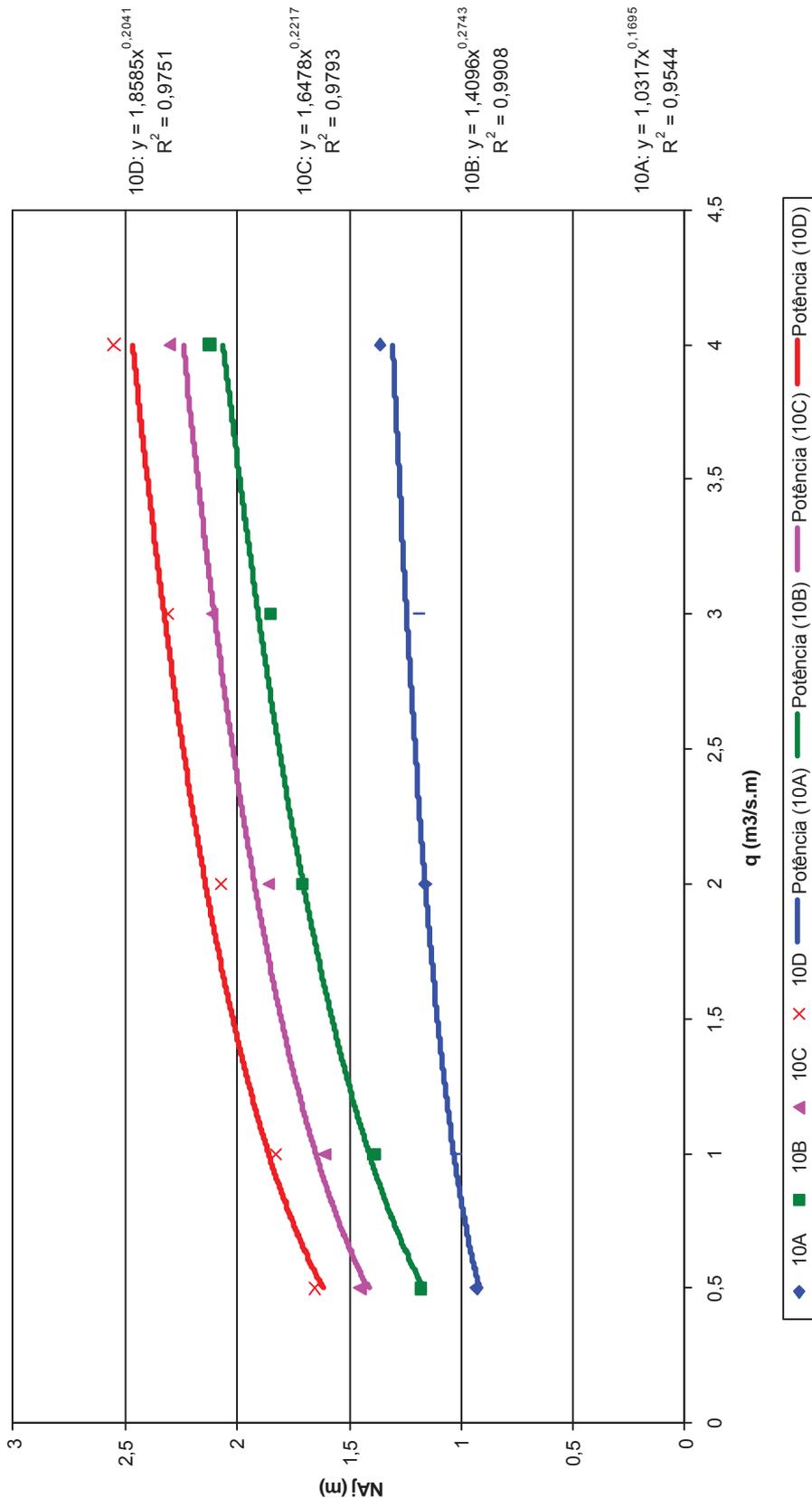
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

### q X NAm (Alternativa 5)



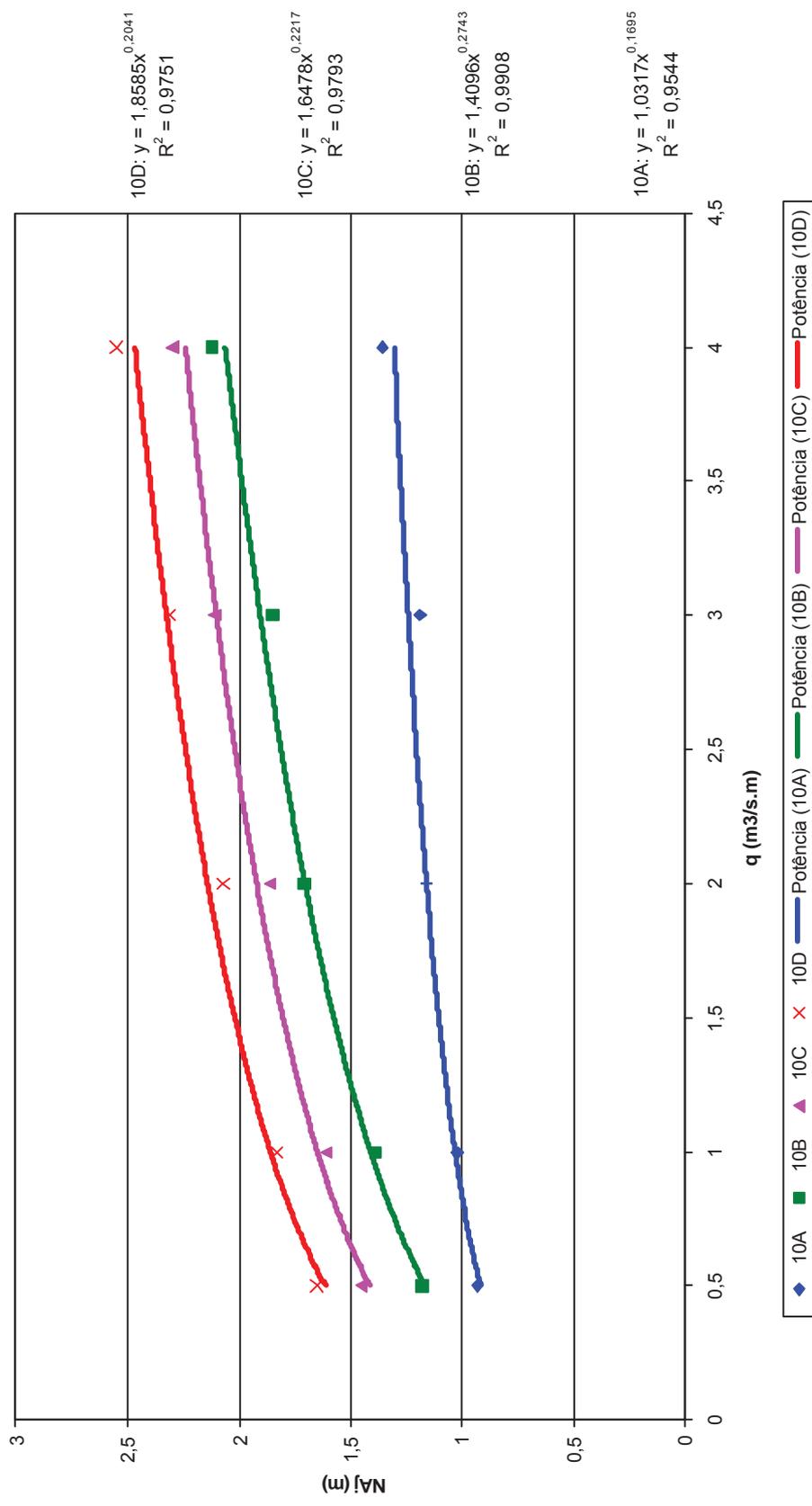
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

### q X NAj (Alternativa 10)



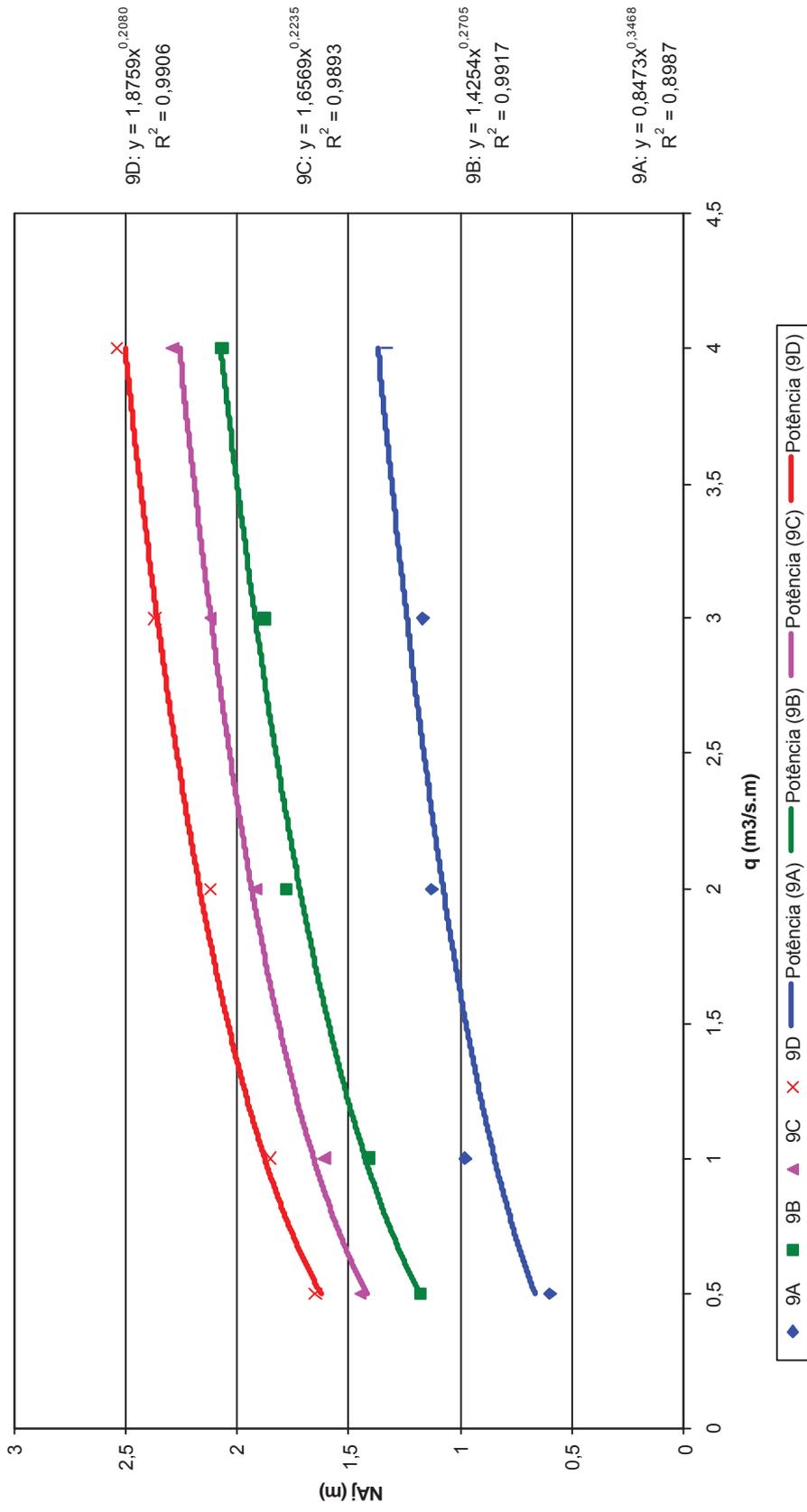
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

### q X NAj (Alternativa 10)



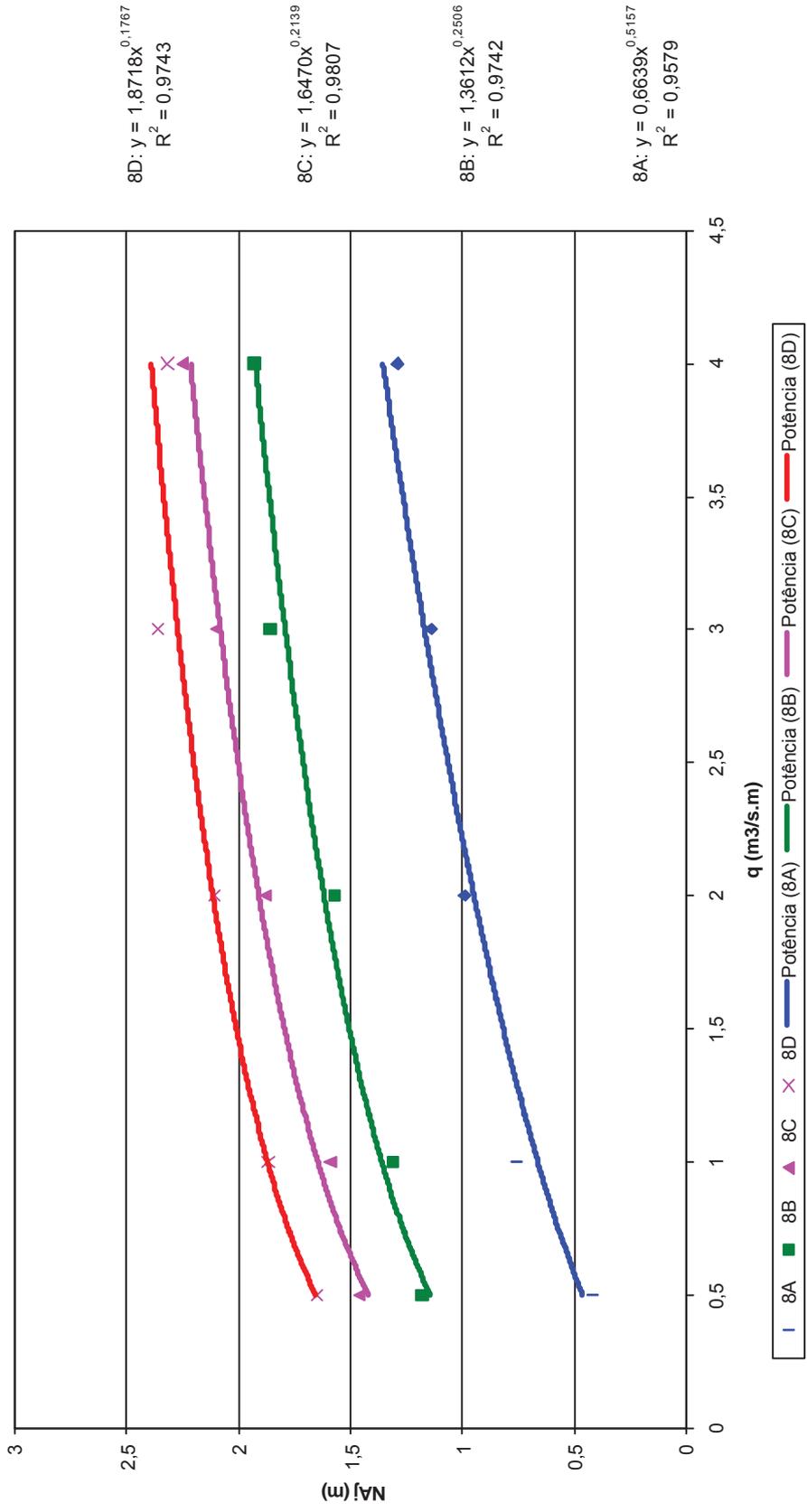
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

### q X NAj (Alternativa 9)

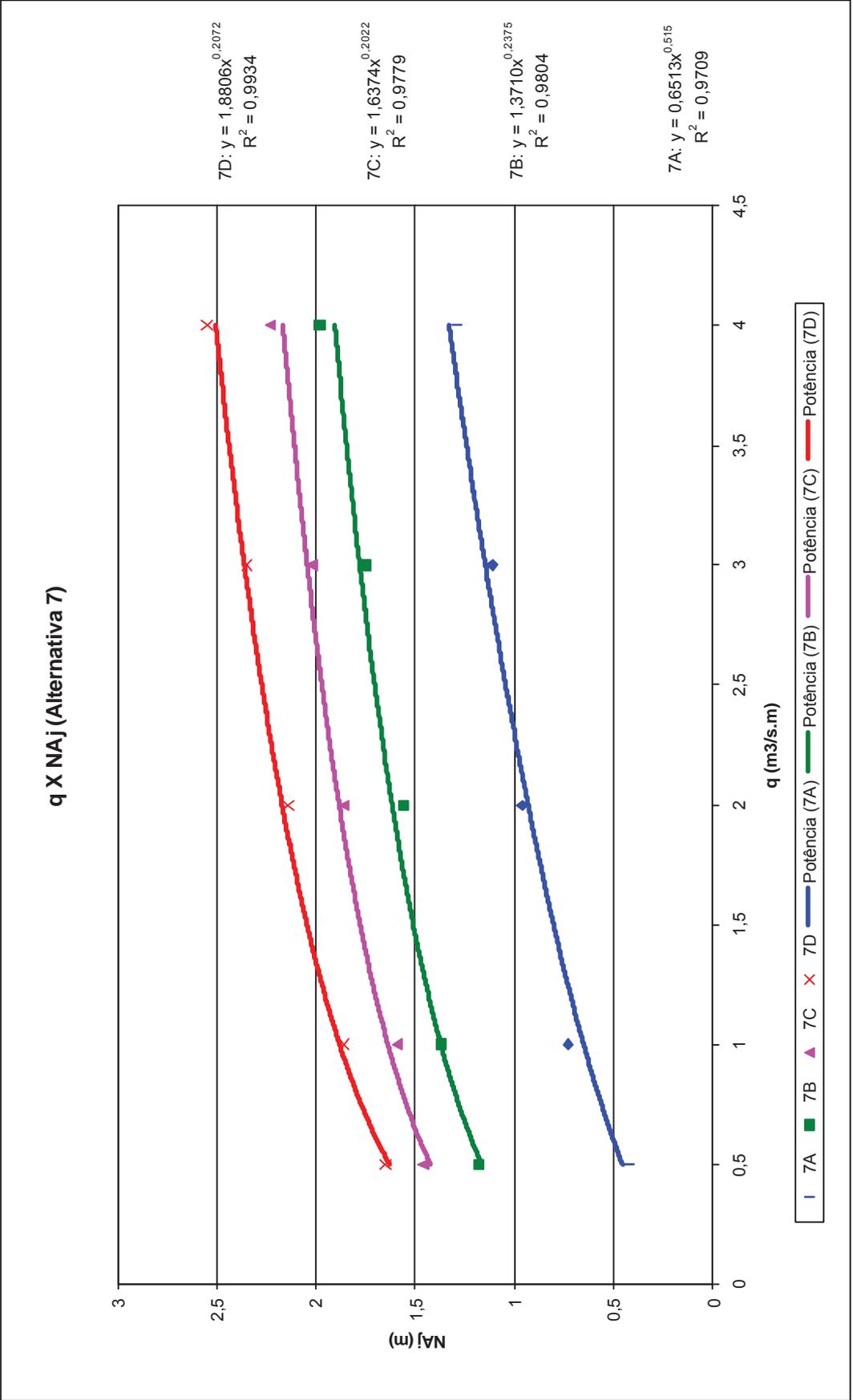


APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

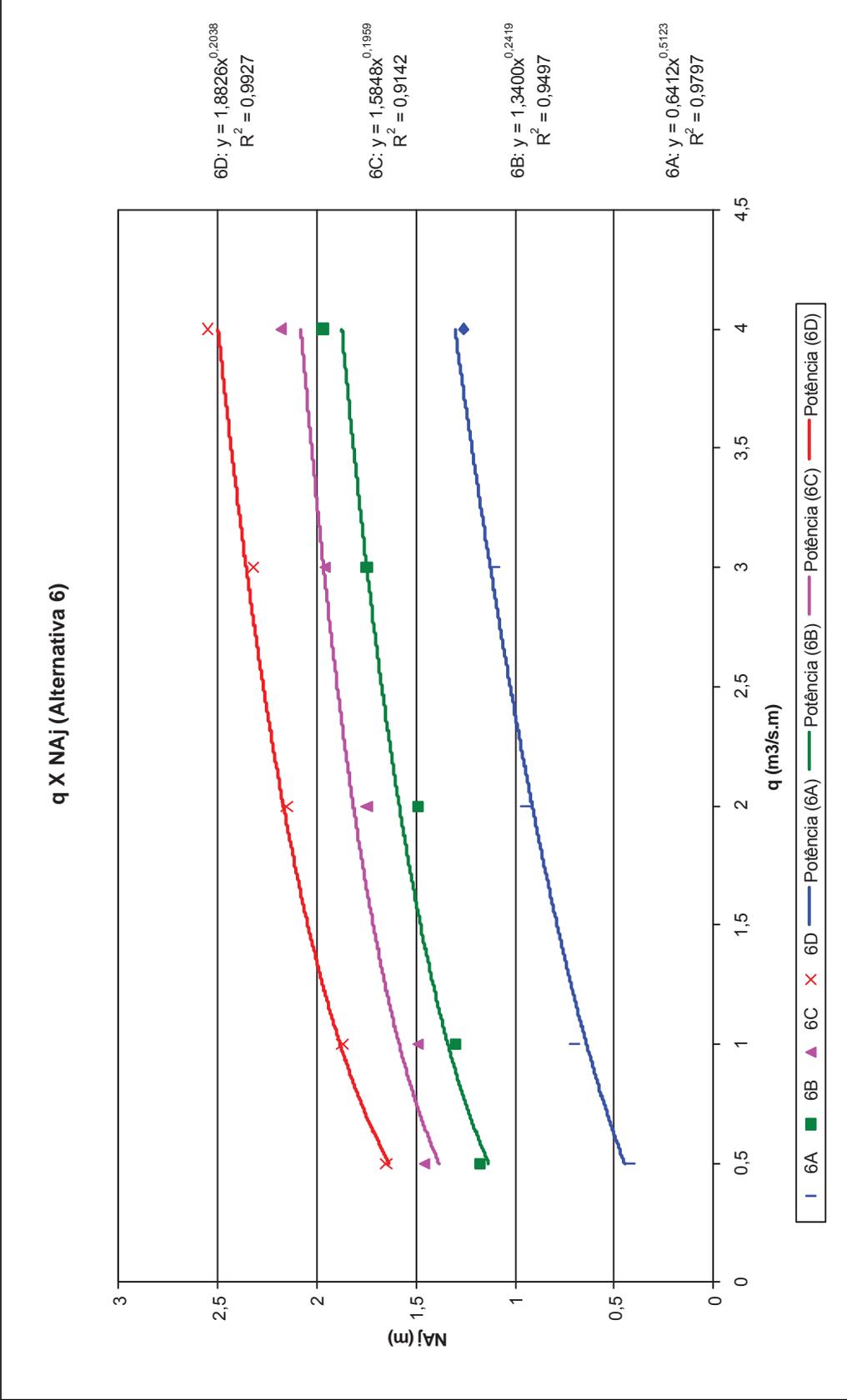
q X NAj (Alternativa 8)



APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª H hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

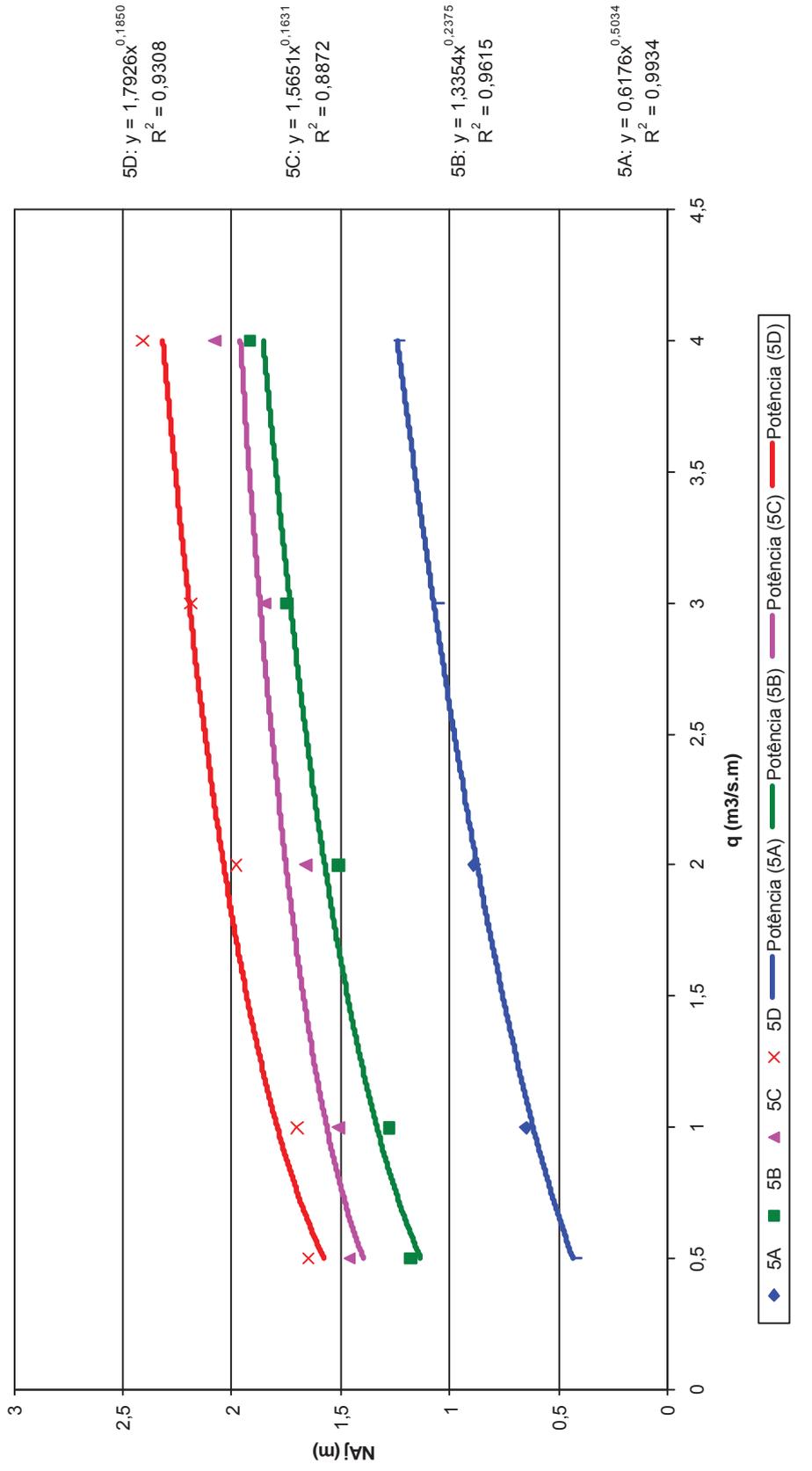


APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

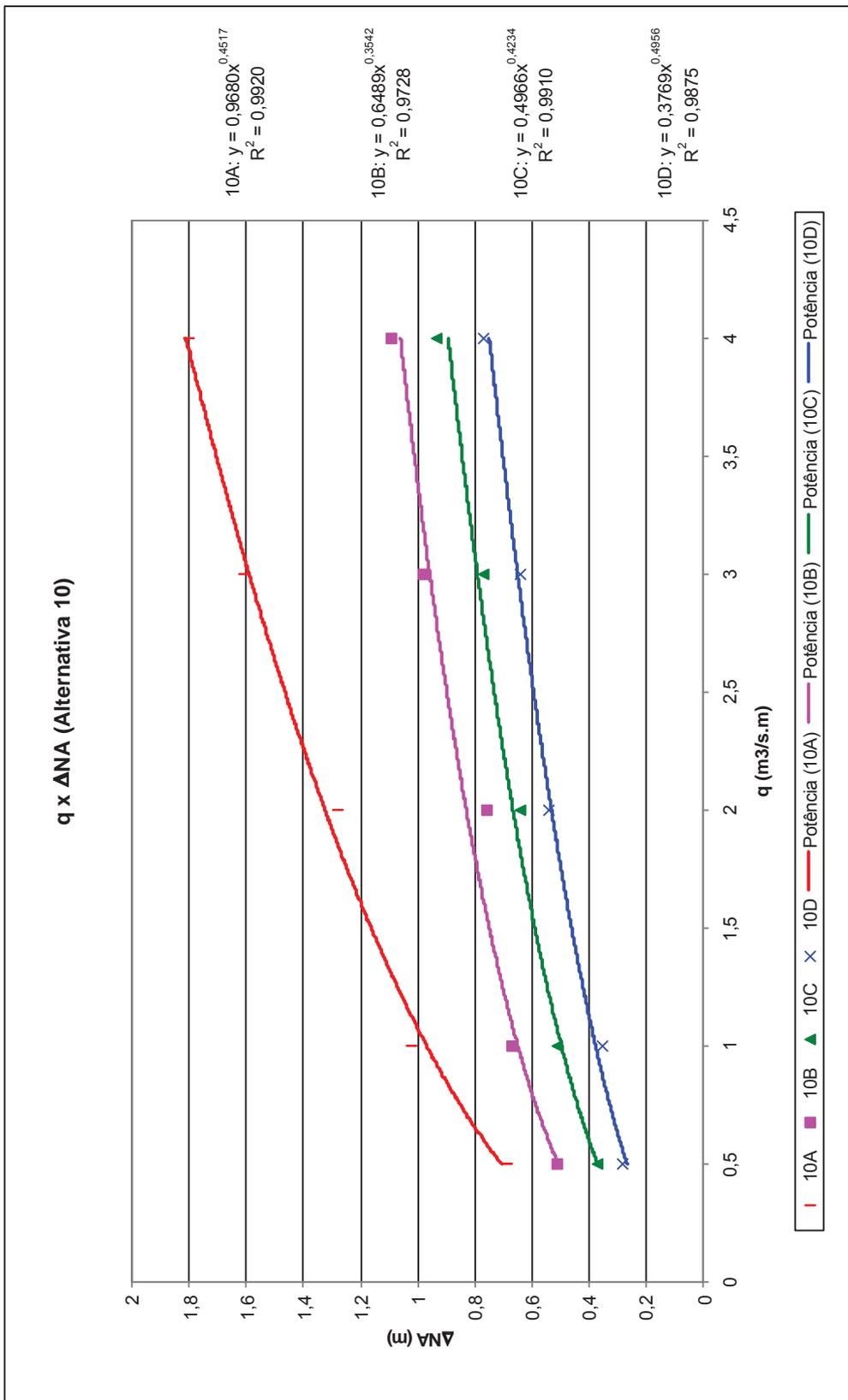


APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva -Chave de Jusante .

q X NAj (Alternativa 5)

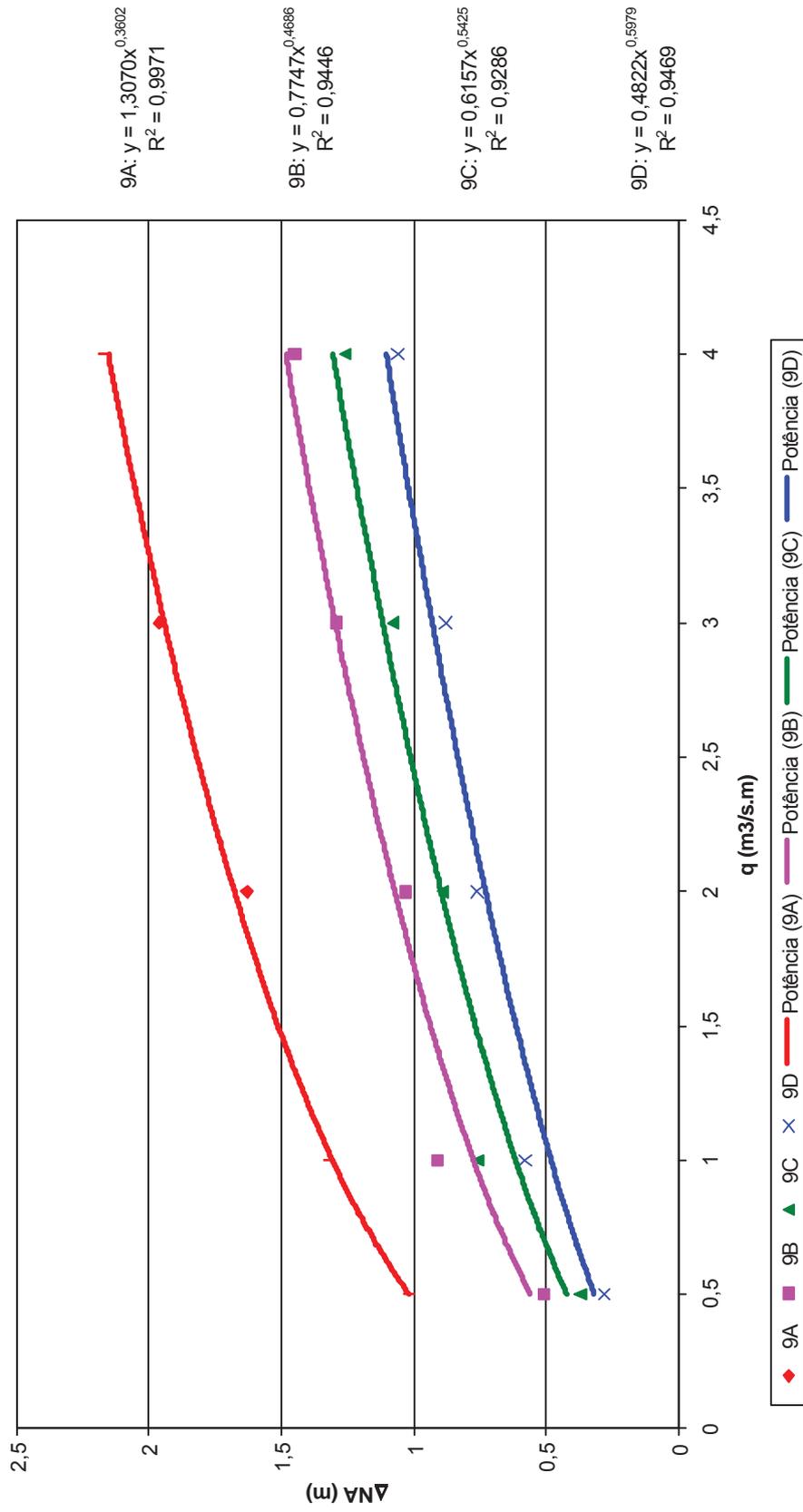


APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .



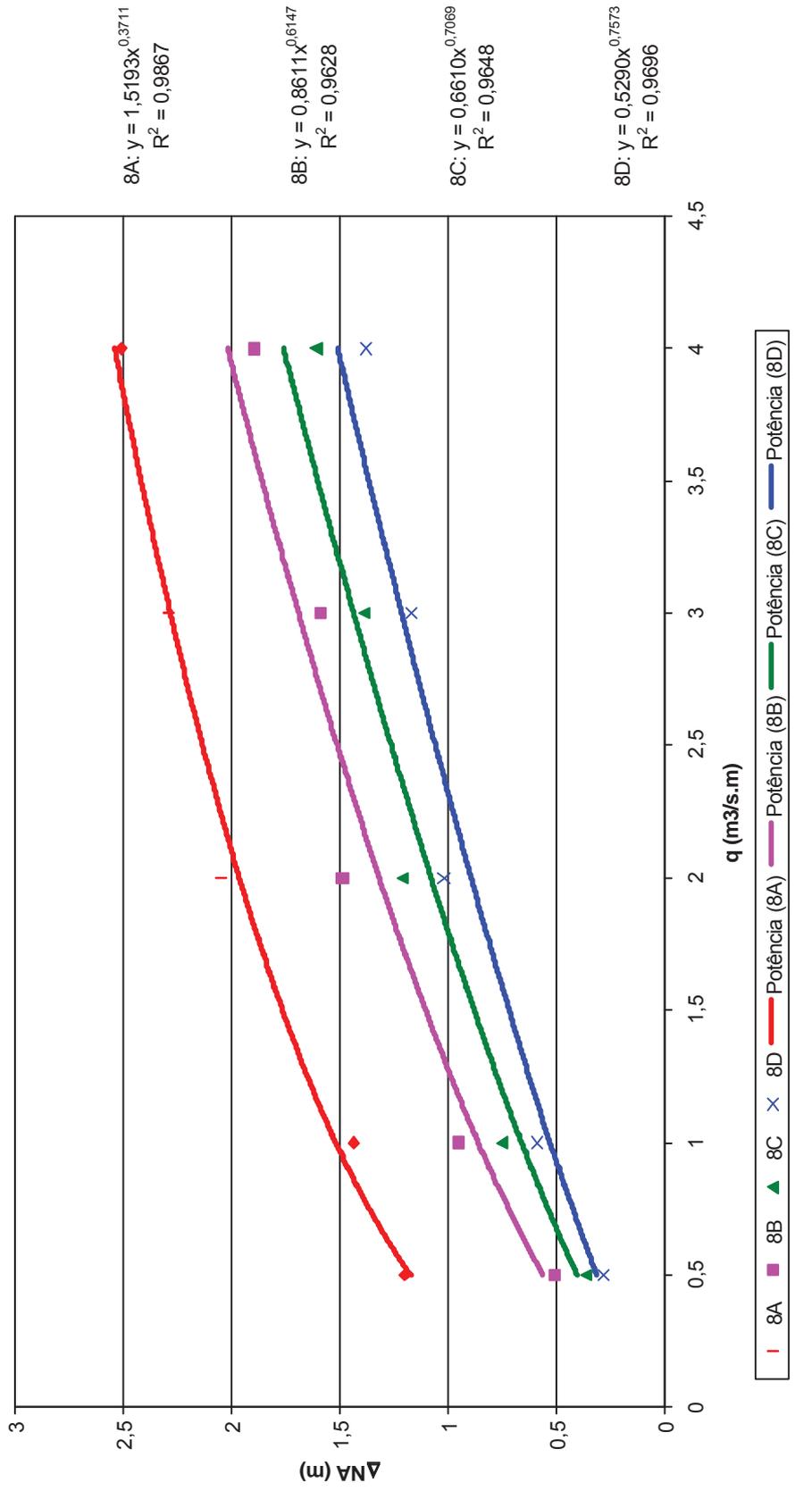
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

**q x ΔNA ( Alternativa 9 )**

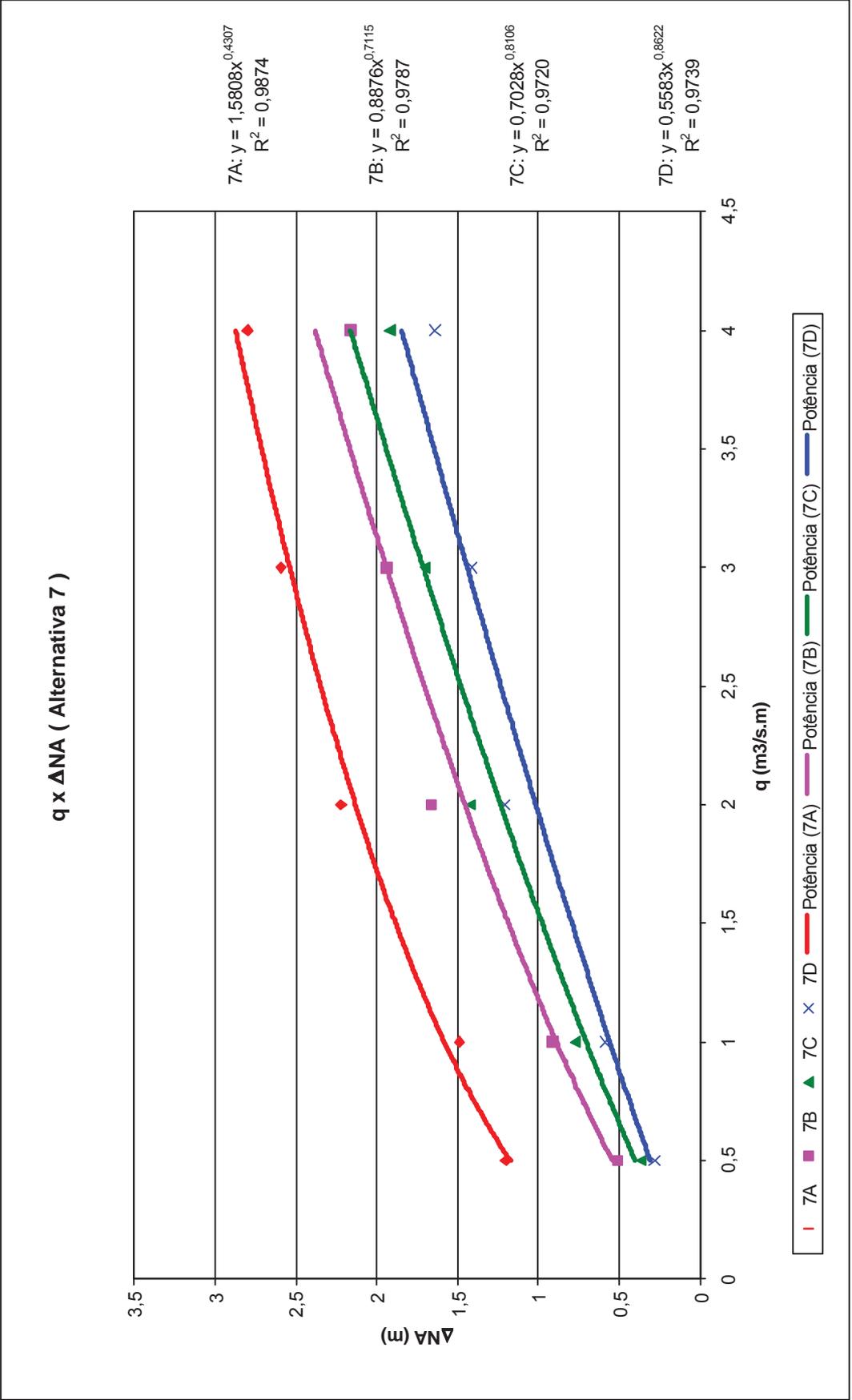


APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva -Chave de Jusante .

### q x ΔNA (Alternativa 8)

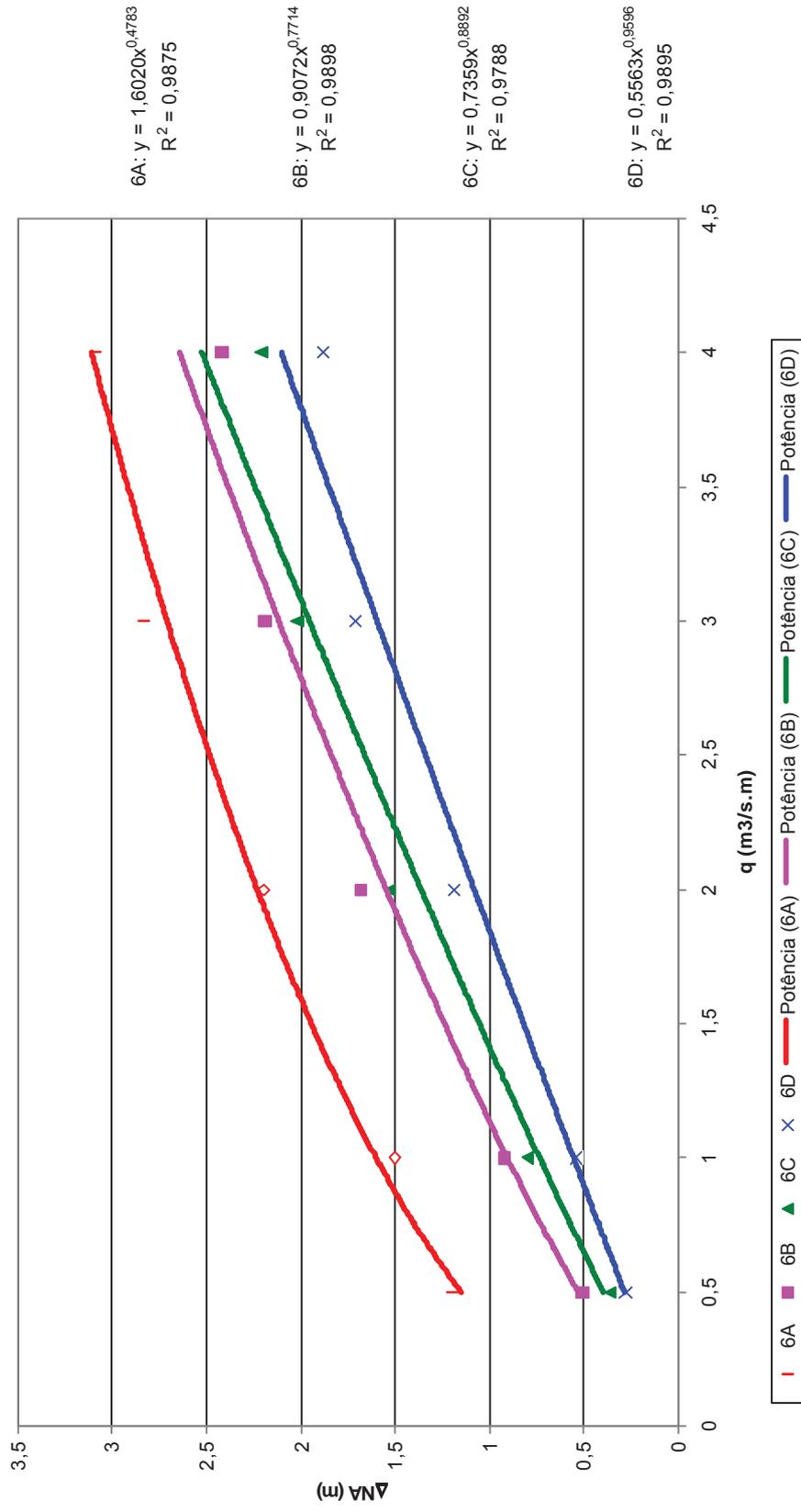


APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .



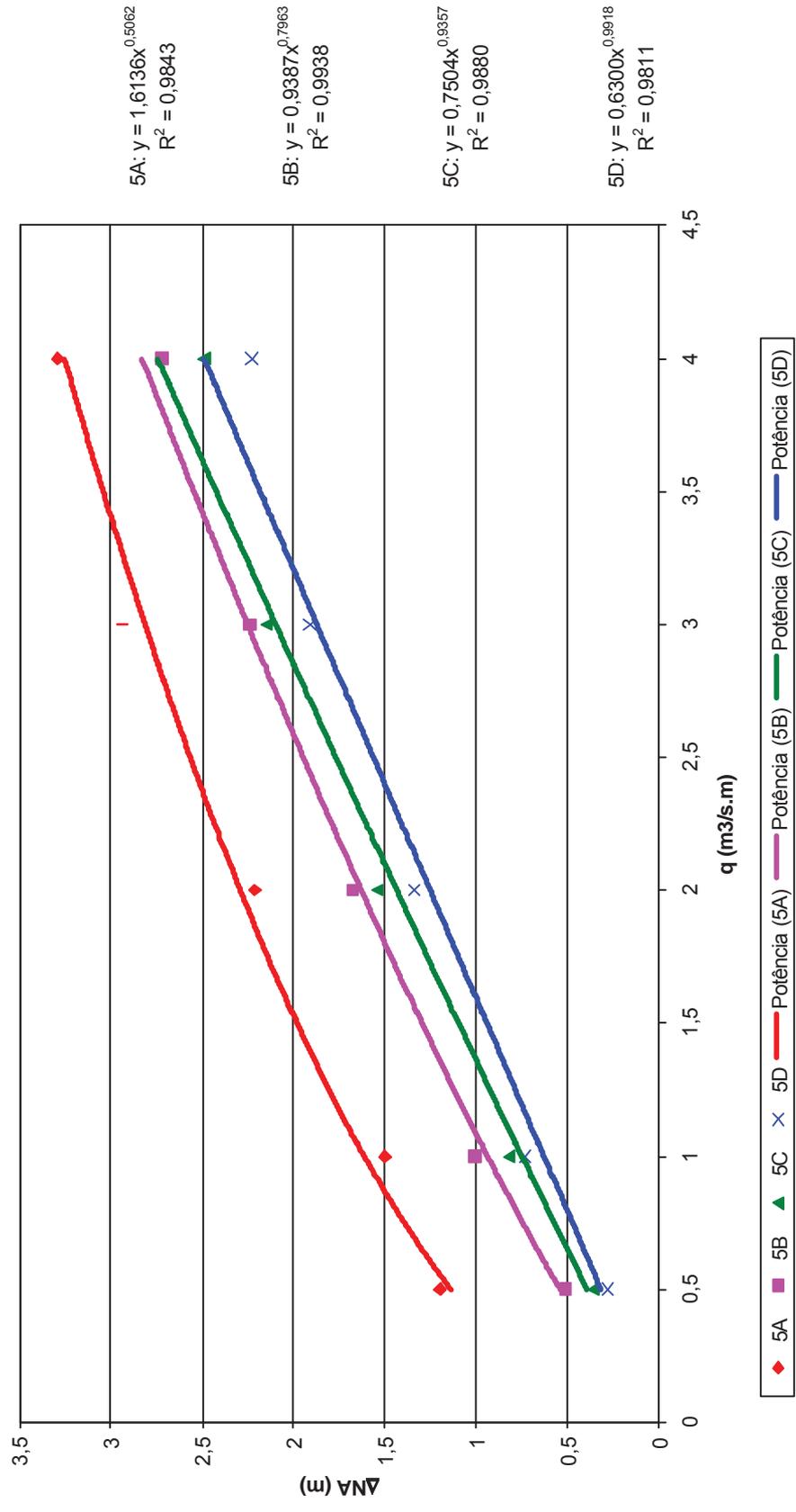
APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

### q x ΔNA (Alternativa 6)



APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

**q x ΔNA (Alternativa 5)**



APÊNDICE 5: Resultados e Discussões. 2ª Hipótese: Comparação das Grandezas Hidráulicas a partir da Variação da Curva-Chave de Jusante .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Água (ANA). (s.d.). **Conjunto Extravasor**. Fonte: Progestão: <http://progestao.ana.gov.br/portal/progestao/destaque-superior/boas-praticas/curso-de-seguranca-de-barragens-dae-1/aula-4-segur-barragem-2016-ext.pdf>

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil- Energia Hidráulica**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia\\_Hidraulica\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica(2).pdf)>. Acesso em: 03 abr. 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Capacidade de Geração do Brasil**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil>>. Acesso em: 03 abr. 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Diretrizes Para Projetos de PCH**, Capítulo 2. Pág. 2-4.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Energia Hidráulica - **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília, 2018. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap3.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf)>. Acesso em 05 dez. 2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Projeto Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica PQA. Programa de Investimentos para a Gestão Integrada e Recuperação Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. Julho de 1999.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Redes e Linhas de Distribuição**. 2010.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 672. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015672.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2019.

ALMEIDA, E de. **Investimentos no setor energético: os caminhos de uma nova dinâmica**. Disponível em: <https://infopetro.wordpress.com/2013/05/06/investimentos-no-setor-energetico-os-caminhos-de-uma-nova-dinamica/>. Acesso em: 06 fev. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7259: comportas hidráulicas terminologia. Rio de Janeiro, 2001

BASTOS, E. M. T.. Parametrização e otimização estrutural de comportas ensecadeiras utilizando APDL. 2018.

BORJA, J. G.; SILVA, L. F.; SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G. (2013). **Energia Residual a Jusante de Vertedouro Tipo Salto Esqui**. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.

BRASIL, Lei nº 6.938 de 1981. **Dispões sobre a Política Nacional do Meio Ambiente**. 1981

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Portaria nº 90, de 6 de maio de 2016.

BRASIL, Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986. **Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para avaliação de impacto ambiental**. Publicada no DOU, de 17 de fevereiro de 1986.

BRASIL, Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997. **Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental**. Publicada no DOU nº 247, de 22 de dezembro de 1997.

BRASIL. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Sistema Integrado de Informação Ambiental. Parecer único N° 0374059/2013, Minas Gerais, 2013.

CANALES, F. A.; BELUCO, A.; MENDES, C. A. B. **Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas**. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental (REGET), v. 19, p. 1230 – 1249, 2015.

CARDOSO, R. B.; ALMEIDA, R. P.; NOGUEIRA, L. A. H. **Uma avaliação do método expedito para determinação da vazão de projeto em pequenas centrais hidrelétricas**. 2011. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/publication/272814931\\_Uma\\_avaliacao\\_do\\_metodo\\_expedito\\_para\\_determinacao\\_da\\_vazao\\_de\\_projeto\\_em\\_pequenas\\_centrais\\_hidreletricas](https://www.researchgate.net/publication/272814931_Uma_avaliacao_do_metodo_expedito_para_determinacao_da_vazao_de_projeto_em_pequenas_centrais_hidreletricas)>. Acesso em: 18 nov. 2019.

Comitê Brasileiro de Barragens CBDB: **Seção esquemática da UHE Capivari/Cachoeira** 2011.

ELETROBRAS, 2000., Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. (Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas, 2007, p.131). PORTO, 2004.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2017**. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2017.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf)>. Acesso em: 03/07/2018.

FERREIRA, F. M. **Profundidade de Erosão a Jusante de Dissipador Salto de Esqui**. 2011. 61 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FERREIRA, L. M. C. ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CURVA DE LIGAÇÃO POÇO-TÚNEL EM VERTEDOR COM EMBOQUE TIPO TULIPA. Campinas, SP: [s.n.], 2007.

GOMES, J. **Campo de Pressões: Condições de Incipiência à Cavitação em Vertedouros em Degraus com Declividade 1V:0,75H**. 173 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GOMES R. O. **Estudo do impacto da incorporação de usinas hidrelétricas a fio d'água do sistema interligado nacional**. 2012. 124 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

HIDRELÉTRICA SANTO ANTÔNIO, **Tecnologia Avançada**. Disponível em: <<http://www.santoantonioenergia.com.br/tecnologia/tecnologiaavancada/>> . Acesso em: 21 de fev. 2020.

HIDROWEB – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Estações Fluviométricas, Pluviométricas, Sedimentométricas. Brasília: ANA. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acessos diversos.

ITAIPU Principais Dados Técnicos. Disponível em: <<https://www.turismoitaipu.com.br/pt/dados-tecnicos>>. Acesso em 08 abr. 2020.

ITAIPU BINACIONAL, **Energia Hidráulica**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/energia-hidraulica>>. Acesso em: 08 de mai. 2020.

LAVADO, Ana Luísa Catarré. **Os Actuais Desafios da Energia. Implementação e Utilização das Energias Renováveis**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

MATO GROSSO. Luciane Mildenerger. Secretaria de Estado de Fazenda (SEFAZ-MT). **Secretaria de Fazenda esclarece sobre preço de pauta da madeira**. 2006. Disponível em: <http://www5.sefaz.mt.gov.br/-/secretaria-de-fazenda-esclarece-sobre-preco-de-pauta-da-madeira>. Acesso em: 16 jun. 2020.

MELQUIADES, Jonathan Alves. **Estudo de caso de comissionamento: painel regulador integrado de tensão, velocidade e automação da REIVAX instalado na pequena central hidrelétrica de caboclo**. 2017. 158 f. Monografia (Especialização) - Curso de Controle e Automação, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

PINTO, N. L. S. **Hidráulica Aplicada**. Curitiba: Editora UFPR, 1987.

Plano decenal de expansão de energia 2024. Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética: MME/EPE, 2018. Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br). Acesso em: 02 mar. 2020.

PORTO, R. d. (2006). **Hidráulica Básica 4ª Edição**. São Carlos - SP: EESC USP - PROJETO REENGE.

OLIVEIRA, A. M. (2004). **Utilização de vertedores tipo labirinto em pequenos aproveitamentos hidrelétricos**. Campinas - SP.

ONCKEN, Karen Christine. **Estudos hidrológicos e dimensionamento Hidráulico do vertedor de uma Usina Hidrelétrica**. 2016. 63 f. Tese (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <http://repositorio.uniceub.br/bitstream/235/9532/1/21160020.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2019.

OTTONI, A. B.. **Estudos Em Modelo Físico Hidrodinâmico de Uma Soleira De Admitância Individual**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PALAURO, Cassius et al. **Simulação em modelo dos fluxos preferenciais atuantes sobre os contornos da fossa a jusante de vertedouro salto esqui**. 2017. Disponível em: <<http://www.eticaeventos.net.br/sngb2017/apresentacoes/sngb/t36.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SANAGIOTTO, D. G.. Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H. 2003. 137 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

Sindicato da Construção, Geração, Transmissão e Distribuição da Energia Elétrica e Gás no estado de Mato Grosso: Conheça as 10 vantagens das Usinas Hidrelétricas. Disponível em: <<http://www.sindenergia.com.br/mostra.php?noticia=5753>>. Acesso em 09 de maio de 2020.

SOUZA, Zulcy de; SANTOS, Afonso Henrique Moreira; BORTONI, Edson da Costa. **Centrais Hidrelétricas: Implantação e Comissionamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009. 520 p.

TIAGO FILHO, G. L. et al. Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos: Soluções energéticas para a Amazônia. 1. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. v. 1. 213p

TURELLA, D. S. **Critérios de dimensionamento para bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I**. 2010. 87 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

UNIONTECH (comp.). **Juntas de dilatação em reservatórios**. 2018. Disponível em: <http://www.uniontech.com.br/juntas-dilatacao-reservatorios>. Acesso em: 04 mar. 2020.