



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Criada pela Lei nº10.435, de 24 de abril de 2002

Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia

**IMPACTO DAS MEDIÇÕES DE DESCARGAS
LÍQUIDAS NOS PROJETOS DE GERAÇÃO
HIDRELÉTRICA**

LUIZ GUSTAVO FORTES WESTIN

Itajubá, Dezembro de 2021



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Criada pela Lei nº10.435, de 24 de abril de 2002

**Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia**

**IMPACTO DAS MEDIÇÕES DE DESCARGAS
LÍQUIDAS NOS PROJETOS DE GERAÇÃO
HIDRELÉTRICA**

LUIZ GUSTAVO FORTES WESTIN

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia

Orientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Itajubá, Dezembro de 2021



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Criada pela Lei nº10.435, de 24 de abril de 2002

**Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia**

**IMPACTO DAS MEDIÇÕES DE DESCARGAS
LÍQUIDAS NOS PROJETOS DE GERAÇÃO
HIDRELÉTRICA**

LUIZ GUSTAVO FORTES WESTIN

Dissertação aprovada por banca examinadora em 07 de dezembro de 2021, conferindo ao autor o título de Mestre em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni (orientador)

Prof. Dr. Leonardo de Mello Honório

Prof^a Dr^a Regina Mambeli Barros

Prof^a Dr^a Ana Paula Moni Silva

Itajubá, Dezembro de 2021

Aos Meus queridos Pais João Oscar Westin e Maria de Fátima Fortes Westin pelo amor incondicional e por não medir esforços em prover uma boa formação aos seus filhos e, à minha esposa Larissa Kozow Westin sempre incentivar a aquisição de novos conhecimentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à DEUS por sempre guiar meus passos no caminho do bem.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni, pela sua visão além do nosso tempo, competência, dedicação, paciência, amizade e confiança na realização deste trabalho e em todas as demais atividades realizadas em conjunto desde o período de graduação.

Ao Grupo Neoenergia que, em parceria com a UFJF, UNIFEI, HICON Engenharia e INESC, com grande competência e dedicação conduziu com êxito o desafio de desenvolver tecnologia de ponta aplicável ao monitoramento hidrológico, agradeço especialmente aos amigos Olívia Mercadante, Jonatas Moreira e André Marcato pelo suporte técnico constante no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colaboradores e professores da UNIFEI pelos conhecimentos transmitidos ao longo de todos estes anos de estudos, não apenas neste mestrado, mas também na graduação e especialização concluída nesta conceituada instituição de ensino.

Aos familiares, em especial, às minhas filhas Maria Luiza Kozow Westin e Isis Kozow Westin por ceder o tempo de convívio em família para o desenvolvimento acadêmico dos seus pais.

A todos os amigos e colegas que direta ou indiretamente contribuíram na elaboração deste trabalho.

"Um homem inteligente pode transformar-se num João-bobo, quando não se sabe
valer dos seus recursos naturais."

William Shakespeare

RESUMO

A forte pressão ambiental e econômica sobre projetos elétricos verificada atualmente exige que os projetos apresentem-se eficientes. Com participação majoritária na matriz elétrica brasileira, os aproveitamentos hidrelétricos se tornam essenciais no período atual e futuro de transformação energética, com relevante contribuição à segurança hídrica nacional. Visando promover maior eficiência dos projetos hidrelétricos, o presente trabalho propôs uma metodologia simplificada para avaliar o impacto das medições de descargas líquidas nos estudos hidráulicos e hidrológicos e, conseqüentemente, no projeto e controle operacional de usinas hidrelétricas. Esta metodologia permitiu verificar a contribuição do desenvolvimento de um Veículo Autônomo de Superfície (VAS) para automatizar as campanhas de medições de descargas líquidas, concebido por um projeto de P&D do grupo Neoenergia. Devido a rapidez e segurança viabilizada por esta automação, o equipamento permitirá a ampliação da amostragem de campanhas de campo que compõe a determinação de curvas-chave, inclusive em condições hidrológicas extremas. O estudo fez uso dos dados empregados no projeto da UHE Tabajara, realizando simulações com ausência destas medições fluviométricas, com limitação de amostragem. Calculou-se os desvios dos principais parâmetros hidrológicos empregados no projeto desta hidrelétrica, bem como o impacto nos estudos energéticos que remuneram o ativo, como resultado obteve-se desvios de: 24% no dimensionamento do vertedouro; 19% nas obras de desvio do rio; 8% no cálculo da vazão ecológica, 3,3% na energia firme e até, 3,5 m do dimensionamento do deck da casa de força. Constatou-se a importância da existência do VAS para aumentar a eficiência e a confiabilidade dos projetos quando da aplicação deste equipamento para a aquisição dos dados hidrológicos de base ao desenvolvimento dos estudos e projetos de hidrelétricas e demais obras hidráulicas.

Palavras-Chave: Descargas líquidas, automação, curva-chave, hidrelétricas, eficiência.

ABSTRACT

The strong environmental and economic pressure on electrical projects currently verified requires projects to be efficient. With a majority share in the Brazilian electricity grid, hydroelectric facilities are essential in the current and future period of energy transformation, with a relevant contribution to national water security. Aiming to contribute to the efficiency of hydroelectric projects, the present work proposed a simplified methodology to assess the impact of liquid discharge measurements on hydraulic and hydrological studies and, consequently, on the design development and operational control of hydroelectric plants. This methodology allowed measuring the contribution of the development of an Autonomous Surface Vehicle (VAS) to automate liquid discharge measurement campaigns, conceived by an R&D project of the Neoenergia group. Due to the speed and safety made possible by this automation, the equipment will allow the expansion of the sampling of field campaigns that make up the determination of key curves even in extreme hydrological conditions. This study made use of data used in the project of the Tabajara hydroelectric plant, performing simulations without these fluviometric measurements, with sampling limitation. Deviations from the main hydrological parameters used in the project of this hydroelectric plant were calculated, as well as the impact on the energy studies that remunerate the asset, as a result, deviations of: 24% in the dimensioning of spillway design; 19% diversion works of the river; 8% in the calculation of the ecological flow, 3.3% in the firm output and until, to 3.5 m in the dimensioning of the powerhouse deck sizing. It was noted the importance of the existence of this VAS to increase the efficiency and confiability of the projects by applying this equipment in the acquisition of the hydrological data base to the development of studies and projects of hydroelectric plants and other hydraulic works was verified.

Keywords: Liquid discharges, automation, key curve, hydropower, efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Croqui de montagem do VAS - protótipo final.....	32
Figura 2 - Equipamento desmontado e interno a caixa de transporte.....	33
Figura 3 - VAS em montagem para uso.....	33
Figura 4 - VAS montado e em operação.....	34
Figura 5 - VAS em teste em condições extremas de uso.....	34
Figura 6 - Obtenção de séries históricas de vazão afluyente.....	36
Figura 7 - Seção e curva-chave do Rio Iguaçu em União da Vitória.....	37
Figura 8 - Características dos traçados de curvas-chave.....	40
Figura 9 – Exemplo de transposição de curva-chave empregando software HEC-RAS unidirecional.....	41
Figura 10 – Curva de Descarga do Túneis de Desvio e da Ensecadeira Galgável de Montante da UHE Serra da Mesa.....	45
Figura 11 - Exemplo de diagramas indicativos para o dimensionamento de vertedouros.....	49
Figura 12 - Seção do vertedouro da UHE Baixo Iguaçu:.....	19
Figura 13: Localização da UHE Tabajara.....	21
Figura 14 - Histórico das seções transversais da estação fluviométrica Tabajara (15580000).....	22
Figura 15 - Curva-chave com seção topográfica da estação Tabajara (15580000).....	23
Figura 16 - Curva-chave da estação Tabajara (15580000) consistida.....	24
Figura 17 - Arranjo geral da UHE Tabajara. Fonte: Estudo de Viabilidade da UHE Tabajara.....	25
Figura 18 – Fluxograma de implantação da metodologia proposta.....	29
Figura 19 – Fluxograma para simulação dos cenários com amostragem reduzida...36	
Figura 20 - Curva-chave típica do posto Tabajara.....	51
Figura 21 - Curva-chave sem registros extremos – Posto Tabajara.....	52
Figura 22 - Curva-chave com amostra reduzida n=20 – Posto Tabajara.....	53
Figura 23 - Curva-chave com amostra reduzida n=15 – Posto Tabajara.....	54
Figura 24 - Curva-chave com amostra reduzida n=10 – Posto Tabajara.....	55
Figura 25 - Curva-chave com amostra reduzida n=5 – Posto Tabajara.....	55

Figura 26 .- Comparativo entre as curvas-chave calculadas e as curvas do EVTE para a estação fluviométrica de referência.....	56
Figura 27 - Comparativo gráfico entre as curvas de permanência de vazões.....	58
Figura 28 - Ajuste da distribuição de Gumbel às vazões de cheia – Série baseada na curva-chave típica.	61
Figura 29 - Ajuste da distribuição de Gumbel às vazões de cheia – Série baseada na curva-chave com ausência de eventos extremos.....	61
Figura 30 - Comparativo da altura do deck da casa de força para cada cenário.	68
Figura 31 - Evolução do armazenamento do Sistema Elétrico Interligado – SIN.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição, vantagens e desvantagens dos métodos clássicos de estimativa de fluxo.....	23
Tabela 2 - Parâmetros calculados da curva-chave típica do posto Tabajara.	50
Tabela 3 - Parâmetros calculados da Curva-chave sem registros extremos – Posto Tabajara.	52
Tabela 4 - Parâmetros calculados da Curva-chave com amostra reduzida n=20 – Posto Tabajara.	53
Tabela 5 - Parâmetros calculados da Curva-chave com amostra reduzida n=15 – Posto Tabajara.	54
Tabela 6 - Parâmetros calculados da Curva-chave com amostra reduzida n=10 – Posto Tabajara.	54
Tabela 7 - Parâmetros calculados da Curva-chave com amostra reduzida n=5 – Posto Tabajara.	55
Tabela 8 - Resumo da série de vazões traçadas com a curva-chave típica do posto Tabajara.	57
Tabela 9 - Resumo da série de vazões traçadas com a curva-chave com ausência de registros de eventos extremos no posto Tabajara.....	57
Tabela 10 - Comparativo entre as permanências de vazões.	58
Tabela 11 - Parâmetros estatísticos das séries de vazões máximas anuais da estação Tabajara.....	59
Tabela 12 - Valores de vazão instantânea máxima pelo método de Gumbel nos dois cenários de construção de curva-chave.	62
Tabela 13 - Comparativo de vazões instantâneas para TR de 50 anos.....	64
Tabela 14 - Comparativo de vazões instantâneas para TR de 50 anos.	65
Tabela 15 - Vazão mínima observada na série histórica.....	66
Tabela 16 - Vazão ecológica calculada para a UHE Tabajara	66
Tabela 17 - Resultado das simulações energéticas com alterando a série histórica de vazões.	70
Tabela 18 - Resultado das simulações energéticas alterando o polinômio de jusante.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

A	Área de drenagem
A_{UHE}	Área de drenagem da UHE adotada
A_{Posto}	Área de drenagem do posto hidrométrico de referência
A_m	Seção ou área molhada
c	Celeridade da onda cinemática ou coeficiente de descarga do vertedouro
C	Coeficiente de Chézy
D2	Determinado valor crítico
h	Cota limnimétrica ou altura d'água acima da soleira
H	Queda
I_0	Declividade da linha piezométrica
i_1, i_2, i_3	Parâmetros de valor constante
L	Largura superficial da seção
L'	Largura do vertedouro
m	Posição de um valor numa lista ordenada de forma decrescente
n	Rugosidade do canal ou número total de amostras
P	Potência Elétrica
P_m	Perímetro molhado
Q	Vazão, vazão líquida, vazão descarregada ou vazões médias diárias máximas
Q_{Posto}	Vazão calculada no posto de referência
Q_{UHE}	Vazão calculada na UHE adotada
Q_{TR}^{md}	Vazão média diária com tempo de recorrência TR
Q_0	Vazão em regime uniforme
$Q_{7,10}$	Vazão mínima de 7 dias de duração em 10 anos de recorrência
$Q_{95\%}$	Vazão calculada para um permanência de 95%
R_h	Raio hidráulico
RN	Referência de Nível
S	Desvio padrão das vazões médias diárias máximas
TR	Tempo de recorrência

U	Velocidade do fluxo
\bar{V}	Velocidade média do escoamento
y_h	Profundidade hidráulica ou profundidade média
y	Profundidade
μ	Coefficiente de rugosidade de Manning
η	Rendimento do grupo gerador
ΔH	Variação de queda líquida

Siglas

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CFD	Computacional Fluid Dynamics
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DGPS	Differential Global Positioning System
DNAEE	Departamento Nacional das Águas e Energia Elétrica
DHI	Danish Hydraulic Institute
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVTE	Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica
FADEPE	Fundação de Apoio ao desenvolvimento, ensino e Pesquisa e Extensão
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GSF	Generation Scaling Factor
HEC-RAS	Hydrological Engineering Centers River Analysis System
INESC	Instituto de Engenharia de sistemas e Computadores, Pesquisa e Desenvolvimento do Brasil
MRE	Mecanismo de Realocação de Energia
MIKE	Microcomputer-Based Modeling System
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCE	Projetos e Consultorias de Engenharia LTDA
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PDDE	Programação Dinâmica Dual Estocástica
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
PMO	Programação Mensal de Operação
PPEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PySDDP	Python Package Applied to the Planning of the Operation of EnergySystems
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
R&D	Research and Development
SDDP	Stochastic Dual Dynamic Programming
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIN	Sistema Interligado Nacional
UHE	Usina Hidrelétrica
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
USACE	United States Army Corps of Engineers
VAS	Veículo Autônomo de Superfície
WMO	World Meteorological Organization
WASP	Water Quality Analysis Simulation Program

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
kg	Quilograma
kW	quilowatt
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
m/s	Metros por segundo
m ³ /s	Metros por segundo
m/m	Metro por metro
MW	Megawatts
MWmédios	Megawatts médios

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. OBJETIVOS	20
1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.2. MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	21
1.3. HIPÓTESES	22
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2. EMBASAMENTO TEÓRICO	19
2.1. OBRIGAÇÕES DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO	19
2.2. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO EM CORPOS HÍDRICOS	21
2.3. CAMPANHAS DE ATUALIZAÇÃO DA CURVA-CHAVE	25
2.3.1. EQUIPE DE CAMPO	25
2.3.2. CONSTRUÇÃO DA CURVA-CHAVE	28
2.4. BENEFÍCIOS DO AUMENTO NO NÚMERO DE CAMPANHAS	28
2.5. GANHOS OPERACIONAIS E ENERGÉTICOS DA AFERIÇÃO DAS CURVAS-CHAVE	29
2.6. VEÍCULO AUTÔNOMO DE SUPERFÍCIE (VAS)	31
2.7. CURVAS CHAVE NO DIMENSIONAMENTO DE USINAS HIDRELÉTRICAS:	34
2.7.1. CURVA-CHAVE NOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS	38
2.7.2. CURVA-CHAVE NO EIXO DO EMPREENDIMENTO	39
2.7.3. OBRAS DE DESVIO	42
2.7.4. DIMENSIONAMENTO DAS TURBINAS	46
2.7.5. ESTRUTURAS VERTENTES	47
2.7.6. VAZÃO ECOLÓGICA	19

3. ESTUDO DE CASO.....	20
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
3.2. LOCAL DOS ESTUDOS.....	20
3.3. DADOS HIDROMÉTRICOS DE ORIGEM.....	21
3.4. CARACTERÍSTICAS DA UHE TABAJARA.....	24
4. METODOLOGIA	27
4.1. FLUXOGRAMA DO ESTUDO:.....	28
4.2. CURVA-CHAVE TÍPICA.....	30
4.3. SIMULAÇÃO DAS CURVAS-CHAVE COM REDUÇÃO DE AMOSTRAGEM.....	32
4.3.1. CURVAS-CHAVE SEM REGISTROS EXTREMOS.....	32
4.3.2. CURVAS-CHAVE COM AMOSTRAGEM REDUZIDA – POLINÔMIOS DE JUSANTE.....	34
4.4. ANÁLISE DAS CURVAS-CHAVE OBTIDAS.....	36
4.5. ANÁLISE DE IMPACTOS EM PROJETOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS	37
4.5.1. IMPACTOS NOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS....	37
4.5.2. ESTUDOS ENERGÉTICOS.....	41
4.5.3. DIMENSIONAMENTO DE OBRAS CIVIS E HIDROMECÂNICOS	46
4.5.3.1. Obras de Desvio	46
4.5.3.2. Dimensionamento do Vertedouro	47
4.5.3.3. Dimensionamento da vazão mínima do aproveitamento	47
4.5.3.4. Dimensionamento da Vazão Ecológica.....	47
4.5.3.5. Dimensionamento das Unidades Geradoras	48
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50

5.1. SIMULAÇÕES NAS CURVAS-CHAVE	50
5.1.1. CURVA-CHAVE TÍPICA	50
5.1.2. CURVA-CHAVE COM AUSÊNCIA DE REGISTROS DE EVENTOS EXTREMOS	51
5.1.3. BAIXA AMOSTRAGEM DE MEDIÇÕES	52
5.1.4. COMPARATIVO ENTRE AS CURVAS-CHAVE DISPONÍVEIS	56
5.2. REVISÃO DO DIMENSIONAMENTO HIDROLÓGICO	56
5.2.1. NOVAS SÉRIES DE VAZÕES	56
5.2.2. CURVA DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES	57
5.2.3. ATUALIZAÇÃO DAS VAZÕES MÁXIMAS	59
5.2.4. ATUALIZAÇÃO DAS VAZÕES MÍNIMAS	62
5.3. REVISÃO DO DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO	63
5.3.1. ESTRUTURA DE DESVIO DO RIO	63
5.3.2. VERTEDOURO	64
5.3.3. VAZÃO MÍNIMA DO APROVEITAMENTO	65
5.3.4. VAZÃO ECOLÓGICA	66
5.3.5. DIMENSIONAMENTO DAS UNIDADES GERADORAS	67
5.4. REVISÃO DOS ESTUDOS ENERGÉTICOS	69
5.4.1. PERÍODO CRÍTICO DO SISTEMA	69
5.4.2. SIMULAÇÕES ALTERANDO AS SÉRIES HISTÓRICA DE VAZÕES	70
5.4.3. SIMULAÇÕES ALTERANDO OS POLINÔMIOS DE JUSANTE	71
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
6.1. SUGESTÕES E ESTUDOS FUTUROS	75
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

APÊNDICE I.....	83
1. SEÇÃO TRANSVERSAL - PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES.....	84
2. CARACTERÍSTICAS DO LEITO.....	86
2.1. NATUREZA DO LEITO	86
2.2. MOBILIDADE DO LEITO.....	87
3. RELAÇÃO COTA-VAZÃO.....	88
3.1. CALIBRAGEM.....	88
3.2. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA.....	89
3.3. FÓRMULA MATEMÁTICA	90
3.4. EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA-CHAVE	91
3.5. MÉTODOS PARA EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA-CHAVE	93
3.5.1. Curva-chave de estações não-unívocas	99
3.5.2. Estações Instáveis	101
3.5.3. Escolha do período de velocidade de cada curva.....	101
3.5.4. Localização do evento responsável pela descalibração da curva....	102
APÊNDICE II.....	103
APÊNDICE III.....	110
APÊNDICE IV.....	113
APÊNDICE V.....	115

1. INTRODUÇÃO

Para o atendimento às demandas da resolução conjunta nº 03/2010 (ANA-ANEEL) é necessário desenvolver atividades complexas, para a aquisição dos parâmetros hidrométricos nos pontos determinados ao monitoramento do curso d'água. Como estas atividades são realizadas no leito dos rios, apresentam algumas características como, por exemplo: exposição aos riscos de segurança da equipe; muitos procedimentos para execução das tarefas; a dificuldade estabelecida para a fiscalização dos serviços, dentre outras.

Estes fatos geram uma excessiva dependência de fatores ambientais e humanos para a garantia da qualidade dos dados hidrométricos para elaboração ou atualização das curvas-chaves que, por consequência, impactam diretamente nos dados hidrológicos e hidráulicos obtidos com base nestas informações.

Para contribuir à minimização de tais problemas, o Grupo Neoenergia sugeriu o desenvolvimento de uma solução tecnológica capaz de automatizar o processo de campanhas de medição de vazão de campo de forma a se obter mais exatidão, segurança e baixos custos na coleta destes dados, não apenas para cumprimento da referida resolução conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010, mas também para a obtenção de informações hidrológicas mais próximas à realidade, melhorando as análises de engenharia que dependam dos dados gerados por tais estações hidrométricas e telemétricas.

Desse modo, por meio do programa de P&D da ANEEL, as usinas hidrelétricas do grupo Neoenergia contrataram um projeto P&D junto a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) para o desenvolvimento de um Veículo Autônomo de Superfície (VAS) capaz de automatizar as campanhas de descargas líquidas previstas nas obrigações da resolução conjunta ANA/ANEEL nº 3/2010. Esse equipamento permitirá o aumento da amostragem das medições de descargas líquidas, medidas em campo, que estarão disponíveis à construção de curvas-chave nas estações hidrológicas em que for empregada esta tecnologia.

Para simular os benefícios do VAS, o presente estudo identificou uma estação fluviométrica com ampla disponibilidade de medições de vazão em campo e excluiu do histórico existente os dados de campo adquiridos durante eventos hidrológicos extremos. Então, construiu uma nova curva-chave e realizou estudos hidrológicos com

e sem estes dados para se comparar os respectivos resultados.

Considerando que as obras hídricas utilizam não apenas a série histórica de vazões para o desenvolvimento do seus projetos, mas também o conhecimento do comportamento hidráulico do rio, no ponto em que será alocada esta obra. O presente estudo se propõe a simular, adicionalmente, o impacto nos projetos das obras hidráulicas, quando da existência de curvas-chave de jusante com maiores amostragens.

Como resultado, foi possível mensurar alguns dos impactos ao dimensionamento das obras e equipamentos de usinas hidrelétricas promovidos pelas medições adicionais, durante os períodos hidrológicos extremos e pelo aumento das campanhas de campo viabilizadas pelo VAS. Estas informações também foram empregadas na determinação do potencial de geração hidrelétrica, e no controle da operação ao longo de vida útil dos aproveitamentos. Estas informações evidenciam a importância dos investimentos em tecnologia nas campanhas de medição de vazões em rios para aumento na confiabilidade destas informações justificando, assim, o VAS desenvolvido pelo projeto de P&D e a motivação de estudos futuros, também dedicados a aquisição de informações hidrométricas em campo.

1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho se propõe a avaliar os potenciais impactos da ampliação de amostragem e melhoria da confiabilidade dos procedimentos empregados na aquisição de medições de descarga líquida medidas em campo, na maior qualidade das curvas-chaves obtidas e, conseqüentemente, nos estudos hidráulicos e hidrológicos empregados no dimensionamento de centrais hidrelétricas.

1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos do presente estudo:

- Apresentar os procedimentos empregados para construção e atualização de curvas-chave para descargas líquidas;
- Avaliar os potenciais impactos nas séries históricas de vazão a partir do uso de

curvas-chave com dados mais exatos e maior amostragem, em especial, com o complemento de eventos hidrológicos extremos;

- Avaliar os impactos do desenvolvimento de estudos hidráulicos, hidrológicos e energéticos com base em curvas-chave sem eventos hidrológicos extremos e com amostragem reduzida;
- Avaliar alguns dos potenciais impactos de tais curvas-chave no dimensionamento das obras e equipamentos de usinas hidrelétricas;
- Com base nos resultados, justificar o desenvolvimento de novas tecnologias na área de hidrometria.

1.2. MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação de mestrado foi inspirada no trabalho de pesquisa e desenvolvimento (P&D) intitulado “Levantamento Automatizado e Análise de Dados Inteligentes para Medição de Descargas Líquidas e Sólidas” projeto nº PD-0059-0017-2017, desenvolvido para o Grupo Neoenergia com financiamento das empresas Itapebi Geração de Energia S/A, Geração CIII S/A. e Companhia Hidrelétrica Teles Pires S/A.

O projeto de P&D foi desenvolvido pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), sob a interveniência da Fundação de Apoio ao desenvolvimento, ensino e Pesquisa e Extensão (FADEPE) e em Parceria com o Instituto de Engenharia de sistemas e Computadores, Pesquisa e Desenvolvimento do Brasil (INESC), a Hicon Engenharia e a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), no período de Setembro de 2017 a Março de 2021.

O referido projeto originou-se da necessidade do grupo Neoenergia de melhorar o atendimento à resolução conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010 (ANA/ANEEL,2010), otimizando os processos empregados nas campanhas de campo das medições de descargas líquidas.

Com base nestes dados, o presente trabalho de pesquisa buscou identificar e quantificar (cap. 5) alguns dos benefícios da obtenção de medições de descargas

líquidas, com maior exatidão dos estudos, projetos de engenharia e operação de hidrelétricas.

1.3. HIPÓTESES

O desenvolvimento da tecnologia de medição de vazões de forma autônoma proporciona:

- dados mais precisos e menos dependentes da ação humana;
- mais medições de vazão em curto espaço de tempo;
- condições seguras de realizar medições de vazão durante a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, tanto de cheia quanto de seca;
- construção das curvas-chave melhor ajustadas;
- estudos hidráulicos e hidrológicos mais exatos, melhorando a qualidade dos projetos de obras hidráulicas.

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para o desenvolvimento do presente estudo dividiu-se o mesmo em seis capítulos que buscam, individualmente, a consecução dos objetivos específicos, mas que, no conjunto, permitem que se atinja o objetivo apresentado anteriormente.

O segundo capítulo traz uma revisão bibliográfica acerca dos métodos de medição de descargas líquidas comumente empregados, apresentando os critérios técnicos adotados para elaboração e atualização de uma curva-chave bem como as técnicas empregadas para extrapolação das mesmas para os eventos extremos. Por fim, este capítulo apresenta o VAS desenvolvido pelo projeto de P&D e os conceitos empregados no seu desenvolvimento baseados nas informações técnicas necessárias para o monitoramento hidrológico.

O terceiro capítulo apresenta o estudo de caso adotado para realizar as simulações nas curvas-chave e avaliar o impacto de uma curva-chave mais bem

calibrada em um empreendimento que está previsto para ser licitado no Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (MME/EPE, 2021).

A metodologia desenvolvida e aplicada no presente trabalho encontra-se descrita no quarto capítulo, em que são listadas as fontes de informações acerca das simulações empregadas. São apresentadas em detalhes as técnicas empregadas no estudo e como se pretende atingir os objetivos pretendidos.

No quinto capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas tanto nas curvas-chave, quanto em todos os demais estudos que derivam desta informação para o correto dimensionamento de uma usina hidrelétrica. Neste capítulo também são apresentados os resultados de alguns dos impactos promovidos ao projeto.

O sexto capítulo apresenta as conclusões do estudo e recomendações para estudos futuros.

Posteriormente são apresentadas as referências bibliográficas adotadas nesta dissertação e apresentados os anexos contendo informações relevantes tratadas ao longo deste trabalho, bem como, os anexos do trabalho detalhando algumas informações relevantes e empregadas nos cálculos apresentados.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Apresenta-se, neste capítulo, uma visão geral, com base na opinião de estudos especializados disponíveis na literatura, sobre as formas de se obter dados hidrométricos, calibrar e empregar as curvas-chave no desenvolvimento de projetos de hidrelétricas, bem como, os principais fatores que podem impactar na qualidade destas informações. Também será apresentado o VAS desenvolvido pelo projeto de P&D, equipamento ao qual pretende-se avaliar a sua contribuição ao monitoramento hidrológico e estudos correlatos.

2.1. OBRIGAÇÕES DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Em conformidade com a Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei 9433/1997, os recursos hídricos estão sendo, cada vez mais, considerados fontes de valor econômico essencial para a sobrevivência e desenvolvimento dos seres vivos. Conseqüentemente, a preocupação com a preservação do ambiente hídrico, nas diversas atividades exercidas pelos seres humanos, está evoluindo progressivamente. Assim, é essencial o gerenciamento adequado dos potenciais hídricos disponíveis no mundo e, para isso, o conhecimento do regime fluvial é fundamental (AMORIM et al, 2011).

A informação de vazão fluvial é essencial para muitos usos importantes, em uma ampla variedade de escalas, incluindo os balanços hídricos globais, projetos de engenharia, previsão de cheias, operação de reservatórios, navegação, abastecimento de água, recreação, e gestão ambiental. A população crescente e as conflitantes prioridades de água, incluindo a preservação e restauração de ambiente aquático, estão estimulando a demanda por dados mais precisos acerca da água, oportunos e acessíveis. Para ser mais útil, a informação vazão deve ser obtida de forma padronizada, com uma precisão conhecida, e por um longo e contínuo período de tempo (HIRSCH e COSTA, 2004).

Os fatos supracitados motivaram a regulamentação da resolução normativa ANEEL n° 396/1998 (ANEEL, 1998), posteriormente transformada em resolução conjunta ANA/ANEEL n° 03/2010 (ANA-ANEEL, 2010) que obriga a todos os agentes detentores de concessão de geração de energia hidrelétricas a instalar e operar, nos

locais de interesse de uma determinada bacia hidrográfica, estações fluviométricas, pluviométricas, telemétricas e automatizadas, com transmissão de dados hidrológicos em tempo real ao banco de dados HIDROWEB/ANA.

Esta norma (ANA-ANEEL, 2010) visa a balizar as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos.

Tais atividades são de extrema importância para o levantamento de dados e o conhecimento dos regimes hidrológicos da bacia onde está inserido o empreendimento e, assim, definir as regras de operação visando ao aproveitamento ótimo do potencial hidráulico dos reservatórios de hidrelétricas.

A resolução supracitada também estabeleceu que os monitoramentos fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água devem ser realizados, no mínimo, quatro medições no decorrer do ano, para fins de definição e atualização das curvas de descarga líquida (curvas-chave) e sólida e acompanhamento das condições de qualidade da água, respectivamente. Essas medições: fluviométrica, sedimentométrica e de qualidade da água, devem ocorrer simultaneamente.

Todas as estações hidrométricas com monitoramento pluviométrico, limnimétrico e fluviométrico devem ser automatizadas e telemetrizadas, devendo as informações coletadas serem registradas em intervalo horário, ou menor, com disponibilização horária à ANA.

As medições precisas de descargas líquidas e sólidas constituem fonte fundamental de dados, para validar teorias ou modelos na elaboração de estudos e projetos, que são voltados ao aproveitamento dos recursos hídricos. Assim, a sua estimativa exata é um requisito essencial para garantir a qualidade e objetividade para as análises hidrológicas. No entanto, esta exatidão só é obtida por meio do monitoramento sistemático. Neste, a qualidade e confiabilidade são fundamentais para proporcionar escolhas acertadas e o melhor aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis.

Por este motivo, a referida resolução normativa¹ teve o objetivo de consolidar e ampliar a base de informações hidrológicas das bacias hidrográficas que abrigam aproveitamentos hidrelétricos. Estas informações trazem um benefício inequívoco: à melhoria dos projetos de hidrelétricas; à operação destes empreendimentos; e à gestão dos recursos hídricos em geral.

O completo atendimento à essa resolução conjunta gera demandas de campanhas de campo, necessárias à aquisição de parâmetros hidrológicos suficientes para construir e calibrar curvas-chave. A partir desta informação, a estação telemétrica passa a coletar, em tempo real, apenas os dados de nível d'água do rio. Com base na curva-chave construída, pode-se calcular a vazão equivalente no ponto de controle caracterizado pela estação hidrométrica.

A caracterização destes parâmetros depende de diversos procedimentos complexos, trabalhosos e com relevantes custos de execução. Para se realizar medições de descargas líquidas e sólidas em campo, é necessário dispor de uma equipe de hidrólogos experientes. Portanto, diversos equipamentos empregados dos processos de hidrometria, tais como: barcos, molinetes ou *Acoustic Doppler Current Profilers* (ADCPs), amostradores de sedimento em suspensão e de fundo, cordas, materiais de escritório para lançar as leituras coletadas, equipamentos de segurança para realização da atividade, veículos de porte para transportar todos estes equipamentos, dentre outros.

Na sequência serão detalhados os métodos e procedimentos empregados para atendimento à resolução conjunta ANA-ANEEL nº 03/2010.

2.2. MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO EM CORPOS HÍDRICOS

A vazão geralmente é influenciada pelo clima, aumentando durante os períodos de precipitação e diminuindo nos períodos de estiagem. Segundo Tucci (1997), o volume de água por segundo que atinge um determinado curso d'água depende das características físicas da bacia hidrográfica em estudo: área, forma, sistema de

¹ Resolução conjunta ANA-ANEEL nº03/2010.

drenagem, relevo, além da precipitação total e seu regime de perdas por evaporação, transpiração e infiltração.

A vazão não pode ser medida diretamente, mas pode ser calculada a partir de variáveis possíveis de serem tomadas, como largura, profundidade e velocidade do canal (WMO, 2010).

Para isso, diversos métodos são empregados de forma indireta, a partir da medição de velocidade ou de nível. Os instrumentos mais comuns para medição de velocidade de água em rios são os molinetes hidrométricos, que são pequenos hélices que giram impulsionados pela passagem da água; o método acústico; ou estruturas hidráulicas, como calhas e vertedores. Em situações de medições expeditas, ou de grande carência de recursos, as medições de velocidade podem ser feitas utilizando flutuadores, com resultados muito menos precisos. Cada uma destas diversas metodologias apresentam suas vantagens, erros e limitações na medição de dados fluviométricos. A indicação para a utilização de cada método varia de acordo com as características dos cursos d'água – de pequeno, médio ou grande porte. Cabe ao gestor técnico a sensibilidade de escolher o melhor método de acordo com suas necessidades e limitações.

Neste sentido são apresentadas algumas das técnicas mais utilizadas para a realização de campanhas de campo para medição desses parâmetros hidrométricos.

Medição de descarga líquida em hidrometria é todo processo empírico utilizado para determinar a vazão de um curso d'água. A vazão ou descarga líquida de um rio é o volume de água que passa através de uma seção transversal na unidade de tempo (em geral um segundo). Em hidrometria, essa vazão é associada a uma cota limnimétrica “h” (cota da superfície livre em relação a um plano de referência arbitrário). Os principais métodos de medição de vazão em cursos d'água são:

- Medição com flutuadores;
- Método químico ou diluição de sais;
- Uso de dispositivos de geometria regular (vertedores e calhas Parshal) ou trajetória;
- Medição e integração da distribuição de velocidade ou medição de corrente (método convencional) e;

- Método acústico.

Segundo Samboko (2020), para determinar a vazão durante os levantamentos, é importante registrar a velocidade da água em uma seção transversal da superfície. Existem vários métodos que podem ser usados para fazer isso.

A Tabela 1 - Descrição, vantagens e desvantagens dos métodos clássicos de estimativa de fluxo. Adaptado de Samboko (2020) a seguir resume alguns destes métodos empregados para aquisição do perfil de velocidade da seção e determinação da vazão em rios com uma breve descrição de cada método, as suas vantagens e desvantagens:

Tabela 1 - Descrição, vantagens e desvantagens dos métodos clássicos de estimativa de fluxo. Adaptado de Samboko (2020)

Método	Breve Descrição	Vantagens	Desvantagens
Flutuador	Deposição de objetos na superfície de um corpo de água por uma distância predeterminada e, conseqüentemente, o cálculo da velocidade da superfície	Normalmente fácil e rápido de conduzir.	Adequado apenas para pequenos fluxos retos. Pode ser afetado por condições climáticas como o vento. Requer contato com água. Grande grau de incerteza.
Método químico ou Diluição de sal	Utiliza a taxa de difusão de um traçador particular para determinar o fluxo.	Capaz de determinar não apenas a velocidade, mas a descarga total.	Pode ser afetado pela falta de mistura suficiente. Aplicável apenas em pequenos rios.
Uso de dispositivos de geometria regular ou Trajetória	Envolve o desvio da vazão para uma tubulação ou outra seção de controle de modo a estimar a vazão.	Muito e preciso, pois coleta o volume total	Normalmente mais difícil de conduzir devido ao custo do experimento. É necessária permissão ambiental para desviar a água. Requer contato com água.
Medição e integração da distribuição de velocidade ou Medidor de corrente	A velocidade é determinada assumindo-a como equação de correlação à taxa de rotação de um rotor em um determinado período de tempo.	Fácil de usar. Relativamente preciso. Método tradicionalmente empregado.	Afetado pela localização da medição na seção transversal do rio. Requer contato com a água com uma pessoa na água ou uma construção.
Perfilador de Corrente Acústica Doppler (ADCP)	Determina a velocidade das partículas da água calculando as diferenças na frequência do som e dos ecos transmitidos.	Relativamente preciso. Aplicação rápida. Aplicável em grandes fluxos.	Equipamento relativamente caro. Não pode ser usado para canais de rio rasos (menos de 1 m de profundidade).

Mais recentemente estão em desenvolvimento métodos de estimativa de vazão

por sensoriamento remoto, porém o método ainda não apresenta exatidão suficiente quando comparados aos métodos descritos na tabela 1.

A escolha do tipo de método a ser utilizado em cada situação depende das condições locais, da precisão requerida e dos recursos disponíveis. Diante das dificuldades encontradas em campo e do nível de precisão desejado, na grande maioria das vezes, opta-se pelo método do molinete, considerado o método mais convencional, por sua melhor adequação em relação a outros métodos.

Porém, mais recentemente, tem se popularizado o método acústico de medição de vazão em cursos d'água, pois apresenta diversas vantagens devido ao grau de automatismo embarcado neste método.

De acordo com Tucci (2001), alguns procedimentos de aquisição de dados fluviométricos dependem de campanhas de campo, em geral custosas, cujos resultados não apresentam a precisão adequada.

Visando a redução de tais imprecisões, o método do molinete pode ser otimizado baseado em cálculos numéricos. Por meio da utilização de técnicas de interpolação das medições hidrométricas com vistas a um melhor ajuste do perfil hidrodinâmico e na utilização de softwares apropriados para integração numérica, obtém-se um cálculo de vazão mais preciso.

O método acústico também embarca tecnologias similares, apresentando funções para a minimização de erros das leituras hidrométricas, inclusive os erros humanos, bastantes presentes no método convencional.

De acordo com (ANA, 2009) os métodos mais utilizados para medição de vazão em grandes rios são:

- Medição e integração da distribuição de velocidade ou medição de corrente (método convencional);
- Método acústico.

O método acústico tem sido empregado, nos últimos anos, com frequência por entidades operadoras de redes de monitoramento hidrológico, universidades, centros de pesquisa, empresas privadas, e estão sendo alcançados bons resultados. Entretanto, o método convencional ainda é o mais utilizado nas medições de descarga líquida em grandes rios.

Por este motivo, são detalhados a seguir apenas estes dois métodos mais usuais de aquisição de dados fluviométricos em rios naturais, portanto, mais empregados nas campanhas de campo previstas na resolução conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010, (ANA-ANEEL,2010) também nos institutos responsáveis pela operação e manutenção das demais estações que compõe a rede hidrológica brasileira.

Assim, na maioria dos rios brasileiros, estes dois métodos são os mais aplicáveis, porém, nas técnicas atualmente empregadas, ambos os métodos demandam presença de hidrometristas especializados em campo para a realização das campanhas de medição, dificultando a mobilização de equipes durante eventos hidrológicos extremos.

O Desenvolvimento do VAS, um protótipo empregado na medição de descarga líquida em rios de forma automatizada, realizado pelo projeto de P&D ANEEL apresentado posteriormente adotou o uso do ADCP em seu método de aquisição de dados. Desta forma, apresenta-se como uma solução tecnológica para minimizar tal dependência de hidrometristas especializados em campo, fazendo com que possam ser monitorados os eventos hidrológicos extremos, condição básica e bastante explorada no presente estudo.

2.3. CAMPANHAS DE ATUALIZAÇÃO DA CURVA-CHAVE

Para o integral atendimento à resolução conjunta nº 03/2010 (ANA/ANEEL,2010), tornam-se necessárias a realização das medições de descarga líquida, descarga sólida, de determinação de parâmetros de qualidade da água e levantamentos de perfil transversal topobatimétricos, nos locais adequados para a instalação de uma estação de monitoramento fluviométrico e com a periodicidade estabelecida pela resolução de uma leitura a cada 3 meses, buscando o registro confiável e seguro dos dados levantados por meio do preenchimento das respectivas fichas de campo e cópias dos arquivos de medição (medidores acústicos, ecobatímetros, dentre outros equipamentos).

2.3.1. EQUIPE DE CAMPO

Para uma adequada execução dos trabalhos de campo realizados com o

emprego das tecnologias disponíveis no mercado, recomenda-se a formação de uma ou mais equipes de campo, em quantidade suficiente para a realização das atividades de operação dos pontos de monitoramento a cargo do concessionário ou autorizado.

Recomenda-se que seus integrantes tenham concluído, pelo menos, o ensino fundamental, além das seguintes qualificações:

- Um hidrometrista, com pleno conhecimento sobre instalações e manutenções de estações hidrométricas, medições de descargas líquida e sólida, determinação in situ de parâmetros de qualidade de água, coleta e acondicionamento adequado de amostras de água para análises em laboratório e levantamento de perfil transversal;
- Um técnico, com conhecimentos de eletrônica e de informática para operação e manutenção das estações telemétricas, bem como operar aparelhos para testes dos componentes eletrônicos dos equipamentos.

Devido a esta estrutura necessária para realizar as medições de campo, torna-se praticamente impossível realizar medições de vazão coincidentes com os períodos de extrema cheia ou extrema seca, pontos significativos para compor uma boa curva-chave.

Fato corroborado por Barros et al, que mesmo estações antigas podem apresentar número de medições de descargas líquidas insuficientes, tornando impossível o traçado confiável de uma curva-chave. Rios podem apresentar respostas rápidas, impossibilitando que equipes de hidrometrista cheguem ao rio a tempo de executar medições de vazões durante eventos hidrológicos extremos.

Acima de qualquer coisa, a segurança dos hidrometristas deve ser sempre levada em consideração. Durante as cheias de alguns rios a velocidade do fluxo é excessiva e pode trazer perigos à execução desta atividade. Mesmo que o rio apresente níveis de vazão ainda não medidos e essenciais para uma boa extrapolação da curva de descarga, caso a medição ponha em risco os operadores da rede, a mesma não deve ser executada. Além das dificuldades naturais, há fatores alheios tais como: tempo de mobilização, disponibilidade dos profissionais, condições de acesso, dentre outras, que também dificultam as medições nos períodos ideais.

2.3.2. CONSTRUÇÃO DA CURVA-CHAVE

Em Hidrologia é necessário se ter um controle temporal da vazão líquida que escoar em determinado trecho de um curso d'água, para diversas finalidades, tais como: estudos ambientais, estudos de disponibilidade hídrica para os seus diversos fins, calibração de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, dentre outros.

Dessa forma, procura-se determinar uma relação gráfica que forneça para diferentes condições de escoamento, a vazão que passa em uma seção do curso d'água. Esta tarefa é realizada com a determinação de uma curva-chave, que relaciona para uma seção transversal de um curso d'água a cota do nível d'água com a vazão nesta seção.

Entretanto, traçar uma curva-chave não é quase sempre uma tarefa fácil e se necessita ter um bom conhecimento do terreno e uma compreensão do funcionamento hidráulico do canal onde se situa a régua, para permitir uma interpretação correta das medições das vazões.

As principais propriedades necessárias à construção da curva-chave devem atender a conceitos técnicos precisos (apêndice I) para auxiliar os trabalhos de instalação e operação adequados de uma estação hidrométrica de um curso d'água.

2.4. BENEFÍCIOS DO AUMENTO NO NÚMERO DE CAMPANHAS

A metodologia de medição de vazões empregada na maioria dos rios brasileiros demandam a mobilização equipe qualificada, diversos equipamentos e a adução de muitos procedimentos de campo para obter todas as informações necessárias à construção de uma boa curva chave.

Conforme apresentado anteriormente, a existência de campanhas de medição de vazão durante eventos hidrológicos extremos (seca e cheias) tornará a curva-chave desta estação mais confiável, por consequência haverá mais confiabilidade também nos dados desta estação, reduzindo riscos operacionais ao empreendedor do aproveitamento hidrológico.

Este fato ficou evidente no estudo de Oliveira et al (1998) quando informa que durante operações em cheias, as curvas-chave puderam chegar com medições a 80%

do nível máximo observado quando FURNAS começou a operar estes postos, só haviam medições de, até 30% destes níveis máximos observados, assim, a parte alta da curva não precisou ser extrapolada.

Em um ambiente competitivo, como se tornou o mercado de geração hidrelétrica a partir na concorrência de leilões por menor preço da energia, e considerando que as usinas hidrelétricas estão sendo desenvolvidas cada vez mais distantes de centros urbanos, torna-se inviável a realização de campanhas hidrológicas nas ocasiões de eventos hidrológicos extremos e, no caso de rios com leito móvel, na frequência suficiente para obter a construção de várias curvas-chave.

Segundo BARROS et al, (2014), a prática de frequência das leituras de medição de vazão até o final da década de 80 era realizar várias medições de vazão ao longo de um único mês, durante eventos extremos, as equipes ficavam de plantão para caracterizar as cheias. Com o passar do tempo, esta prática não mais foi realizada, o que passou a desfavorecer a aquisição de pontos de vazão em cotas ainda não medidas.

O avanço tecnológico atual permite desenvolver soluções que minimizem a referida mobilização de equipamentos e mão de obra qualificada, reduzindo o custo de campanhas hidrométricas viabilizando o maior número de amostragem e permitindo tratamentos estatísticos mais precisos e, por consequência dados hidrológicos mais confiáveis.

Esta aparenta ser a solução para imputar maior confiabilidade no monitoramento hidrológico, obter maior precisão nas estimativas de cheia e secas e, os consequentes, ganhos operacionais às usinas hidrelétricas.

2.5. GANHOS OPERACIONAIS E ENERGÉTICOS DA AFERIÇÃO DAS CURVAS-CHAVE

Do ponto de vista físico, a geração de energia hidrelétrica depende de duas variáveis: Queda e Vazão. Neste sentido, o monitoramento hidrológico proposto pela resolução conjunta nº 03/2010 (ANA/ANEEL,2010) obriga os empreendedores a monitorar estes dois parâmetros, uma vez que o empreendedor precisa manter uma estação limnimétrica no reservatório e também precisa manter uma rede de estações fluviométricas na bacia incremental do aproveitamento e, ao menos, uma estação a

jusante com capacidade de medir vazão turbinada e vazão vertida.

Assim, segundo Silveira (2002), a operacionalização deste sistema é fundamental para o conhecimento dos regimes hidrológicos das bacias hidrográficas, para o gerenciamento adequado dos potenciais hidráulicos do país, e para a mediação de futuros conflitos gerados pelo uso múltiplo das águas.

As ferramentas desenvolvidas e embarcadas no equipamento “VAS” facilitam o acompanhamento da situação dos reservatórios hidrelétricos e da sua área de contribuição, e a realização de estudos hidrológicos mais precisos para tomadas de decisões a respeito das afluências e defluências.

O sistema fornece, ainda, subsídios para a realização de estudos de capacidade de geração de energia elétrica e elaboração de novos projetos, otimizando a produtividade hidroelétrica no país.

Com o início das discussões sobre a tarifação horária da geração de energia, a previsibilidade da geração é muito valorada, pois trata eficiência à geração e o monitoramento hidrológico bem ajustado possui grande valor ao negócio hidrelétrico, especialmente, em aproveitamento a fio d'água com grande área incremental, onde um percentual alto da vazão turbinada não é controlada por reservatórios e pelos respectivos controles por balanço hídrico.

A presença de um sistema de monitoramento hidrológico bem planejado e gerido, subsidia previsão de vazões com antecedência de dias, permitindo o planejamento do despacho elétrico de forma eficiente, reduzindo perdas por volumes vertidos e possibilitando a operação de usinas com níveis d'água mais altos nos reservatórios, aumentando a geração de energia.

Cada vez mais os conflitos pelo recurso hídrico se agravam, o setor hidrelétrico passa a disputar água com diversos outros usuários, neste ambiente, o adequado monitoramento hidrológico torna-se imprescindível, por diversos motivos, dentre eles, o registro correto dos dados históricos fornecendo informações aos processos de infração de outorga de uso da água, por exemplo.

Fato corroborado por Oliveira et al (1998), relatando que a confiabilidade dos dados hidrometeorológicos, que já é de vital importância para o setor elétrico, tornou-se ainda mais importante, uma vez que se constitui ferramenta básica para a outorga do direito de uso e para a cobrança pelos usos da água.

Outro benefício relevante é a previsão de eventos extremos e o planejamento

da operação para minimizar as suas consequências para a comunidade de jusante que depende do rio e possibilitar avisos às autoridades de proteção e defesa civil para empreender ações de salvamento, resgate e minimização de danos à sociedade. Tais previsões podem subsidiar a operação da hidrelétrica em atenuar o pico de cheias fazendo modulação do reservatório, da mesma forma, poderá subsidiar informações importantes para a modulação do reservatório para minimizar impactos dos efeitos da seca. Com relação à segurança de barragens, alertas de cheias em antecipação podem subsidiar decisões de baixar o nível do reservatório e gerar volume de espera, minimizando riscos de galgamento da barragem que apresentam reservatórios porém que não são utilizados frequentemente na operação por limitações regulatórias.

A demanda por um sistema de monitoramento hidrológico confiável é muito antiga. Segundo Vieira (1999), o primeiro “serviço de alerta” desta área surgiu associado a uma empresa geradora de energia elétrica, na década de 50. O sistema de alerta foi instalado em 1984 pelo Departamento Nacional das Águas e Energia Elétrica (DNAEE), suportado por uma rede telemétrica de cinco estações automáticas de coleta de dados de chuva e nível do rio.

2.6. VEÍCULO AUTÔNOMO DE SUPERFÍCIE (VAS)

Como mencionado na introdução, para contribuir com o aumento dos pontos amostrais utilizados pelas ferramentas estatísticas empregadas nos estudos hidrométricos e hidrológicos e melhorar os resultados do monitoramento hidrológico exigido pela Resolução Conjunta nº 03/2010 (ANEEL/ANA,2010), o grupo Neoenergia idealizou e contratou um programa de pesquisa e desenvolvimento financiado pela ANEEL (P&D ANEEL) que foi registrado na ANEEL sob o número: PD-00453-0017-2017.

Um dos grandes focos que se tem com esse VAS é a missão de otimizar a Curva-Vazão dos rios. O problema com essa atividade é que eventos extremos nos rios brasileiros, como grandes inundações durante a época de chuvas, alteram consideravelmente o perfil dessa curva e, conseqüentemente, os modelos matemáticos relacionados geram previsões imprecisas. Durante essas inundações, o escoamento da água nas margens pode ser lento e aparentemente raso, mas possui velocidades severamente aumentadas em sua região mais central (CATIAN et al.,

2018; LUZ et al., 2018; REGINA et al.,2020).

Este projeto de P&D propôs o desenvolvimento de um VAS para simplificar os procedimentos de aquisição de campanhas de hidrometria em campo, buscando soluções para ampliar o grau de automatismo destas atividades, permitindo a ampliação das campanhas de campo de medição de vazão e maior possibilidade de registros de eventos hidrológicos extremos de cheias e secas devido à redução dos custos de operação das campanhas de campo e também das condições de segurança para realização destas atividades.

O desenvolvimento deste VAS contou com uma equipe multidisciplinar de diversas Universidades, destacando-se UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora, UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto com profissionais ligados à engenharia elétrica, robótica, hidrologia, mecânica além de empresas colaboradoras tais como Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Pesquisa e Desenvolvimento do Brasil (INESC) e a HICON Engenharia.

Como resultado deste projeto de pesquisa dois protótipos de veículos autônomos de superfície foram desenvolvidos seguindo os conceitos gerais apresentados no apêndice II do presente estudo e o resultado do protótipo segue ilustrado nas figuras 1 a 5 abaixo:

Figura 1 - Croqui de montagem do VAS - protótipo final.

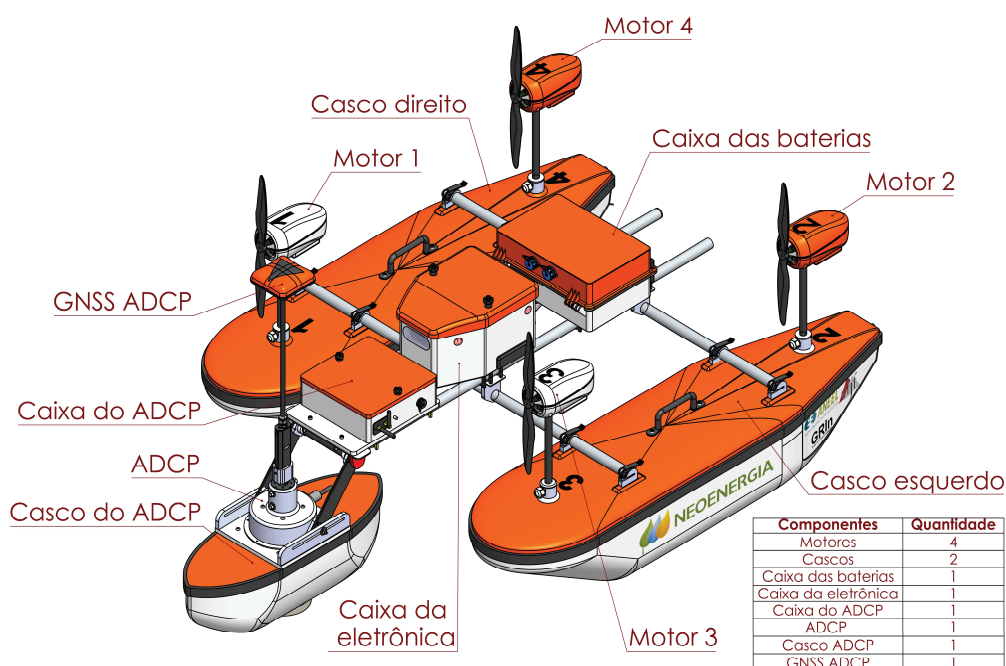


Figura 2 - Equipamento desmontado e interno a caixa de transporte.

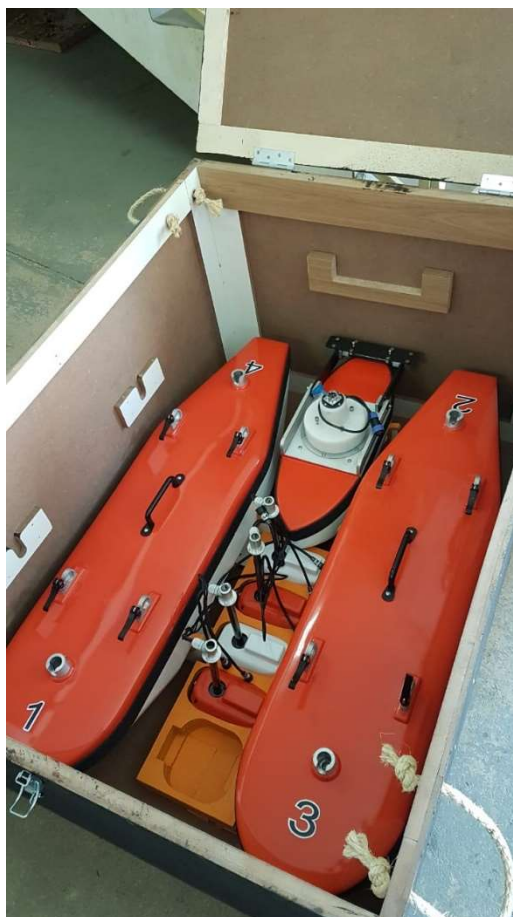


Figura 3 - VAS em montagem para uso.



Figura 4 - VAS montado e em operação.



Figura 5 - VAS em teste em condições extremas de uso.



2.7. CURVAS CHAVE NO DIMENSIONAMENTO DE USINAS HIDRELÉTRICAS:

Uma usina hidrelétrica é dimensionada a partir do potencial hidráulico existente em um determinado trecho de rio, a potência do aproveitamento é obtida a partir do produto de queda (H) e vazão (Q) disponível, conforme equação 1 abaixo:

$$P = 9,81 Q \Delta H \eta \quad (1)$$

Onde:

P Potência (kW);

- Q Vazão (m^3/s);
 ΔH Variação de queda líquida (m);
 η Rendimento do grupo gerador.

O rendimento do grupo gerador depende exclusivamente das características do equipamento a ser instalado.

Os parâmetros de queda bruta de um projeto hidrelétrico são obtidos pela diferença entre o nível d'água no reservatório e o nível d'água imediatamente a jusante da casa.

Além das características topográficas locais, a queda de um projeto hidrelétrico também pode ser influenciado pelas características das obras e equipamentos empregados no circuito hidráulico de geração (perdas hidráulicas) e também pelos fatores hidráulicos que do reservatório formado pelo empreendimento e também pelas características do trecho fluvial a jusante da Usina Hidrelétrica (UHE).

Estes dois últimos fatores são mais preponderantes quanto menores forem as quedas naturais existentes.

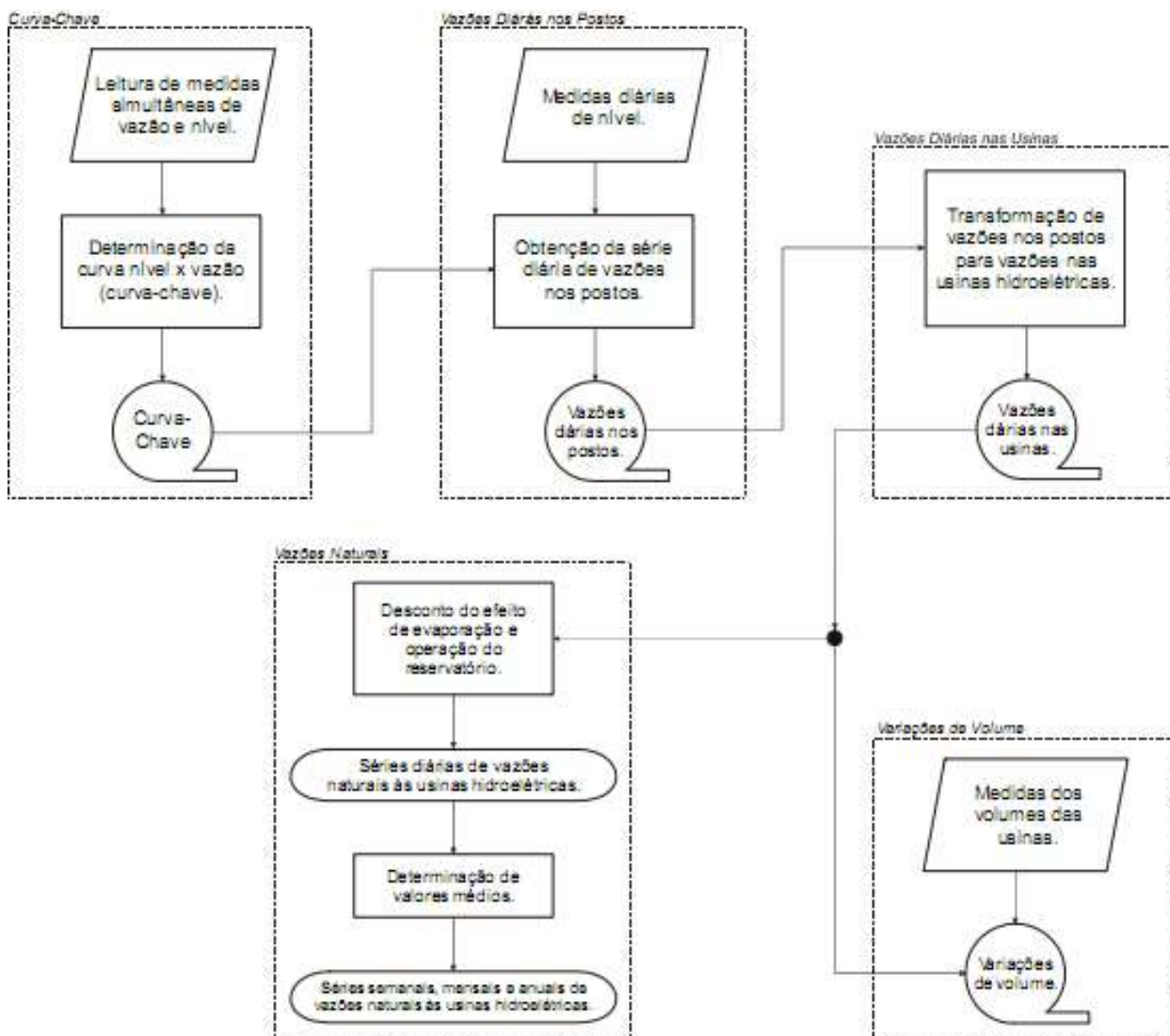
O comportamento do rio a jusante do empreendimento é informado ao interessado por meio da construção de curva-chave do canal de fuga, obtida com base no tratamento de um conjunto de dados de medição de descarga líquida e o seu relacionamento com níveis d'água na posição próxima ao canal de fuga da futura usina hidrelétrica a ser projetada.

As descargas líquidas, vazões, empregadas no dimensionamento de usinas hidrelétricas são obtidas por meio de estudos hidrológicos realizados com base em histórico de descargas líquidas medidas em campo e, com base na curva-chave construída para esta estação, são calculadas as vazões a partir de registros limimétricos realizados em estações telemétricas fazendo uso das respectivas curvas-chave dos postos fluviométricos existentes no rio ou rios próximos que são usados como base ao estudo.

SILVA FILHO, D (2003) resumiu esta metodologia quando apresentou que as séries de vazões afluentes naturais são obtidas pelo processos apresentado na figura 6, este processo. Onde inicia-se pela elaboração das curvas-chave previamente determinadas. Como os postos de medição normalmente não se encontram na posição do eixo da usina, faz-se a transformação das vazões dos postos às usinas.

Assim, tem-se vazões nas usinas para os tratamentos hidrológicos pertinentes.

Figura 6 - Obtenção de séries históricas de vazão afluente. Fonte: Silva Filho, D (2003).



Segundo Shreiber (1977), os projetos hidrelétricos são feitos para usinas que funcionarão no futuro, porém dispõem-se de dados hidrográficos e meteorológicos somente em tempos passados. Usando esses dados, pressupõem-se que, no futuro, as condições serão as mesmas ou, pelo menos, muito semelhantes.

Da altura do nível d'água lida na régua se deduz a descarga do rio, utilizando-se a curva-chave, que representa a relação ente nível d'água lida e a descarga.

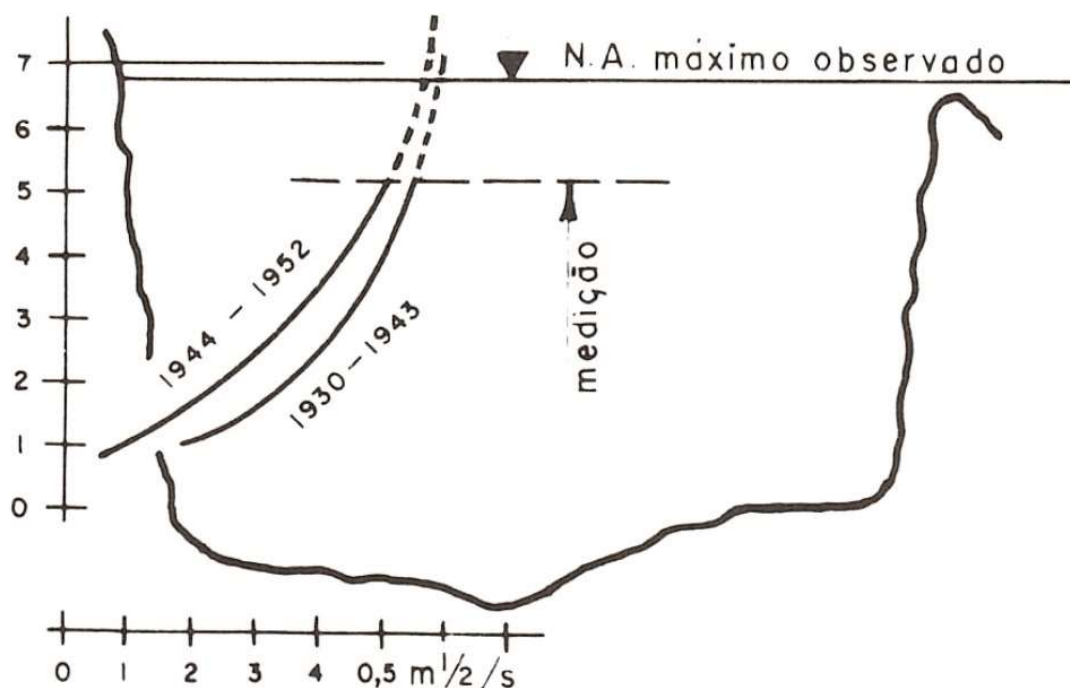
Marcando-se os resultados das medidas de descarga num sistema cartesiano, considerando-se as descargas como abscissas e as Alturas do nível d'água como ordenadas, verificar-se-á que dificilmente os pontos obtidos seguem uma curva

regular.

Às vezes os resultados de medidas efetuadas com o mesmo nível diferem consideravelmente entre si. A curva-chave, por isso, deverá ser ajustada aos pontos de medição. Por outro lado, muitas vezes faltam medidas com vazões elevadas e precisa extrapolar a curva seguindo metodologia de extrapolação aplicável.

Ao se extrapolar a curvas-chave, o projetista passa a confiar em dados sintéticos gerados a partir dos dados medidos em campo que podem ou não representar a realidade para vazões extremas, bastante empregada no dimensionamento das obras hidráulicas. A figura 7 a seguir ilustra uma estação fluviométrica com limitação de medição de campo.

Figura 7 - Seção e curva-chave do Rio Iguaçu em União da Vitória. Fonte: Shreiber (1977)



Note que o limite máximo observado encontra-se no trecho tracejado da curva, portanto, trecho sem medição de campo para subsidiar a curva-chave de referência. Neste ponto, a curva-chave infere um valor por extrapolação dos dados realmente registrados nas campanhas de descarga líquida realizadas *in loco*.

Note que a margem direita da seção apresenta uma descontinuidade do terreno, abrindo a seção e alterando as características extrapoladas pela curva-chave. Este caso certamente gerará um “out layer” na série histórica de vazão que poderá

alterar o dimensionamento das estruturas de uma hidrelétrica.

Este problema poderia ser solucionado com a existência de uma topobatimetria na seção do rio considerando a área seca e área molhada (abaixo do nível d'água) desta seção de controle. Porém a prática comum nas medições de descarga líquida que sejam obtidos apenas os valores abaixo do nível d'água pois estas informações nas áreas secas da seção requerem a adoção de outros equipamentos e conhecimentos topográficos mais específicos.

Esse problema foi ressaltado na obra de Shreiber (1977) onde chama atenção para que raras vezes as medições de vazão abrangem vazões de enchente e nunca chegam a medir as vazões de enchente máxima provável. Assim, as curvas de descarga devem ser extrapoladas e que estas atividades de extrapolação da curva-chave não é uma tarefa fácil, estando até os engenheiros mais experientes sujeitos a cometer erros grosseiros ao realizar tais trabalhos.

Assim, a projetista deve considerar estes fatos, quando decide a que precisão matemática deseja levar os cálculos hidráulicos e hidrológicos, sendo aconselhável a solicitação de uma seção topobatimétrica contendo a área seca e molhada da seção de controle fluviométrica para subsidiar melhor os estudos hidrológicos, porém este cuidado nem sempre é tomado nos estudos.

Desta forma, é recomendável também a obtenção de dados mais precisos e maior série histórica de valores fluviométricos medidos em campo, especialmente, durante a ocorrência de eventos extremos de vazão. A aquisição destes pontos durante a ocorrência de eventos extremos de vazão são importantes contribuições esperadas do "VAS", exaltando a relevância desta aplicação do equipamento.

2.7.1. CURVA-CHAVE NOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Os estudos hidrológicos empregados em aproveitamentos hidrelétricos costumam fazer uso de dados hidrométricos existentes em postos fluviométricos cujos dados são publicados pelos órgãos públicos gestores de recursos hídricos.

Com base nestas informações, é aconselhável que o hidrólogo da projetista resgate informações sobre os postos existentes nas regiões próximas ao futuro empreendimento interprete-os de forma a fornecer informações necessárias para a construção de uma curva-chave adequada a cada posto e, com base nesta

informação, lançar os dados limimétricos dos respectivos postos fluviométricos para obtenção de séries hidrológicas confiáveis,

A partir de então, a projetista faz análises e tratamentos hidrológicos necessários para realizar a consistência dos dados, reconstituir falhas das séries e transpor os dados para o eixo da usina a ser dimensionada.

Com base nestas atividades produz-se uma série histórica de vazões no local do aproveitamento para subsidiar estudos hidráulicos e hidrológicos pertinentes ao dimensionamento das obras e equipamentos que compõe o aproveitamento hidrelétrico.

2.7.2. CURVA-CHAVE NO EIXO DO EMPREENDIMENTO

A curva chave no local do aproveitamento é de extrema importância para definição da potência instalada da usina, do seu cálculo energético e da definição dos níveis das estruturas de jusante.

Por isso, ao estudar determinado potencial hidrelétrico, uma das primeiras ações a serem empreendidas deve ser a instalação de régua limimétrica próximo ao eixo da barragem com a aquisição de um perfil topobatimétrico para subsidiar informações essenciais ao projeto sobre o comportamento do rio na região do aproveitamento.

A partir desta atividade, é essencial ao desenvolvimento do projeto para realizar campanhas de medição de vazão em campo com o respectivo registro na régua limimétrica para a constituição de curva-chave do empreendimento.

Critérios de projeto recomendam a realização de, ao menos, 6 medições de descarga líquida dispersas em um período de um ano hidrológico, portanto, contemplando eventos de seca e estiagem.

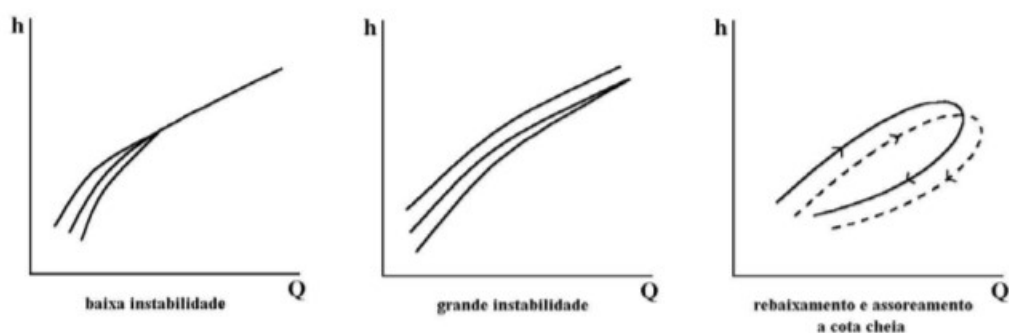
Salienta-se que o ideal é obter um número de medição tal que seja possível definir o tipo de relação entre as vazões e nível, esses podem variar de acordo com a mobilidade do leito, morfologia da seção e a condutância hidráulica. A figura 8 resume estas correlações possíveis:

Figura 8 - Características dos traçados de curvas-chave. Fonte: JACCON e CUDO (1989).

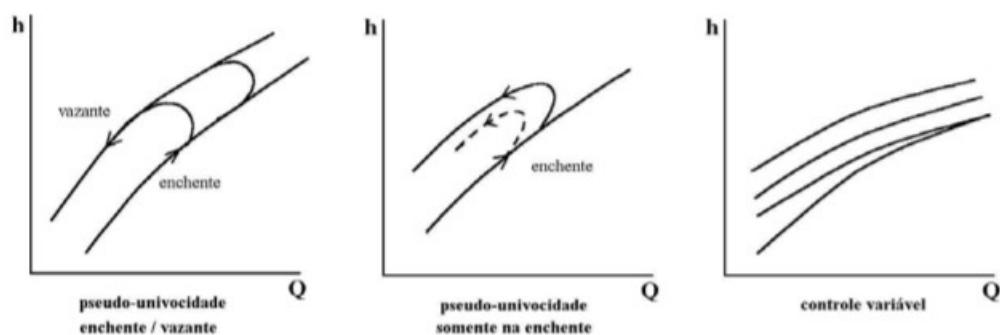
A - Relação Bi-unívoca



B - Relação Não-unívoca em rio instável



C - Relação Não-unívoca em regime Não-permanente



Apesar disso, muitas vezes os polinômios de jusante são elaborados com poucos dados de medição. Nesses casos, a elaboração da curva no local do aproveitamento é baseada em diversas metodologias para reduzir os erros de sua construção e nos diversos tramos da curva que se façam necessários.

Mesmo sem a realização de campanhas hidrométricas, para definir uma curva que seja confiável é imperativo que o nível linimétrico da seção seja monitorado e que exista um levantamento batimétrico detalhado da seção de controle contemplando a parte seca e molhada da seção, conforme apresentado anteriormente.

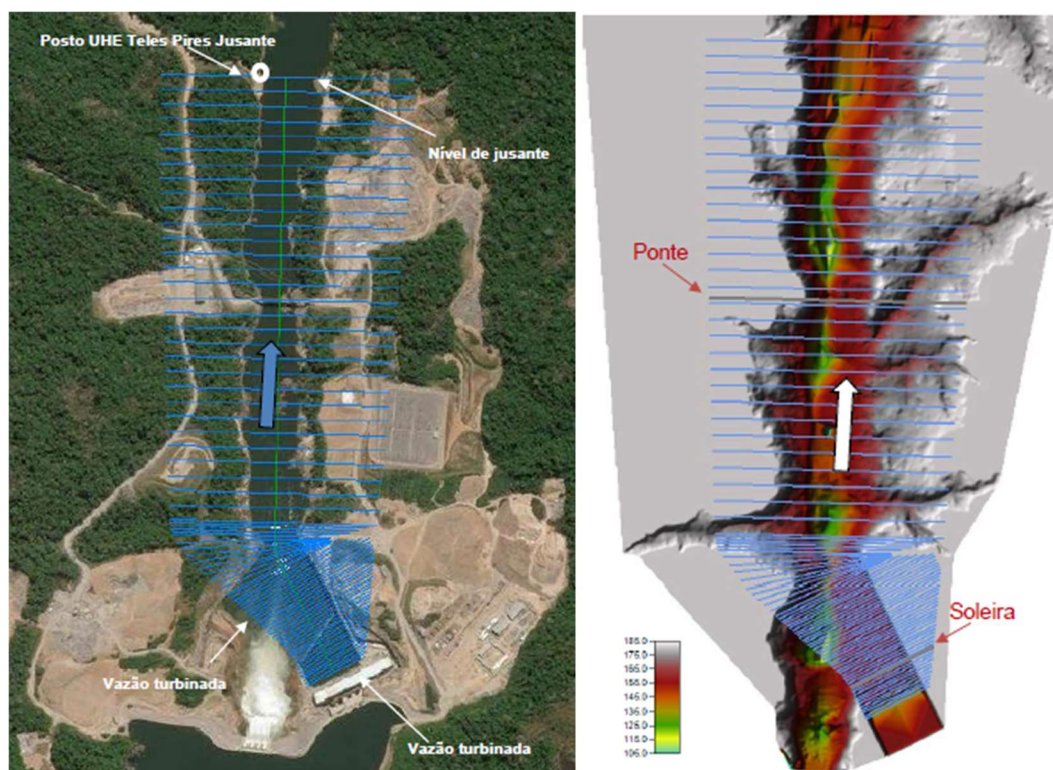
Por vezes, o eixo do empreendimento está próximo a um posto fluviométrico

com maior histórico de medição de vazão e, com curva-chave devidamente constituída. Nestes casos é comum o projetista aproveitar tais informações transpondo esta curva-chave do posto fluviométrico para o local previsto para a usina hidrelétrica empregando as metodologias de modelagem hidráulica das quais algumas foram citadas anteriormente neste estudo.

Nos casos de ausência de dados suficiente ao adequado tratamento hidráulico, recomenda-se utilizar as campanhas de campo em uma estação próxima. Caso a diferença de área de drenagem ($>5\%$) entre o local monitorado e o aproveitamento é necessário realizar uma correção da vazão considerando o fator de área de drenagem JACCON e CUDO (1989).

Com isso, transpor a vazão para aproveitamento, desta forma, a gerar pontos com a vazão transposta e o nível observado no local do aproveitamento. Tais pontos são balizadores para o traçado da curva chave empregando os mesmos métodos já apresentados neste estudo.

Figura 9 – Exemplo de transposição de curva-chave empregando software HEC-RAS unidirecional.



Independente da disponibilidade de curva-chave próximo ao eixo e da metodologia adotada na transposição da curva-chave é essencial a realização de

medições de vazão no local para validar a informação transposta e aferir maior confiabilidade aos estudos e projetos desenvolvidos com base nesta informação.

Estas informações são básicas ao desenvolvimento dos estudos hidráulicos na usina hidrelétrica a ser projetada, fornecendo informações para modelagens matemáticas e também para a calibração de modelo hidráulico reduzido, atividades essenciais ao desenvolvimento do projeto e análise do comportamento das obras hidráulicas ao longo do período operativo.

Na sequência deste estudo são apresentadas algumas características de alteração da curva-chave com potencial de impactar o projeto de uma usina hidrelétrica.

2.7.3. OBRAS DE DESVIO

As Obras de desvio do rio são provisórias e têm a função de permitir o desenvolvimento das estruturas definitivas das usinas hidrelétrica ou qualquer outra obra que necessitam ser executadas no leito de um rio.

Logo, o desvio tem a finalidade de realizar o manejo do rio, durante a construção do aproveitamento, por meio de estruturas de controle, que devem ensejar, proteger e garantir condições de trabalho na praça de construção de obra, de maneira segura, dentro dos riscos aceitáveis. (Rocha G. S.C, 2006).

Segundo CBDB (2009), o desvio do rio é uma etapa muito importante no projeto e construção de uma barragem, afetada por diversos fatores condicionantes da avaliação complexa, cuja boa concepção é indispensável para um bom desempenho, associado aos custos de execução compatíveis com os riscos aceitáveis em função das características hidrológicas do sítio.

Por se tratarem de estruturas provisórias e de menor custo quando comparadas à obra principal, as obras de desvio do rio assumem riscos maiores, sendo empregados critérios hidrológicos, aspectos geológicos e geotécnicos e procedimentos construtivos menos rigorosos quando comparadas às estruturas definitivas.

Além disso, reconhece-se que a concepção do esquema de desvio há um impacto significativo no custo do empreendimento e no tempo de sua realização, de modo que a formulação e dimensionamento final resultam adequados ao balanço de

todos estes fatores. (CBDB, 2009).

Existem várias soluções de desvio do rio a depender das características da obra que estão ligadas a:

- Arranjo da obra;
- Condições topográficas;
- Condições Geológicas;
- Condições hidrológicas;
- Disponibilidade de material na região;
- Cronograma da obra.

No presente trabalho são explorados apenas os aspectos hidráulicos e hidrológicos e como estes aspectos impactam no dimensionamento da estrutura.

Conforme ROCHA G.R.C (2006), a hidrologia influencia no dimensionamento de todos os elementos do desvio do rio, pois é ela que define a cheia de projeto a ser utilizada no dimensionamento das estruturas.

O regime hidrológico ao qual o rio está submetido e o plano de execução das obras também podem influenciar na solução adotada para o esquema de desvio do rio.

Outro fator que influencia nas decisões de projeto das obras de desvio é o regime hidráulico do rio pois define as condições de escoamento e, conseqüentemente, nas soluções de engenharia adotadas.

ROCHA G.R.C (2006) também argumenta que a cheia de projeto é definida de forma conjunta com o risco aceitável, que também está ligado a uma análise financeira.

A partir da definição de uma boa curva-chave no eixo do barramento e calculadas a vazão de projeto de desvio, para as diferentes fases, as estruturas são dimensionadas, sendo definidas altura das ensecadeiras e as características das estruturas de condução do fluxo, tais como o número de túneis ou galerias e as respectivas seções transversais e longitudinais, também são definidas as cotas das soleiras, as dimensões do canal de desvio e demais características do projeto.

Devido a adoção de maiores riscos a estas estruturas, torna-se essencial a adoção de informações hidrológicas e hidráulicas do projeto, sob pena de cometer equívocos no seu dimensionamento e gerar grande prejuízo a obra.

É muito comum identificar situações reais nas obras de desvio de rios diferentes daquelas previstas nos projetos de dimensionamento hidráulico e hidrológico das justamente pela limitação do histórico de informações definição de curvas-chave de melhor qualidade tanto nos postos fluviométricos de base quanto no próprio eixo da barragem.

Estas diferenças registradas entre o projeto e a condição real sempre apresenta um risco, pois se a curva-chave está superestimada, as estruturas de desvio consomem recursos financeiros para execução de estruturas robustas. No sentido contrário o risco aumenta e pode causar prejuízos ainda maior por subdimensionamento da estrutura de desvio.

Estas condições tornam-se mais frequentes quanto menor é o porte da obra e quanto menor ou menos confiável for a série histórica empregada na elaboração destas curvas-chave.

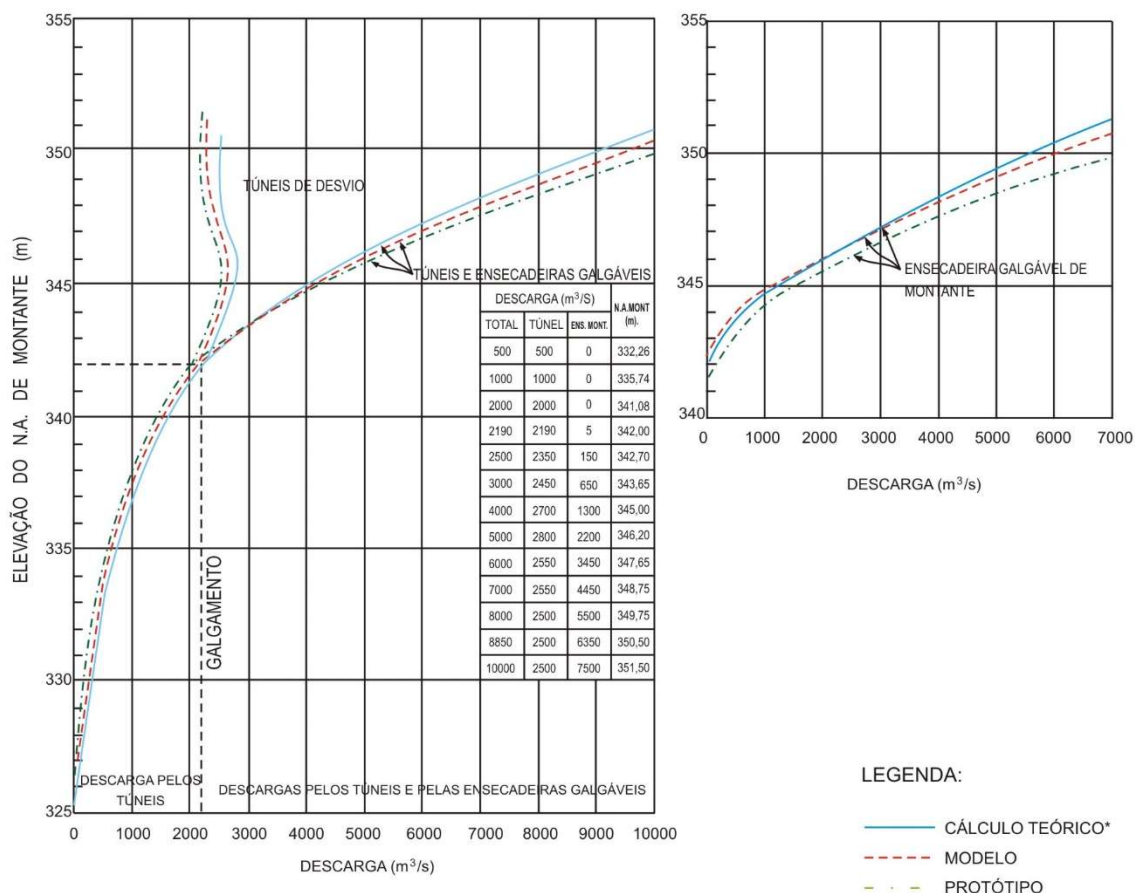
A seguir são apresentados exemplos de divergências entre o projeto e a obra de desvio do rio ocorrida em grandes aproveitamentos hidrelétricos brasileiros, que foram contornados ou mais bem investigados durante a obra pois detinham recursos humanos, materiais e econômicos para tal, fato que não ocorre em obras hidráulicas de menor porte:

Usina de Serra da Mesa:

O projeto de desvio da UHE Serra da Mesa, construída no rio Tocantins, adotou o conceito de ensecadeiras galgáveis com uma vazão de projeto simulada em modelo reduzido de 8.850,00 m³/s, porém, no início do ano de 1990, registrou uma afluência de 9.200,00 m³/s, pouco superior a vazão de projeto para os túneis de desvio.

Este fato motivou a empresa responsável a recalcular a curva-chave destas obras de desvio e os resultados seguem apresentados nos gráficos da figura 10 abaixo:

Figura 10 – Curva de Descarga do Túneis de Desvio e da Ensecadeira Galgável de Montante da UHE Serra da Mesa. Fonte: CBDB (2009).



Note que o protótipo, construído com medições atualizadas obtidos durante o evento extremo de chuvas citado acima, apresentou curva chave um pouco superior ao projetado para o túnel de desvio e um pouco inferior ao projetado para as ensecadeiras, fato que poderia ser foco de otimização do projeto caso houvesse disponibilidade destes dados previamente.

Vale ressaltar que, apesar do exposto acima, o dimensionamento das obras de desvio desta usina hidrelétrica foi um sucesso, pois a solução de ensecadeiras galgáveis adotada economizou 1.500.000 m³ de material nas ensecadeiras e o seu comportamento durante os eventos extremos foi considerado satisfatório mesmo para vazões maiores que o previsto nestas estruturas.

Usina Hidrelétrica Tucuruí:

O posto fluviométrico mais próximo ao aproveitamento foi instalado apenas 6

anos antes do início do projeto básico, além disso, a bacia hidrográfica apresentava apenas 36 postos, um para cada 21.300 km² e com distribuição geográfica irregular.

Assim, ao longo do desenvolvimento do projeto executivo, a projetista continuou o monitoramento do posto fluviométrico mais próximo, aumentando a base de dados e, conseqüentemente, a confiabilidade da estação fluviométrica mais próxima. Neste período de desenvolvimento do projeto executivo foram registradas 4 das 7 maiores cheias observadas, sendo a cheia de 1980 a maior da série histórica.

Por consequência, a curva-chave dos postos empregados nos estudos hidrológicos foram atualizadas e passaram a obter dados mais precisos. Assim, a vazão no eixo do empreendimento passou de 51.000 m³/s para um tempo de recorrência de 25 anos, valor adotado nas obras de desvio do rio, para uma vazão de 56.000 m³/s, aumentando em 10% o seu valor inicial previsto no projeto básico. Fato que motivou o aumento da ensecadeira de 2º fase da cota 27,00m para 28,50 m a montante e da cota 19,00 m para 21,00 m a jusante.

Apesar disso, o valor do nível d'água registrado (26,34m) foi inferior ao previsto na revisão de projeto (27,50m) por dois motivos: erosão registrada na margem direita e, possível erro de curva-chave no local dadas as limitações de informações e alteração das condições do rio, devido a referida erosão.

2.7.4. DIMENSIONAMENTO DAS TURBINAS

Vários são os fatores observados para o dimensionamento de turbinas hidráulicas em usina hidrelétricas, os principais são:

- Queda;
- Vazão;
- Rotação específica;
- Rendimento esperado;
- Características de operação do reservatório e,
- Características do rio.

O retorno econômico direto de qualquer aproveitamento hidrelétrico é a venda de energia, por este motivo, o dimensionamento das turbinas e, conseqüentemente, do grupo gerador como um todo é extremamente importante.

De forma direta ou indireta, as curvas-chave influenciam nem todos os fatores acima relacionados, portanto, determinam o dimensionamento das turbinas.

A curva-chave empregada para geração da série histórica de vazão quando mal ajustada poderá causar danos como erros nos estudos energéticos e de motorização do empreendimento.

O dimensionamento de vazões mínimas também é de extrema importância para a definição do engolimento mínimo da turbina e no dimensionamento do número de unidades geradoras.

A curva-chave traçada para o canal de fuga da UHE também influencia na queda da UHE, especialmente, nas usinas de baixa queda onde a variação do rio impacta no rendimento das unidades geradoras e na queda disponível à geração hidrelétrica.

Outro importante dimensionamento que é baseado na curva-chave do canal de fuga é a posição de instalação da turbina pois todas as turbinas são dimensionadas a partir das referências de nível do rio, seja para manter a sua altura mínima para evitar a cavitação ou para evitar o seu afogamento em caso de turbinas de reação, tipo Pelton, por exemplo.

2.7.5. ESTRUTURAS VERTENTES

Os vertedouros de usinas hidrelétricas são dimensionados a partir de estudos hidrológicos realizados com os dados hidrológicos disponíveis nos postos fluviométricos mais próximos ao empreendimento. Assim, são estudados vários registros de enchente das quais existam registros. As descargas verificadas durante o decorrer da enchente são aumentadas na relação entre a enchente máxima e a descarga maior, durante a enchente em estudo. Com estas informações é determinado o hidrograma, relacionado a vazão com o tempo para tais enchentes hipotéticas. Depois é estimada, em primeira aproximação, a descarga correspondente à capacidade do vertedouro com o nível d'água da represa, cerca de 60 a 80% da descarga máxima e é medido o volume do diagrama situado acima desta linha, o que

significa deflúvio de enchente. Como base, para os cálculos seguintes, escolha-se a enchente com maior deflúvio.

Em seguida, estabelece-se a fórmula para a capacidade de escoamento pelo vertedouro conforme apresentado na equação 2 abaixo:

$$Q = c L' h^{2/3} \quad (2)$$

Onde:

Q = Vazão descarregada (m^3/s);

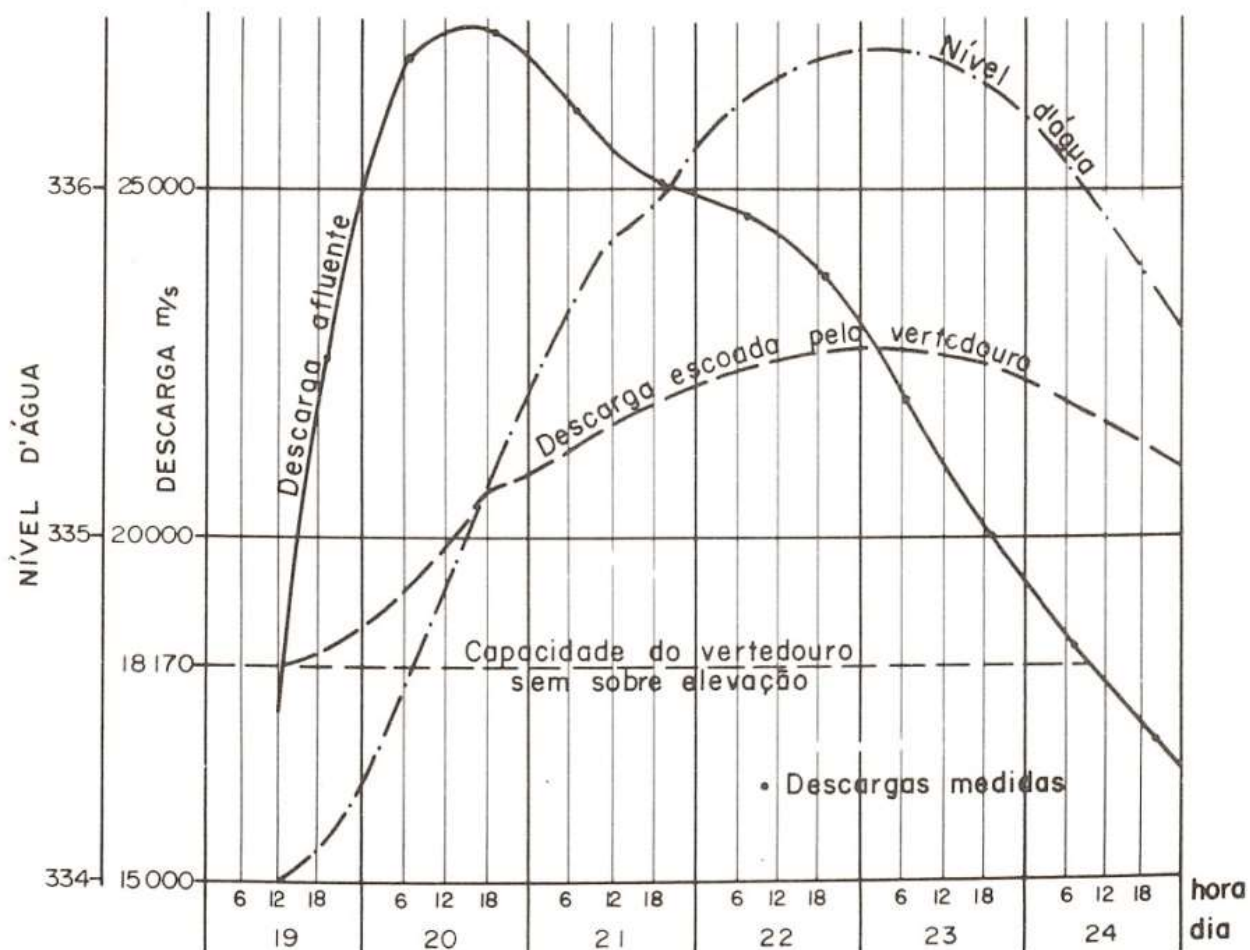
c = Coeficiente de descarga do vertedouro;

L' = Largura do vertedouro (m);

h – Altura do nível d'água acima da soleira (m).

Traça-se o diagrama de relação do volume acumulado no reservatório entre o nível d'água normal e o excepcional, à altura (h) do nível d'água acima do nível d'água da soleira do vertedouro conforme figura 11 abaixo.

Figura 11 - Exemplo de diagramas indicativos para o dimensionamento de vertedouros. Fonte: Shreiber (1977)



Depois de se verificar a descarga afluyente média no intervalo, avalia-se, em primeira aproximação, a descarga média escoada, e calcula-se a diferença entre ambas. Multiplica-se essa diferença pelo número de segundos do intervalo e obtém-se o deflúvio a ser acumulado ou retirado do reservatório. Do diagrama de volumes acumulados, tira-se a altura (h) correspondente e calculam-se a descarga escoada no fim do intervalo de descarga média. O cálculo é repetido até que essa descarga coincida com a descarga estimada na primeira aproximação.

Em rios pequenos é comum o emprego de soleiras livre, assim a metodologia também pode ser empregada, porém o ponto de partida deve ser a vazão de engolimento das usina.

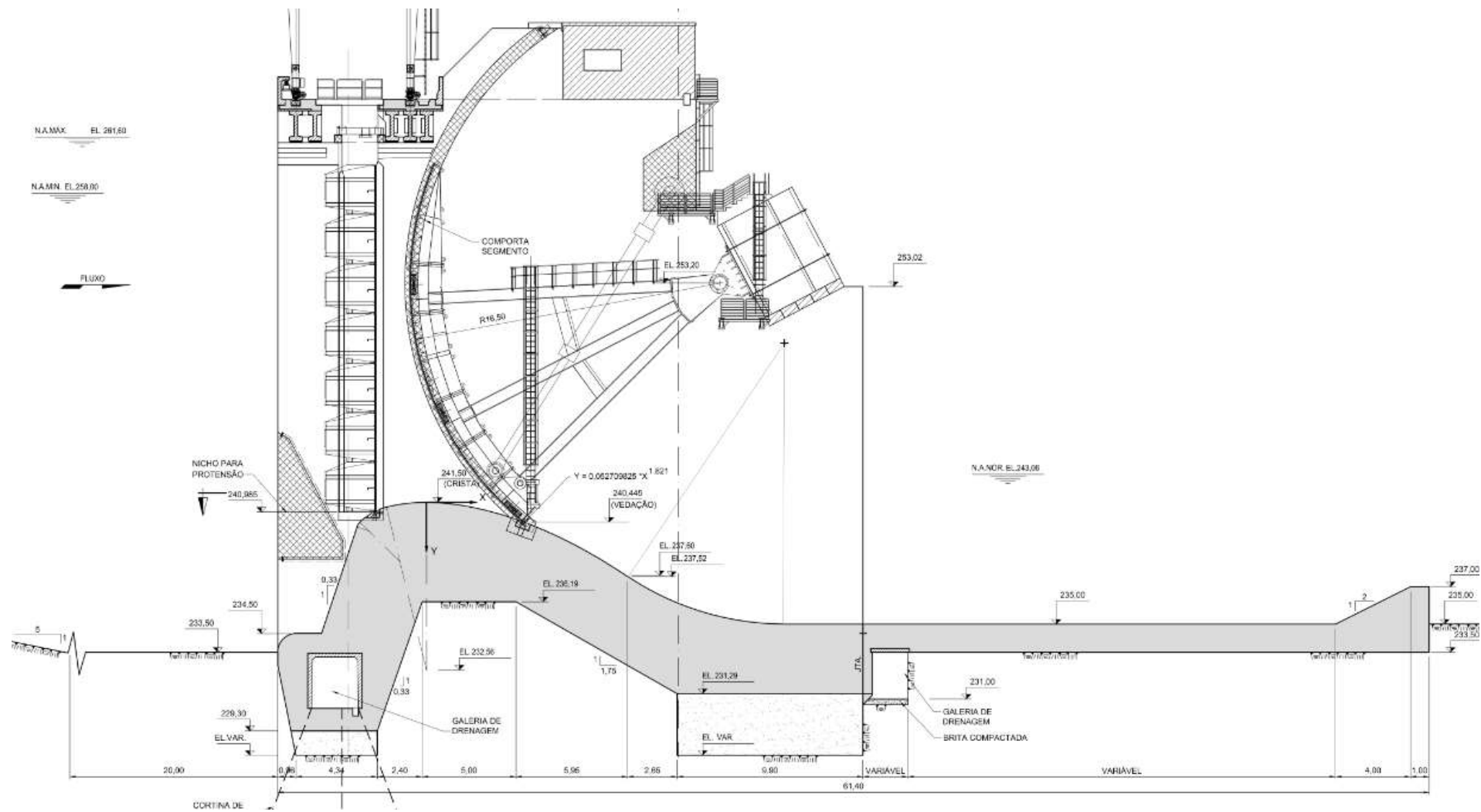
Nota-se, portanto, que existe emprego de curvas-chave no dimensionamento do vertedouro no cálculo do deflúvio máximo e, qualquer alteração no tramo de alta

da curva-chave pode alterar significativamente este deflúvio e, por consequência comprometer o cálculo de vazão máxima do vertedouro.

Algumas estruturas vertentes, em especial em rios caudalosos com projetos hidrelétricos de baixa queda, por vezes os projetos do vertedouro é “afogado” por jusante como é o caso de empreendimentos como as UHE’s Santo Antônio, Jirau, Belo Monte e Baixo Iguaçu.

Neste caso o dimensionamento do vertedouro também é impactado pela curva-chave de jusante. Abaixo segue uma imagem ilustrativa de um vertedouro “afogado” ilustrando esta condição.

Figura 12 - Seção do vertedouro da UHE Baixo Iguaçu: Fonte: Projeto executivo do empreendimento, INTERTECHNE, 2015.



2.7.6. VAZÃO ECOLÓGICA

A vazão ecológica pode ser definida pela vazão mínima necessária para garantir a preservação do equilíbrio natural e a sustentabilidade dos sistemas aquáticos.

Trata-se da vazão que se deve garantir a jusante de uma estrutura de armazenamento (barragem) ou captação de água (tomada d'água), para que se mantenham as condições ecológicas naturais de um rio.

A vazão ecológica corresponde a um percentual fixo da vazão referencial que também é estabelecida como limite para o total das outorgas de captação existentes no rio a jusante do empreendimento.

Esta vazão também é definida por com base estudos hidrológicos de vazão mínima do rio, respeitando os critérios definidos pelo órgão ambiental licenciador e também aos valores de outorgas definidos no estirão de jusante.

Assim, independente do critério legal estabelecido ao projeto, todos os cálculos hidrológicos dependem diretamente da série histórica de vazões e, conseqüentemente, da curva-chave do posto fluviométrico utilizado como base ao estudo deste aproveitamento hidrelétrico.

Visando a otimizar a eficiência dos projetos hidrelétricos, é aconselhável que o dimensionamento considere a vazão mínima de engolimento das unidades geradores igual ou superior a este valor para viabilizar a manutenção da vazão ecológica sem perda de recurso hídrico disponível no sítio.

Outras formas de vazão mínima podem ser demandadas a depender do arranjo proposto tais como: vazão sanitária em trecho de vazão reduzida ou vazão ambiental para atendimento a uma condição ambiental específica da região.

Porém, independente do conceito e fundamento adotado para o cálculo da vazão mínima, é notório que uma boa base de dados hidrológicos, baseados em uma curva-chave confiável e robusta é essencial ao dimensionamento também deste importante parâmetros existente em projetos hidrelétricos.

3. ESTUDO DE CASO

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Foi adotado no presente estudo de caso o empreendimento UHE Tabajara pois trata-se de um empreendimento previsto no PDE 2030 (Brasil/MME/EPE, 2030), produzido e publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), e está previsto para ser ofertado nos próximos leilões de contratação de energia centralizada.

Este aproveitamento também detém características que são mais flagrantes quanto a importância da curva-chave empregada em seus estudos pois é um empreendimento de baixa queda, localizado na região norte do país, cujos dados hidrológicos disponíveis apresentam limitações técnicas como menor série histórica e menor disponibilidade de registros de eventos extremos quando comparado com as estações disponíveis nas regiões nordeste, sul e sudeste do país.

Este aproveitamento também foi escolhido como estudo de caso por ser dimensionado próximo a um posto fluviométrico existente, que facilita a transposição ou mesmo simplificações matemáticas para uso de seus dados junto ao eixo do empreendimento.

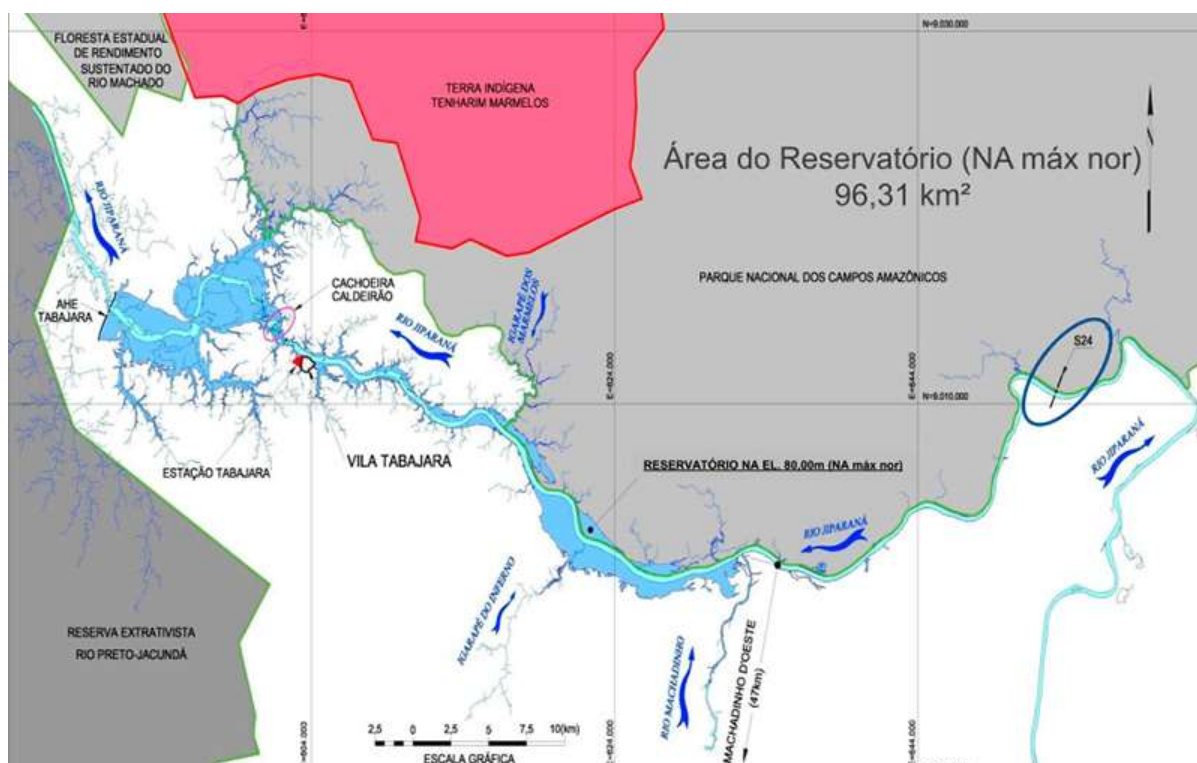
3.2. LOCAL DOS ESTUDOS

O aproveitamento hidrelétrico Tabajara situa-se no rio Ji-Paraná, na bacia do rio Amazonas. O Ji-Paraná é um afluente pela margem esquerda do Rio Madeira, O local do aproveitamento dista 145 km da foz, no rio Madeira.

A casa de força está localizada no município de Machadinho d'Oeste-RO, bem como todas as demais estruturas da Usina Hidrelétrica (UHE).

O acesso ao aproveitamento é realizado pela BR-364 em via pavimentada por 152 km, até a entrada de Cujubim, seguidos por 94 km em estrada asfaltada e 60 km de estrada de terra até Machadinho d'Oeste. A partir da sede do município, o aproveitamento é acessado por 70 km de estrada de terra até o distrito de Tabajara, situada a 14,5 km a montante do eixo do aproveitamento.

Figura 13: Localização da UHE Tabajara. Fonte: <http://www.ihu.unisinos.br/78-noticias/595299-eletronorte-insiste-em-usina-na-amazonia>



3.3. DADOS HIDROMÉTRICOS DE ORIGEM

Em virtude da localização estratégica da estação Tabajara para obtenção da série de vazões na UHE Tabajara considera-se adequado o estudo do regime fluvial neste ponto. De posse dos dados de nível d'água, vazão, resumo das descargas e curvas-chave, veiculados no Hidroweb para esta estação, foi possível obter todas as informações básicas necessárias ao desenvolvimento do presente estudo.

A estação fluviométrica Tabajara (código ANA nº 15580000), operada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), situa-se no município de Machadinho d'Oeste e controla uma área de drenagem de 60.300 km².

Desde o início de sua operação, em 1977, até a presente data, foram realizadas 220 medições de descarga-líquida neste local, sendo 182 disponibilizadas no Hidroweb, as demais realizadas pela Eletrobrás Furnas e utilizadas para o desenvolvimento do Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE) da UHE Tabajara.

Como este estudo não tem o objetivo de criticar o projeto, mas sim avaliar possíveis impactos das campanhas de descargas líquidas no resultado da curva-chave e, por consequência, no dimensionamento da UHE, foram adotados apenas as medições de vazão produzidas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e publicadas no portal Hidroweb.

Na figura 14 a seguir é disponibilizado o histórico das seções transversais desta estação fluviométrica utilizada como base ao presente trabalho, estas informações são disponíveis no sistema Hidro, mantido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA) também junto ao portal Hidroweb:

Figura 14 - Histórico das seções transversais da estação fluviométrica Tabajara (15580000). Fonte: Hidroweb, 2021.



Nota-se que, provavelmente, existe um erro de medição na seção realizada em 23/10/2019 e essa pode ser descartada nas análises, também é possível observar que nenhuma das medições se estenderam às margens a ponto de gerar informações suficientes para identificar a necessidade de se dividir a curva-chave em dois ou mais

tramos.

É válido informar que a série histórica de vazão do EVTE do empreendimento utilizou todos os dados de medição de descarga líquidas disponíveis, incluindo àqueles produzidos pela Eletrobrás/Furnas, e, após tratamentos pertinentes produziu uma série histórica de vazões muito similar àquela publicada no Hidroweb.

Nas figuras 15 e 16 são apresentadas as curvas-chave da ANA e do EVTE, informações públicas disponíveis sobre este posto fluviométrico Tabajara.

Figura 15 - Curva-chave com seção topográfica da estação Tabajara (15580000). Elaborado com base no HIDROWEB, 2021.

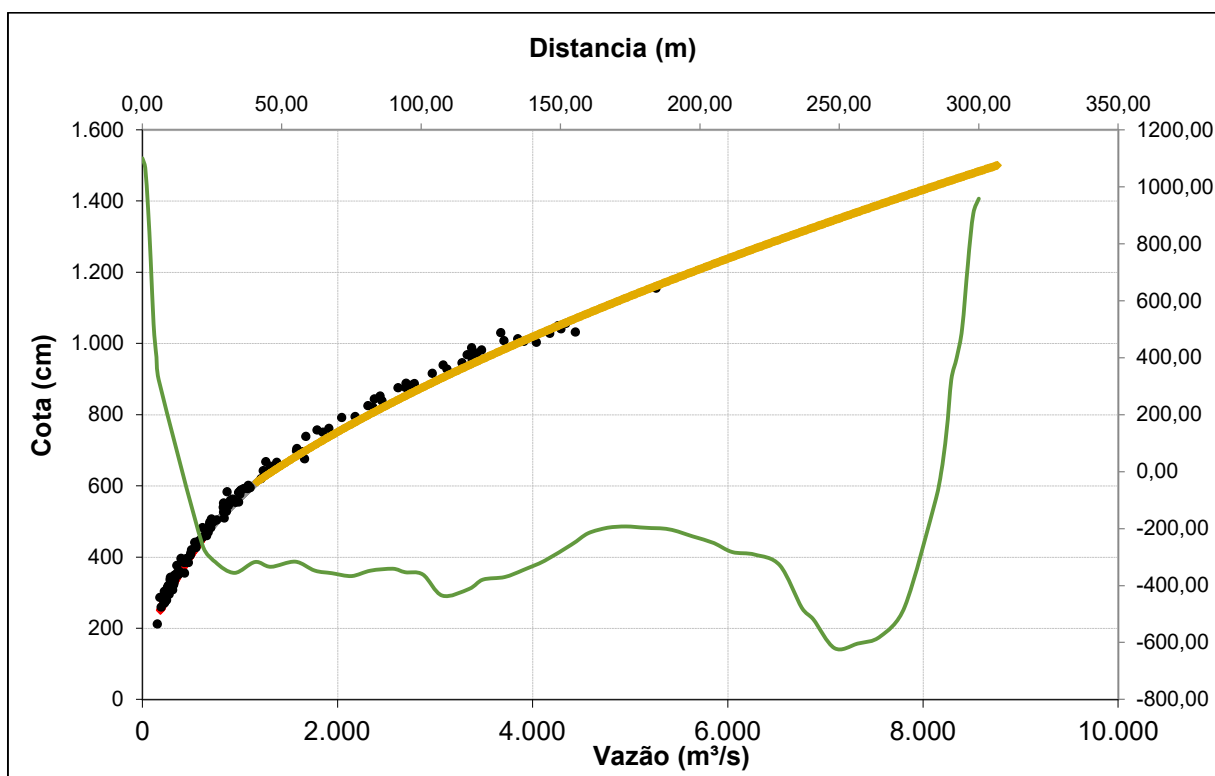
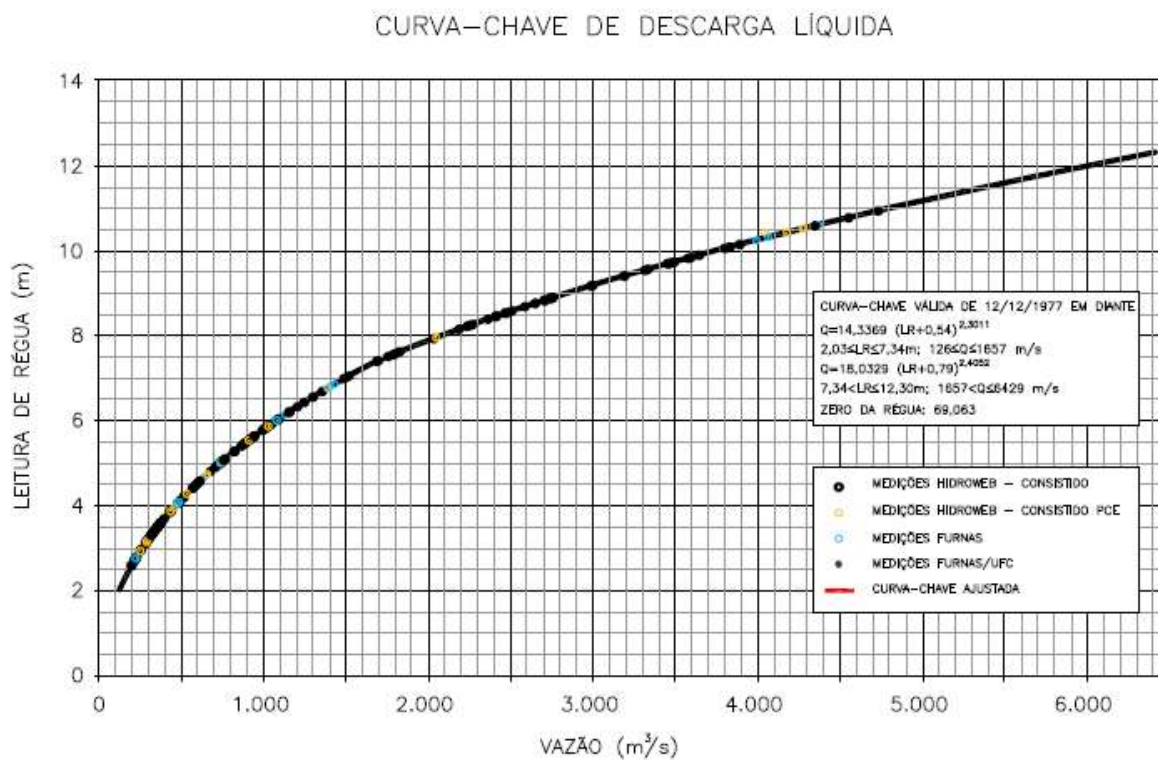


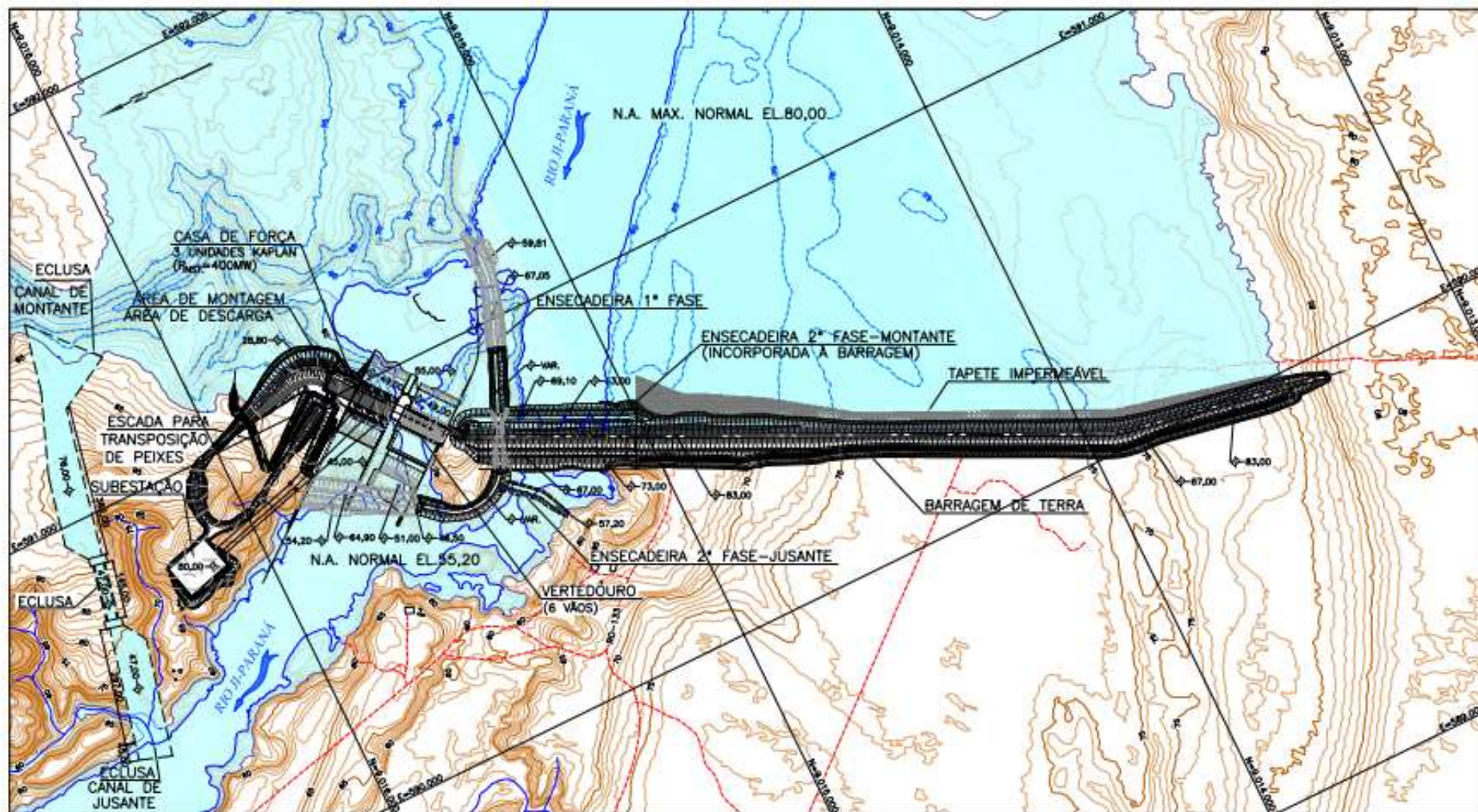
Figura 16 - Curva-chave da estação Tabajara (15580000) consistida. Fonte: EVTE da UHE Tabajara (PCE, 2016).



3.4. CARACTERÍSTICAS DA UHE TABAJARA

O arranjo da UHE Tabajara proposto no estudo de viabilidade contempla estruturas da tomada d'água, casa de força, área de montagem e sistema de transposição de peixes na margem e vertedouro, bacia de dissipação no canal direito do rio Ji-Paraná, conforme arranjo geral do empreendimento proposto no EVTE.

Figura 17 - Arranjo geral da UHE Tabajara. Fonte: Estudo de Viabilidade da UHE Tabajara (PCE, 2016)



No desvio de 1º fase o rio é estrangulado pela margem direita, limitado à ilha central por meio de ensecadeira de enrocamento, transições e solo, sendo a vazão direcionada para o canal esquerdo em seu leito natural. A cota de projeto da ensecadeira de montante é de 67,05 m e de jusante 64,90 m. Como critério ao seu dimensionamento foi adotada a utilização de vazão para recorrência de 100 anos (7480 m³/s), considerando borda-livre de 2 metros para o tramo de montante e de 1,5 m para o tramo de jusante pois este é um critério amplamente empregado pelas projetistas no dimensionamento de obras de desvio.

O vertedouro está localizado no trecho direito do rio, na ilha central, à esquerda da casa de força. O vertedouro é do tipo superfície baixa com perfil “creager” e dimensionado para passar uma cheia milenar de 10.570 m³/s. A estrutura extravasora é dotada de seis vãos de 13,50m de largura com a crista da soleira na elevação 64,30 m e controlada por comportas seguimento de dimensões 17,00m (sentido vertical) x 13,50m (sentido horizontal).

A tomada d'água é composta de nove portais de entrada dotados de grades de proteção de 25,93m de altura livre na vertical por 8,98m de largura e foi usado no desvio de 2º fase, conforme conceito adotado pelo estudo de viabilidade. A elevação de montante para a operação do reservatório é de 80,00 m, a mesma cota para a vazão decamilenar.

A casa de força é do tipo abrigada e equipada com 3 turbinas Kaplan com caixa espiral em concreto, dimensionadas para uma queda líquida de referência de 20,66m, vazão nominal de 648,7m³/s, com potência instalada igual a 400 MW. O nível máximo maximorum atingirá a casa de força por jusante na cota 66,33m.

O canal de fuga inicia-se a partir da saída do tubo de sucção, na cota 28,80 m e mantém-se na mesma elevação por um trecho de 10,00 m de comprimento quando sobe em rampa 1 : 3 até a elevação 45,00m, permanecendo nesta cota até o leito natural do rio.

4. METODOLOGIA

Para avaliar o impacto da quantidade de medições de descarga líquida no traçado de curvas-chave, a consequente geração de séries históricas e os devidos tratamentos de engenharia aplicados aos projetos de usinas hidrelétricas esta dissertação propõe:

- Identificar um projeto de hidrelétrica com existência de um posto fluviométrico com grande quantidade de medições de campo e próximo ao eixo proposto da UHE;
- Traçar curva-chave da estação fazendo uso de todos os dados de medição de vazão disponíveis;
- Gerar série histórica de vazões original;
- Identificar os principais eventos de cheias e secas medidos em campo e retirá-los da série de medições de campo;
- Recalcular a curva-chave;
- Gerar série histórica de vazões com a nova curva-chave;
- Gerar estudos hidrológicos empregando a série histórica de vazões original e a série histórica de vazão com a nova curva-chave para:
 - Estudos de vazão mínima com a determinação da vazão mínima turbinável e a vazão ecológica do empreendimento;
 - Estudos vazão máxima para determinar a vazão de dimensionamento do vertedouro e das obras de desvio do rio;
 - Estudos hidrológicos para o dimensionamento das unidades geradoras e cálculo da garantia física.
- No caso de usinas de baixa-queda, o polinômio do canal de fuga afeta diretamente a produtividade do aproveitamento, então, para considerar este impacto esta metodologia, propõe retirar, de forma aleatória, do histórico, algumas campanhas

de medição de vazão, limitando o histórico a 20 pontos, 15 pontos, 10 pontos e 5 pontos. Assim, são calculadas as curvas-chave do canal de fuga (polinômios de jusante) com estes novos pontos.

- Com posse dos estudos hidrológicos revisados e também dos polinômios de jusante, calculam-se energia firme para estimar a garantia física do aproveitamento hidroelétrico em cada um dos cenários propostos.
- Por fim sugere-se a comparação dos resultados não apenas dos dados calculados mas também com as informações calculadas no EVTE do empreendimento adotado.

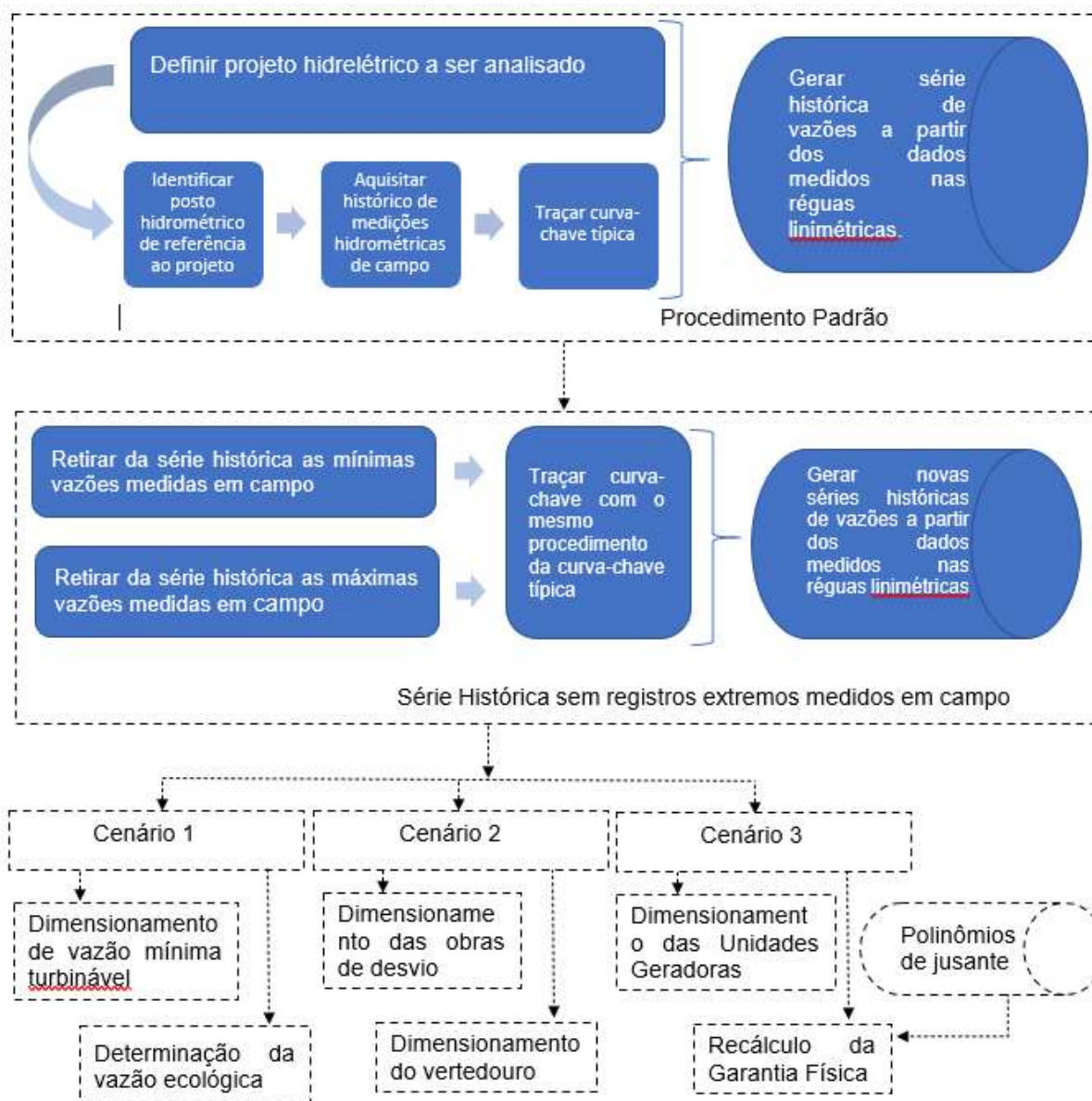
Como posse destes dados é possível comparar os impactos no dimensionamento de uma UHE quando existem limitações de medição de vazões, especialmente, as vazões extremas de cheias e secas quando existem riscos aos hidrometristas em acessar o rio ou mesmo dificuldade de mobilizar equipe durante os picos de cheias e secas para realizar as medições de campo para calibração das curvas-chave.

É importante destacar que esta metodologia pode ser aplicada a qualquer empreendimento hidrelétrico, porém qualquer alteração na série histórica de vazões, ou em estudos hidráulicos em pontos específicos do rio tendem a apresentar resultados mais impactantes nos empreendimentos hidrelétricos de baixa queda. Nestes os fatores hidráulicos e hidrológicos dependem mais da parcela referente a vazão de que referente a queda do empreendimento disponível no local do dimensionamento do empreendimento hidrelétrico. Assim, sugere-se que esta metodologia seja praticada aos empreendimentos de baixa queda.

4.1. FLUXOGRAMA DO ESTUDO:

Para discorrer sobre a concepção e sequencia de atividades adotadas nestes estudo para alcance dos objetivos propostos, foi elaborado o fluxograma da figura 18 com as fases do estudo:

Figura 18 – Fluxograma de implantação da metodologia proposta. Fonte: Autor.



Os dados podem ser adquiridos do portal Hidroweb, disponível no site: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas> para todos os postos fluviométricos próximos às áreas de interesse ao estudo.

Então, avalia-se a disponibilidade de dados fluviométricos nessas estações de interesse e deve-se escolher, para cada usina hidrelétrica, postos fluviométricos com maior série histórica de vazão e maior qualidade dos dados para realizar as simulações necessárias à avaliação dos impactos das medições de descarga líquida nos estudos de engenharia e dimensionamento do aproveitamento.

Para uso de posto hidrométrico representativo, deve-se utilizar nas simulações

postos com, no mínimo, 30 anos de série histórica de vazão e com registro superior a 120 medições de campo de descarga líquida a serem empregadas na calibração da curva-chave. Também calculam-se indicadores estatísticos para avaliar se os dados disponíveis foram adequados à construção de uma boa curva-chave.

Assim, outro fator observado para a definição do posto a ser empregado nas simulações é o traçado da curva-chave. Para este estudo sugere-se a posto fluviométrico que apresente curvas-chave bem definidas e sem divisões por tramos diferentes para facilitar o tratamento dos dados e obtenção dos resultados.

Esta restrição também é motivada pelo fato de que as curvas-chave traçadas com menores amostragens tentem a apresentar-se em um único tramo, muito comum para curvas-chave jovens onde supõe-se que a aplicação do equipamento VAS será relevante.

4.2. CURVA-CHAVE TÍPICA

A curvas-chave típica é calculada com toda a disponibilidade de dados existentes no posto fluviométrico de referência na área de interesse.

Para simplificação dos cálculos, neste estudo não devem ser avaliados os parâmetros geométricos (seção transversal e longitudinal), características do rio na seção do posto fluviométrico (natureza do rio, rugosidade, mobilidade do leito, dentre outras) registros da estação (inventário, dossiê técnico e outras informações sobre o posto).

A ausência destas avaliações não comprometem os resultados pois as simulações impostas à curva-chave não alteram os parâmetros físicos do ponto de medição, mas têm a função de mensurar o impacto nos resultados a partir da disponibilidade da amostra e da redução das campanhas de medição de descargas líquidas da estação.

Adota-se a forma exponencial ($Q = a.(h - h_0)^b$) para a equação da curva-chave com a altura do nível d'água em função da vazão, relação $h=f(Q)$. Pois esta é a forma mais convencional de representação de curvas-chave nos postos fluviométricos da rede hidrológica brasileira e estudos de engenharia para o desenvolvimento de empreendimentos hidrelétricos.

Assim, com base na série de medições de descargas líquidas disponível,

calcula-se o logaritmo de altura (h) e o logaritmo da vazão (Q) para os resultados destas medições, isso ajusta a equação polinomial calculada a uma reta.

Na sequência, adota-se o método dos mínimos quadrados para a definição dos parâmetros da equação curva-chave “ a ”, “ b ” e “ h_0 ”.

Para o cálculo desses parâmetros, obtém-se o coeficiente de determinação “ R^2 ” e, fazendo uso da ferramenta do Excel “solver”, varia-se o valor de “ h_0 ”, para o máximo “ R^2 ” possível, limitando o valor de “ h_0 ” e de “ b ” a valores condizentes com a realidade hidráulica das seções dos rios onde encontram-se estes postos.

A partir da definição do “ h_0 ”, os demais coeficientes são calculados automaticamente pelas fórmulas estabelecidas no Excel e a curva-chave é formatada, a partir disso, a curva deve ser plotada no gráfico.

Como foi adotada a curva exponencial e este cálculo se dá pelo método dos mínimos quadrados, empregando o logaritmo da altura (h) e da vazão (Q), a extrapolação da curva-chave para o método logarítmica é favorecida, assim, tanto os valores de alta quanto os valores de baixa vazão da curva-chave também podem ser determinados pela curva.

Esta curva-chave deve ser produzida no posto onde foram medidas e, devem ser transpostas ao eixo do empreendimento por comparação de similaridade com a curva-chave produzida no projeto do empreendimento. Este procedimento deve ser adotado para simplificar a análise, uma vez que o procedimento não altera significativamente os resultados esperados ao estudo. Mesmo porque o posto fluviométrico adotado no presente estudo está localizado muito próximo do canal de fuga da Usina hidrelétrica de referência.

Também devem ser calculados alguns indicadores hidrológicos básicos para favorecer a comparação dos dados a partir da curva-chave típica, são eles:

- Mínima vazão registrada na estação ao longo de toda a série histórica, calculada com base na curva-chave original do posto fluviométrico;
- Vazão equivalente a 50% da curva permanência a 95% para estimar o valor de vazão ecológica praticada por alguns estudos ambientais e algumas legislações estaduais;
- Vazão de engolimento da UHE projetada;

- Vazão com TR de 50 anos a partir do estudo hidrológico da usina hidrelétrica de referência a este posto, essa vazão é importante pois é um critério bastante comum para o dimensionamento de obras de desvio;
- Vazão com TR de 10.000 anos, empregadas, normalmente, no dimensionamento de vertedouros de usinas hidrelétricas.

A partir destes valores, pode-se comparar alguns dos parâmetros importantes para o dimensionamento de Usinas hidrelétricas.

4.3. SIMULAÇÃO DAS CURVAS-CHAVE COM REDUÇÃO DE AMOSTRAGEM

O veículo autônomo para medição de descargas líquidas VAS é uma ferramenta que torna possível a coleta de dados rápida e fácil, sem a necessidade de um hidrólogo experiente junto ao rio durante as medições de descarga líquida. Esta metodologia de aquisição de dados também não demanda acesso ao leito do rio por nenhuma pessoa, portanto, elimina o risco inerente às atividades tradicionais de medição de vazões em rios.

Isso viabiliza a coleta de vazões durante picos dos eventos extremos de cheias e estiagens. O custo e tempo para a realização de campanhas de descargas líquidas são reduzidos favorecendo, também, a realização de campanhas com mais frequência que àquelas realizadas com os procedimentos convencionais e atualmente empregados.

Assim, torna-se importante mensurar os impactos positivos que estes registros podem impor às curvas-chave obtidas com base nestas campanhas de campo de medição de descargas líquidas e também aos consequentes estudos de engenharia para o dimensionamento das obras e equipamentos de usinas hidrelétricas .

A seguir são apresentadas as metodologias adotadas para avaliar os possíveis impactos nas curvas-chave:

4.3.1. CURVAS-CHAVE SEM REGISTROS EXTREMOS

Com base nas campanhas de descargas líquidas realizadas na estação

fluviométrica da região de estudo, devem-se traçar curvas-chave típicas conforme os procedimentos apresentados anteriormente.

A partir da definição destas curvas-chave, identifica-se as maiores cheias e secas na série histórica de vazão medida em campo.

Estes pontos máximos e mínimos devem ser expurgados da série e a curva-chave deve ser calculada novamente. Sempre quando forem identificados registros extremos concentrados em poucos dias, deve-se excluir todos os registros por entender que houve um monitoramento de todo o hidrograma de cheia ou seca, portanto, tratando-se do mesmo evento extremo.

Para simular a ausência de eventos extremos medidos em campo, também devem ser expurgados eventos extremos em períodos diferentes, porém com vazões medidas apresentando valores similares, pois entende-se que na estação fluviométrica adotada não foram monitorados eventos extremos de cheias e secas e, portanto, tornou-se necessário expurgar toda nuvem de pontos que caracterizam o trecho extremo de alta ou de baixa nas vazões da curva-chave em análise.

A partir destes expurgos foram empreendidos os mesmos tratamentos realizados para a definição da curva-chave típica.

A seguir são apresentadas justificativas à necessidade de expurgo de tais vazões extremas:

Durante eventos extremos de seca

Em eventos extremos de seca diversas situações surgem em campo que dificultam a execução da medição de descarga líquida. Primeiramente é difícil verificar a ocorrência de um evento extremo e conseguir medi-lo, uma vez que é necessário reunir profissionais e equipamentos e mobilizá-los a campo em um curto espaço de tempo. É comum verificar, durante eventos de seca, o surgimento de ilhas e pedras no leito rio, aparecimento de trechos da seção com calado baixo, presença de dejetos no rio que dividem o fluxo, causando turbulência e insegurança à navegação ao longo da seção transversal, navegação esta necessária para obtenção das medições de descargas líquidas em campo pelos métodos atualmente empregados. Estas turbulências também geram condições inadequadas para o uso de molinetes pois são formadas correntes de retorno que falseiam a aquisição dos dados, gerando informações equivocadas das vazões ali praticadas.

Estes fatos dificultam a execução de medições durante estes eventos extremos. Para execução de medições nestas condições, o hidrometrista precisa ser hábil e insistente pois é necessário corrigir as leituras ou desviar a seção nos trechos com maior turbulência, é preciso tirar e reposicionar o barco no rio em diversos pontos para desviar das ilhas, e/ou realizar parte da medição a vau além de expor o profissional ao trabalho em condições limites dos equipamentos em alguns trechos.

Por tudo o exposto, os registros de secas históricas são incomuns ou as que existem na série podem apresentar erros de medição ou simplesmente a coleta do dado pode não ter sido realizada durante o pico do evento.

Durante eventos extremos de cheia

As cheias caracterizam-se por aumento significativo do nível d'água do rio e aumento da velocidade do fluxo d'água. Nestas condições, de forma geral, não são seguras às atividades com presença de profissionais embarcados no leito do rio. Os procedimentos necessários para a garantia das referências das medições tradicionais ficam comprometidas e, por consequência, a qualidade das leituras.

Nestas condições, também é comum o rio encobrir todas as réguas limimétrica da estação, dificultando a referência do hidrometrista em campo.

Assim, na maioria das seções onde estão instalados postos fluviométricos, a medição de vazão durante a ocorrência de cheias históricas pode se tornar inviável ou quando torná-la possível pode não se tratar necessariamente de um pico de cheia, mas apenas um ponto na base do hidrograma de cheia.

4.3.2. CURVAS-CHAVE COM AMOSTRAGEM REDUZIDA – POLINÔMIOS DE JUSANTE

Por vezes, os projetos de engenharia demandam a criação de uma curva-chave em curto espaço de tempo ou outra situação em que é necessária a produção de maior quantidade de amostras em curto espaço de tempo. Estes casos também ressaltam a relevância do uso do equipamento "VAS".

Isto também é empregado, por exemplo, em seções onde o leito do rio é móvel tornando-se necessária constante atualização das medições de campo para que se tenha uma curva-chave ajustada e confiável, nestas condições é imprescindível

executar uma quantidade muito maior de campanhas de campo na mesma seção do rio. Muitas vezes, isso inviabiliza o monitoramento do rio neste trecho, fato que pode interferir no desenvolvimento de projetos hídricos de qualidade na região ou afeta diretamente a operação dos mesmos, quando viabilizados.

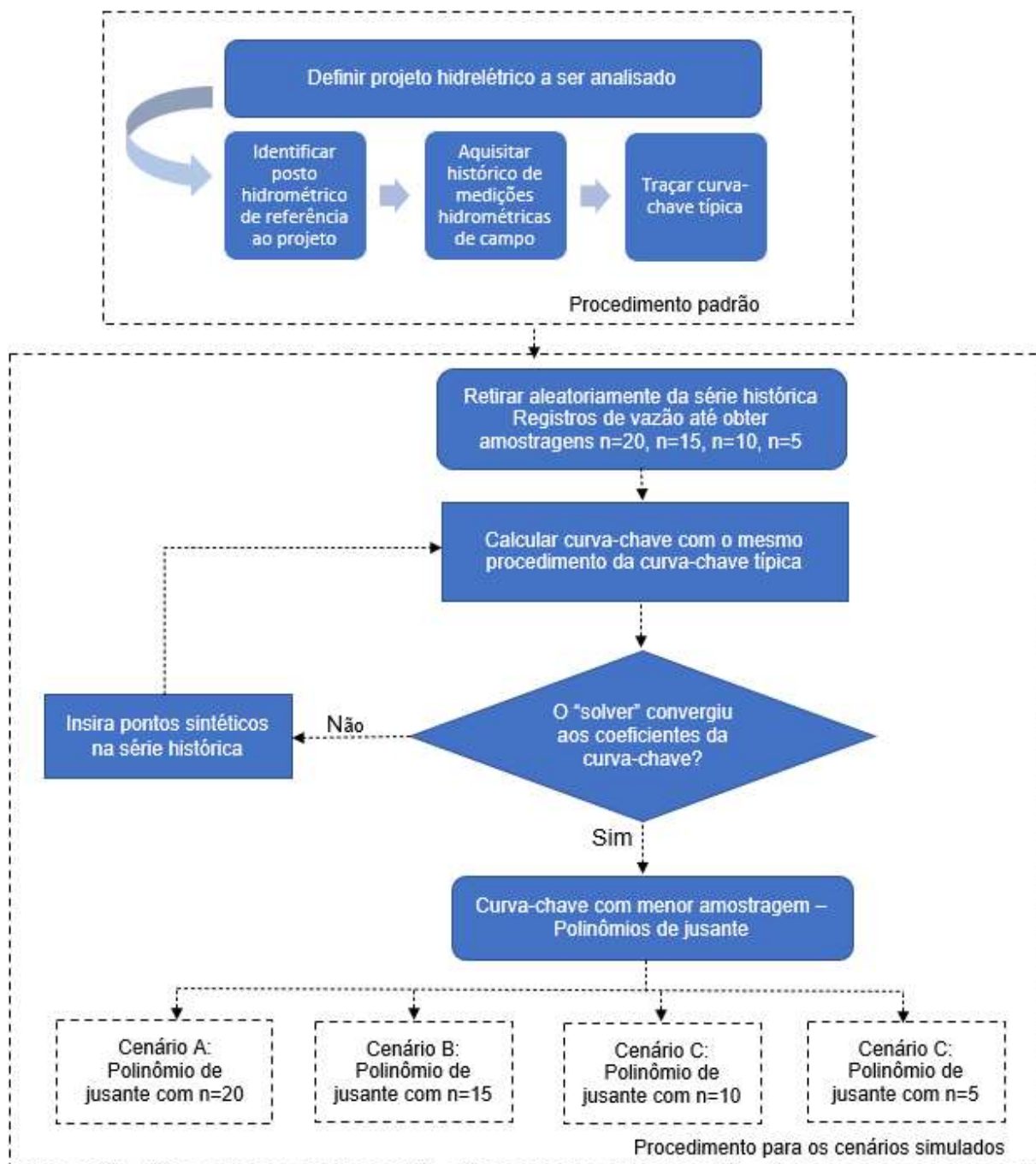
Também quando existem pontos do rio com interesse ao desenvolvimento de projetos hídricos, como as hidrelétricas por exemplo, existe a necessidade de uma transposição de dados fidedigna desde o posto fluviométrico de base até o ponto onde o empreendimento está sendo projetado para construir uma curva-chave no eixo. Neste caso é essencial manter uma equipe de hidrometria em campo por um grande período de tempo ou é necessário mobilizar muitas vezes esta equipe para realizar as medições de descargas líquidas em campo.

Isso também imputa custos ao projeto que podem ser minimizados pelo equipamento "VAS" pois o transporte desse equipamento é bastante fácil, sua montagem rápida e a sua operação em campo pode ser realizada por profissionais menos capacitados que, por consequência, reduz os custos da operação, viabilizando a execução de centenas de pontos adicionais que a serem disponibilizados à construção ou calibração de curvas-chave.

Assim, adotou-se o resgate de todas as informações de medições de descargas líquidas no postos eleito e excluiu-se leituras de vazão aleatórias da série, reduzindo a amostragem(n) para $n=20$, $n=15$, $n=10$ e $n=5$. Para cada um destes casos foram geradas curvas-chave com a mesma metodologia de construção das curvas típicas, conforme fluxograma ilustrativo do procedimento abaixo apresentado:

O alcance dos objetivos propostos, foi elaborado o fluxograma disponível na figura 19 com as fases do estudo:

Figura 19 – Fluxograma para simulação dos cenários com amostragem reduzida. Fonte: Autor.



4.4. ANÁLISE DAS CURVAS-CHAVE OBTIDAS

Após obtidas todas estas curvas, deve-se plotá-las em um único gráfico para favorecer a comparação dos resultados, sugere-se, também, que sejam inseridas nesta comparação as curvas-chave original e àquelas calculadas com o expurgo dos eventos hidrológicos extremos.

Deve-se também inserir os perfis transversais no eixo da seção de controle da estação fluviométrica para avaliar a necessidade de dividir a curva em tramos.

4.5. ANÁLISE DE IMPACTOS EM PROJETOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

A partir da definição destas novas curvas-chave obtidas, condições que simulam o possível uso do equipamento “VAS”, torna-se necessário avaliar os impactos destas alterações nos projetos de usinas hidrelétricas, as quais são apresentados a seguir:

4.5.1. IMPACTOS NOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

Todos os estudos hidrológicos de um aproveitamento hidrelétrico são baseados em alguma curva-chave, assim como todos os estudos hidráulicos de estruturas e equipamentos hidráulicos que se posicionam no rio e sofrem interferência da condição natural do mesmo.

Portanto, pode-se afirmar que a qualidade da curva-chave no posto hidrométrico de referência e no eixo proposto ao aproveitamento afetam diretamente a qualidade do projeto de usinas hidrelétricas. Ao se ajustarem curvas-chave fidedignas, os projetos podem ser mais assertivos, mitigando riscos hidrológicos associados, reduzindo custos construtivos, aumentando a confiabilidade, reduzindo exposição a riscos e conferindo maior confiança ao cálculo energético do empreendimento.

Como base para a avaliação dos estudos hidrológicos, sugere-se eleger um projeto de hidrelétrica próximo a um posto fluviométrico de base e cuja a curva-chave será bastante alterada nas simulações realizadas a partir da exclusão dos pontos de vazão máxima e vazão mínima, nestas condições, determina-se uma nova curva chave excluindo os dados extremos de cheias e secas e simula-se uma nova série de vazões no posto fluviométrico de base ao empreendimento.

A nova série histórica de vazões deve ser calculada empregando os registros de medições diárias de nível colhidas no posto hidrológico existente na região do aproveitamento. Estes dados devem ser lançados na nova curva-chave produzida a

partir da simulação de ausência de dados em eventos extremos.

Deve ser realizada a análise de consistência dos dados históricos de vazão calculada e, caso seja necessário, deve-se realizar o preenchimento de falhas nesta nova série de vazões empregando os dados históricos de outros postos fluviométricos existentes na região do estudo.

Para transportar a série histórica do postos para o eixo do aproveitamento adotado, deve ser realizada transposição por correção de área de drenagem, empregando a equação 3 a seguir:

$$Q_{UHE} = \frac{Q_{posto}}{Ad_{posto}} Ad_{UHE} \quad (3)$$

Onde:

Q_{UHE} Vazão calculada na UHE adotada (m^3/s);

Ad_{UHE} Área de drenagem da UHE adotada (km^2);

Q_{Posto} Vazão calculada no posto de referência ao projeto com base na curva-chave produzida pelo estudo (m^3/s);

Ad_{Posto} Área de drenagem do posto hidrométrico de referência (km^2).

Exatamente a mesma metodologia deve ser aplicada à curva-chave típica para que os resultados possam ser comparados, permitindo a avaliação real do impacto de alterações na curva-chave do posto nos estudos hidrológicos do empreendimento.

A partir daí, realizam-se os dimensionamentos de vazões máximas e de vazões mínimas, adotando os procedimentos similares aos previstos no estudo de viabilidade desta usina e a seguir descritos:

Estudo de Vazões Máximas Anuais

Para cada ano do período de operação da estação fluviométrica de referência, deve-se identificar a vazão média diária máxima e, posteriormente, essas vazões devem ser relacionadas em ordem decrescente, visando ao cálculo dos respectivos tempos de recorrência, o qual empregam-se a fórmula de Gringorten adaptada.

$$TR = \frac{n + 0,12}{m - 0,44} \quad (4)$$

Onde:

- n Número total de valores da amostra;
 m Posição de um valor numa lista ordenada de forma decrescente;
 TR Tempo de recorrência em anos.

As vazões de cheias, os tempos de recorrência e os respectivos parâmetros estatísticos devem ser relacionados tanto para a série produzida para a curva-chave típica, quanto para a série com o emprego da curva-chave com restrições de registros em eventos extremos.

Para a seleção da distribuição de probabilidades a ser empregada, deve-se seguir a recomendação do “Guia para o Cálculo de Cheia de Projeto de Vertedouro” (MME/Eletróbrás, 1987), que preconiza a utilização da distribuição de Gumbel para séries com o coeficiente de assimetria inferior a 1,5, caso dos dados em análise.

Em face do acima exposto, nos ajustes da distribuição estatística foram consideradas as equações 5 e 6 abaixo:

$$Q_{TR}^{md} = \mu - \alpha \left(\ln \left(- \ln \left(\frac{TR - 1}{TR} \right) \right) \right) \quad (5)$$

α 0,78S

μ Q - 0,577 α

Onde:

- Q_{TR}^{md} Vazão média diária com tempo de recorrência TR (m³/s);
 Q Média das vazões médias diárias máximas (m³/s);
 S Desvio padrão das vazões médias diárias máximas (m³/s);
 TR Tempo de recorrência (anos).

Para uma avaliação do grau de aderência entre as distribuições ajustadas e as amostras, deve-se utilizar o teste de Kolmogorov – Smirnov, que tem como base a expressão 17:

$$D_2 = \max|F_x(x) - \hat{F}_x(x)| \quad (6)$$

Essa expressão reflete a diferença máxima entre as funções probabilidade acumulada empírica e teórica. A hipótese do teste à aderência é considerada boa quando o resultado da expressão supracitada é menor que um determinado valor crítico (D_2 crítico), tabelado em função do tamanho da amostra e do nível de significância adotado.

Desta mesma forma, devem ser calculadas para diferentes tempos de recorrência de vazões médias diárias máximas (Q_{TR}^{md}). As vazões máximas instantâneas (Q_{TR}^{mx}) correspondentes são obtidas pela fórmula de Fuller (equação 7), ou seja:

$$Q_{TR}^{mx} = Q_{TR}^{md} (1 + 2,66 A^{-0,3}) \quad (7)$$

Onde:

A Área de drenagem (km²).

Por fim, utilizando a relação entre as áreas de drenagem da estação fluviométrica de referência do aproveitamento, devem ser estimadas as vazões de cheias máximas anuais associadas a vários tempos de recorrência para o projeto da UHE adotada tanto com a curva-chave típica como com a curva-chave sem os registros de evento extremo, possibilitando a comparação dos resultados de cheias no dimensionamento hidráulico do vertedouro e demais estruturas hidráulicas.

Estudo de Vazões Mínimas Anuais

Os estudos de vazões mínimas são empregados nos estudos ambientais de vazão ecológica ou sanitária, nos estudos de enchimento do reservatório e também nos estudos de motorização, principalmente, para definição do número de unidades geradoras para melhor aproveitamento da operação de uma UHE.

Como é comum os projetos de hidrelétricas adotarem o estudo de permanência de 95% das vazões médias diárias observadas para subsidiar o estudo de enchimento do reservatório, conforme o estabelecido no Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos de 2009 (ANA, 2009). Considerando

também que vários estados adotam o critério de percentual do valor de vazão a partir do estudo de permanências para a definição de vazão sanitária ou ecológica e um dos critérios para avaliar o número e o porte das unidades geradoras de um aproveitamento hidrelétrico também é baseado neste parâmetros. O presente estudo propõe apenas a avaliação de 50% da vazão de 95% de frequência nas médias diárias como parâmetro para avaliação do impacto da curva-chave nos estudos de vazão mínima.

Assim, foram geradas informações necessárias para as avaliações energéticas e alguns dos impactos mais relevantes no dimensionamento dos equipamentos e obras civis empregados nos itens a seguir.

4.5.2. ESTUDOS ENERGÉTICOS

Uma maior confiabilidade dos estudos energéticos é de extrema importância ao equilíbrio do setor elétrico, reduzindo conflitos existentes aos empreendedores pertencentes ao Mecanismo de Realocação de Energia (MRE).

O MRE é uma regra criada pelo mercado elétrico para dividir e mitigar o risco hidrológico do empreendedor de hidrelétricas. Ele realoca energia do empreendedor que gerou mais que o previsto em seu projeto para suprir os déficits dos empreendedores que não conseguiram gerar o volume de energia previsto nos respectivos estudos, provendo, assim, maior segurança aqueles que decidem investir no setor hidrelétrico devido a minimização do risco hidrológico.

Porém, todos os geradores que aderiram ao MRE têm que entregar ao sistema o volume de energia previstos no somatório dos respectivos contratos, caso isso não aconteça, existirá uma “dívida” ou um “crédito” de todos os geradores de energia hidrelétrica com os seus clientes, neste caso, existirá a necessidade dos geradores, como um bloco do MRE, comprar energia para honrar os seus contratos ou, caso haja sobra de energia, haverá um volume disponível que pode ser comercializado e dividido pelos participantes deste bloco.

Este conceito é conhecido como *Generation Scaling Factor (GSF)* que corresponde à relação entre o volume de energia que é gerado pelas usinas e sua garantia física.

A garantia física ou energia assegurada é a quantidade de energia mínima que

uma hidrelétrica pode gerar e fornecer durante um certo período as simulações de garantia física no Brasil são realizadas por softwares produzidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) em que se calcula a contribuição deste aproveitamento hidrelétrico ao sistema mesmo em períodos críticos, na prática, o valor se assemelha muito com a energia firme do empreendimento, trata-se da energia a qual o empreendimento consegue entregar ao sistema, mesmo durante períodos hidrológicos críticos.

No Brasil, a legislação permite que os contratos do setor elétrico sejam firmados com base na garantia física, para assegurar que o fornecimento contemple a todos. Por força da Lei nº 10.848/2004, cada hidrelétrica tem sua garantia física determinada a partir das condições do longo prazo considerando a variabilidade hidrológica à qual uma usina está submetida e o que cada usina pode fornecer ao sistema (potência instalada), assumindo um critério de risco do não atendimento. Na prática, isto é obtido por meio de simulações da operação, utilizando séries sintéticas de energia afluyente calculadas com base nos estudos hidrológicos, parâmetros hidráulicos do reservatório e do canal de fuga, perdas hidráulicas, características do conjunto turbina-gerador e do sistema de transmissão, além dos indicadores de manutenção do empreendimento.

Recentemente, o mercado de energia brasileiro estabeleceu o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) em bases horárias que é utilizado para valorar os volumes de energia liquidados na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), trata-se do órgão que regula os contratos de compra e venda de energia.

O PLD determina os preços do mercado de curto prazo e é a base para o mercado livre de energia, sendo a referência de preços para os contratos estabelecidos no ambiente de contratação livre.

Para viabilizar a operação do mercado com preços a base horária, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), desenvolveu e implantou o modelo de otimização do sistema elétrico nomeado pelo CEPEL como DESSEM, trata-se de um programa que simula as condições de planejamento do sistema em curto prazo fornecendo suporte técnico às operações do ONS e também para a precificação horária da energia.

Um dos benefícios do DESSEM é a redução na assimetria das informações, tornando o processo mais transparente e reproduzível a todos os agentes. Porém, este

modelo horário demanda também informações de projeto e de operação mais precisos pois qualquer desconformidade dos dados operacionais do empreendimento pode gerar erros no planejamento da operação do sistema e, conseqüentemente, na ordem do mérito de geração podendo influenciar o preço horário da energia.

Esse fato também requer maior assertividade dos dados de projeto dos empreendimentos tanto para o dimensionamento quanto para a operação do sistema, quando baseados nas informações de estações fluviométricas de referência.

Por tudo o exposto, torna-se cada vez mais importante o ajuste das curvas-chave empregadas no projeto e operação das usinas hidrelétricas, evidenciando as contribuições do equipamento VAS à qualidade da geração hidrelétrica, além da minimização dos riscos hidrológicos e dos custos de construção e remuneração do ativo.

Os estudos energéticos de usinas baixa queda devem ser avaliados também a partir do impacto causado pela alteração do polinômio do canal de fuga, além da série histórica de vazões.

A simulação de energia firme e garantia física impactadas pela alteração da série histórica de vazões e do polinômio do canal de fuga devem ser realizadas para o aproveitamento hidrelétrico adotado e após a recriação de toda a série histórica de vazões.

O presente estudo sugere que esta simulação energética seja realizada com o emprego do sistema *Python Package Applied to the Planning of the Operation of Energy Systems* (PySDDP), esta preferência se dá por este sistema ser gratuito, de uso acadêmico e simular condições similares aos sistemas computacionais de simulação empregados pela EPE para suporte ao cálculo de garantias físicas, tais como o NEWAVE e SUIISHI-O, além dos sistemas computacionais de simulação do planejamento energético DECOMP e DESSEM, estes de uso prioritário do ONS.

Desenvolvido no âmbito do P&D realizado com a UFJF para a viabilização de um veículo autônomo para medição de descargas líquidas, houve a possibilidade de apoiar-se o desenvolvimento da toolbox PySDDP pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE) para realizar simulações energéticas e avaliar os benefícios do VAS para os estudos energéticos de usinas hidrelétricas.

O PySDDP é um *toolbox* da linguagem *Python*, *open source*, a qual pode ser utilizada em qualquer plataforma de desenvolvimento utilizando a linguagem *Python*.

Ela está inserida no repositório de softwares de terceiros oficial da linguagem *Python* denominado PyPI. Uma abordagem muito interessante é a sua utilização no ambiente *Google Colab* a partir de qualquer navegador de internet ou *browser* em uma infraestrutura em nuvem disponibilizada pela própria Google.

O objetivo do PySDDP é que ele seja uma ferramenta gratuita para funcionar como um laboratório virtual para estudos de planejamento da operação médio/longo/curto prazo, bem como, pré-operação. Para tanto, ele é capaz de ler/escrever diretamente informações nos decks de dados dos modelos oficiais (NEWAVE/DESSEM).

Adicionalmente, o PySDDP possui uma classe denominada "*classroom*" que possui as principais metodologias de otimização aplicadas a problemas de instância mínima com apenas uma ou duas usinas hidrelétricas. Por meio desta funcionalidade, é possível estudar e compreender com detalhes o funcionamento da principal metodologia utilizada para avaliar o planejamento da operação e expansão que é a Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE), em inglês, *Stochastic Dual Dynamic Programming* (SDDP), a qual é responsável pela origem do nome PySDDP.

A partir da leitura do deck oficial do modelo NEWAVE (dados oficiais da Programação Mensal de Operação - PMO), elaborado pelo ONS e possui informações detalhadas de todas as usinas hidrelétricas brasileiras é possível também avaliar o impacto na energia firme e garantia física através da *toolbox* PySDDP.

Existe uma classe na *toolbox* PySDDP que representa as restrições operativas no problema de planejamento energético de sistemas hidrotérmicos conectados ao SIN e operados pelo ONS.

A metodologia utilizada no PYSDDP é análoga àquelas empregadas pelos softwares oficiais para o cálculo de energia firme e garantia física do setor elétrico brasileiro tais como SUIHI-O, NEWAVE e, para simulações de planejamento da operação, DECOMP e DESSEM, que calculam o PLD, todos os softwares citados foram desenvolvidos pelo CEPEL e são empregados pela EPE, pelo ONS e pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

Os cálculos são realizados por meio do PySDDP pois este modelo permite alterar-se os dados cadastrais das usinas hidrelétricas de forma versátil e, também, fazer ajustes no modelo de otimização de acordo com os objetivos do presente trabalho.

Assim, os dados devem ser enviados para análise no PySDDP tais como: a série histórica de vazões atualizada da UHE adotada com a nova curva-chave gerada e também os polinômios de jusante simulados para o aproveitamento em estudo.

O PySDDP também comunica com os dados oficiais, baixando os Decks (informações de entrada do modelo) definidos pela EPE em suas últimas modelagens, portanto, entende-se que todos os parâmetros de entrada na modelagem e aqui omitidos, são empregados os dados oficiais disponíveis nos respectivos decks.

Assim, propõe-se que sejam avaliadas as simulações para os seguintes cenários em conformidade com os procedimentos apresentados anteriormente:

- Impacto deste aproveitamento no período crítico do sistema elétrico brasileiro usando:
 - a série de vazão do EVTE;
 - a série de vazão gerada com a curva-chave típica e,
 - a série de vazão gerada a partir da curva-chave com ausência de registros dos eventos hidrológicos extremos;
- Calculo da energia firme com o uso da série de vazões e polinômio de jusante previstos no deck oficial da EPE (similar ao do EVTE);
- Calculo da energia firme com o uso da série de vazões calculadas a partir da curva-chave típica e polinômio de jusante estabelecido no deck oficial da EPE (similar ao do EVTE);
- Calculo da energia firme com o uso da série de vazões calculadas a partir da curva-chave construída sem o registro de eventos extremos e polinômio de jusante estabelecido no deck oficial da EPE (similar ao do EVTE);
- Calculo da energia firme com o uso da série de vazões previstos no deck oficial da EPE (similar ao do EVTE) e polinômio de jusante calculado com base no registro completo das campanhas de campo realizadas pelo CPRM e disponíveis no Hidroweb;
- Calculo da energia firme com o uso da série de vazões previstos no deck oficial da EPE (similar ao do EVTE) e polinômio de jusante calculado com base na amostragem reduzida das campanhas de campo a n=20;
- Calculo da energia firme com o uso da série de vazões previstos no deck oficial da EPE (similar ao do EVTE) e polinômio de jusante calculado

com base na amostragem reduzida das campanhas de campo a $n=15$;

- Calculo da energia firme com o uso da série de vazões previstos no deck oficial da EPE (similar ao do EVTE) e polinômio de jusante calculado com base na amostragem reduzida das campanhas de campo a $n=10$;
- Calculo da energia firme com o uso da série de vazões previstos no deck oficial da EPE (similar ao do EVTE) e polinômio de jusante calculado com base na amostragem reduzida das campanhas de campo a $n=5$;

Nesta metodologia, avalia-se a energia firme, pois a garantia física depende de outros atributos sistêmicos e pode variar a depender da simulação realizada pela EPE. Porém a energia firme retrata um valor muito próximo da garantia física, portanto, o seu uso para a comparação dos impactos nos estudos energéticos não fica prejudicado em nada.

Este sistema PySDDP também calcula a geração de energia desta UHE durante o período crítico do sistema elétrico, mas propõe-se que este dado não seja analisado no presente estudo pois ele interfere na energia firme e a análise deste parâmetro é realizado de forma indireta.

4.5.3. DIMENSIONAMENTO DE OBRAS CIVIS E HIDROMECAÑICOS

4.5.3.1. Obras de Desvio

Ao se alterar a série hidrológica e/ou a curva-chave no eixo do empreendimento tem-se, por consequência, a alteração também do dimensionamento das estruturas de desvio do rio.

Para se estimar os impactos da alteração nesta estrutura provisória, calculou-se o dimensionamento das estruturas de desvio para um nível d'água do rio referente a vazão com tempo de recorrência de 50 anos, vazão adotada em projetos de desvio do rio quando a obra não apresenta risco à vida humana, mas se prevê danos importantes à obra, segundo ELETROBRAS (2003).

Devido a esta prática do setor, para a UHE adotada, sugere-se que seja calculada a vazão de dimensionamento das obras de desvio fixada a um tempo de retorno de 50 anos, calculada a partir dos estudos de cheias máximas detalhados anteriormente.

A partir dos resultados, compara-se existe alteração significativa na vazão de

dimensionamento das obras de desvio entre os valores calculados com a série histórica gerada com a curva-chave típica e também com a série histórica de vazão calculada com a curvas-chave construída sem os valores extremos de vazão medidos em campo.

4.5.3.2. Dimensionamento do Vertedouro

Conforme apresentado anteriormente, de forma geral os impactos nas estruturas do vertedouro dependem do estudo hidrológico de vazões máximas e do controle hidráulico de jusante quando o vertedouro for “afogado” por jusante.

Para o presente estudo decidiu-se por estimar o impacto no dimensionamento do vertedouro calculando apenas comparando a vazão decamilenar calculada com a série histórica de vazões original e as séries históricas de vazão sem a presença dos eventos extremos, empregando os procedimentos descritos ao longo desta metodologia para estas duas simulações.

Ao obter o resultado é possível comparar os impactos no dimensionamento de vertedouros devido a ausência destes dados extremos de vazão na confecção de curvas-chave dos postos de referência.

4.5.3.3. Dimensionamento da vazão mínima do aproveitamento

Para simplificar os cálculos e garantir uma estimativa devidamente embasada, sugere-se adotar a vazão mínima registrada na série histórica, pois este é o valor adotado pelos programas empregados no cálculo de garantia física quando não se determina a vazão mínima do aproveitamento.

Estes valores devem ser aquisitados nas séries históricas de vazão calculadas sob a mesma metodologia tanto para a curva-chave típica quanto para a curva-chave construída com ausência dos dados de vazão extrema.

4.5.3.4. Dimensionamento da Vazão Ecológica

Como a legislação de alguns estados brasileiros adotam como referência para definição da vazão ecológica o valor de 50% da vazão com permanência de 95%,

sugere-se adotar este critério para a avaliação desta vazão ecológica.

Assim, determina-se as curvas de permanências de vazões a partir das séries histórica de vazões médias mensais calculadas a partir o procedimento apresentado nesta metodologia.

Após o cálculo das séries históricas de vazões baseada na curva-chave típica e na curva-chave com ausência de medição hidrológica durante os eventos extremos de vazão. Obtém-se das respectivas curvas de permanência de vazões os valores equivalentes a 50% da vazão com 95% de permanências para ambas as séries históricas de vazão simuladas.

Assim, é possível identificar o potencial impacto ao longo da operação da UHE, especialmente, quando esta UHE é demandada pelo ONS para operar em período de ponta, pois as UHEs que fazem ponta do sistema, permanecem muito tempo defluindo a vazão mínima para manutenção da vida no rio a jusante do empreendimento.

Esta operação tende a ser potencializada devido ao aumento da geração intermitente na matriz elétrica brasileira, que demandará cada vez mais energia de ponta dos aproveitamentos hidrelétricos.

Por este motivo a vazão ecológica é um dos fatores que potencializam a ineficiência na geração de energia hidrelétrica, especialmente, quando esta é demandada a fazer atendimento de ponta do sistema elétrico.

4.5.3.5. Dimensionamento das Unidades Geradoras

Para se estimar o dimensionamento das unidades geradoras devem ser observados diversos parâmetros oriundos das série histórica de vazões e, conseqüentemente, da curva-chave obtida com todos os dados medidos em campo.

No presente estudo adotou-se observar o impacto dos polinômios de jusante simulados com baixa amostragem no dimensionamento das unidades geradoras e verificar se existe impacto no dimensionamento da altura de submergência das unidades geradoras adotadas no projeto bem como a redução de queda do empreendimento.

Para simplificação dos cálculos, propõe-se comparar apenas o cálculo da altura deck da casa de força para todos os cenários para uma vazão próxima a decamilenar estabelecida no EVTE ou do projeto original da UHE adotada.

Ao calcular a altura do deck da casa de força para cada cenário e utilizando esta mesma vazão de referência, pode se ter uma ideia do desvio verificado no dimensionamento do posicionamento das turbinas no projeto em consequência dos desvios possíveis de ocorrer devido ao tratamento dos dados hidrológicos e cálculos dos polinômios de jusante realizados pela projetista.

Para estas simulações sugere-se realizar o cálculo da curva-chave da estação de referência empregando a metodologia detalhada neste estudo e adotar estas curvas como o polinômio de jusante, caso o eixo do empreendimento esteja próximo da estação fluviométrica de referência.

Assim, deve-se calcular a curva-chave típica, as curvas-chave com amostragem reduzida ($n=20$, $n=14$, $n=10$ e $n=5$), bem como a curva-chave construída sem os registros de campo de eventos hidrológicos extremos. Também é possível lançar a curva-chave do posto fluviométrico de referência calculado e consistido pelo projeto (ou EVTE) da UHE adotada.

Com estas informações plotadas num único gráfico é possível avaliar o quão pode variar o estudo de dimensionamento das obras (provisórias ou definitivas) e equipamentos dimensionados a partir da variação da amostragem dos dados de campo que compõe as curvas-chave.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. SIMULAÇÕES NAS CURVAS-CHAVE

5.1.1. CURVA-CHAVE TÍPICA

Na simulação realizada para compor o presente estudo, a curva-chave típica foi gerada com base em 182 dados de medição de descarga líquida obtidos pelo CPRM entre 1977 e 2020, no apêndice 3 é apresentada a série histórica de vazão completa das medições realizadas em campo neste período, dados que tiveram origem no site Hidroweb em 2021.

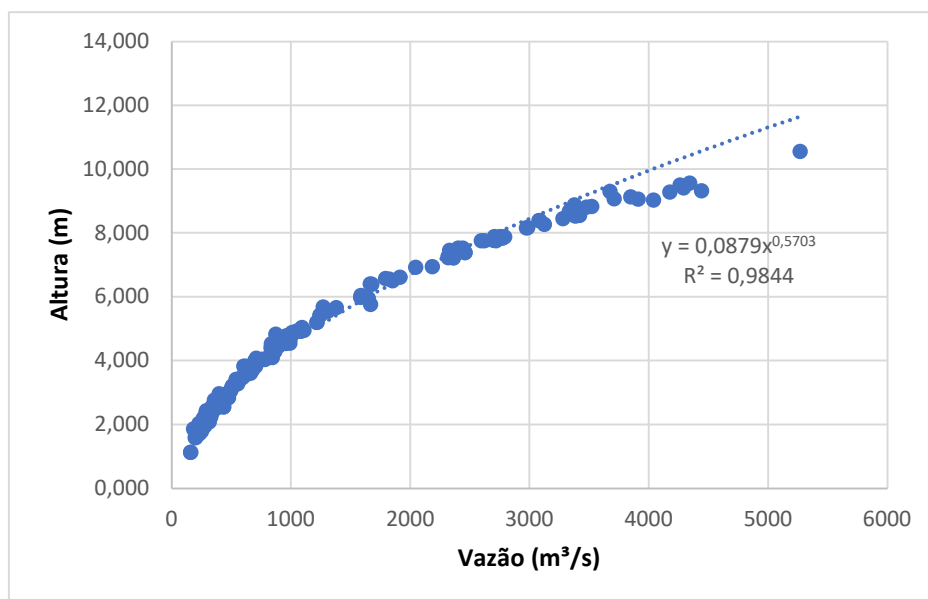
O histórico das medições das seções transversais empregadas nos estudos hidrológicos estão disponíveis na figura 14, onde não se identifica em nenhum momento a necessidade de dividir a curva-chave em diferentes tramos pois as seções topográficas do rio no ponto de monitoramento não apresentam variações significativas que justifique a adoção de novos tramos, exatamente como o adotado nos estudos hidrológicos do EVTE da UHE Tabajara, que utilizou estes mesmos dados de base.

Com base em toda esta amostragem, gerou-se a curva-chave típica conforme metodologia apresentada neste trabalho. Na tabela 2 abaixo encontram-se resumidos os parâmetros de cálculo da curva-chave típica e também, na figura 20, o gráfico desta curva-chave:

Tabela 2 - Parâmetros calculados da curva-chave típica do posto Tabajara.

	h(Q)	Q(h)	R²
a	0,0879	71,107	0,9844
b	0,5703	1,7535	
ho	1,00	1,00	

Figura 20 - Curva-chave típica do posto Tabajara.



5.1.2. CURVA-CHAVE COM AUSÊNCIA DE REGISTROS DE EVENTOS EXTREMOS

De acordo com a metodologia apresentada, foram removidos pontos ou nuvem de pontos de vazões extremas medidos em campo.

Da série histórica de medições de descargas líquidas foi identificado como valor máximo a vazão medida no dia 26/02/2019 no valor de 5.266 m³/s. Valor este, não considerado no estudo de viabilidade técnica da UHE Tabajara, que foi concluído no ano de 2016.

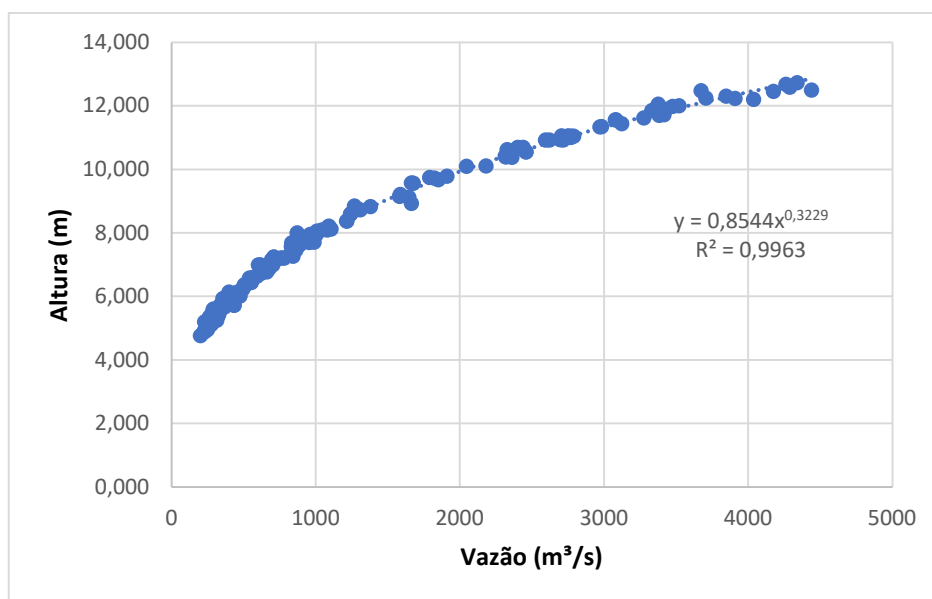
Como valores mínimos, foram identificadas duas medições realizadas no dia 13/10/1981 com vazões de 194 m³/s e 201 m³/s. Também foram removidos da série os registro de vazão de 181 m³/s obtido no dia 03/10/1995 e dois registros de vazão mínima iguais no valor de 156 e coletados no dia 01/10/1998.

Excluindo apenas estes seis registros de vazão obteve-se a seguinte curva-chave:

Tabela 3 - Parâmetros calculados da Curva-chave sem registros extremos – Posto Tabajara.

	$h(Q)$	$Q(h)$	R^2
a	0,8544	1,628	0,9963
b	0,3229	3,0974	
ho	-2,17	-2,17	

Figura 21 - Curva-chave sem registros extremos – Posto Tabajara.



5.1.3. BAIXA AMOSTRAGEM DE MEDIÇÕES

Conforme metodologia apresentada, o registro de baixa amostragem foi realizado a partir da remoção aleatória de medições de descargas líquidas presentes no histórico de vazão.

Para uma primeira simulação foram removidos da série histórica 162 registros, mantendo apenas 20 medições para a elaboração da curva-chave.

Numa segunda simulação, foram retirados de forma aleatória desta série, 5 registros adicionais, mantendo-se 15 medições para a elaboração das curvas-chave.

Repetiu-se o procedimento, retirando aleatoriamente outros 5 registros, formando uma amostragem de 10 medições para a elaboração da curva-chave.

Por fim, retirou-se mais 5 registros aleatórios, obtendo uma amostragem de 5 medições para a elaboração da curva-chave.

As amostras foram retiradas aleatoriamente, porém para simular o procedimento empregado comumente em estudos hidrológicos realizados por projetista, manteve-se apenas o critério de espaçar as os pontos amostrais ao longo do ano, preferencialmente, realizando campanhas de campo em todos os meses do ano.

Todos os registros das medições empregadas em cada uma destas amostragens são disponibilizados para consulta no apêndice 4.

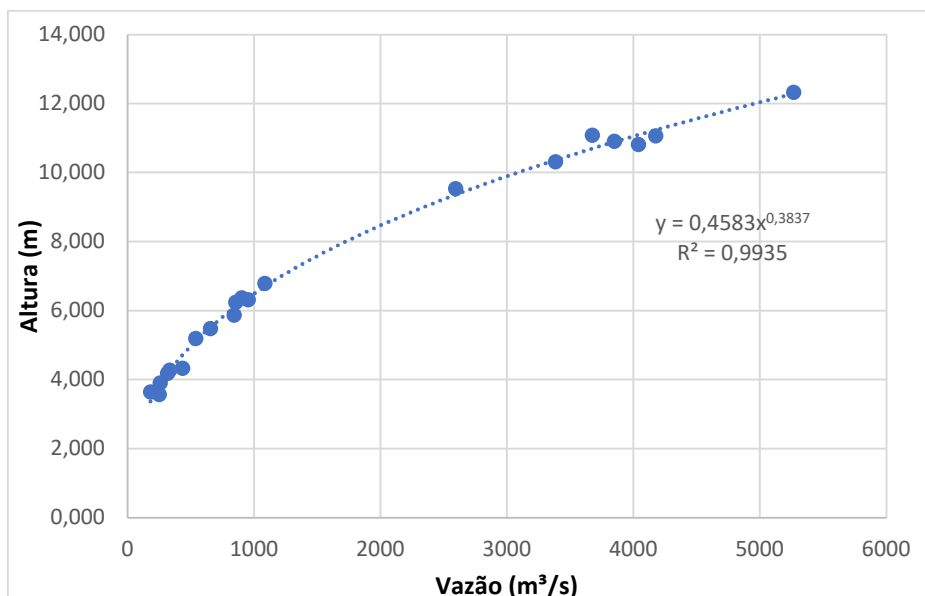
Traçando as novas curvas-chave, foram obtidos os gráficos das figuras 22 a 25:

20 medições (n=20):

Tabela 4 - Parâmetros calculados da Curva-chave com amostra reduzida n=20 – Posto Tabajara.

	h(Q)	Q(h)	R²
a	0,4583	7,637	0,9935
b	0,3837	2,6059	
ho	-0,79	-0,79	

Figura 22 - Curva-chave com amostra reduzida n=20 – Posto Tabajara.



15 medições (n=15):

Tabela 5 - Parâmetros calculados da Curva-chave com amostra reduzida n=15 – Posto Tabajara.

	h(Q)	Q(h)	R²
a	0,6246	3,785	0,9972
b	0,3535	2,8286	
ho	-1,44	-1,44	

Figura 23 - Curva-chave com amostra reduzida n=15 – Posto Tabajara.

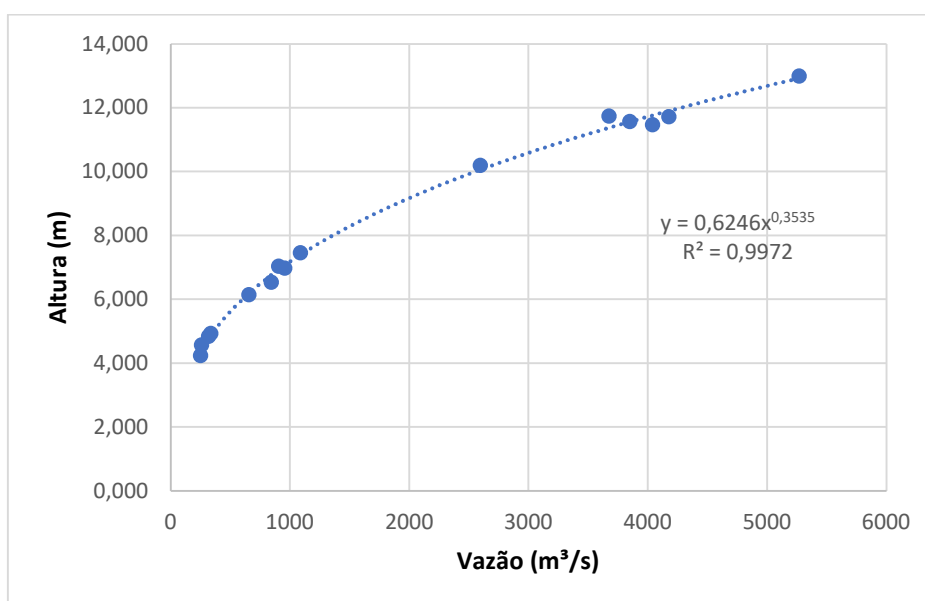
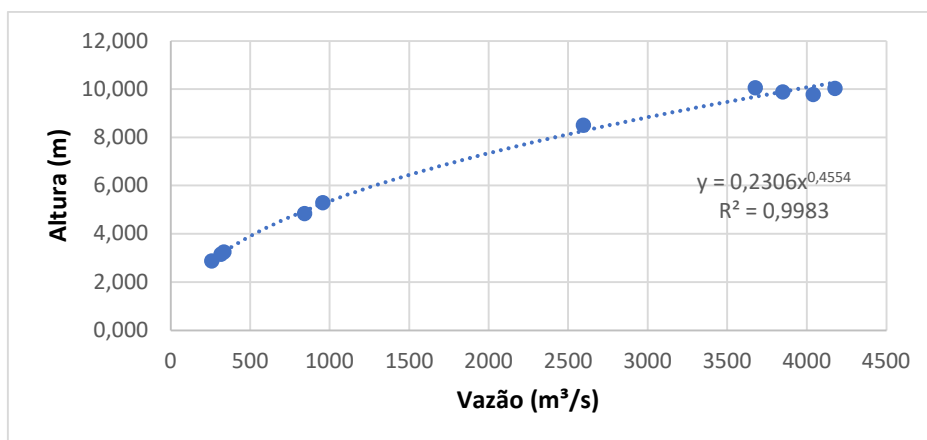
**10 medições (n=10):**

Tabela 6 - Parâmetros calculados da Curva-chave com amostra reduzida n=10 – Posto Tabajara.

	h(Q)	Q(h)	R²
a	0,2306	25,058	0,9983
b	0,4554	2,1956	
ho	0,23	0,23	

Figura 24 - Curva-chave com amostra reduzida n=10 – Posto Tabajara.

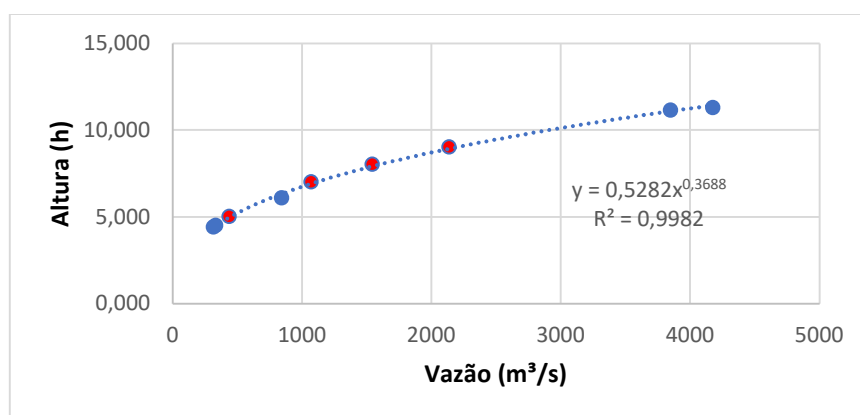


5 medições (n=5):

Tabela 7 - Parâmetros calculados da Curva-chave com amostra reduzida n=5 – Posto Tabajara.

	h(Q)	Q(h)	R²
a	0,5282	5,643	0,9982
b	0,3688	2,7114	
ho	-1,02	-1,02	

Figura 25 - Curva-chave com amostra reduzida n=5 – Posto Tabajara.

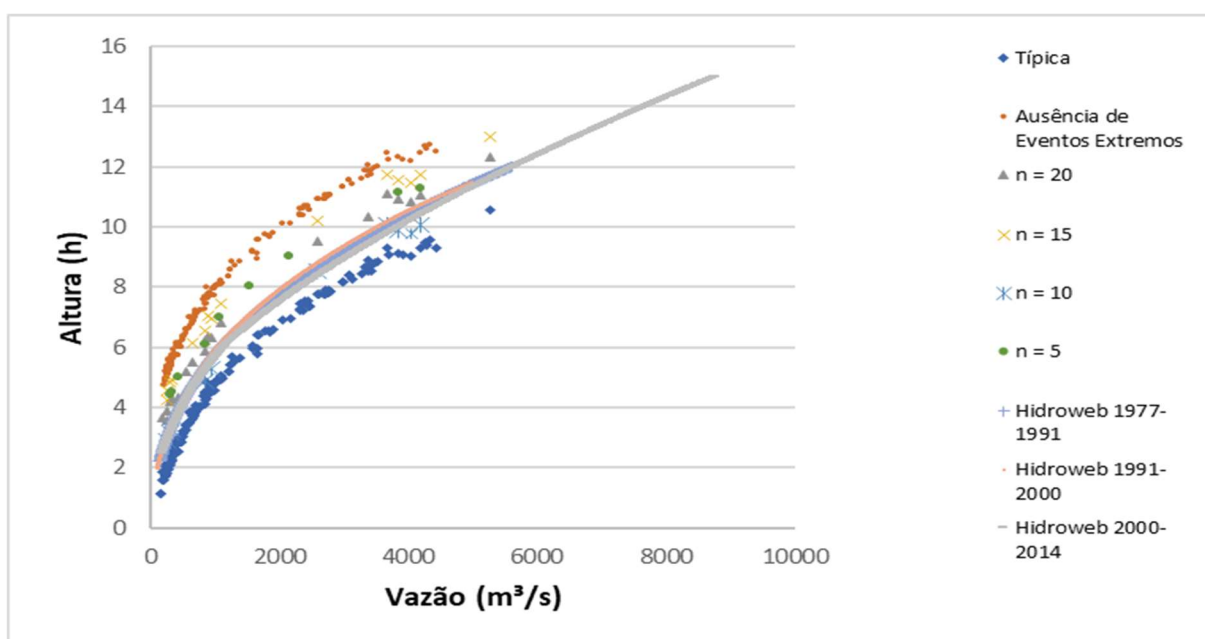


Devido a amostragem insuficiente para convergência do “solver” e definição dos parâmetros da curva-chave, foi necessário inserir no gráfico alguns pontos sintéticos para gerar o mínimo de informação necessária para a referida convergência na amostragem n=5. Esta técnica é amplamente empregada nos estudos de engenharia para determinação de curva-chave quando os dados disponíveis não são suficientes ou são de má qualidade.

5.1.4. COMPARATIVO ENTRE AS CURVAS-CHAVE DISPONÍVEIS

A figura 26 abaixo resume as diferenças gráficas obtidas nas diversas curvas-chave simuladas neste estudo bem como o comparativo deste com as curvas-chave original da ANA e a do estudo hidrológico do EVTE.

Figura 26 .- Comparativo entre as curvas-chave calculadas e as curvas do EVTE para a estação fluviométrica de referência.



O simples fato de retirar os eventos extremos fez com que toda a curva-chave subisse, assim como a redução aleatória da amostragem passou a oferecer grandes desvios à curva-chave.

A Hidroweb dividiu as curvas em 3 espaços temporais, apenas este fato fez com que descolasse os valores da curva-chave típica que considerou em sua construção toda a série histórica das medições, porém, mesmo assim, resguardam alguma similaridade entre elas, especialmente quando se compara as respectivas linhas de tendência.

5.2. REVISÃO DO DIMENSIONAMENTO HIDROLÓGICO

5.2.1. NOVAS SÉRIES DE VAZÕES

As tabelas 8 e 9 abaixo segue o resumo das séries de vazão obtidas a partir das curvas-chave calculadas:

Série de vazão com a curva-chave típica:

Tabela 8 - Resumo da série de vazões traçadas com a curva-chave típica do posto Tabajara.

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	q1t
mínimo	1170	1395	1395	1395	1187	693	345	190	134	162	260	260	134
média	2238	2768	3165	2700	1701	1076	704	437	387	403	723	1378	1470
máximo	3297	3741	3960	3719	3255	3255	3255	2242	2242	1395	1466	2801	3960

Série de vazão com a curva-chave com ausência de registros de eventos extremos:

Tabela 9 - Resumo da série de vazões traçadas com a curva-chave com ausência de registros de eventos extremos no posto Tabajara.

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	q1t
mínimo	1074	1298	1298	1298	1085	629	345	227	184	206	279	279	184
média	2288	2972	3508	2876	1648	1000	670	433	395	395	667	1322	1511
máximo	3679	4331	4677	4318	3616	3616	3616	2258	2258	1298	1387	2987	4677

As séries históricas completas estão apresentadas no apêndice 05 desta dissertação. Na avaliação dos valores de vazão mínima, máxima e vazão média de longo termo, é possível constatar aumento de vazão quando a série histórica foi traçada sem registros de eventos extremos, sendo uma um valor de 38 % maior para a vazão mínima média mensal registrada, 3% maior para a vazão média de longo termo mensal e de 18% superior para a vazão máxima média mensal anual.

5.2.2. CURVA DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES

Também foram reconstituídas as curvas de permanência de vazões mensais considerando a reconstituição da série histórica de vazões a partir destes dois cenários de curvas-chave.

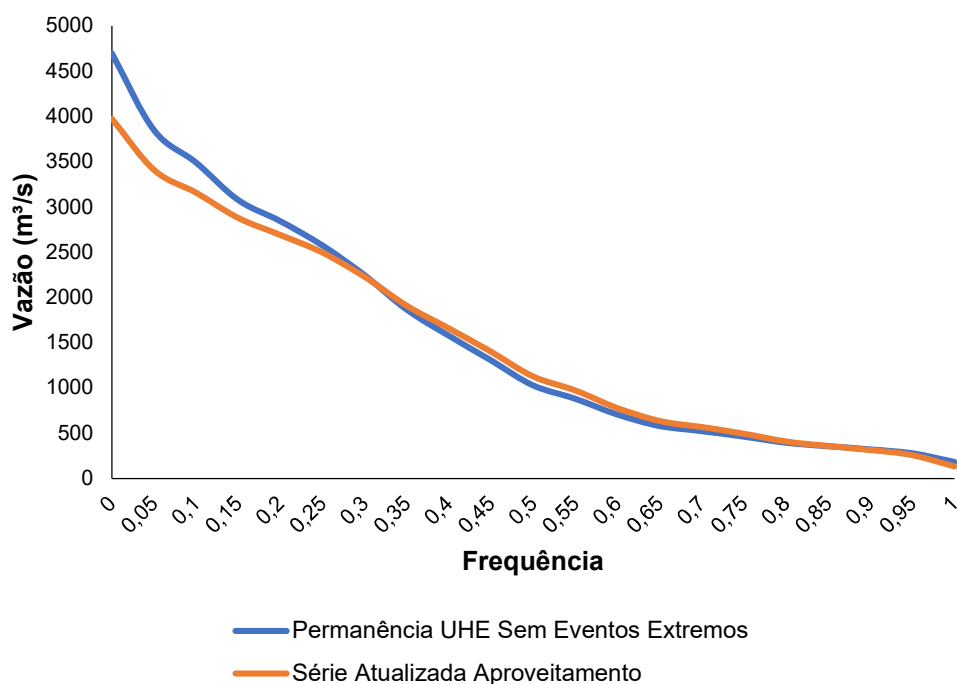
Os cálculos das curvas de permanência de vazões apresentadas a seguir já contemplam a transposição de vazões para o eixo da UHE Tabajara na posição

proposta pelo estudo de viabilidade técnica e econômica.

Tabela 10 - Comparativo entre as permanências de vazões.

	CPV com série atualizada	CPV aproveitamento sem eventos extremos	Diferença
Permanência (%)	Vazão (m³/s)	Vazão (m³/s)	(%)
0%	3.975	4694	1,18
5%	3.407	3845	1,13
10%	3.158	3491	1,11
15%	2.877	3075	1,07
Permanência (%)	Vazão (m³/s)	Vazão (m³/s)	(%)
20%	2.690	2844	1,06
25%	2.494	2573	1,03
30%	2.225	2243	1,01
35%	1.908	1865	0,98
40%	1.658	1576	0,95
45%	1.400	1304	0,93
50%	1.129	1028	0,91
55%	973	881	0,91
60%	779	707	0,91
65%	636	581	0,91
70%	567	524	0,92
75%	495	463	0,94
80%	408	395	0,97
85%	360	357	0,99
90%	316	323	1,02
95%	258	278	1,08
100%	134	185	1,38

Figura 27 - Comparativo gráfico entre as curvas de permanência de vazões.



Para a UHE Tabajara, a curva de permanência de vazões produzida com uma curva-chave com ausência de medições de descargas líquidas durante eventos hidrológicos extremos retratou um considerável aumento de vazões máximas, superior a 700 m³/s, quando comparados os resultados obtidos por meio da série histórica de vazões produzidas com a curva-chave típica.

Para as vazões com frequências intermediárias, a curva de permanência sem os registros de eventos extremos apresentou-se com valores de vazão inferior àquelas produzidas com base na curva-chave típica.

Para as vazões mínimas, portanto, com mais permanência, os valores produzidos com base na curva-chave sem os registros de eventos extremos, voltou a apresentar valores maiores que os valores construídos com base na curva-chave típica.

Para o dimensionamento de uma usina hidrelétrica, este comparativo é muito importante, pois diversas estruturas se baseiam nestas informações, no capítulo de revisão do dimensionamento hidráulico, estas análises serão mais bem detalhadas.

5.2.3. ATUALIZAÇÃO DAS VAZÕES MÁXIMAS

A atualização dos estudos de vazão máxima foram calculados com base na série histórica mensal de vazões e transpostos para o eixo da UHE Tabajara sugerido pelo Estudo de viabilidade e, como em todos os estudos hidrológicos realizados na presente dissertação, foram produzidos a partir da série histórica de vazões calculadas com base na curva-chave sem os registros de eventos extremos e com todos os registros de medição de descarga líquida disponível no posto fluviométrico Tabajara.

Na tabela 11 são apresentados os parâmetros estatísticos das séries de vazões máximas anuais na estação Tabajara:

Tabela 11 - Parâmetros estatísticos das séries de vazões máximas anuais da estação Tabajara

	Estatísticas	
	Curva-chave típica	Curva-chave com ausência de eventos extremos
Nº eventos	43	43
Máxima	3960	4677
Média	3234	3608

Mínima	1395	1298
Desvio Padrão	452	622
Coef. Variação	0,140	0,172
Assimetria	-1,587	-1,149

A simulação do grau de aderência também foi satisfatória, indicando a hipótese de adequação do ajuste para um nível de significância de 2,5% em ambas as séries de vazão.

Ao aplicar a metodologia de cálculos das vazões máximas apresentados anteriormente, obteve-se os seguintes ajustes da distribuição Gumbel às vazões de cheia já transpostas para o eixo proposto pelo estudo de inventário da UHE Tabajara, e foram obtidos os gráficos das figuras 28 e 29:

Figura 28 - Ajuste da distribuição de Gumbel às vazões de cheia – Série baseada na curva-chave típica.

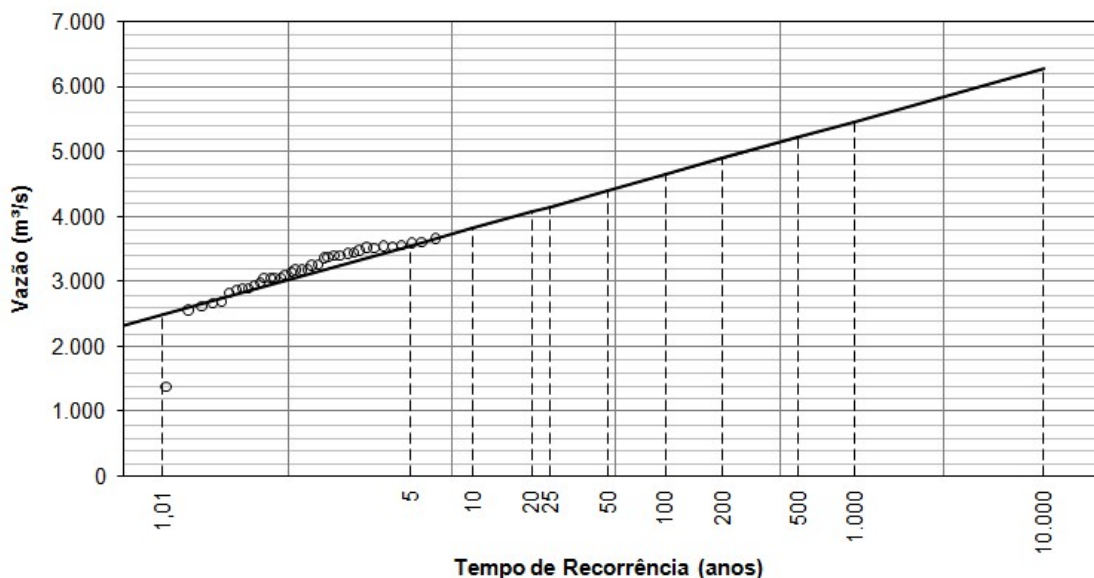
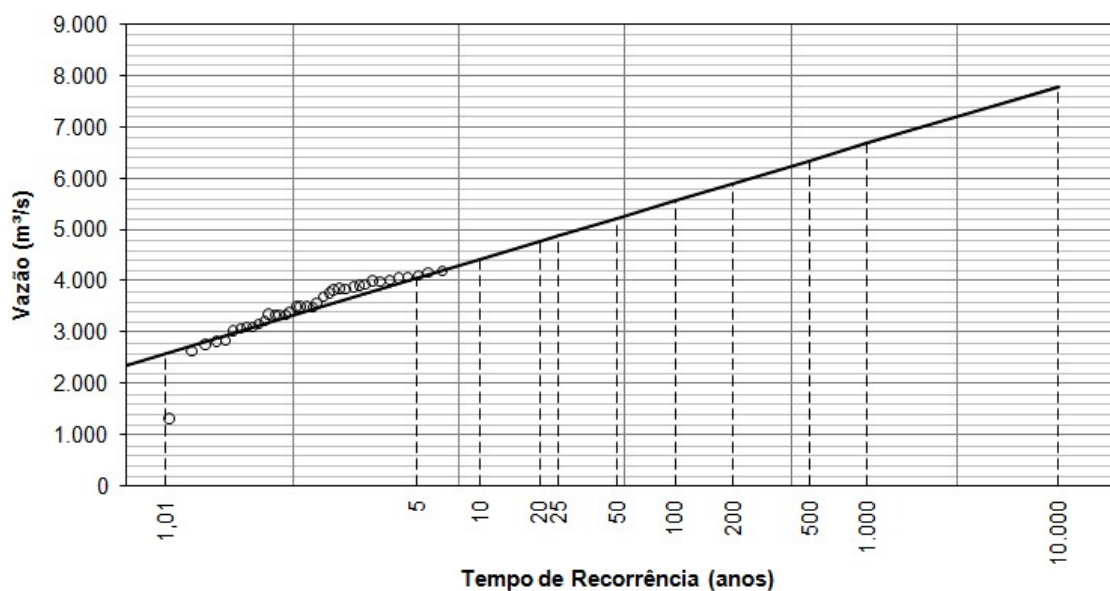


Figura 29 - Ajuste da distribuição de Gumbel às vazões de cheia – Série baseada na curva-chave com ausência de eventos extremos.



A tabela 12 a seguir resume os resultados dos cálculos de vazão máxima instantânea do projeto viabilizando, assim, a comparação do impacto da construção das curvas-chave às estruturas de projetos hidrelétricos que demandam os estudos de cheias em seu dimensionamento.

Tabela 12 - Valores de vazão instantânea máxima pelo método de Gumbel nos dois cenários de construção de curva-chave.

AHE Tabajara				
TR (anos)	Curva-chave típica		Curva-chave com ausência de eventos extremos	Diferença
	Risco	Vazão Instantânea (m ³ /s)	Vazão Instantânea (m ³ /s)	(%)
2	0,5	3.480	3.860	1,11
5	0,2	3.920	4.470	1,14
10	0,1	4.210	4.870	1,16
15	0,067	4.380	5.100	1,16
20	0,05	4.490	5.250	1,17
25	0,04	4.580	5.380	1,17
50	0,02	4.850	5.750	1,19
100	0,01	5.130	6.130	1,19
200	0,005	5.400	6.500	1,20
500	0,002	5.750	6.990	1,22
1000	0,001	6.020	7.360	1,22
5000	0,0002	6.650	8.220	1,24
10000	0,0001	6.920	8.590	1,24

A tabela 12, permite observar que a ausência de medições de descargas líquidas durante eventos extremos na construção da curva-chave impacta diretamente nos cálculos de vazões máximas.

No caso específico da UHE Tabajara, os desvios são maiores para os eventos mais extremos de cheia. Assim, a série histórica de vazões produzidas com a curva-chave apresentando ausência de informações traduziu em valores de vazões máximas superior em até 24% para vazões com tempo de recorrência acima de 5.000 anos e em 11% as cheias com tempo de recorrência de 2 anos quando comparados com a série histórica de vazões produzidas com a curva-chave típica.

5.2.4. ATUALIZAÇÃO DAS VAZÕES MÍNIMAS

Com base na tabela 10 e na figura 27, foi possível verificar a diferença entre a vazão com recorrência de 95%, que, com o uso dos dados sem a presença de eventos extremos para a construção da curva-chave, a vazão calculada foi de 258 m³/s e a mesma permanência de vazões calculada a partir da curva-chave típica, o valor foi de 278 m³/s.

Trata-se de uma diferença 8%, 20 m/s³, menor no histórico de dados gerados a partir da curva-chave sem registros eventos hidrológicos extremos, fato que pode alterar significativamente o dimensionamento das estruturas que dependem desta informação.

5.3. REVISÃO DO DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Para viabilizar o comparativo entre as simulações hidráulicas e hidrológicas apresentadas a seguir é necessário ressaltar que, para o desenvolvimento do EVTE, Furnas com o suporte da empresa de engenharia UFC, realizaram diversas campanhas de campo complementares com a existência de novos pontos de máxima vazão medidos em campo. Também deve se ressaltar que o presente estudo utilizou a série histórica de dados até 2019, quando o EVTE utilizou dados até meados de 2015.

O principal ponto a ser considerado é que o EVTE utilizou série diária dos dados de vazão enquanto os dados da curva-chave típica adotou, por simplificação dos cálculos, a série histórica mensal. Além disso, o EVTE realizou um tratamento de consistência de dados e preenchimento de falhas mais completo que o presente estudo.

Apesar disso, é possível obter algumas informações relevantes destes comparativos. A disponibilidade de dados de eventos extremos medidos em campo desloca o cálculo do tempo de retorno para cima ou para baixo a depender da intensidade dos eventos medidos em campo, fazendo variar significativamente o valor da vazão de dimensionamento das estruturas da UHE em análise.

Também é importante ressaltar a grande diferença obtida quando são adotados série de médias diárias de vazões e séries mensais de vazões.

5.3.1. ESTRUTURA DE DESVIO DO RIO

A tabela 13 a seguir apresenta o resumo dos resultados dos estudos hidrológicos de cheias empregado para o dimensionamento das obras de desvio, em que foi adotada a vazão com TR de 50 anos calculados para a vazão instantânea no EVTE da UHE Tabajara, com uso da curva-chave típica e com uso da curva-chave

com ausência dos registros de eventos hidrológicos extremos. Estes cálculos foram realizados para o eixo do aproveitamento previsto no EVTE, nesta condição os resultados são listados na tabela 13:

Tabela 13 - Comparativo de vazões instantâneas para TR de 50 anos

Vazão instantânea com o tempo de retorno de 50 anos (m³/s)		
EVTE	Curva-chave típica	Curva-chave com ausência de eventos extremos
7010	4.850	5.750

No caso do presente estudo, os dados do EVTE apontam para uma estrutura maior e mais robusta das obras de desvio do rio. Com a curva-chave típica, este valor de vazão reduz em, aproximadamente, 30%, incluindo neste montante as particularidades de cálculo apresentadas acima.

Quando se analisa somente o valor encontrado na curva-chave típica e a curva-chave com ausência de eventos extremos, identifica-se que existe um aumento estimado de vazão em 19%.

Uma vez que estas últimas foram calculadas com o mesmo procedimentos, pode-se afirmar que as diferenças impactam diretamente no porte das obras de desvio e exposição das mesmas a eventos hidrológicos extremos, influenciando significativamente os custos e riscos associados a estas obras.

5.3.2. VERTEDOURO

A tabela 14 apresenta o resumo dos resultados dos estudos hidrológicos de cheias para o dimensionamento do vertedouro, em que foi adotada a vazão com TR de 10.000 anos calculados para a vazão instantânea no EVTE da UHE Tabajara, com uso da curva-chave típica e com uso da curva-chave com ausência dos registros de eventos hidrológicos extremos. Estes cálculos foram realizados para o eixo do aproveitamento previsto no EVTE, nesta condição são apresentados os resultados na tabela 14:

Tabela 14 - Comparativo de vazões instantâneas para TR de 50 anos.

Vazão instantânea com o tempo de retorno de 10.000 anos (m³/s)		
EVTE	Curva-chave típica	Curva-chave com ausência de eventos extremos
10.570	6.920	8.590

Ao comparar as vazões extremas empregadas no dimensionamento do vertedouro, observa-se que o EVTE apresenta a maior vazão de dimensionamento de todas as demais simulações, quase 35% superior à vazão decamilenar calculada com base na curva-chave típica, ressaltando que este item considera o uso de séries de vazão média diária para o EVTE e séries de vazão média mensal para as demais simulações.

Quando se compara apenas os resultados obtidos com a curva-chave típica com a curva-chave apresentando ausência de eventos hidrológicos extremos, portanto, calculadas com o mesmo procedimento, verifica-se uma diferença de 24% entre eles, sendo o valor calculado com a curva-chave típica menor que os dados da curva-chave que considera os eventos extremos.

Como o dimensionamento do vertedouro é um dos pontos que mais impactam financeiramente o projeto de uma usina hidrelétrica, pode-se perceber claramente o quão importante é a curva-chave e os respectivos tratamentos hidrológicos não apenas no dimensionamento da UHE, mas também na consequente viabilidade econômica do empreendimento.

Por este motivo o investimento em estudos básicos de hidrologia se faz essencial à competitividade do empreendimento nos leilões de aproveitamentos hidroenergéticos e também na confiabilidade da obra durante a sua operação.

5.3.3. VAZÃO MÍNIMA DO APROVEITAMENTO

Para o comparativo entre as vazões mínimas do aproveitamento identificou-se o menor registro de vazão média diária nas séries históricas calculadas pelo EVTE, pela simulação com uso da curva-chave típica e pelo uso da curva-chave com ausência de eventos extremos, a seguir é apresentada a tabela 15 com a apresentação destes resultados:

Tabela 15 - Vazão mínima observada na série histórica.

Vazão mínima observada (m³/s)		
EVTE	Curva-chave típica	Curva-chave com ausência de eventos extremos
179	134	185

Com base nestas informações é possível identificar que a curva-chave típica apresentou vazão mínima observada menor que a vazão do EVTE em , aproximadamente, 33%, deve ser enfatizado que as campanhas adicionais realizadas no EVTE por Furnas não obtiveram valores extremos de seca quando comparados aos dados presentes no histórico de medições da ANA.

Quando se compara os dados de vazão mínima obtidos com a curva-chave típica com a curva-chave com ausência de eventos extremos, constata-se que os dados calculados sem os eventos extremos de chuva são 38% maiores, fato que impacta diretamente na decisão quanto ao dimensionamento das unidades geradoras, nos dos parâmetros utilizados no cálculo da garantia física do empreendimento e no planejamento de operação das usinas hidrelétricas despachadas pelo ONS.

5.3.4. VAZÃO ECOLÓGICA

Apesar do EVTE da UHE Tabajara adotar o critério de vazão ecológica como a vazão $Q_{7,10}$, para simplificar os cálculos do presente estudo e considerando que diversos órgãos ambientais estaduais adotam o valor de 50% da vazão com 95% de permanência ($Q_{95\%}$) este foi o valor adotado para a análise da vazão ecológica dimensionada , a tabela16 abaixo resume os resultados:

Tabela 16 - Vazão ecológica calculada para a UHE Tabajara

Vazão ecológica calculada por 50% da $Q_{95\%}$ (m³/s)		
EVTE	Curva-chave típica	Curva-chave com ausência de eventos extremos
143	129	139

Os resultados obtidos demonstram que a vazão ecológica calculada no EVTE é 10 % superior ao cálculo desta com a curva-chave típica.

E a vazão ecológica calculada com a curva-chave com ausência de eventos extremos é, aproximadamente, 8% superior àquela calculada pela curva-chave típica.

Estas informações são relevantes para o dimensionamento das estruturas de controle da vazão ecológica remanescente tanto no período de enchimento do reservatório quanto durante a operação do empreendimento, em alguns projetos, são também utilizadas para o dimensionamento das unidades geradoras.

Para os empreendimentos com maior comprometimento da estabilidade elétrica do sistema, este valor impacta demais o cálculo energético, o atendimento à garantia física do empreendimento durante o período de operação da UHE e no atendimento às condicionantes ambientais estabelecidas, por este motivo é essencial o seu correto dimensionamento.

5.3.5. DIMENSIONAMENTO DAS UNIDADES GERADORAS

Além dos parâmetros acima calculados e que interferem diretamente no dimensionamento das unidades geradoras, tanto para as vazões baixas como também para as vazões extremas de cheias, uma informação importante para o dimensionamento das unidades geradoras é o polinômio de jusante. Este parâmetro é muito importante para determinar o posicionamento da unidade geradora, a sua altura de cavitação e a quantidade de escavação da casa de força.

Como a maioria dos empreendimentos hidrelétricos não apresentam uma estação telemétrica confiável próximo ao empreendimento como a UHE Tabajara, foi simulado, em conformidade com a metodologia apresentada, a obtenção de uma curva-chave de jusante (polinômio de jusante) com poucas campanhas de campo, com as amostragens de $n=20$, $n=15$, $n=10$ e $n=5$.

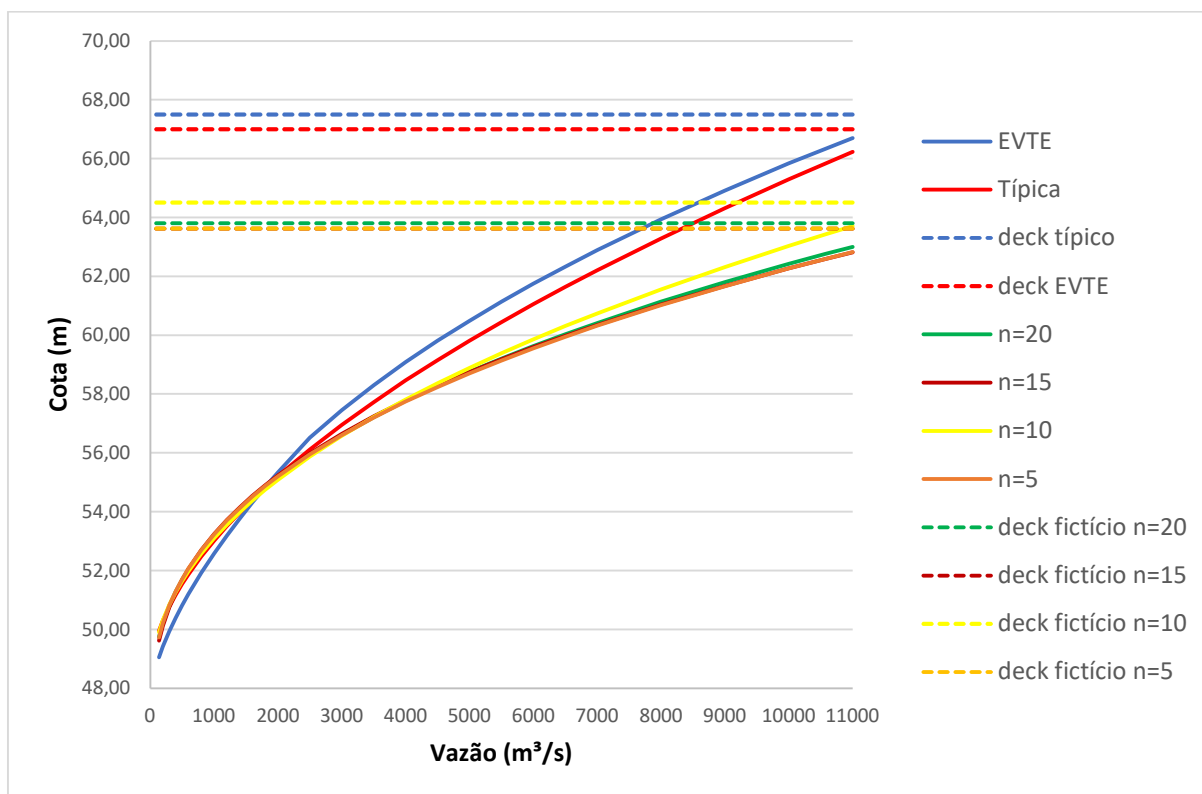
Para avaliar minimamente o impacto da existência de medições de campo confiáveis, foram adotadas para a avaliação deste estudo o cálculo da altura do deck da casa de força para cada um destes polinômios.

Para os cálculos dos decks da casa de força foi utilizado o padrão de uma vazão de $11.000 \text{ m}^3/\text{s}$ para todos os cenários, esta adoção se deu a partir do arredondamento da vazão decamilar estabelecida no EVTE.

Esta metodologia poderia ser calculada para o posicionamento das turbinas ou mesmo para a altura para evitar a cavitação, porém como estes dependem integralmente do projeto das unidades geradoras e das tecnologias de cada fabricante, assim, adotou-se esta referência do deck da casa de força no presente

estudo para se ter uma idéia das variações de dimensionamento causados pela construção da curva-chave. A figura 30 abaixo ilustra o resultado obtido:

Figura 30 - Comparativo da altura do deck da casa de força para cada cenário.



Da figura 30, obtém-se que a diferença de cota do deck da casa de força obtido com os dados do EVTE e com a curva-chave típica são muito similares, diferença de apenas 50 cm entre eles.

Porém, quando se compara estes polinômios construídos com muitos dados com aqueles construídos com amostragem pequena, menor que 20 dados, verifica-se que podem ser encontrados desvios superiores a 3,5 metros. Esta diferença poderá impactar seriamente o dimensionamento de unidades geradoras, trazendo sérios riscos e problemas à operação da UHE, além dos impactos nos estudos energéticos que serão apresentados no próximo item.

Também é possível verificar que a amostragem de $n=20$ obteve praticamente o mesmo resultado da amostragem de $n=15$ e $n=5$.

Estas informações ressaltam a necessidade de se obter o maior número possível de amostras de campo, especialmente, nos períodos de registro de eventos hidrológicos extremos que pode ser viabilizada com o uso do VAS proposto pelo P&D

Neoenergia.

Outra informação importante é que o dimensionamento da altura do deck da casa de força é muito importante para evitar a inundação da casa de força durante eventos extremos de cheias. Este dimensionamento também afeta diretamente diversos outros aspectos do projeto como escavação da casa de força, volume de concreto empregado, alterações no projeto estrutural, conseqüente emprego de aço e etc. Como as estruturas de desvio estão próximas ao eixo desta barragem, pode se afirmar, que o dimensionamento das obras de desvio do rio, também podem ser seriamente afetadas também por este parâmetro hidráulico, além do parâmetro hidrológico apresentado anteriormente.

É muito comum verificar o impacto do polinômio de jusante ou curva-chave de jusante em projetos hidrelétricos, especialmente, os projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), os quais detêm menor disponibilidade de dados medidos em campo para elaboração do projeto.

5.4. REVISÃO DOS ESTUDOS ENERGÉTICOS

As simulações dos estudos energéticos foram realizadas com todas as informações oficiais da UHE Tabajara presentes nos arquivos da EPE, conhecidos como “deck” e no PMO do ONS.

Seguindo a metodologia proposta, foi simulado o impacto desta UHE Tabajara no período crítico do sistema para todos os cenários estabelecidos: Dados do EVTE; com a curva-chave típica; com a curva-chave com ausência de dados; com o polinômio de jusante usando todos os dados disponíveis e com amostragens reduzidas.

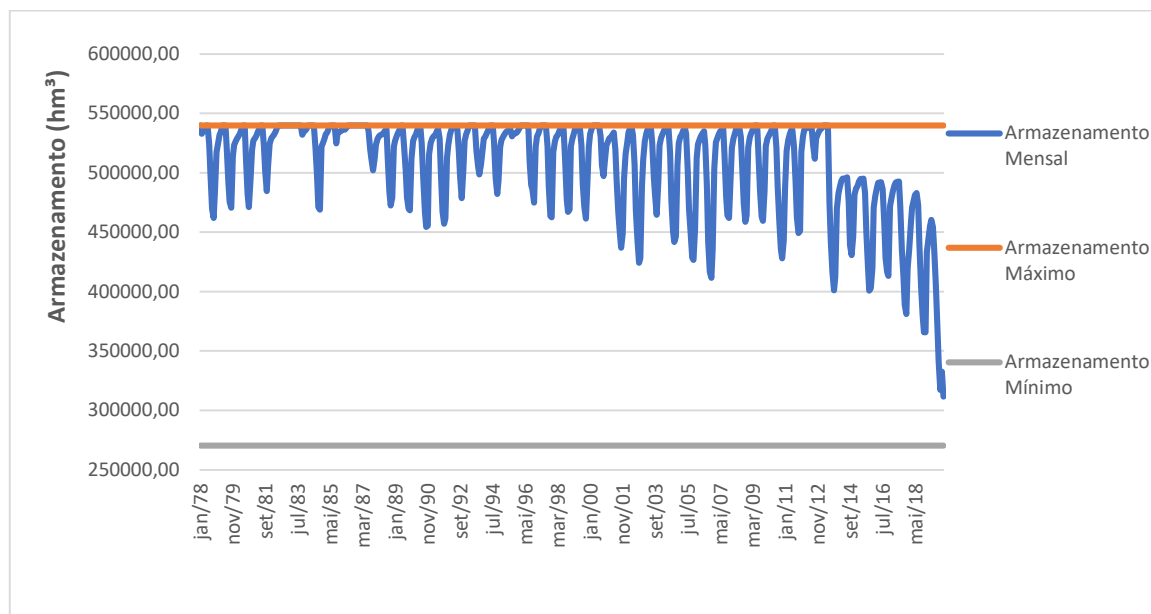
5.4.1. PERÍODO CRÍTICO DO SISTEMA

Em todos estes cenários, não houve impacto deste projeto no período crítico do sistema elétrico.

Apesar desta usina não impactar o período crítico do sistema, o resultado da simulação realizada no PySDDP demonstra que o sistema elétrico vêm apresentando forte baixa no seu armazenamento a partir de 2013, conforme apresentado na figura

31 abaixo:

Figura 31 - Evolução do armazenamento do Sistema Elétrico Interligado – SIN.



Esta informação é importante não apenas para este projeto, porém para todos os projetos de usinas hidrelétricas existentes no país, pois podem impactar significativamente a garantia física de todas elas, caso comprovado que o presente momento será o “novo período crítico” do sistema elétrico brasileiro.

5.4.2. SIMULAÇÕES ALTERANDO AS SÉRIES HISTÓRICA DE VAZÕES

A tabela 17 a seguir apresenta em detalhe os resultados obtidos com as simulações alterando a série histórica de vazões, porém mantendo o polinômio de jusante oficial da UHE Tabajara:

Tabela 17 - Resultado das simulações energéticas com alterando a série histórica de vazões.

Energia firme da UHE Tabajara (MW médios) alterando as séries histórica de vazões		
Série histórica de vazões oficial	Série histórica de vazões com uso da Curva-chave típica	Série histórica de vazões com uso da Curva-chave com ausência de eventos extremos
271	276	270

As simulações energéticas foram executadas alterando as séries de vazões de entrada no sistema PySDDP a partir dos dados disponíveis para construção das

curvas-chave das estações fluviométricas de referência confirmam o impacto no estudo energético.

Neste caso, o valor da energia firme (aproximadamente o valor da garantia física) se apresenta superior em 2% quando a série histórica de vazão é construída com todos os dados colhidos em campo quando comparado à série histórica de vazão construída a partir de uma curva-chave sem eventos hidrológicos extremos.

Diferença similar existe quando se compara a série histórica de vazões a partir da curva-chave típica com a série histórica oficial, lembrando que a série histórica oficial foi calculada a partir de uma série histórica de vazões médias diárias e detém maiores procedimentos de consistência de dados e preenchimento de falhas quando comparadas às series históricas de vazão produzidas pelo presente estudo.

5.4.3. SIMULAÇÕES ALTERANDO OS POLINÔMIOS DE JUSANTE

As simulações energéticas alterando os polinômios de jusante considerou que o eixo da UHE Tabajara fosse construído exatamente na seção da estação fluviométricas, assim, foram modeladas as energias firmes para os cenários em que a série histórica de vazões é mantida a mesma dos registros oficiais e alterando os polinômios de jusante, os resultados destas simulações encontram-se resumidas na tabela 18 abaixo:

Tabela 18 - Resultado das simulações energéticas alterando o polinômio de jusante.

Energia firme da UHE Tabajara (MWmédios) alterando o polinômio de jusante					
Curva-chave do EVTE	Curva-chave típica	Curva-chave com n=20	Curva-chave com n=15	Curva-chave com n=10	Curva-chave com n=5
295,65	293,08	293,24	293,46	293,06	293,24

Estes valores estão superiores às simulações com alteração da série histórica pois a estação fluviométrica da UHE Tabajara encontra-se a jusante do eixo da UHE estabelecido nos dados oficiais simulados anteriormente.

Os resultados demonstram que, ao considerar o eixo da UHE na estação fluviométrica de jusante, o polinômio construído para o EVTE apresentou valor superior em, aproximadamente, em, aproximadamente, 2,5 MW_{médios} de energia firme que as curvas-chave calculadas no presente estudo.

Não houve variação significativa de energia firme usando as curvas-chave com

limitação de amostragem nos dados de jusante e também a curva-chave com todos os dados, a maior diferença se deu para a amostragem de $n=15$, onde apresentou uma energia firme $0,40 \text{ MW}_{\text{médios}}$ superior à simulação utilizando todos os dados.

De fato, ao avaliar a figura 26, constata-se que a curva-chave que apresentou maior desvio no gráfico foi a curva-chave de jusante com ausência dos eventos extremos, que na presente simulação foi utilizada apenas na construção da série histórica de vazões, portanto, não foi simulada esta curva-chave como um polinômio de jusante. As demais curvas apresentam-se muito próximas em toda a sua trajetória, variando muito pouco entre elas, fato refletido na modelagem energética. A modelagem energética também utiliza as vazões com maiores frequências, figura 26, percebe-se que a maior parte das vazões operacionais são menores que $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$, estas vazões nas curvas-chave simuladas estão, de fato, mais próximas ainda uma das outras.

O fato da metodologia de expurgo dos dados manter uma distribuição equilibrada ao longo do ano, certamente, minimizou os desvios nos resultados encontrado, confirmando a boa prática de manter, mesmo com poucos dados, uma distribuição das campanhas ao longo de um ano, prática comum adotada pelas projetistas.

Assim, verifica-se que é mais importante obter medições de eventos hidrológicos extremos que maiores amostragem para a determinação do polinômio de jusante a ser empregado nas simulações energéticas de energia firme e garantia física desde que mantida a prática de realizar medições de campo distribuídas ao longo de um ano hidrológico.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme mencionado na introdução do presente estudo, este trabalho buscou avaliar os benefícios da automatização das campanhas de medição de descarga líquida em campo fornecendo informações para a construção de curvas-chave, corroborando também os diversos artigos publicados em revistas qualificadas sobre o desenvolvimento do Veículo Autônomo de Superfície (VAS).

Com a automatização destes procedimentos de aquisição de dados fluviométricos será possível realizar medições de campo com segurança e em poucos minutos, a depender do rio em menos de uma hora, possibilitando a realização de várias medições fluviométricas em um único dia. Também viabilizará a realização tais campanhas durante eventos hidrológicos extremos, possibilitando a aquisição de dados hidrométricos mais exatos durante todo o hidrograma de cheia, por exemplo.

Deste modo, no projeto de uma hidrelétrica, foi possível avaliar os impactos da ampliação de campanhas de medição de vazão em campo. Isso possibilitou demonstrar a importância da existência de um sistema autônomo de medição de vazão em rios, quando comparados aos procedimentos convencionais amplamente empregados para medição fluviométrica, corroborando com as hipóteses previamente estabelecidas para este projeto de pesquisa.

Com as simulações realizadas, foi possível constatar que o aumento de campanhas fluviométricas realizadas durante eventos hidrológicos extremos, alteram significativamente a confiabilidade da curva-chave e a assertividade da série de vazões geradas. Ao comparar os resultados obtidos entre as séries históricas de vazões geradas com base em curvas-chave com e sem dados hidrológicos extremos, constatou-se valores de vazão mínima, média e máxima variando respectivamente em 40%, 3% e 18%.

Ao realizar os tratamentos hidrológicos aplicáveis e padronizados, obteve-se desvios significativos e inconstantes na permanência de vazões. Estes desvios potencializaram o cálculo de vazões máximas empregadas no dimensionamento de obras e hidromecânicos.

Para o caso do dimensionamento das obras de desvio, quando os estudos são baseados em uma curva-chave sem registro de eventos extremos, foi verificado um superdimensionamento destas estruturas em 19% quando comparados com os

resultados da curva-chave típica.

Já no dimensionamento do vertedouro para um tempo de retorno de 10.000 anos, verifica-se o mesmo fenômeno, porém com valores 24% maiores para estudos sem registros de eventos extremos na curva-chave.

Para os estudos hidrológicos de vazões mínimas, obteve-se diferenças de 38% superior quando comparada com o registro de vazão mínima da série histórica de vazões baseada na curva-chave típica, e, da série histórica de vazões obtida por meio de curva-chave com ausência de eventos hidrológicos extremos. Este fato tem impacto direto na eficiência da operação da UHE durante períodos secos.

Para o caso do tratamento hidrológico de 50% da vazão $Q_{95\%}$ o resultado foi similar, porém com valor de 8% menor quando utilizada a curva-chave construída sem os registros hidrológicos extremos no estudo hidrológico.

Ao realizar simulação de construção de curvas-chave de jusante do aproveitamento com baixa amostragem, verificou-se uma diferença de até 3,5 m na cota de dimensionamento do deck da casa de força. Fato este que tende a afetar o dimensionamento das proteções de jusante contra enchentes e, provavelmente, em diversos aspectos construtivos do equipamento e das obras, tais como: posicionamento da turbina; a sua altura mínima de cavitação; volume de escavação e dimensionamento de materiais de construção empregados na casa de força.

Estabelecidas as curvas-chave típicas, com ausência de registros de eventos hidrológicos extremos e com baixa amostragem, estimou-se os potenciais impactos na garantia física por meio do simulação da energia firme. Para o caso de alteração da série histórica de vazões, motivadas pela diferença na determinação da curva-chave com e sem registros de eventos extremos, verificou-se um desvio aproximado de 6 MW médios em 270 MW. Portanto, uma significativa variação de 3,3% no valor da principal fonte de remuneração do ativo.

Também foi simulado o impacto da construção do polinômio de jusante com pouca amostragem à construção da curva-chave. Ao comparar os resultados obtidos com o polinômio construído com todos os registros disponíveis na estação fluviométrica Tabajara, identificou-se que não houve alteração significativa da energia firme. Nesta ocasião, observou-se que para vazões menores de 1.000 m³/s os pontos de todos estes polinômios estavam bem próximos. Ao observar o gráfico de todas as curvas-chave produzidas neste estudo, constata-se que poderia haver um relevante

desvio apenas para a curva-chave com ausência de eventos externos e que esse desvio seria apurado tanto na construção da série histórica de vazões, quanto no seu uso como polinômio de jusante do empreendimento.

Assim, com o presente estudo, foi possível constatar que o uso do VAS será bastante relevante na determinação de curvas-chave com registros hidrológicos externos. Corroborando com o sentimento do meio técnico, este trabalho demonstrou que o emprego das informações produzidas por este equipamento impactará significativamente os projetos de usinas hidrelétricas, nos seus custos de implantação e remuneração do ativo, bem como outras obras hidráulicas que dependam destas informações, provendo maior eficiência e segurança nos projetos destas obras.

Considerando o momento de transição energética em curso, a inserção de muitas tecnologias de geração intermitente e microgeração no sistema elétrico interligado e a cobrança da sociedade por barragens mais seguras, as usinas hidrelétricas terão que ser construídas e operadas de forma cada vez mais eficiente. Assim, os resultados obtidos com o presente trabalho ganham relevância não apenas na fase de projeto mas, principalmente, no período de operação destes ativos hidráulicos.

6.1. SUGESTÕES E ESTUDOS FUTUROS

Ao identificar a real interferência das curvas-chave nos projetos hidráulicos, especialmente das campanhas de medição fluviométrica em campo durante a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, torna-se oportuno desenvolver trabalhos futuros para melhor mensurar os custos e riscos envolvidos na otimização destes projetos.

Também é possível ampliar o conceito empregado, detalhando melhor os cálculos simplificados aqui realizados, bem como, aplicar à metodologia outras estruturas hidráulicas do empreendimento tais como: sistema adutor; canal de fuga; tomada d'água; volume do reservatório, dentre outros.

A aplicação desta metodologia e o seu melhor detalhamento podem ser desenvolvidos para outros aproveitamentos hidrelétricos, tanto na fase de projeto como na fase de operação, durante o desenvolvimento da revisão periódica de segurança da barragem, prevista na ferramenta legal presente na Lei 12.334/2010

(Brasil, 2010).

Com a operacionalização do VAS, também é possível realizar medições fluviométricas durante a existência de eventos históricos de cheias e secas nos rios. E, assim, recalculando o dimensionamento hidráulico e energético empregando a metodologia desenvolvida neste estudo. Também será possível averiguar se o que fora projetado no passado mantém o seu dimensionamento no presente, após aumento da amostragem e registros de vazões extremas a serem utilizadas na correção da curva-chave do posto de referência.

Este VAS pode ser empregado também para a elaboração de curvas-chave em rios com presença de leito móvel em que a sua aferição torna-se difícil. Mensurar esta possibilidade e os seus benefícios também pode ser um interessante trabalho a ser desenvolvido.

Por fim, como identificado no presente estudo, desde 2013, o sistema elétrico brasileiro está passando por uma severa estiagem com potencial de se caracterizar como novo período crítico do sistema. Como consequência, haverá impacto significativo nas revisões de garantia física das usinas hidrelétricas. Desta forma, outro tema relevante a ser desenvolvido é aplicar esta metodologia e identificar dentre os principais aproveitamentos hidrelétricos brasileiros quais apresentam maior impacto na energia firme apenas pela revisão da série histórica de vazões.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, J. C. J. et al. **Comparativo dos Medidores de Vazão Acústicos Flowtracker e ADP (S5)**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19, Maceió - AL, 2011.

BAPTISTA, M.; LARA. M. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 2ª Ed. Editora UFMG, Belo Horizonte-MG, 2003.

Agência Nacional de Águas e Saneamento – ANA; Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Conjunta Nº 3, de 10 de agosto de 2010**. Brasília-DF, 2010.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução Normativa Nº 396, de 04 de dezembro de 1998**. Brasília-DF, 1998.

Agência Nacional de Águas e Saneamento – ANA. **Medição de Descarga Líquida em Grandes Rios: Manual Técnico**. Brasília-DF, 2009.

Agência Nacional de Águas e Saneamento – ANA. **Orientações para Operação de Estações Hidrométricas**. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica, Brasília-DF, 2012.

Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE. **Manual para Serviços de Hidrometria**. São Paulo-SP, 1977..

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf Acesso em 24 de novembro de 2021.

BARROS M. R; FILHO G.L.T; SILVA F. G. B. **Avaliação Preliminar das Incertezas Hidrológicas na Determinação de Vazões de Cheias em Projetos de PCH's**. ANAIS da VII Conferência de PCH, Mercado e Meio Ambiente. Itajubá-MG, 2011.

BARROS M. F.; MELO C.R. **Análise dos Efeitos da Redução de Medições de Descarga Líquida Sobre a Qualidade Das Curvas-Chave no Rio Tracunhaém: Um Estudo De Caso**. ANAIS do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. ABRH. Natal-RN, 2014

COELHO, L. S.; SILVA, J. F. R.; FARIAS, J. A. M. **Análise comparativa dos medidores descarga convencional (molinete) e medidores acústicos Flowtracker – ADV (Velocímetro Acústico Doppler) em medições a vau, nas sub-bacias 35 e 36 no estado do Ceará**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió, Anais XIX Simpósio brasileiro de recursos hídricos, ABRH: Maceió-AL, 2011.

COIMBRA, R.M. **Monitoramento da Qualidade da Água**. PORTO, R. et al. Hidrologia ambiental. São Paulo: ABRH, 1991.

Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB, **Desvio de Grandes Rios Brasileiros**. Rio de Janeiro-RJ, 2009.

CLARKE, R.T. **Uncertainty in the estimation of mean annual flood due to rating-curve indefiniton**. Journal of Hydrology, 1999.

DA SILVA, M.F, **AERO4RIVER: Uma embarcação autônoma de superfície com 3 DOF e sistema de propulsão azimutal aéreo**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Juiz de Fora-UFJF, Juiz de Fora-MG , 2020.

DYHOUSE, G.; HATCHETT, J.; BENN, J. **Floodplain modeling using HEC-RAS**. 1ª ed. Bentley Institute Press, Exton, Pennsylvania U.S.A. 2007.

Centrais Elétricas Brasileiras S.A - ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro-RJ, 2001.

Centrais Elétricas Brasileiras S.A - ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro-RJ, 2003.

Environmental Protection Agency – EPA. **Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)**. Disponível em: <https://www.epa.gov/exposure-assessment-models/water-quality-analysis-simulation-program-wasp>. Acesso em: 27 setembro de 2021.

Projetos e Consultorias de Engenharia Ltda - PCE . **Estudo de Viabilidade do AHE Tabajara**. Processo nº48.500.00223/2007. Rio de Janeiro-RJ, 2016.

SILVA FILHO, D. **Dimensionamento de Usina Hidrelétrica Através de Técnica de Otimização Evolutiva**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – USP, São Carlos-SP, 2003.

HIRSCH, R. M.; COSTA, J. E. U.S. **Stream Flow Measurement and Data Dissemination Improve**. EOS, Transactions, American Geophysical Union, USA, Maio 2004.

JACCON G. **Curso sobre Técnicas de Medição de Descarga Líquida em Grandes Rios**. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica/MME, Brasília-DF, 1984.

FILHO, Geraldo Lúcio Tiago et al. **O uso do ADCP em Pequenos e Médios Cursos d'Água**. Grupo de Trabajo Sobre Hidromecánica, 5a Reunión. [S.I.]. 1999.

ROCHA, G. S.C., **Desvios de Rios para Construção de Barragens**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, São Paulo-SP, 2006.

JACCON, G.; CUDO, K. J. **Curva-chave: análise e traçado.**, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, Brasília-DF, 1989.

KEAN, J.W.; SMITH, J.D. **Generation and verification of theoretical rating curves in the Whitewater River basin, Kansas**, Journal of Geophysical Research. 2005.

LANG, M.; POBANZ, K.; RENARD, B.; RENOUF, E.; SAUQUET, E. **Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis**. Hydrological Sciences Journal, 2010.

LEBRETON, A. **Dynamique Fluviale**. Editions Eyrolles. Paris, France. 1974.

LEWIS, J.; EADS, R. **Automatic real-time control of suspended sediment sampling based upon high frequency in situ measurements of nephelometric turbidity**. Federal Interagency Workshop, 1998, St. Petersburg, FL. Proceedings Sediment Technology for the 21st Century. <http://water.usgs.gov>.

MIKE: Powered by DHI. Disponível em: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-11>. Acesso em: 27 setembro de 2021.

MAIDMENT, D.R. **Handbook of Hydrology**. McGraw-Hill, Inc., U.S.A., 1992.

MORRIS, G.L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use**. McGraw-Hill, New York, 1997.

OLIVEIRA, L.C.K E CANELLAS A.V.B, **Importância de Dados Hidrometeorológicos Confiáveis no Gerenciamento de Recursos Hídricos**, Simpósio Internacional Sobre Gestão de Recursos Hídricos. Gramado-RS, 1998.

PALHARES, J. C. P., RAMOS, C., KLEIN, J. B., LIMA, J. M. M., MULLER, S., CESTONARO, T. **Medição da Vazão em Rios pelo Método do Flutuador**. EMBRAPA, Comunicado Técnico 455, Concórdia – SC, 2007. ISSN 0100-8862.

PINTO, N.L.S. et al. **Hidrologia Básica**. Fundação Nacional de Material Escolar, Rio de Janeiro-RJ, 1976.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. 4ª ed. EESC-USP, São Carlos-SP, 2006.

RANTZ, S.E. **Measurement and computation of streamflow: Volume 1. Measurement of stage and discharge**. U.S. Geological Survey USGS, Washington, USA, 1982.

RICARDO, M. et al. **Análise de Aplicação de Perfiladores Acústicos Doppler para Medição de Vazão em Centrais Hidrelétricas**. Simpósio Brasileiro Sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, 4, Belo Horizonte , 21 a 25 Abril 2008.

RIZZARDI, A.S.; BERLING, F.; DULAC, V.; PAIVA, J.B.D. de.; TASSI, R. **Comparação de métodos de extrapolação da curva chave para estação fluviométrica de Restinga Seca – RS**. 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, Bento Gonçalves-RS, 2012.

REGINA, B.A., **Dinâmica dos fluidos computacional para posicionamento de sensor e Estimção Paramétrica em Embarcação**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora-UFJF, Juiz de Fora-MG, 2020.

SHREIBER P. G., **Usinas hidrelétricas**, Engevix S.A, Editora Edgard Blucher, Rio de Janeiro-RJ, 1977.

SILVEIRA, C. A. C, **O Sistema de Monitoramento Hidrológico dos Reservatórios Hidrelétricos Brasileiros**, XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002

SAMBOKO, H.T; ABAS, I.; LUXEMBURG, W.M.J; SAVENIJE, H.H.G; MAKURIRA, H; BANDA, K e, WINSEMIUS; H.C. **Evaluation and Improvement of Remote Sensing-based Methods for River Flow Management**. Physics and Chemistry of the Earth 117, Netherlands, 2020.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R.V.B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. R. **Hidrometria Aplicada**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba-PR, 2001.

SEFIONE, A.L. **Estudo comparativo de métodos de extrapolação superior de curvas-chave**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS. Porto Alegre-RS, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS. 2ª ed. Porto Alegre-RS. 2001.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **HEC-RAS, River Analysis System User's Manual** (CPD-68), Hydraulic Reference Manual (CPD-69), and Applications Guide. Davis, CA: Hydrologic Engineering Center. 2010.

VIEIRA, R. S. **Protótipo de um sistema de monitoramento remoto inteligente**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis-SC, 1999.

WESTIN, L.G.F., CONCEIÇÃO L.R. , BORTONI E.C. , MARCATO .A.L.M. , RIBEIRO .C.B.M. , HONORIO L.M. **Evaluating the Impact of Streamflow Rating Curve Precision on Firm Energy of Hydropower Plants**, *Water (Switzerland)*, 2021 , art. no. 1016.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Manual on Stream Gauging**.Vol1. Fieldwork. Geneva, 2010.

APÊNDICE I

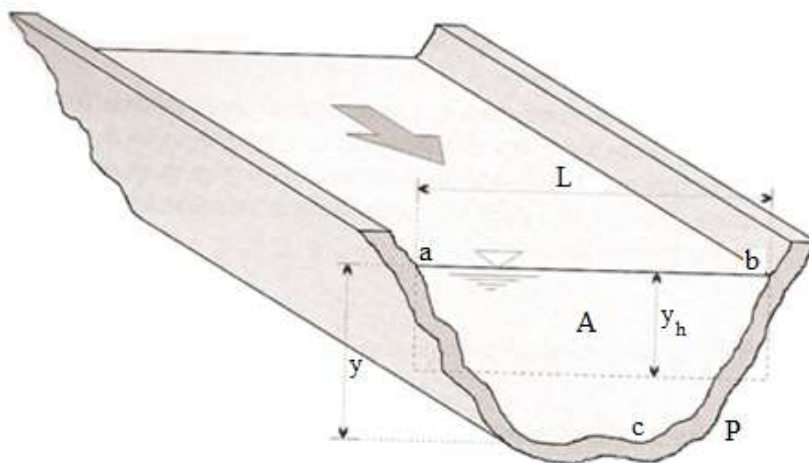
PRINCIPAIS PROPRIEDADES PARA CONSTRUÇÃO DE UMA CURVA-CHAVE

1. SEÇÃO TRANSVERSAL - PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES

O conhecimento das características hidráulicas de seções transversal é condição fundamental para a construção de uma curva-chave. Para a determinação da curva de calibração (curva-chave), é necessário que o responsável pela medição tenha conhecimento acerca das particularidades do terreno e do funcionamento hidráulico do canal, de modo a viabilizar a correspondência entre a cota aferida na régua e a respectiva descarga líquida (Jacon e Cudo, 1989).

Assim, seção transversal pode ser representada pelo corte de um plano perpendicular à direção de escoamento de um curso d'água e às margens, conforme apresenta a figura 1:

Figura 1 - Ilustração dos parâmetros geométricos de uma seção transversal. Fonte: adaptado de Baptista & Lara (2003).



Cabe destacar que os parâmetros geométricos de uma seção transversal são definidos em função no nível d'água e, portanto, variam com ele. Esta propriedade permite determinar relações da cota com as características geométricas da seção para uma dada descarga líquida.

Os parâmetros geométricos de uma seção transversal utilizados nos cálculos hidráulicos, correspondentes às dimensões características da seção geométrica por onde flui o líquido são:

- Seção ou área molhada (A_m): corresponde à área da seção transversal ocupada pela água, expressa em m^2 ;
- Perímetro molhado (P_m): corresponde ao comprimento da linha de contato entre a área molhada e o leito (linha abc), expressa em metros;
- Largura superficial (L): comprimento da linha horizontal da área molhada (linha ac), expressa em metros;
- Profundidade (y): corresponde a distância do ponto mais profundo da seção do canal e a linha da superfície livre.

Outros embora derivados, não menos importantes, são:

- Raio hidráulico ($R_h = A/P$): é a razão entre a área molhada e o perímetro molhado, expresso em metros;
- Profundidade hidráulica ou profundidade média ($y_h = A/L$): é a razão entre a área molhada e a largura superficial, expressa em metros.

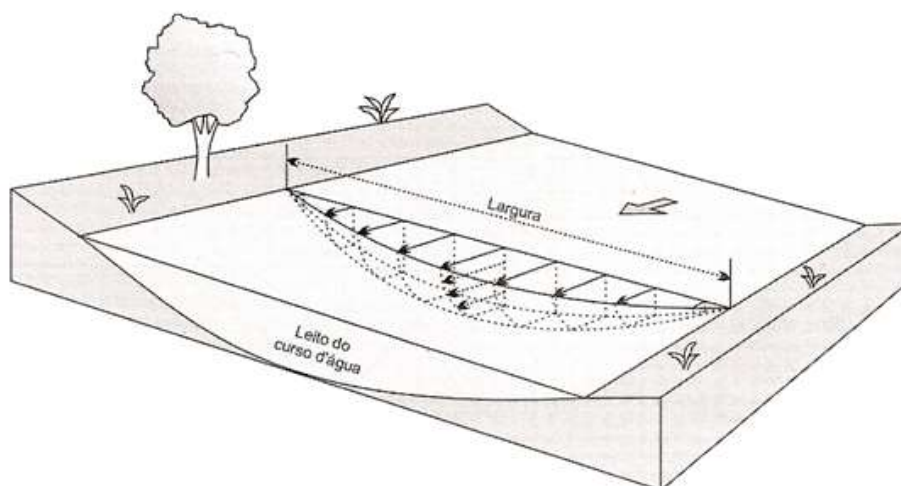
A correta definição desses parâmetros é importante na determinação de uma curva-chave. Como exemplo, pode-se destacar a área molhada e o raio hidráulico, que são parâmetros de utilização frequente na elaboração de curvas-chave.

O valor de referência para o nível d'água, normalmente escolhido, é o "zero" da régua, de uma estação limnimétrica ou estação hidrométrica, à qual também está relacionada a profundidade da seção transversal.

Para representação gráfica de uma seção transversal há, quase sempre, a necessidade de se escolher duas escalas diferentes, uma para as alturas e outra para as distâncias horizontais, acarretando uma modificação na forma real da seção transversal que é muito menos encaixada do que aparenta no desenho.

A distribuição de velocidades é não uniforme na seção transversal em cursos d'água devido ao atrito do líquido com o ar e com os taludes laterais, das margens e do fundo. Elas aumentam da margem para o centro e do fundo para a superfície, conforme apresenta a figura 2.

Figura 2- Representação da variação da velocidade de escoamento em um perfil transversal. Fonte: adaptado de Baptista & Lara (2003).



2. CARACTERÍSTICAS DO LEITO

O leito possui algumas características importantes que podem definir as condições de escoamento, por meio de sua forma geométrica (seção transversal e declividade do fundo) e pela natureza do material que o constitui.

Conforme afirma Jaccon & Cudo (1989) um dos problemas essenciais para a definição de uma curva-chave tem sido o desconhecimento da variabilidade no tempo destas duas características: forma geométrica e rugosidade.

2.1. NATUREZA DO LEITO

Os leitos podem variar em dois tipos, basicamente:

- Rochosos ou constituídos principalmente por rochas: nesse tipo o trajeto longitudinal depende da resistência à erosão das formações geológicas e da existência de acidentes tectônicos. Neste caso, o traçado é geralmente muito irregular e acompanha a direção das falhas e fraturas, sendo caracterizado por ângulos retos, trechos retilíneos longos e normalmente geométricos;
- Aluvionares: classificados e descritos, conforme Lebreton (1974), em:

- Leitos com meandros: são os mais frequentes, apresentam uma forma sinusoidal bastante regular cujo comprimento de onda da senóide é da ordem de 7 a 12 vezes a largura – em geral, o número de meandros aumenta para jusante;
- Leitos sinuosos: em fundo de vale são caracterizados por linhas e braços múltiplos interligados – correspondem a cursos d'água com grande declividade e elevado transporte sólido;
- Leitos retilíneos: são pouco frequentes e de pequena extensão, da ordem de 10 vezes a largura – nestes trechos, o leito menor, de estiagem, é sinuoso entre as margens constituindo-se de partes baixas e soleiras naturais.

Conforme informado no item anterior, natureza do leito influencia no escoamento, por meio da sua rugosidade e da mobilidade dos materiais que o constitui.

2.2. MOBILIDADE DO LEITO

Todos os leitos, que não são escavados em rocha, conglomerado ou areia compactada, são móveis e mais ou menos rapidamente deformáveis. Esta deformação pode desempenhar uma função importante na instabilidade cronológica da relação cota-vazão.

Em termos de comportamento, a mobilidade do fundo do leito difere das margens. No fundo do leito, ela é particularmente acentuada quando aumentam as velocidades de escoamento (declividade longitudinal elevada) e quando os materiais são finos e sem coesão. Neste caso, a mobilidade do fundo apresenta uma alternância de fases de movimento com escavação (retirada de material) e deposição (assoreamento).

O processo que regula estes movimentos é muito complexo e, às vezes, de difícil interpretação: em certas cheias ocorre escavação, em outras deposição e algumas passam sem que se constate alguma ação aparente.

É recomendável avaliar, após a passagem de uma cheia excepcional, se houve

alguma alteração na geometria da seção transversal de uma estação limnimétrica, a partir de um levantamento topobatimétrico.

A mobilidade das margens é geralmente menos intensa e descontínua. O processo é irreversível quando há desmoronamento dos taludes na passagem de uma cheia.

Jacson & Cudo (1989) destacam que a instabilidade dos leitos naturais é um fenômeno geral que afeta grande parte das estações limnimétricas e é frequentemente subestimado pelos hidrólogos no momento de escolher o local da estação. É nesse ponto que se localiza a principal dificuldade para a calibração das estações.

Vale ressaltar que a mobilidade do leito, sobretudo do fundo, é um fenômeno muito frequente e pode ser muito intenso, afetando seriamente a calibração da curva-chave.

Isso torna importante a validação das características geométricas e a facilidade de se criar novas campanhas para melhor conhecimento dos fenômenos ocorridos no local e estabelecer novas curvas-chave sempre que ocorrerem tais eventos.

Daí a importância de se obter procedimentos ágeis e fáceis de medição de vazão, que favoreça a execução de campanhas com maior frequência e, conseqüentemente, obter curvas-chave mais precisas.

3. RELAÇÃO COTA-VAZÃO

A relação cota-descarga de uma seção qualquer de um rio permite ao usuário determinar a vazão escoada apenas com o valor do tirante em um momento qualquer. Cabe ao hidrólogo o traçado da curva de calibração, a qual é confeccionada com base nos resultados de séries de medições e na análise dos parâmetros hidráulicos do escoamento (Jaccon e Cudo, 1989).

3.1. CALIBRAGEM

Uma definição genérica de calibragem é a “determinação experimental das relações entre as quantidade medida e a indicação dada pelo instrumento, dispositivo

ou processo de medição” (Jaccon e Cudo, 1989).

Neste caso, é a relação efetivamente procurada pelo hidrólogo: esta que faz corresponder as vazões com as cotas medidas em uma seção transversal. Vale destacar que as cotas podem ser muito diferentes das alturas verdadeiras em razão de defeitos de alinhamento ou de nivelamento entre lances de régua, de erros sistemáticos nas observações e de outras falhas que afetem as leituras de réguas.

A relação cota-vazão, aproximada, é apresentada sob três formas, geralmente associadas: a representação gráfica, a fórmula matemática e a tabela de calibragem.

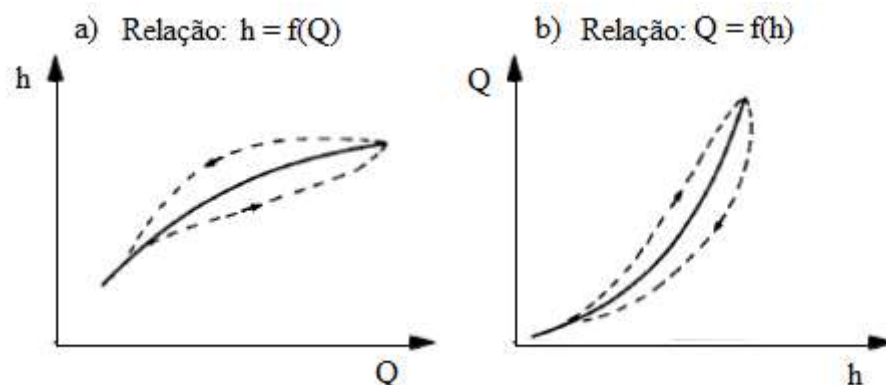
3.2. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA

É a forma mais utilizada e mais conhecida. A relação cota-vazão é representada por uma curva traçada em um sistema de eixos retangulares.

Conforme os usos de cada país ou de cada escola hidrológica, o eixo das ordenadas é utilizado para:

- Representar as cotas, segundo o hábito dos hidráulicos mais frequentemente acostumados a calcular a altura normal do escoamento de uma descarga dada, logo, utilizando a relação sob a forma $h = f(Q)$: é também a representação gráfica admitida pela norma internacional (figura 3). Neste caso, a cota é a profundidade y , representada por h ($y = h$), para não confundir com a notação comum do eixo das ordenadas y ;
- Representar as descargas, segundo a relação matemática habitual de toda função, $Q = f(h)$, a vazão na hidrometria, sendo quase sempre considerada como função de h (figura 3) .

Figura 32 - Relações cota x vazão. Fonte: adaptado de Jaccon e Cudo (1989).



3.3. FÓRMULA MATEMÁTICA

Segundo (Jaccon e Cudo, 1989), em um canal retangular de grande largura onde o raio hidráulico é muito pouco diferente da profundidade hidráulica (y_h), a equação 1, referente à fórmula de Manning pode ser escrita como:

$$U = \frac{1}{n} y_h^{2/3} I_0^{1/2} \quad (1)$$

e a área molhada dada por $A_m = Ly_h$, onde se deduz a equação 2:

$$Q = U A_m = C y_h^{5/3} \quad (2)$$

Com a equação 3:

$$C = \frac{1}{n} L I_0^{1/2} \quad (3)$$

Onde:

- Q Vazão líquida (m^3/s);
- U Velocidade do fluxo (m/s);
- A_m Área Molhada da Seção (m^2);
- y_n Profundidade hidráulica (m);
- I_0 Declividade da linha piezométrica (m/m);
- C Coeficiente de Chézy;
- L Largura da seção (m);

1/n Rugosidade medida em campo.

Esta equação 3 é a expressão matemática da relação cota-vazão, para este caso particular.

Segundo Jaccon e Cudo (1989), de um modo geral, a relação entre H e Q pode ser representada por equações matemáticas, seja em sua totalidade ou em trechos sucessivos. As expressões mais utilizadas fazem uso do método dos mínimos quadrados, sendo apresentadas na forma exponencial (equação 4) ou polinomial (equação 5):

$$Q = a (h + h_0)^n \quad (4)$$

$$Q = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + \dots + a_n h^n \quad (5)$$

Onde:

H Cota do nível de água para a descarga Q (m);

h₀ Cota do nível de água para a descarga Q₀ (m);

Demais símbolos parâmetros de valor constante tabelados na literatura a depender da característica do rio no ponto de monitoramento.

3.4. EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA-CHAVE

A relação h x Q deve ser definida em todo o intervalo de variação das cotas de uma cronologia limimétrica homogênea. Este intervalo, limitado pelas cotas mínima e máxima observadas é designado por “intervalo de definição da calibragem”.

Contudo, é muito comum que o número de medições realizadas seja insuficiente ou que a curva de calibração esteja incompleta. Outro fator refere-se à medição de vazão em eventos de cheia, que tornam o procedimento muito perigoso, apresentando risco ao pessoal responsável e aos equipamentos. Nesses casos, as medições de descarga tornam-se inviáveis, tanto em função de condições inseguras quanto em termos de capacidade operacional dos equipamentos. Nestas situações, é necessário que curva seja extrapolada em sua extremidade superior (Jaccon e Cudo,

1989; Lang et al., 2010; Rizzardi et al., 2012).

Em geral, o número de medições é insuficiente e a curva deve então ser extrapolada em suas extremidades.

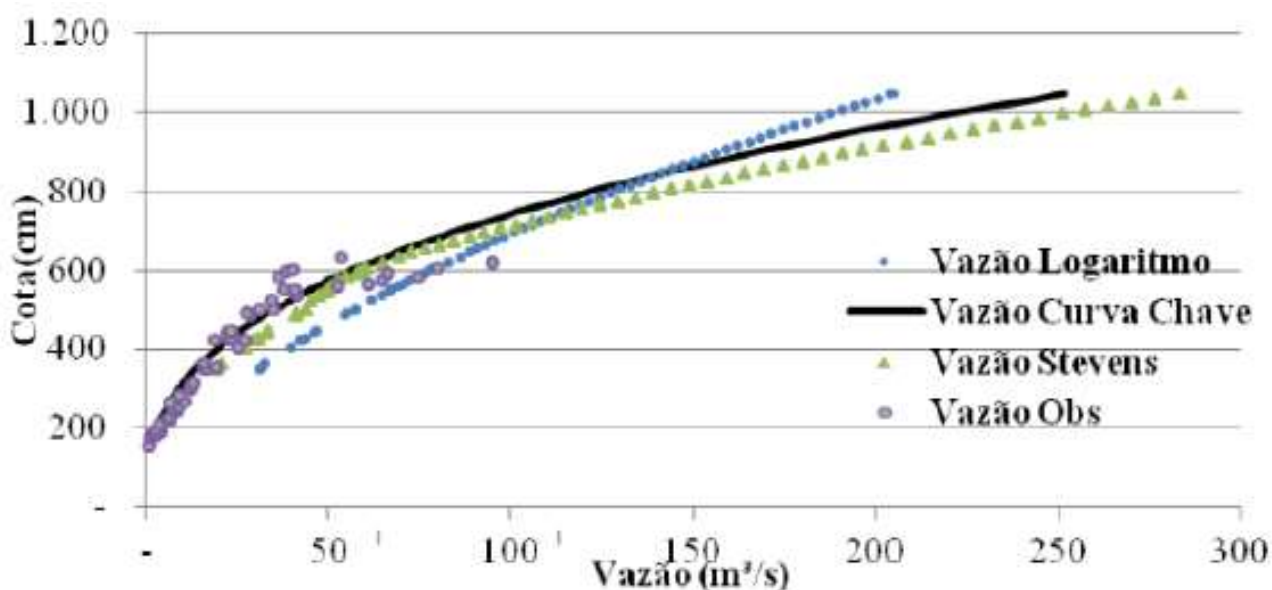
Os métodos de extrapolação diferem de acordo com a extremidade da curva a ser prolongada “na direção superior” (médias e altas vazões) ou “na direção inferior” (baixas vazões).

Vale destacar que “extrapolar” não significa dizer, simplesmente, complementar o traçado da curva segundo sua tendência. Este é um erro que ocorre com frequência e que pode conduzir a valores absurdos para a descarga.

Segundo Jaccon e Cudo (1989), entende-se por extrapolação como a complementação do traçado da relação $Q(h)$ nos pontos não medidos. A extrapolação da parte superior da curva-chave é um processo complexo e requer o conhecimento aprofundado sobre as condições hidráulicas e geométricas das seções), além da influência do coeficiente de rugosidade de Manning (Kean e Smith, 2005). A extrapolação na direção superior, que implica num bom conhecimento do funcionamento hidráulico da estação em águas muito altas, pode conduzir a uma alteração do traçado da curva, se o número de medições for reduzido: é então recomendado fazê-lo antes da extrapolação na direção inferior.

A figura 4 a seguir demonstra a extrapolação superior da curva-chave com base em alguns métodos.

Figura 4 - Exemplo de extrapolação da região superior da curva-chave (Rizzardi et al., 2012)



O procedimento de extrapolação da curva-chave pode ser realizado por vários métodos matemáticos. Rantz et al. (1982), propõem que os picos de descarga possam ser estimados a partir de métodos indiretos, como o de “*slope-area*”, “*contracted opening*”, “*flow-over-dam*” ou “*flow-through-culvert*”. Os autores argumentam que os métodos fazem uso da equação de energia, considerando também a velocidade do escoamento para o cálculo da vazão e que cada tipo de fluxo tem uma formulação matemática específica, mas que todas dependem das características físicas do canal; do tirante no momento de pico de vazão e dos respectivos limites superiores da margem da seção; e de demais fatores hidráulicos do canal e do escoamento.

Vale destacar que, durante eventos de grandes vazões, caso alguns fatores sejam ignorados, a extrapolação da curva-chave pode desencadear uma série de erros. Dentre esses fatores estão incluídos: mudanças abruptas no perfil da seção transversal em decorrência da elevação do nível de água; variação na rugosidade do leito; desenvolvimento de caminhos preferenciais; alterações no comportamento do fluxo na seção de controle; e estabelecimento de relações não únicas entre Q e h (Lang et al., 2010). Clarke (1999) aponta ainda que os erros na extrapolação da curva-chave surgem de basicamente duas fontes principais: erros oriundos da forma incorreta da curva e da estimativa do perfil da curva em locais com dados muito espalhados.

3.5. MÉTODOS PARA EXTRAPOLAÇÃO DA CURVA-CHAVE

Os métodos mais tradicionais para extrapolação da curva de descarga são: Stevens, Logarítmico, Manning e Velocidade Média e Superfície Molhada.

Método de Stevens

O método proposto por Stevens foi baseado na equação de Chézy, sendo restrito à aplicação para escoamentos pseudo-uniformes. Neste método, a equação de Chézy é apresentada pela expressão (Jaccon e Cudo, 1989):

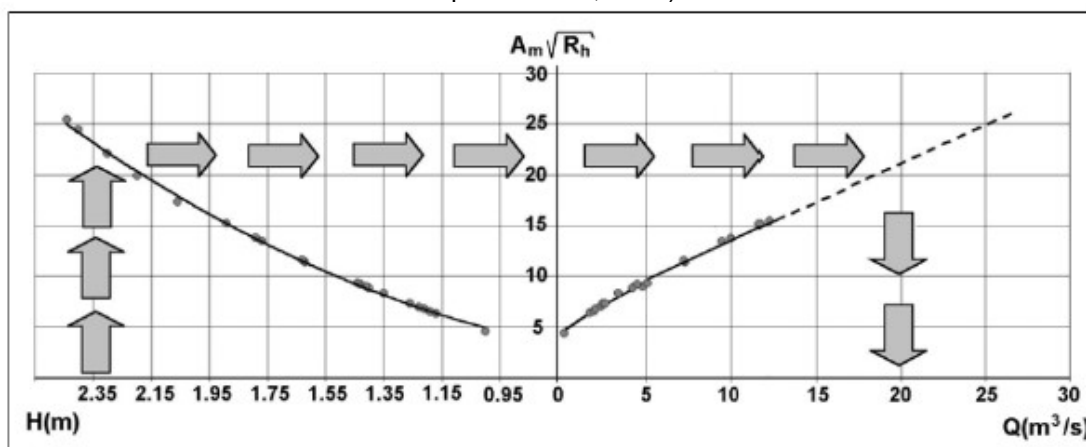
$$\frac{Q}{A_m \sqrt{R_h}} = C \sqrt{I_0} \quad (6)$$

Onde:

- Q Vazão líquida (m³/s);
 A_m Área molhada (m²);
 R_h Raio hidráulico (m);
 C Coeficiente de Chézy (m^{1/2} s^{-1/2});
 I₀ Declividade do fundo do canal (m/m).

Os termos $A_m \times \sqrt{R_h}$ e $C \times \sqrt{I_0}$ referem-se, respectivamente, ao fator geométrico e ao fator de declividade. Caso o primeiro membro da equação seja igual a uma constante, a função Q pode ser representada, em um sistema de coordenadas cartesianas, por uma reta que passa pela origem, sendo prolongada até a máxima cota aferida (Jaccon e Cudo, 1989). A figura 5 abaixo apresenta um exemplo de extrapolação da curva-chave pelo método de Stevens.

Figura 5 - Exemplo de extrapolação pelo método de Stevens (adaptado de Jaccon e Cudo, 1989, apud Sefione, 2002)



Método Logarítmico

Método amplamente utilizado em decorrência de sua simplicidade, e possivelmente o mais utilizado no Brasil, para extrapolação superior da curva-chave. Tem como principal restrição a aplicação em seções de perfil transversal regular. Na seção superior, o comportamento da curva é do tipo exponencial, sendo possível a utilização da Equação abaixo (Jaccon e Cudo, 1989).

$$Q = i_1 H_2 + i_2 H + i_3 \quad (7)$$

Onde:

Q Vazão líquida (m³/s);

H Cota do nível de água (m);

i₁, i₂, i₃ Parâmetros de valor constante.

O nome logaritmo retoma o princípio de que a solução gráfica da equação deve se comportar como uma reta, quando os pontos são plotados em papel do tipo log-log. A restrição à aplicabilidade do método para extrapolações superiores da curva decorre do fato de esta região ter um controle estável e as características geométricas constantes (Sefione, 2002).

Método de Manning

Este método consiste em utilizar as equações para escoamento em regime uniforme em canais para rios. Neste caso, pode-se utilizar uma variação da fórmula de Chézy, como está definido nas equações 8 e 9 (Santos et al. 2001):

$$Q = K A_m R_h^{2/3} \quad (8)$$

$$K = \frac{I_0^{1/2}}{\mu} \quad (9)$$

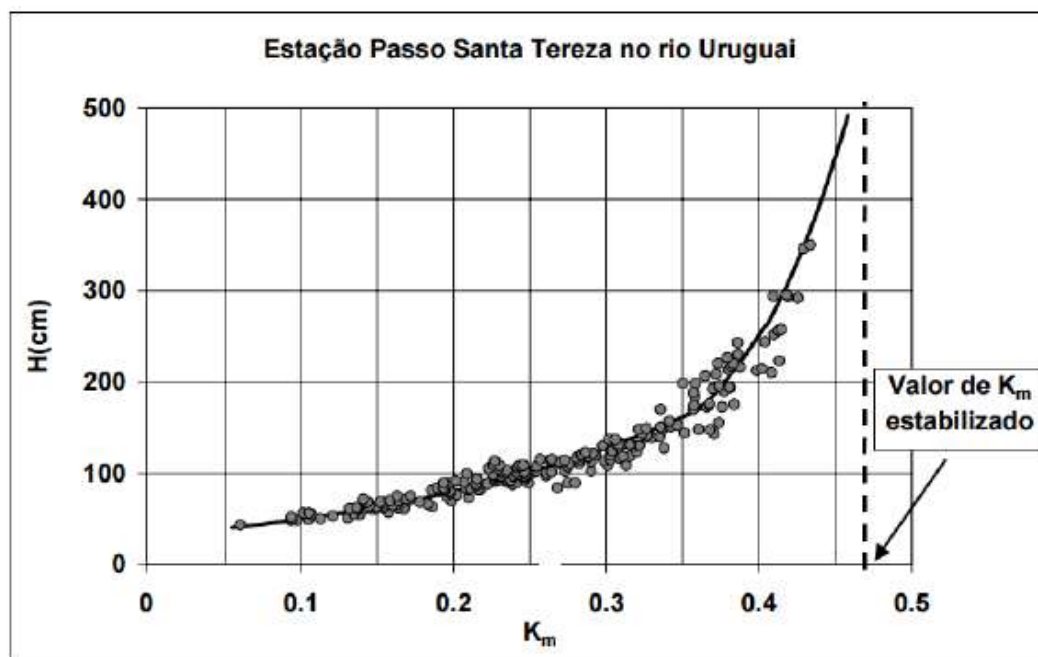
Onde:

Q Vazão líquida (m³/s);

μ Coeficiente de rugosidade de Manning.

Também se constitui como um método gráfico, sendo plotados em um plano cartesiano os valores de K contra os valores de H, como representado na figura 6 a seguir.

Figura 6 - Exemplo de extrapolação de K pelo método de Manning (Sefione, 2002)



Método Velocidade Média e Superfície Molhada

Neste método, ambos os componentes da descarga são analisados separadamente: o valor da área molhada (A_m), que é conhecido até a cota máxima do perfil, e a velocidade média do escoamento (\bar{V}), cujo crescimento é mais lento que a descarga. Desse modo, o método baseia-se na extrapolação da curva de velocidade utilizando a fórmula de Manning-Strickler (Tucci et al. 2012).

O método pode ser aplicado a seções irregulares, desde que as condições do escoamento sejam homogêneas (Jaccon e Cudo, 1989).

Modelos de Simulação Hidráulica

Existem uma variedade de modelos hidráulicos capazes de simular o comportamento da água em canais, artificiais ou naturais, e áreas de inundação. Os softwares também variam em termos de complexidade e sofisticação do modelo utilizado, partindo de modelos simples até muito complexos.

A escolha do modelo que melhor se adequa ao problema em questão deve ser baseada na própria complexidade do problema, haja vista que não é necessário o uso de um programa com alto nível de sofisticação para a resolução de uma questão simples.

Vale destacar que, conforme o nível de complexidade aumenta, maior será o

custo de obtenção dos dados, o tempo de processamento e calibração do modelo e a dificuldade em operar o software. Não existe um mecanismo específico para escolha do modelo. Contudo, o usuário deve se basear no objetivo do projeto, na disponibilidade de informações, nas características do rio e demais informações que julgar pertinentes para a seleção do melhor modelo que represente o problema (Dyhouse et al., 2007).

Alguns modelos têm sido comumente utilizados em modelagens hidráulicas para sistemas fluviais, entre eles podem ser citados o WASP, o MIKE, e o HEC-RAS, alvo de revisão bibliográfica desta dissertação.

WASP

Desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA – U.S.A.), o *Water Quality Analysis Simulation Program* (WASP) é um software de modelagem dinâmica para sistemas aquáticos, incluindo tanto a camada de água quanto a região de bentônica. Ele permite ao usuário a interpretação e previsão das respostas de qualidade da água às alterações naturais e induzidas por poluições antrópicas.

O modelo é capaz de representar diversos processos, incluindo advecção, dispersão e cargas pontuais e difusas. Também pode estar associado a modelos hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos, simulando fluxo, velocidades, temperatura, salinidade e fluxo de sedimentos (EPA, 2021).

MIKE

Desenvolvido pelo *Danish Hydraulic Institute* (DHI), o *Microcomputer-Based Modeling System* (MIKE) é um software para a simulação de fluxos, níveis de água e transporte de sedimentos e materiais suspensos e dissolvidos. Ele é capaz de realizar simulações tanto de processos de escoamento superficial quanto de comportamento hidráulico do fluxo em rios, transporte de sedimentos e qualidade da água. O MIKE pode ser utilizado no desenvolvimento, gerenciamento e operação de sistemas fluviais e de redes de canais (Maidment et al., 1992).

A versão MIKE11 consiste em uma série de módulos individuais para que o usuário consiga desenvolver diversos tipos de simulações. Foi programado com um componente central denominado *basis module* que, entre outras funções, inclui a parcela do menu responsável pela manipulação dos dados e execução do programa

e o banco de dados que contém informações sobre seções do rio, séries de precipitação, nível de água e descarga líquida (Maidment et al., 1992).

O software pode ser utilizado em diversas aplicações, incluindo (MIKE, 2021):

- Análises e desenvolvimento de estudos sobre amortecimento de cheias;
- Otimização da operação de sistemas de reservatórios e canais;
- Previsão de enchentes e secas e de qualidade da água;
- Simulações de rompimento de barragem;
- Transporte de sedimentos e projeções de longos períodos de mudanças na morfologia de rios.

Alguns autores também apresentaram aplicações do MIKE para o desenvolvimento de modelos de cheias e de auxílio em planos de gerenciamento de risco.

HEC-RAS

Desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidráulica (HEC) e de domínio público, o *U.S. Army Corps of Engineers, o Hydrological Engineering Centers River Analysis System* (HEC-RAS) é um software de modelagem hidráulica que permite o cálculo de análise unidimensional de: escoamento permanente e não permanente; transporte de sedimentos em canais; e análise de qualidade da água (USACE, 2010).

As equações de energia, continuidade e de Manning estão inseridas no HEC-RAS como métodos padrão para a determinação do tirante ao longo do canal, em conjunto com a equação de quantidade de movimento utilizada como parte de análises que envolvam pontes, escoamento supercrítico, e escoamento rapidamente variado.

Para o desenvolvimento das simulações, é necessário que o usuário introduza informações geométricas sobre o canal, a superfície de inundação e estruturas que dificultem o escoamento (pontes, bueiros etc.), bem como informações sobre a vazão escoada, condições de contorno, coeficientes de rugosidade das paredes, e outros

parâmetros (Dyhouse et al., 2007).

De acordo com Dyhouse et al. (2007), o HEC-RAS pode ser aplicado em diversas situações que requeiram modelagem hidráulica, como:

- Análises de modificações no perfil do canal;
- Análises do perfil da corrente próxima a pontes;
- Análises múltiplas de trechos de rios;
- Determinações simultâneas de escoamento supercrítico e subcrítico, bem como o estabelecimento do regime de escoamento;
- Integração com o Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Vários autores realizaram trabalhos que envolveram aplicações do HEC-RAS no planejamento e monitoramento de cheias, além de associações com métodos de geoprocessamento e softwares de modelagem da qualidade da água.

3.5.1. Curva-chave de estações não-unívocas

O item precedente descreve as etapas sucessivas de elaboração de uma curva-chave:

- Inventário dos dados de base;
- Preparação do gráfico;
- Análise da dispersão dos pontos;
- Traçado e extrapolação da curva.

Este processo de análise, essencialmente gráfico, é aplicável a qualquer que seja o tipo de curva considerada.

Se a relação cota-vazão é biunívoca e permanente, o traçado de uma só curva, para uma cronologia completa de cotas, define uma correspondência única entre cota observada e vazão.

Em todos os outros casos, a instabilidade geométrica ou hidráulica conduz ao traçado de duas ou mais curvas, simples ou cíclicas, que definem uma superfície de calibragem: a cada cota correspondem várias, até mesmo uma infinidade de vazões.

Neste caso, apresentam-se dois problemas:

- Como escolher a curva que convém, num caso de um feixe de curvas?
- Como se posicionar em uma superfície de calibragem?

A resposta a estas duas questões depende da origem da não-univocidade e de suas consequências na calibragem. Ela depende também dos dados que se dispõe, além da cronologia limnimétrica e da relação das medições.

De acordo com o caso, a variável secundária que, associada à cota, permite extrapolar a superfície de calibragem, pode ser:

- Tempo “t” (período de validade da curva): $Q = f(h,t)$ para as estações com instabilidade geométrica;
- A declividade hidráulica “ I_0 ”, ou um índice associado (nível de jusante, desnível, gradiente limnimétrico) $Q = f(h,I)$ para as estações com instabilidade hidráulica.
- Três métodos principais correspondem a esta escolha:
- Método das calibragens unívocas transitórias, para as estações instáveis;
- Os métodos do desnível normal e do gradiente limnimétrico para as estações com regime não-permanente (variação contínua da declividade hidráulica).

Para o escoamento não permanente em canais, a relação entre o nível de água nunca é rigorosamente unívoca e, pode ser expressa no caso de canais prismáticos, pela fórmula de Jones (Jaccon e Cudo, 1989):

$$Q = Q_0 \sqrt{\left(1 + \frac{1}{I_0 c} \frac{\partial y}{\partial t}\right)} \quad (10)$$

Em que:

- Q Vazão líquida (m³/s)
 Q₀ Vazão em regime uniforme (m³/s);
 y Profundidade (m);
 I₀ Declividade do fundo do canal (m/m), e
 $c = \frac{dQ}{dA}$ Celeridade da onda cinemática (m/s²).

Nessa fórmula, verifica-se que para o mesmo nível de água, a vazão, na ascensão da cheia ($\partial y / \partial t > 0$), é superior que a vazão na recessão ($\partial y / \partial t < 0$).

O valor de Q₀ corresponde ao escoamento uniforme (y = constante) e pode ser calculado pela fórmula de Manning que também pode ser apresentada conforme a equação 11 a seguir (Jacon e Cudo, 1989):

$$Q_0 = \frac{1}{n} A_m R_h^{2/3} I_0^{1/2} \quad (11)$$

Onde:

- Q₀ Vazão em regime uniforme (m³/s);
 A_m Área molhada (m²);
 R_h Raio hidráulico (m);
 I₀ Declividade do fundo do canal (m/m).

3.5.2. Estações Instáveis

O método das calibragens unívocas transitórias constitui em traçar tantas curvas-chave quantos os períodos homogêneos, qualquer que seja a duração dos mesmos. A cada uma destas curvas é associado um período de validade.

3.5.3. Escolha do período de velocidade de cada curva

Esta escolha não pode ser feita aleatoriamente: ela implica na localização precisa do evento que tem causado a descalibração e considera o efeito da transformação das cotas em vazões sobre a continuidade do hidrograma.

3.5.4. Localização do evento responsável pela descalibração da curva

Quando a mudança da descalibração tem uma origem artificial (obras no leito ou relocação de régua limnimétrica, por exemplo), o dossiê técnico da estação geralmente menciona o fato. Tal acontecimento ocorre sempre em período de águas baixas e o limnigrama, normalmente regular, deixa uma marca: deslocamento vertical, ajuste à nova cota, parada momentânea, etc.

Ao contrário, uma descalibração natural é, quase sempre devido a uma cheia que não é, necessariamente, grande ou excepcional. Com a erosão ou deposição são processos físicos progressivos, o limnigrama não apresenta nenhuma descontinuidade.

A identificação da cheia responsável pela descalibração pode ser feita pela análise das cotas observadas, imediatamente antes da subida das águas. Quando as cheias são separadas entre si por um período de tempo bastante longo, a cota de escoamento associada à descarga de base é um bom indicador do abaixamento ou da elevação do leito.

APÊNDICE II

CONCEITOS GERAIS DO VAS DESENVOLVIDO PROJETO
DE P&D

Abaixo seguem apresentados os conceitos gerais aplicados aos protótipos de VAS desenvolvidos pelo projeto de P&D:

- **Operação segura e eficiente:** Ser possível realizar a campanha de medição de vazão em rios sem a necessidade de adentrar ao rio com pessoas, sendo possível calibrar o equipamento e lança-lo ao rio com um único técnico treinado para esta atividade, que as campanhas de medição de vazão sejam previamente programadas por hidráulicos experientes e a distância e que, em campo, o operador apenas montasse o equipamento, o colocasse na água a partir da margem do rio e que, automaticamente, o sistema coletasse todos os parâmetros necessários à medição de vazão na seção de controle da estação hidrométrica.
- **Embarcação compacta:** para mais facilmente transportar o veículo de passeio entre os locais de missão, pensou-se em uma solução com dimensões reduzidas que pudesse ser levada em um porta-malas grande, por exemplo;
- **Estabilidade:** para resistir aos distúrbios provenientes da correnteza dos rios sem que sofra o risco de tombar e ficar inoperante, é importante que a embarcação possua uma configuração estável como a catamarã, que apresenta dois cascos simétricos e permite o posicionamento do sensor em sua região central;
- **Sensoreamento:** a missão do veículo necessita, além do ADCP, de fornecer suporte a sensores embarcados específicos, como acelerômetros e (*Differential Global Positioning System*) DGPS e que o equipamento seja georreferenciado ao Referência de Nível (RN) da régua;
- **Navegação por águas rasas:** o VAS deve ser capaz de navegar em condições de coluna d'água consideravelmente rasas, da ordem de 15 cm de profundidade, de forma a garantir versatilidade em sua operação;
- **Superação de obstáculos no percurso:** a operação da embarcação não deve ser impedida pela presença de obstáculos tais como algas, pedras ou galhos que estejam no leito do rio ou próximos do casco;

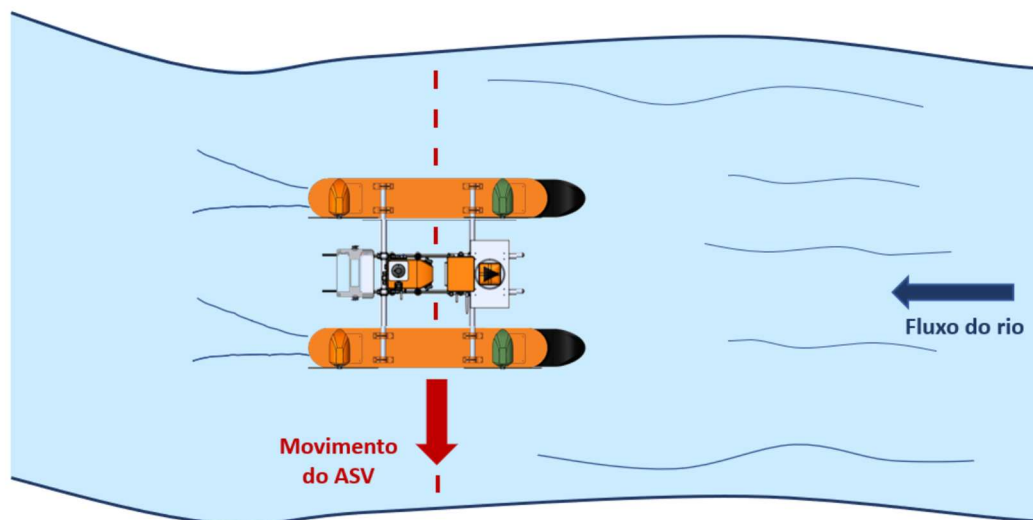
- **Capacidade de 20 kg de carga:** levando em consideração as estimativas de peso estrutural, dos sensores embarcados, e da bateria que fornece a propulsão elétrica, o veículo deve ser capaz de garantir empuxo para levar pelo menos 20 kg (10 kg por casco, portanto);
- **Velocidade de operação máxima de 3 m/s:** o VAS deve ser capaz de operar em rios de escoamento veloz, com velocidades de até 3 m/s, pois este foi o limite máximo de vazão identificado nas estações hidrométricas operadas pelo grupo Neoenergia durante eventos extremos;
- **Proteção do sensor:** o posicionamento do sensor ADCP deve ser tal que este não esteja muito exposto a obstáculos, de preferência sendo envolvido pelos dois cascos para sua maior segurança.

Assim, o conceito de operação proposto para o VAS é o cruzamento do rio (ou outros cursos d'água) pela embarcação de maneira longitudinal e portando um equipamento de ADCP, como pode ser verificado na figura 1 e na figura 2, com o escoamento do rio passando de maneira direta pelo sensor ADCP para a aferição de sua velocidade. O VAS deve estar referenciado à estação hidrométrica a partir do uso de um DGPS com uma base fixa a ser posicionada pelo operador no RN da régua de medição da estação e outra base móvel embarcada no VAS.

A velocidade que o veículo cruza o rio de uma margem à outra deve ser menor do que a velocidade do escoamento (cerca de 4 vezes menor) para que não haja interferência nas aferições e aquisição dos dados fluviométricos. Eventualmente pode ser necessária a navegação por águas rasas para se chegar aos pontos de medição no rio, onde, de fato, o sensor seria utilizado para aferir com precisão as informações de vazão do curso d'água.

Entretanto, é válido ressaltar que, devido ao caráter multimissão do VAS, este ainda pode ser usado para missões específicas em águas rasas, focadas em análise de água, controle de sedimentação em rios ou reservatórios ou, ainda, monitoramento de vida selvagem, por exemplo.

Figura 1 - Missão típica para utilização do ADCP pela embarcação. Fonte: Regina,2020



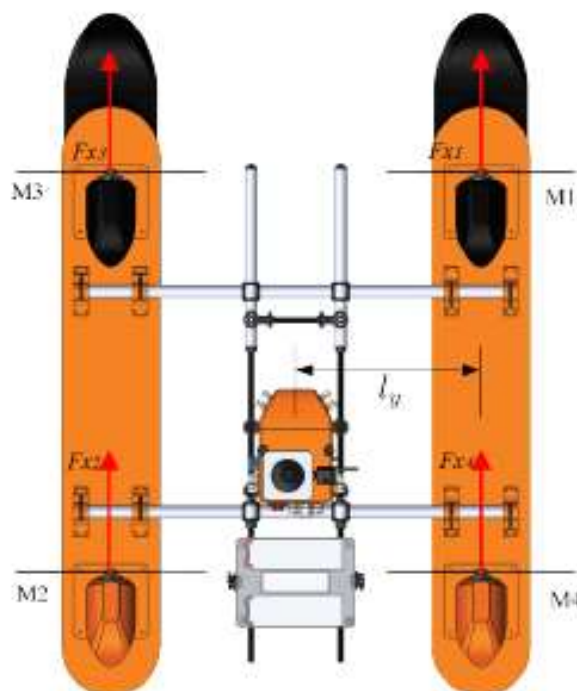
Um casco com geometria é desejável por motivos diversos. Pode ser mais facilmente manufaturado, além de que sua modelagem em software de *Computacional Fluid Dynamics* (CFD) se torna mais prática e garante melhores resultados, devido às ausências de partes móveis como um leme ou de quinas abruptas que se veria em uma quilha, por exemplo.

Sua configuração propulsiva utiliza 4 motores aéreos posicionados na parte superior dos cascos, com seus eixos de rotação paralelos à superfície da água. Essa configuração é propícia para ser utilizada nesse caso em que há sensores submersos, de forma que os motores não impactem em nada no escoamento da água e assim não produzam ruídos nas medições feitas embaixo d'água.

Outra grande vantagem dessa configuração é que as hélices ficam protegidas de se entrelaçarem em algas ou mesmo de danos causados por impactos em pedras, galhos ou outros detritos que podem eventualmente estar nos ambientes, especialmente, de águas rasas.

Os motores são dispostos na embarcação como apresentado na figura 2. Cada motor é capaz de gerar momento de guinada que deve estar bem balanceado de acordo com a manobra requisitada à embarcação durante a missão.

Figura 2 - Embarcação do tipo catamarã com sistema propulsivo aéreo. Fonte: Regina, 2020



Além disso, na figura 3, fica evidente que se trata de um sistema propulsivo azimutal, em que cada motor pode assumir uma direção angular diferente de acordo com comandos dados por servo motores (em vermelho na imagem) acoplados a eixos de apoio e engrenagens (em amarelo). Dessa forma, é possível observar que o veículo é controlável nos 3 Graus de Liberdade em que se movimenta (de avanço frontal e lateral e de rotação em guinada), permitindo que seja extremamente manobrável e propício para missões em locais de difícil locomoção.

Figura 3 - Detalhe do sistema propulsivo aéreo azimutal. Fonte: Regina, 2020.

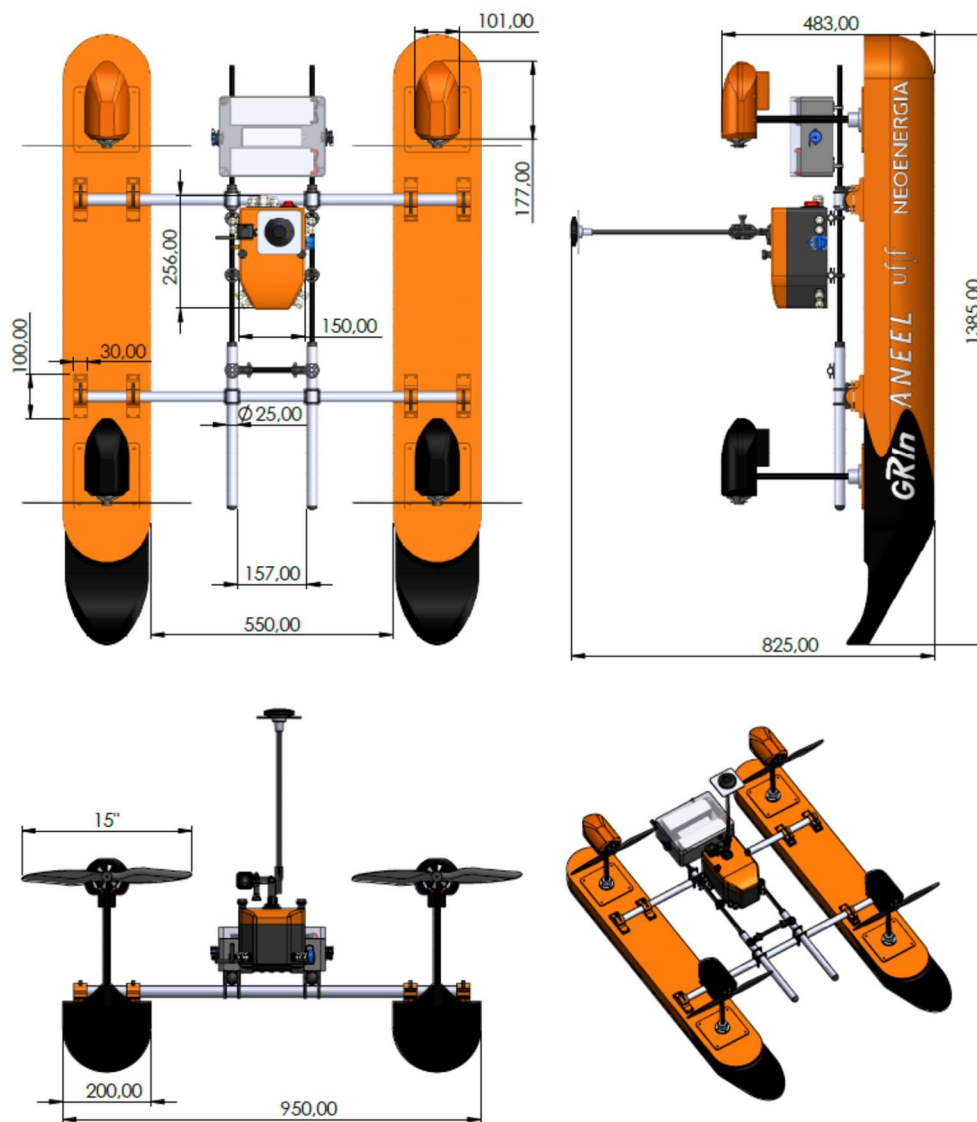


O conceito desenvolvido e acima detalhado é bastante aplicável às características dos rios tropicais existentes no Brasil devido à grande existência de sólidos em suspensão a comum proliferação de macrófitas, o que exige uma propulsão externa à água.

Este conceito de propulsão também favorece a aplicação do equipamento em águas rasas pois protege o ADCP sem causar turbulência à água e, por consequência, interferir nas leituras. Minimiza-se, assim, a faixa de descarte de dados do ADCP próximo à superfície pelo motivo de interferências causadas por ruídos nestas medições.

A seguir são apresentadas na figura 4 outras imagens conceituais do protótipo:

Figura 33 - Catamarã projetado. Fonte: DA SILVA, 2020.



APÊNDICE III

SÉRIE HISTÓRICA DE MEDIÇÕES DE DESCARGA LÍQUIDA
REALIZADAS PELO CPRM NA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA
TABAJARA (ESTAÇÃO Nº 15580000)

Data	COTA [m]	Q [m³/s]	Data	COTA [m]	Q [m³/s]	Data	COTA [m]	Q [m³/s]
08/09/2002	3,23	317	31/10/2012	3,86	433,825	30/04/2019	8,75	2716,157
08/09/2002	3,23	317	07/03/2013	10,03	4038,058	12/06/2019	5,54	912
19/08/2003	3,49	333	13/07/2013	4,6	659,646	15/08/2019	3,5	368
11/11/2003	3,35	316,593	13/11/2013	5,86	1005,73	24/10/2019	4,42	560
06/09/2004	3,3	296,072	07/02/2014	10,5	4261,494	26/11/2019	6,66	1379,34
10/12/2004	5,62	927,258	04/06/2014	6,76	1664,41	26/02/2020	10,06	3910
13/06/2005	5,04	761,731	19/03/2015	10,41	4290			
23/09/2005	2,79	248,913	24/07/2015	4,73	673			
21/07/2006	4,05	493,412	11/11/2015	4,82	703			
17/07/2007	3,76	355,295	19/05/2016	5,92	1041			
07/11/2007	4,7	653,971	31/10/2016	5,95	1107			
21/05/2008	6,95	1645,596	25/04/2017	8,76	2697,573			
09/09/2008	3,17	302,819	20/07/2017	3,95	451,62			
03/12/2008	4,7	676	06/10/2017	3,15	293			
24/06/2009	5,53	954,178	30/11/2017	5,59	940			
21/10/2009	3,96	462,142	02/03/2018	9,45	3277,06			
01/04/2010	10,56	4340,599	28/03/2018	10,32	4440			
19/08/2010	3,15	298,104	25/07/2018	3,92	442			
24/11/2010	4,27	552,509	15/08/2018	3,48	348			
15/04/2011	10,28	4175,551	20/09/2018	3,5	357			
12/08/2011	2,93	258,046	05/12/2018	9,27	3124			
14/04/2012	7,94	2182,291	26/02/2019	11,55	5266,28			

APÊNDICE IV

SÉRIE HISTÓRICA DE MEDIÇÕES DE DESCARGA LÍQUIDA
REALIZADAS EMPREGADAS NAS SIMULAÇÕES DE
CURVAS-CHAVE COM AMOSTRAGEM REDUZIDA

n=20			n=15			n=10		
Data	COTA [m]	Q [m³/s]	Data	COTA [m]	Q [m³/s]	Data	COTA [m]	Q [m³/s]
28470	6,01	1085	28470	6,01	1085	29323	8,75	2594
28894	9,53	3383	29323	8,75	2594	30536	3,12	257
29323	8,75	2594	30536	3,12	257	32595	10,13	3848
29740	5,46	855	32115	5,59	902	34215	3,4	316
30536	3,12	257	32595	10,13	3848	35508	10,3	3674
31335	4,41	539	34215	3,4	316	37060	5,09	840,812
32115	5,59	902	35508	10,3	3674	37852	3,49	333
32595	10,13	3848	37060	5,09	840,812	39988	5,53	954,178
34215	3,4	316	37852	3,49	333	40648	10,28	4175,551
34975	2,86	181	38618	2,79	248,913	41340	10,03	4038,058
35508	10,3	3674	39393	4,7	653,971	n=5		
36432	3,55	433	39988	5,53	954,178	Data	COTA [m]	Q [m³/s]
37060	5,09	840,812	40648	10,28	4175,551	32595	10,13	3848
37852	3,49	333	41340	10,03	4038,058	34215	3,4	316
38618	2,79	248,913	43522	11,55	5266,28	37060	5,09	840,812
39393	4,7	653,971				37852	3,49	333
39988	5,53	954,178				40648	10,28	4175,551
40648	10,28	4175,551				SINTÉTICO	4	438,6
41340	10,03	4038,058					6	1071,2
43522	11,55	5266,28					7	1543
							8	2138,4

APÊNDICE V

SÉRIES HISTÓRICAS DE VAZÃO COMPLETAS
CALCULADAS COM BASE NA CURVA-CHAVE TÍPICA E
COM EXPURGO DOS EVENTOS HIDROLÓGICOS
EXTREMOS MEDIDOS EM CAMPO

ANO CIVIL	VAZÕES MÉDIAS MENSAIS NO POSTO TABAJARA - CURVA-CHAVE TÍPICA [m³/s]											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1977												1995
1978	2793	2527	3511	2726	2005	1428	807	456	352	434	635	2176
1979	2816	3250	3526	2814	1700	1044	606	391	364	306	542	689
1980	1265	2096	2995	2503	1573	778	478	255	151	314	416	1056
1981	1947	2058	2676	2349	1198	751	361	190	134	199	708	1419
1982	2559	3020	3164	2516	1712	965	584	365	358	523	473	781
1983	1561	2288	3064	2446	1296	814	443	234	146	162	543	1026
1984	1555	2094	2402	2547	1780	998	529	276	253	270	718	1319
1985	1919	2301	2633	2627	2413	1033	551	324	282	503	838	1444
1986	2585	3225	3392	2919	1887	1272	708	479	447	528	582	1048
1987	1575	1999	2694	2257	1470	867	499	257	191	237	617	1111
1988	2251	2780	3352	2937	1824	1099	599	333	225	291	625	1207
1989	2349	3536	3255	3255	3255	3255	3255	490	379	382	612	1053
1990	2226	3266	3142	2171	1395	1395	1395	1395	1395	1395	1395	1395
1991	1395	1395	1395	1395	1395	1395	1395	1395	1395	387	667	878
1992	1716	2203	3172	2296	1423	971	718	589	561	392	776	1633
1993	2565	3075	3241	2750	1668	950	583	408	446	468	748	1798
1994	2972	3407	3070	2702	1657	1054	730	428	341	428	602	1196
1995	2150	2883	2777	2545	1897	1009	606	334	271	358	760	1996
1996	2537	2694	3410	2695	1680	945	575	393	329	453	972	1179
1997	1921	2725	3389	3465	1961	1174	652	425	359	383	405	845
1998	1170	1741	2899	1937	1187	699	345	201	144	300	898	1622
1999	2471	2104	3068	1997	1417	810	546	247	228	227	676	1380
2000	2336	2583	2902	2202	1295	704	447	341	264	289	897	1323
2001	2305	2709	3623	2328	1568	1018	604	328	380	493	702	1895
2002	2829	2645	2485	2460	1565	823	493	372	388	550	599	1126
2003	1995	2875	3187	3719	1995	1126	527	313	284	401	575	827
2004	2249	2738	3164	2645	1399	881	526	294	300	323	732	1262
2005	2510	2509	3699	2543	1384	846	487	272	209	426	621	1694
2006	2832	3341	3337	3419	1625	972	561	328	260	585	878	1525
2007	2360	3072	2995	2398	1373	755	474	279	206	383	730	1431
2008	2268	3456	3402	2702	1775	1063	600	350	259	340	570	1018
2009	1770	2815	3540	3218	2210	1182	719	408	318	319	546	1851
2010	2688	3554	3960	2906	1394	987	526	300	229	287	557	767
2011	1748	2725	3165	2983	1238	693	367	228	217	304	502	1515
2012	2649	3653	3226	2430	1569	1004	559	295	194	360	682	1338
2013	2222	3573	3220	2923	1669	1124	685	375	343	574	1466	2080
2014	2922	3741	3914	3332	2242	2242	2242	2242	2242	460	1272	2599
2015	2565	2831	3582	3363	2637	1411	830	497	383	339	453	626
2016	1398	1919	2951	2663	1350	789	418	247	257	384	968	1482
2017	2162	2816	3111	2705	1755	962	519	333	248	334	768	1774
2018	2522	2623	3063	3069	1736	982	552	392	315	474	977	2801
2019	3297	3395	3664	3070	1849	957	574	365	315	517	1114	1807
2020	2322		3687	3179		1048	611	352	260	260	260	260

VAZÕES MÉDIAS MENSAIS NO POSTO TABAJARA - Curva-Chave com ausência de registros [m³/s]												
ano	jan-00	fev-00	mar-00	abr-00	mai-00	jun-00	jul-00	ago-00	set-00	out-00	nov-00	dez-00
1978	2977	2618	3987	2873	1975	1340	727	432	350	414	580	2196
1979	2996	3605	4005	3010	1627	948	555	381	359	315	503	641
1980	1163	2084	3240	2581	1492	703	450	275	197	322	401	962
1981	1904	2031	2807	2406	1101	681	357	227	184	234	648	1325
1982	2662	3273	3478	2598	1643	872	537	360	355	486	445	706
1983	1475	2309	3341	2526	1197	735	422	260	194	206	506	928
1984	1469	2086	2453	2643	1719	904	491	292	274	288	651	1222
1985	1878	2329	2751	2743	2501	937	510	328	296	473	757	1383
1986	2711	3575	3813	3147	1836	1173	641	449	425	490	540	949
1987	1489	1961	2848	2276	1384	780	467	277	228	262	567	1012
1988	2265	2979	3748	3165	1774	1001	549	335	253	303	574	1112
1989	2391	4029	3616	3616	3616	3616	3616	459	371	373	562	972
1990	2236	3697	3488	2171	1298	1298	1298	1298	1298	1298	1298	1298
1991	1298	1298	1298	1298	1298	1298	1298	1298	1298	378	607	792
1992	1653	2217	3493	2320	1328	875	649	539	518	382	715	1548
1993	2673	3364	3595	2935	1593	858	535	393	424	442	684	1769
1994	3207	3839	3351	2847	1576	955	661	409	342	411	552	1102
1995	2148	3092	2947	2642	1852	913	556	336	288	356	704	1970
1996	2637	2832	3854	2835	1604	855	530	382	333	430	884	1078
1997	1889	2872	3805	3941	1926	1073	593	407	356	375	393	767
1998	1074	1673	3115	1894	1085	635	345	235	192	314	812	1540
1999	2564	2087	3345	1980	1324	730	507	270	256	255	616	1313
2000	2378	2688	3117	2208	1198	638	424	342	283	303	810	1223
2001	2370	2860	4173	2363	1480	923	553	332	372	464	643	1853
2002	3016	2787	2562	2533	1481	743	461	366	378	509	548	1057
2003	1981	3075	3532	4318	1967	1026	491	320	298	389	532	749
2004	2296	2924	3479	2788	1301	796	488	305	310	328	671	1176
2005	2625	2618	4268	2674	1287	765	457	289	241	413	570	1672
2006	3018	3750	3738	3863	1542	880	517	332	280	539	804	1440
2007	2405	3349	3246	2474	1276	683	446	294	239	377	662	1335
2008	2298	3902	3822	2862	1714	966	550	349	279	342	530	927
2009	1703	3007	4046	3559	2234	1081	651	394	324	325	506	1831
2010	2868	4059	4677	3195	1296	898	488	310	256	302	516	694
2011	1687	2879	3480	3257	1139	629	362	255	247	314	469	1474
2012	2784	4198	3578	2498	1481	909	516	306	230	356	636	1240
2013	2255	4082	3568	3172	1590	1024	622	368	343	531	1387	2086
2014	3141	4331	4628	3769	2258	2258	2258	2258	2258	437	1193	2714
2015	2673	3017	4117	3774	2778	1317	749	465	375	340	433	575
2016	1314	1881	3179	2855	1253	713	402	270	278	381	886	1444
2017	2159	3000	3402	2844	1697	872	483	335	271	337	702	1754
2018	2615	2739	3343	3351	1666	887	509	381	321	449	903	2987
2019	3679	3837	4268	3356	1814	865	528	360	322	483	1018	1765