

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

**JOSILENE FERRARI REIS
WELLINGTON LINCONL CHIMANSKI DE SOUZA
SÉRGIO LUIZ DE OLIVEIRA JORGE FILHO**

MEDIÇÃO DA VAZÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE RONCADOR

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2011**

JOSILENE FERRARI REIS
WELLINGTON LINCOLN CHIMANSKI DE SOUZA
SÉRGIO LUIZ DE OLIVEIRA JORGE FILHO

MEDIÇÃO DA VAZÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE RONCADOR

Trabalho de Conclusão do Curso de graduação, apresentado à disciplina de TCC II, do Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Manoel Alves

CURITIBA
2011

AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem ...

A Deus, pela vida.

Aos nossos familiares, pelo apoio incondicional.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pela oportunidade de desenvolvermos o presente trabalho.

Ao Professor Dr. Gilberto Manoel Alves, pela orientação.

Aos nossos amigos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos colegas Angelo, Jorge e Vitor, pelas longas discussões nos corredores da UTFPR e pelas divertidas viagens até Bocaiúva do Sul.

À Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL), especificamente ao Sr. Homero Buba, pelo fornecimento de informações hidrológicas da Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza.

Ao Instituto Tecnológico SIMEPAR pelo fornecimento de informações sobre a precipitação pluviométrica na Região Metropolitana Norte de Curitiba.

RESUMO

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

Neste trabalho foi realizada a medição da vazão na Usina Roncador, localizada no município de Bocaiúva do Sul, no Estado do Paraná, e que está desativada há mais de quarenta anos, não possuindo registros de informações hidrométricas. Inicialmente foi feita uma pesquisa para levantamento dos principais métodos de medição de vazão citados na literatura. Foram realizadas cinco campanhas de medições, sendo que em cada campanha foram utilizados dois métodos: vertedouro e flutuador. O primeiro só foi possível dada a existência de um vertedouro no local. O segundo foi utilizado por ser um método de baixo custo. Os resultados para a vazão média obtida com os dois métodos foram comparados e o erro entre eles foi inferior a 5%, validando as medições. Foi obtida a série histórica de vazões de 1985 a 2005 utilizando um fator de transposição e a série histórica da Usina Hidrelétrica Gov. Pedro Viriato Parigot de Souza, localizada na mesma bacia hidrográfica da Usina Roncador. Com a série histórica foi obtido o fluviograma e a curva de permanência para um período de 21 anos.

Palavras-chave: Microcentral hidrelétrica. Medição de vazão. Método do flutuador. Método do vertedouro.

ABSTRACT

REIS, Josilene F.; FILHO, Sérgio Luiz O. J.; SOUZA, Wellington Linconl C. **Flow Measurement at MHP Roncador**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

This work presents the results of flow measurement in MHP Roncador, located in Bocaiúva do Sul, Brazil. MHP Roncador was disabled forty years ago and having no information about its hydrologic history. Was done a research about flow measurement methods used in micro hydroelectric plants. Was done five measurements campaigns in MHP Roncador's reservoir and in each campaign were used two methods: Weir and Float. The first method could be used because there was an existing weir in the place. The second method was used because it's a low cost method. The error between the two methods' results was less than 5%, validating the measurements. Was obtained the historical series of flows from 1985 to 2005 using a transposition factor and the historical series of HP Gov. Pedro Viriato Parigot de Souza, located in the same watershed that MHP Roncador. Using the historical series was obtained the permanence curve and the hydrograph for a period of 21 years.

Keywords: Micro hydroelectric plant. Flow measurement. Float method. Weir method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragem e vertedouro da Usina Roncador	11
Figura 2 – Modelo hidromecânico de um aproveitamento hidráulico.....	16
Figura 3 – Corte longitudinal da central hidrelétrica.....	18
Figura 4 - Situação da geração de energia do Brasil – 2011	21
Figura 5 - Desenho demonstrativo de uma MCH.....	23
Figura 6 – Esquema da calha de Parshal com suas seções principais	35
Figura 7 – Marcação do trecho no rio para medição da vazão pelo método dos flutuadores... 37	
Figura 8 – Marcação dos intervalos para medição das médias de profundidade	38
Figura 9 – Perfil de velocidades	40
Figura 10 – Distribuição dos pontos de medida	41
Figura 11 – Área de influência para cada posição do molinete.....	42
Figura 12 – Lastro para fixação do molinete.....	42
Figura 13 – Orifício afogado	44
Figura 14 – Corte de um bocal cilíndrico externo.....	45
Figura 15 – Corte de um bocal cilíndrico interno.....	45
Figura 16 – Bocal cônico convergente	46
Figura 17 – Vertedor retangular contraído	49
Figura 18 – Vertedor triangular com contração.....	51
Figura 19 – Desvio do curso d’água para medição pelo método volumétrico ou gravimétrico	52
Figura 20 – Localização da Usina Roncador.....	55
Figura 21 – Instalações da Usina Roncador	56
Figura 22 – Linímetro instalado no reservatório	57
Figura 23 – Materiais usados para medição de vazão pelo método do flutuador.....	58
Figura 24 – Vertedouro da Usina Roncador.....	59
Figura 25 –Corte do vertedouro com as principais dimensões e cotas.....	60
Figura 26 – Configuração utilizada para aplicação do método do flutuador.....	61
Figura 27 – Esquema ilustrando batimetria na seção transversal do rio	61
Figura 28 – Fluviograma com vazões obtidas pelo método do vertedouro.....	65
Figura 29 – Curva-chave com dados obtidos entre 03/09/2011 e 12/10/2011 – Método do vertedouro.....	66
Figura 30 – Fluviograma com vazões obtidas pelo método do flutuador	67
Figura 31 – Trechos do rio onde foi aplicado o método do flutuador.....	68
Figura 32 – Fluviograma com vazões obtidas pelo método do flutuador, excluído o valor obtido no dia 03/09/2011	68
Figura 33 – Curva-chave com dados obtidos entre 17/09/2011 e 12/10/2011 – Método do flutuador	69
Figura 34 – Comparação entre as vazões médias obtidas com os dois métodos.....	71
Figura 35 – Comparação entre as curvas-chave obtidas com os dois métodos.....	71
Figura 36 – Comparativo entre os níveis dos reservatórios das Usinas Roncador e GPS.....	74
Figura 37 – Comparativo entre as vazões Usinas Roncador e GPS	74
Figura 38 – Fluviograma de vazões médias mensais para a Usina GPS	75
Figura 39 – Fluviograma de vazões médias mensais para a Usina Roncador.....	76
Figura 40 – Fluviogramas estratificados para os anos em que ocorreram máximas (1995 e 1997) e mínimas (1985 e 1986).....	76
Figura 41 – Curva de permanência da Usina Roncador no período entre 1985 e 2005	77
Figura 42 – Níveis d’água no reservatório indicados no linímetro	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das PCHs quanto à potência e quanto à queda de projeto.....	19
Tabela 2 - Limitações das Micro e Mini Centrais	19
Tabela 3 - Classificação das PCHs em diversos países (kW)	20
Tabela 4 - Distribuição Geográfica das PCHs no Brasil	20
Tabela 5 – Posição do molinete em cada vertical em relação à profundidade	40
Tabela 6 – Densidade pluviométrica anual de 2001 a 2011 para a Região Metropolitana Norte de Curitiba.	56
Tabela 7 – Visitas de campo para medição de vazão	58
Tabela 8 – Métodos de medição de vazão	64
Tabela 9 – Vazão medida pelo método do vertedouro	65
Tabela 10 – Vazão medida pelo método do flutuador.....	67
Tabela 11 – Comparativo entre as medições pelos métodos do vertedouro e do flutuador	70
Tabela 12 – Vazão obtida pelo método dos molinetes e vazão estimada para os métodos do vertedouro e do flutuador para H=2,34m.	72
Tabela 13 – Níveis dos reservatórios e vazões para as Usinas Roncador e GPS	73
Tabela 14 – Principais vazões e potências.....	79

LISTA DE SIGLAS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ADP	Acoustic Doppler Profiler
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-Elétrica
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EOL	Central Geradora Eolielétrica
MCH	Microcentrais Hidrelétricas
NBR	Norma Brasileira
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SOL	Central Geradora Solar Fotovoltaica
SI	Sistema Internacional de Unidades
UFV	Usina Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UTE	Usina Termelétrica de Energia
UTN	Usina Termonuclear
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	11
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	12
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivo Geral	12
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 JUSTIFICATIVA	13
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 ENERGIA HIDRÁULICA.....	15
2.2 TIPOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS	16
2.2.1 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs).....	16
2.2.1.1 Centrais quanto à capacidade de regularização	17
2.2.1.1.1 PCH a fio d'Água	17
2.2.1.1.2 PCH de acumulação, com regularização diária do reservatório.....	18
2.2.1.2 Centrais quanto ao sistema de adução	18
2.2.1.3 Centrais quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto	19
2.2.2 Usinas Hidrelétricas (UHE).....	21
2.3 MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS (MCH)	22
2.3.1 Estrutura das MCHs	23
2.3.1.1 Tomada d'água	23
2.3.1.2 Adução.....	24
2.3.1.3 Casa de máquinas	24
2.3.1.4 Barragem	24
2.3.1.5 Vertedouro ou extravasor	25
2.4 HIDROLOGIA	25
2.4.1 Fluviometria	25
2.4.1.1 Curva-Chave.....	26
2.4.1.2 Fluviograma.....	28
2.4.1.3 Curva de permanência ou de frequência.....	28
2.4.1.4 Diagrama de Rippl.....	30
2.4.1.5 Curva dos volumes da bacia	30
2.4.1.6 Complementação de séries	31
2.4.1.7 Curva de transposição de vazões	32
2.5 MEDIÇÃO DA VAZÃO.....	33
2.5.1 Definição de vazão	33
2.5.2 Importância da medição de vazão para o projeto de uma usina hidrelétrica.....	34
2.5.3 Métodos de medição de vazão.....	34
2.5.3.1 Método da calha Parshall.....	35
2.5.3.2 Método dos flutuadores	36
2.5.3.3 Método magnético (eletromagnético).....	39
2.5.3.4 Método do molinete.....	39
2.5.3.5 Método dos orifícios, bocais e tubos curtos	42
2.5.3.5.1 Orifícios afogados	43
2.5.3.5.2 Orifícios de grandes dimensões.....	44
2.5.3.5.3 Bocal cilíndrico externo	44
2.5.3.5.4 Bocal cilíndrico interno ou bocal de borda.....	45

2.5.3.5.5 Bocal cônico convergente.....	46
2.5.3.6 Método dos traçadores.....	46
2.5.3.7 Método acústico (ultra-sônico).....	47
2.5.3.8 Método do vertedor	48
2.5.3.8.1 Vertedor retangular contraído de placa delgada	49
2.5.3.8.2 Vertedor retangular sem contração de placa delgada	50
2.5.3.8.3 Vertedor triangular de placa delgada com contração	51
2.5.3.9 Método volumétrico e gravimétrico	52
2.5.3.10 Método Winter-Kennedy	53
2.5.3.11 Método de Allen	53
3 MATERIAL E MÉTODOS	55
3.1 MATERIAL	55
3.1.1 Localização da Usina Roncador	55
3.1.2 Instalações existentes no local.....	56
3.1.3 Materiais para medições de vazão pelo método do vertedouro.....	57
3.1.4 Materiais para medições de vazão pelo método do flutuador	57
3.2 MÉTODO	58
3.2.1 Medição da vazão pelo método do vertedouro.....	59
3.2.2 Medição da vazão pelo método do flutuador.....	60
3.2.3 Determinação da potência aproveitável.....	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO	64
4.2 MEDIÇÃO DE VAZÃO PELO MÉTODO DO VERTEDOURO	64
4.3 MEDIÇÃO DE VAZÃO PELO MÉTODO DO FLUTUADOR	66
4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM OS MÉTODOS DO VERTEDOURO E DO FLUTUADOR.....	70
4.5 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS COM OS MÉTODOS: VERTEDOURO, FLUTUADOR E MOLINETES.....	72
4.6 TRANSPOSIÇÃO DE VAZÕES	73
4.7 FLUVIOGRAMA.....	75
4.8 CURVA DE PERMANÊNCIA	77
4.9 QUEDA BRUTA.....	77
4.10 POTÊNCIA APROVEITÁVEL	78
5 CONCLUSÃO.....	80
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A – PLANILHAS DE CÁLCULO PARA OBTENÇÃO DA VAZÃO.	87
ANEXO A – INFORMAÇÕES DO POSTO FLUVIOMÉTRICO.....	92

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Em setembro de 2010, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) firmou um convênio com a Prefeitura Municipal de Bocaiúva do Sul para a criação de um Centro de Educação Ambiental na cidade, incluindo a revitalização da Usina Roncador que será responsável pelo fornecimento de energia elétrica para o complexo. A Figura 1 mostra a barragem da usina, com o vertedouro ou extravasor.



Figura 1 – Barragem e vertedouro da Usina Roncador
Fonte: Própria.

Para implantação de uma central hidrelétrica, diversas etapas precisam ser cumpridas. Tais etapas podem ser divididas em estudos gerais, projeto, especificações e análise econômico-financeira. A etapa de estudos gerais compreende, dentre outros itens, os estudos hidrológicos para determinar o comportamento do curso d'água onde será instalada a central geradora (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p.25).

Segundo Souza, Fuchs e Santos (1983, p.91), uma importante etapa dos estudos hidrológicos é a fluviometria, cujo objetivo é determinar o comportamento da vazão de um curso d'água ao longo do tempo, apresentando os resultados em diagramas como curva-chave, fluviograma e curva de permanência.

Conhecendo-se o comportamento da vazão, é possível dimensionar os vários componentes da central hidrelétrica e determinar sua potência instalada (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p.25).

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Para a revitalização da Usina Roncador faz-se necessário conhecer a sua vazão. Como ela está localizada num pequeno córrego na região rural do município de Bocaiúva do Sul – Paraná (logo, sem monitoramento) e está desativada há mais de quatro décadas, não há informações disponíveis acerca do comportamento de sua vazão nas bases de dados mantidas pelo governo brasileiro.

Na falta de informações sobre a vazão, é necessário então realizar medições no local da usina. Para isto, existem diversos métodos e técnicas que podem ser empregados, com diferentes níveis de precisão e de custo (ANDRADE *et al.*, 2010).

A determinação da vazão característica de um curso d'água possui caráter estatístico, admitindo-se que os eventos se repetem de forma cíclica. Dessa forma, para se determinar a vazão de projeto de um aproveitamento hidrelétrico, faz-se necessário conhecer a série histórica de vazões para o local, num período mais extenso possível (RICARDO, 2006, p.14).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Medir a vazão da Usina Roncador.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Levantar os principais métodos de medição de vazão citados na literatura;
- Comparar os métodos de medição de vazão;
- Medir a vazão da Usina Roncador;
- Obter a série histórica de vazões para a Usina Roncador.

1.4 JUSTIFICATIVA

Os estudos hidroenergéticos para implantação de centrais hidrelétricas objetivam obter a potência ou energia hidráulica que um rio, córrego ou reservatório pode fornecer. Segundo Stano Junior, Bitencourt e Tiago Filho (2007, p.8), para se estimar a energia hidráulica de um aproveitamento hidráulico duas variáveis são necessárias: a queda bruta¹ e a vazão. Entretanto, segundo Andrade *et al.* (2010), a diferença de cota é obtida com boa precisão, ficando a precisão da energia hidráulica dependendo basicamente da precisão obtida na medição da vazão. Por isso a importância da seleção correta do método.

Ainda neste contexto, Souza, Fuchs e Santos (1983, p.103) citam métodos de medição de vazão que para serem aplicados precisam que os locais onde serão feitas as medições possuam determinados atributos, como um canal construído, por exemplo. Isso evidencia que o local onde será feita a medição de vazão também é um fator de seleção para o método que será empregado.

Outra justificativa está no fato de que nas últimas décadas os métodos de medição de vazão tornaram-se mais sofisticados, principalmente no que tange a utilização de recursos tecnológicos de ponta (PITON, 2007, p.12). Sendo assim, faz-se necessária uma análise da relação custo-benefício de métodos avançados de medição de vazão, principalmente no que tange a aplicação em centrais hidrelétricas de pequeno porte, como o caso da usina estudada.

A vazão de projeto de um aproveitamento hidrelétrico precisa ser obtida via análise da série histórica de vazões médias diárias ou mensais, para um período o mais longo possível (RICARDO, 2006, p.14).

¹ Também aparece na literatura como diferença de cota, nível ou altura.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1 é feita a introdução ao tema, onde são apresentados os objetivos, as motivações e a justificativa para a realização do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema para levantar os principais métodos de medição de vazão encontrados na literatura com suas principais características.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos para a medição da vazão.

No Capítulo 4 constam os resultados da medição e uma análise dos dados obtidos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do presente trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ENERGIA HIDRÁULICA

O movimento das águas provavelmente tenha sido a primeira fonte de energia utilizada para diminuir o esforço no trabalho de homens e animais. Não se sabe exatamente quando a roda d'água foi inventada, mas sabe-se que os sistemas de irrigação existem há pelo menos 5.000 anos. Diversos métodos eram utilizados na irrigação, um deles era o sistema conhecido como "roda Persa", que consistia numa grande roda em madeira com conchas em sua região periférica. Esta roda era instalada à beira de um rio ou riacho de forma que pudesse se movimentar sobre seu eixo, impulsionada pelo movimento da água em contato com as conchas. Este movimento fazia com que a água dentro das conchas fosse elevada (STANO JUNIOR; BITENCOURT; TIAGO FILHO, 2007, p.7).

Com o passar dos tempos, alguém deve ter percebido que o movimento da roda persa podia ser usada para outras finalidades, surgem assim as primeiras rodas d'água que aproveitavam o movimento da água para movimentar moinhos d'água, diminuindo assim o esforço humano e de animais para moagem de grãos. A roda d'água evoluiu ao longo do tempo e inspirou o desenvolvimento de uma grande quantidade de máquinas hidráulicas que fazem a conversão da energia mecânica da água em outras formas de energia, como por exemplo as turbinas hidráulicas usadas na geração de energia hidráulica (BOYLE, 2004, p.157).

Para determinação da energia de um aproveitamento hidráulico são necessárias basicamente duas variáveis: o desnível e a vazão do aproveitamento. Considere um modelo onde dois reservatórios d'água são conectados entre eles por um tubo e que há uma diferença de altura entre os dois reservatórios, conforme mostra a Figura 2. Se for considerado que o nível de água em cada reservatório permanece constante, a potência hidráulica fornecida pelo sistema é dada por (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p.9):

$$P_h = \gamma \cdot H_B \cdot \bar{Q} \quad (1)$$

onde P é a potência hidráulica (W), γ é o peso específico da água (N/m^3), H_B é a queda bruta (m) e \bar{Q} é a vazão de projeto (m^3/s).

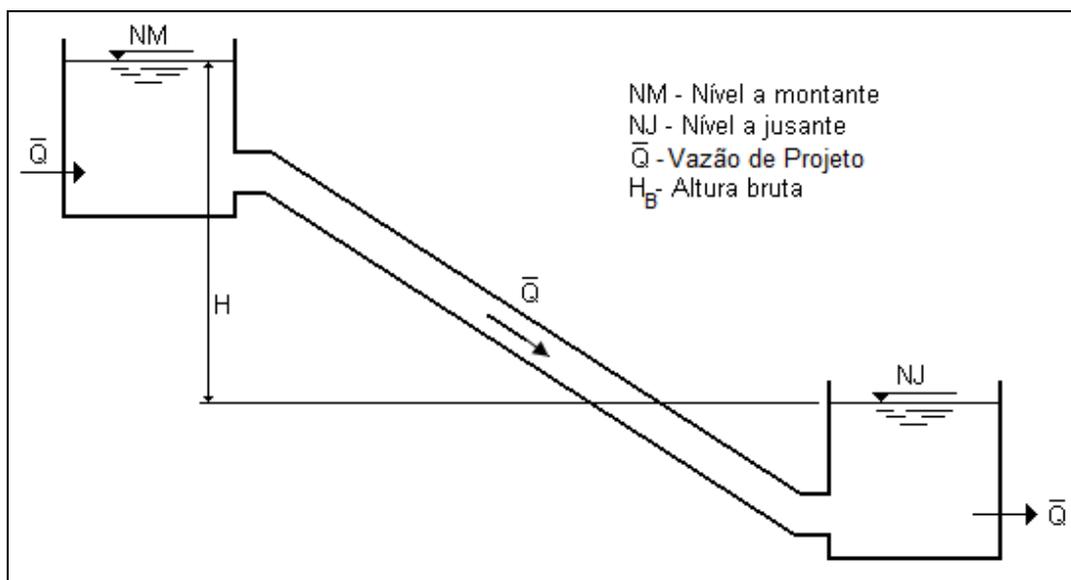


Figura 2 – Modelo hidromecânico de um aproveitamento hidráulico
Fonte: Própria.

Segundo Stano Junior, Bitencourt e Tiago Filho (2007, p.8), “a energia hidráulica deve ser calculada para avaliar a disponibilidade energética no local onde se pretende instalar uma máquina hidráulica”.

2.2 TIPOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

2.2.1 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)

O artigo 2º da resolução 394 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) do dia 04 de dezembro de 1988 definiu PCH como sendo “Empreendimentos hidrelétricos com potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, com área total de reservatório igual ou inferior a 3,0 km².” Posteriormente, essa resolução foi revogada pela Resolução 652, de 09 de dezembro de 2003, que manteve basicamente os mesmos parâmetros anteriores, mas flexibilizou a área alagada para até 13 km², caso uma das seguintes condições fossem verificadas: reservatório cujo dimensionamento, comprovadamente, foi baseado em outros objetivos que não o de geração de energia elétrica; ou o atendimento da seguinte inequação:

$$A \leq \frac{14,3P}{H}. \quad (2)$$

onde P é a potência elétrica instalada em MW, A é a área do reservatório em km², e H a queda bruta em metros, definida pela diferença entre os níveis d'água máximo normal de montante e normal de jusante.

A Eletrobrás apresentou nas “Diretrizes para projetos de PCH” (2011, p.2-2) os critérios de classificação das Pequenas Centrais Hidrelétricas, são elas:

- Centrais quanto à capacidade de regularização;
- Centrais quanto ao sistema de adução;
- Centrais quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto.

2.2.1.1 Centrais quanto à capacidade de regularização

Segundo Macintyre (1983, p.74) existem dois tipos de centrais quanto à capacidade de regularização: a Central Hidrelétrica a Fio D'água e a Central Hidrelétrica de Acumulação, com Regularização Diária de Reservatório.

2.2.1.1.1 PCH a fio d'Água

De acordo com as Diretrizes da Eletrobrás (2011, p.2-4) “esse tipo de PCH é empregado quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista”.

Monteiro (2011, p.18) afirma que as minicentrais hidrelétricas são denominadas centrais a fio de água, pois não é possível grande regularização da vazão afluyente, como ocorre nas centrais de represamento.

Por não possuir reservatório de acumulação algumas é possível fazer algumas simplificações, as quais foram descritas nas Diretrizes para projetos de PCH (2011, p.2-4), tais como dispensa de estudos de regularização de vazões, sazonalidade da carga elétrica do consumidor além de facilitar o estudo e a concepção da tomada d'água.

A Figura 3 exemplifica essa forma de PCH.

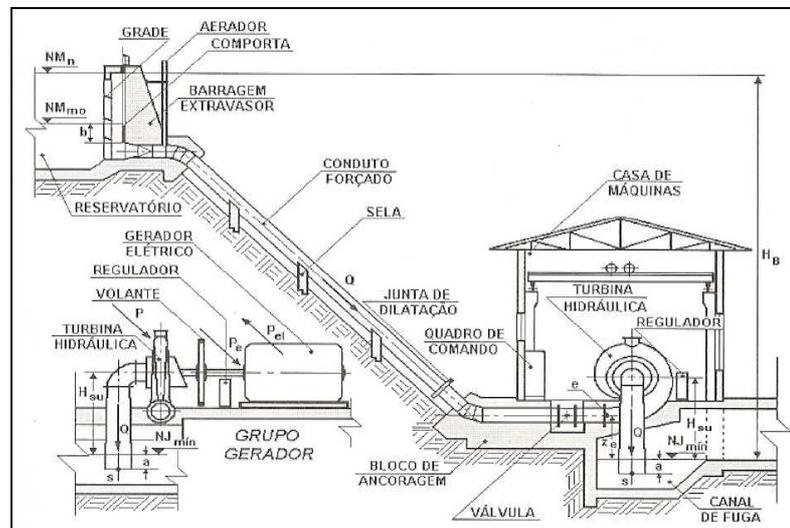


Figura 3 – Corte longitudinal da central hidrelétrica
Fonte: Souza, Santos e Bortoni (1999, p.9).

2.2.1.1.2 PCH de acumulação, com regularização diária do reservatório

Diferente da PCH a fio d'água, esta possui uma acumulação para regularizar a sua vazão. As Diretrizes da Eletrobrás (2011, p.2-4) relatam que esse tipo de PCH é empregado quando as vazões de estiagem do rio são inferiores à necessária para fornecer a potência para suprir a demanda máxima do mercado consumidor e ocorrem com risco superior ao adotado no projeto.

Alves (2007, p.25) ressalta que nos períodos de escassez de água complementa-se a geração por meio de outras fontes produtoras de energia, tais como óleo diesel, cana de açúcar, e biomassa.

2.2.1.2 Centrais quanto ao sistema de adução

Segundo a Eletronorte, em sua apostila Introdução às Energias Renováveis (2011, p.63), essas centrais são subdivididas em:

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

A escolha de um ou outro tipo de baixa e alta pressão deverá ser estudada e dependerá das condições topográficas e geológicas que o local do aproveitamento apresenta, bem como de estudo econômico comparativo, segundo as Diretrizes para projetos de PCH da Eletrobrás (2011, p.2-5) para sistema de adução longo, quando a inclinação da encosta e as condições de fundação forem favoráveis à construção de um canal, este tipo, em princípio, deverá ser a solução mais econômica.

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

De acordo com a Eletronorte (2011, p.63) as PCHs podem ser ainda classificadas quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto, considerando-se os dois parâmetros conjuntamente uma vez que um ou outro isoladamente não permite uma classificação adequada, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das PCHs quanto à potência e quanto à queda de projeto

<i>Classificação das centrais</i>	<i>Potência - P (kW)</i>	<i>Queda de Projeto - H (m)</i>		
		<i>Baixa</i>	<i>Média</i>	<i>Alta</i>
Micro	$P < 100$	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
Mini	$100 < P < 1.000$	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
Pequenas	$1.000 < P < 30.000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

Fonte: Diretrizes para Projetos de PCH (ELETROBRÁS, 2011).

As micro e mini centrais ainda têm determinadas limitações que estão indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Limitações das Micro e Mini Centrais

(continua)

<i>Características</i>	<i>Micro</i>	<i>Mini</i>
Potência máxima (kW)	100	1000
Altura da máxima da barragem (m)	3	5

Tabela 2 - Limitações das Micro e Mini Centrais

(conclusão)

<i>Características</i>	<i>Micro</i>	<i>Mini</i>
Vazão máxima da central (m ³ /s)	2	15
Número Mínimo de grupos geradores para a vazão máxima	1	2
Potência máxima do grupo gerador (kW)	100	1000
Período de recorrência para obras de desvio- vazão de cheias (anos)	-	5 a 10
Período de recorrência para obras permanente- extravasores-cheia máxima (anos)	-	500 a 1000
Período máximo para implantação (meses)	6	12 a 24
Regularização	Q95 ou na Máxima Regularização Diária	-

Fonte: ELETROBRÁS; DNAEE (1985b).

A classificação das usinas de pequeno porte varia de uma nação para outra. Balarim (1999, p.12) afirma que os diferentes países classificam de modo diferente as micro, mini e pequenas centrais. Isso decorre do estágio industrial do momento em um determinado período. A Tabela 3 apresenta essa variação.

Tabela 3 - Classificação das PCHs em diversos países (kW)

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

Fonte: Alves (2007).

A Tabela 4 mostra a distribuição geográfica das PCHs no Brasil.

Tabela 4 - Distribuição Geográfica das PCHs no Brasil

(continua)

<i>Região</i>	<i>UF</i>	<i>Usinas</i>	<i>Potência Gerada (kW)</i>	<i>Usinas na região</i>	<i>Potência gerada na região (kW)</i>
S	PR	30	187.765	111	867.261
	SC	45	310.361		
	RS	36	369.135		
SE	SP	45	173.737	179	1.383.556
	RJ	18	215.840		
	MG	102	774.427		
	ES	14	219.552		
CO	MG	49	632.326	75	1.079.558
	MS	9	182.830		
	GO	17	264.402		

Tabela 4 - Distribuição Geográfica das PCHs no Brasil

(conclusão)

Região	UF	Usinas	Potência Gerada (kW)	Usinas na região	Potência gerada na região (kW)
N	RO	15	77.239	32	284.178
	RR	1	5.000		
	AM	0	0		
	PA	3	60.000		
	AC	0	0		
	TO	13	141.939		
	AP	0	0		
NE	BA	8	91.419	14	107.357
	SE	0	0		
	AL	1	1.250		
	PE	3	7.168		
	PI	0	0		
	MA	0	0		
	CE	1	4.000		
	RN	0	0		
	PB	1	3.520		

Fonte: Adaptado de ANEEL (2011).

2.2.2 Usinas Hidrelétricas (UHE)

Segundo o parecer técnico da ANEEL de número 215/2007 do dia 31 de agosto de 2007, aproveitamentos hídricos acima de 30MW são denominados de Usinas Hidrelétricas (UHE).

O Banco de Informações de Geração (BIG) que está disponível na página virtual da ANEEL relata que dos 114.549.479 kW produzidos 3,27% da energia gerada do país provêm das Pequenas Centrais Hidrelétricas, tal valor corresponde a 3.721.910kW. Ao passo que as Centrais Geradoras Hidrelétricas (usinas de até 1MW) produzem 0,60% (690.646kW) e as Usinas Hidrelétricas 67,40% (78.926.687kW). A Figura 4 ilustra a atual situação da geração do Brasil.

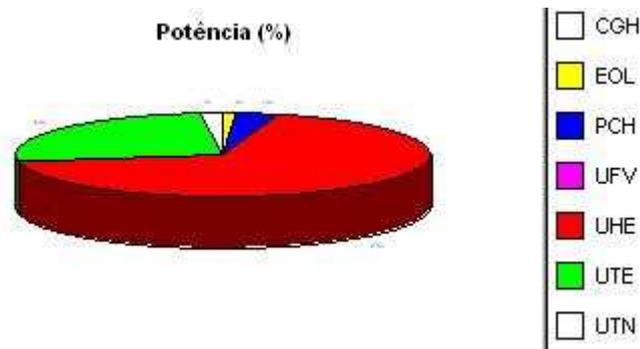


Figura 4 - Situação da geração de energia do Brasil – 2011

Fonte: ANEEL (2011).

2.3 MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS (MCH)

A Eletrobrás em sua página virtual definiu que as MCHs estão classificadas dentro do conceito geral das Pequenas Centrais Hidrelétricas, identificadas de acordo com grandezas como potência de até 100kW, altura de queda menor que 3m, vazão inferior a 2m³/s e período de implantação máximo de seis meses.

De acordo com Santos (2003),

atualmente, o perfil daqueles que desenvolvem esse tipo de aproveitamento é caracterizado pelo isolamento da unidade consumidora, não tendo outra forma de suprimento, estando muito distante da rede convencional de energia elétrica.

Alves (2007, p.17) comenta que a classificação das microcentrais é utilizada no Brasil especialmente no que diz respeito às áreas rurais, embora não existam engenharia e legislação adequadas.

Segundo Viana (2007, p.4), estima-se que haja mais de 1.000 minicentraís e microcentrais com potências médias de 300kW, entre centrais desativadas e em funcionamento. E em relação ao estado de conservação e de operação destes empreendimentos, não se tem nenhum dado a respeito. Contudo Alves (2007, p.17) salienta que embora a ANEEL tenha tentado inventariar todas as usinas hidrelétricas, não conseguiu incluir as micro usinas. Uma das dificuldades é a complexidade de levantamento de todos os pequenos empreendimentos, pois muitas vezes são privados e muitos deles em áreas rurais. Tiago Filho (2001) ainda alerta que

[...] as minicentraís e as microcentrais, que são as centrais abaixo de 1MW, estão no limbo. Não existe consenso para determinar sua situação. Geralmente, elas são operadas por autoprodutoras, e sua produção destina-se a consumo próprio. Normalmente, elas são associadas a empreendimentos agroindustriais. Sobre microcentral, estima-se que existam 200 MW em recapacitação. Desativadas, temos notícia de que existem 427 e, em situação desconhecida, 1.039, grande parte delas no Estado de Minas Gerais. [...] Por ser um Estado montanhoso e ter muitas nascentes, há vários potenciais remanescentes, várias centrais desativadas. Temos que nos preocupar com isso. Pelo registro das microcentrais e pelo de potência instalada, podemos ver que o pessoal que implanta microcentrais abaixo de 1 MW não se preocupa em avisar o órgão regulador, que é a ANEEL. E ela precisa desse registro. Então, existem vários empreendimentos, mas não existe a correlação registrada na ANEEL.

Segundo a Eletrobrás (2011) uma MCH é composta por dispositivos que captam e conduzem água do rio para uma casa de máquinas, onde ocorre a transformação de energia hidráulica em elétrica através da utilização de um conjunto turbina-gerador. A água utilizada é restituída ao rio ao final do processo. Os principais componentes de uma MCH são uma Barragem, uma Estrutura de Captação, um Canal ou Tubulação de Adução, um Canal de Fuga, Comportas, Turbinas Hidráulicas, Geradores Elétricos e equipamentos de proteção.

A Figura 5 é uma imagem ilustrativa de uma Micro Central Hidrelétrica.

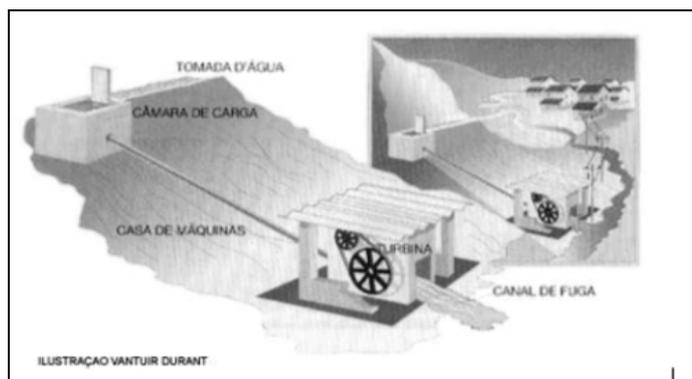


Figura 5 - Desenho demonstrativo de uma MCH
Fonte: Alterima (2011).

2.3.1 Estrutura das MCHs

2.3.1.1 Tomada d'água

Segundo a Eletrobras/DNAEE (1985, p.16),

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

As funções da tomada d'água são duas:

permitir o ensecamento da tubulação forçada ou canal de adução para a realização das obras de manutenção [...]; prover a retenção de corpos flutuantes e de material sólido (sedimentos) transportados pelo escoamento (ELETROBRAS/DNAEE, 1985, p.169).

2.3.1.2 Adução

A Eletrobrás/DNAEE (1985, p.16) define que a adução

compreende o sistema de ligação de água entre a tomada d'água e a casa de máquinas e apresentado em três concepções nos arranjos de microcentrais hidrelétricas:

- Adução entre a tomada d'água e a câmara de carga em escoamento livre por canal, e adução em alta pressão entre a câmara de carga e a turbina através de tubulação forçada;
- Adução entre a tomada d'água e a câmara de carga em baixa pressão, por meio de tubulação, e adução entre a câmara de carga e a turbina, em alta pressão, através de tubulação forçada;
- Adução em canal ou tubulação em baixa pressão, sem tubulação forçada, nos casos de turbinas tipo caixa aberta.

2.3.1.3 Casa de máquinas

É definida como “edificação que abriga os grupos geradores destinados à produção de energia elétrica, bem como os equipamentos auxiliares necessários ao funcionamento da central hidrelétrica” (ELETROBRÁS; DNAEE, 1985a, p. 273).

Alves (2007, p.44) afirma que

seu posicionamento deve ser também levado em consideração devido aos custos relacionados, bem como deve ser observada com atenção a cota do seu piso para que a cheia do rio não a alcance. É importante realizar análise a respeito da posição da casa de máquinas em relação à câmara de carga ao canal de fuga e à distância do consumidor, especialmente por abranger altos custos. A casa de máquinas é colocada neste local devido às condições do terreno levando em consideração a otimização da queda útil da usina.

2.3.1.4 Barragem

As barragens têm como função primária o armazenamento de água, para fins de abastecimento, irrigação, controle de cheias, navegação, recreação ou geração de energia. A

forma construtiva adotada deve ser definida pelas disponibilidades locais de material de construção e pelas características das fundações.

Caso seja necessária a construção de uma barragem para garantir a operacionalidade da tomada d'água, deve se escolher o tipo de barragem (terra ou alvenaria) (ELETROBRÁS; DNAEE, 1985a, p.17).

2.3.1.5 Vertedouro ou extravasor

É uma obra projetada e construída com o objetivo de escoar o excesso d'água acumulado pelo reservatório, evitando o risco do nível d'água atingir a crista da barragem (SOUZA, 1999, p.151).

2.4 HIDROLOGIA

“Hidrologia é a ciência que trata do estudo da água na natureza. É parte da geografia física e abrange, em especial, propriedades, fenômenos e distribuição da água na atmosfera, na superfície da terra e no subsolo.” (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 81).

Já a hidrologia aplicada está focada na utilização dos recursos hídricos, preservação do meio ambiente e ocupação da bacia hidrográfica (CARVALHO; SILVA, p. 2).

2.4.1 Fluviometria

“A fluviometria trata da determinação da vazão de um curso de água em várias de suas seções durante um longo tempo. Neste sentido, os valores das vazões médias diárias ou mensais podem ser apresentados sob forma de diagramas [...] que colocam em evidência aspectos distintos do regime do curso de água e facilitam a compreensão das características da bacia hidrográfica e a solução de problemas específicos.” (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 91-92)

2.4.1.1 Curva-Chave

A curva-chave, ou curva de descarga de um rio, em uma determinada seção, é a relação entre as alturas do nível de água e a vazão correspondente (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 92).

Sua obtenção parte da medida, em épocas oportunas, da vazão e das alturas da água para uma determinada seção do rio (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 92). A relação cota-descarga é obtida a partir da interpolação dos pontos obtidos, e como as medições costumam definir apenas um trecho central da curva, utiliza-se ainda a extrapolação (PORTO; FILHO; SILVA, p. 34; TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003).

As dificuldades na representação do trecho inferior da curva são devidas principalmente à mudança de leito. Já no trecho superior o problema é a carência de medidas nos eventos extremos (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003).

Segundo Tucci, Pereira e Neto, as extrapolações nem sempre apresentam uma boa aproximação da curva real, devendo-se realizar medições fora do intervalo já medido, a fim de confirmar ou retificar as extrapolações.

Existe um grande número de métodos para extrapolar as curvas-chave, que serão apresentados adiante (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003).

O método da extrapolação gráfica a sentimento, que segue a tendência do trecho definido pelas medições, e o método do ajuste de equações nos pontos medidos são usados apenas para pequenas extrapolações, por serem os mais sujeitos a grandes erros caso aplicados a trechos extensos (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003).

O método que se utiliza da leitura de cotas simultâneas em outra estação próxima com uma curva-chave melhor definida, “consiste em plotar num gráfico as leituras de régua simultâneas da duas estações e estabelecer uma relação empírica entre essas estações.” (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003)

A técnica mais utilizada no Brasil para extrapolar a parte superior da curva-chave é o método da extrapolação logarítmica, porém não pode ser utilizado para o trecho inferior. Esse processo de extrapolação apresenta bons resultados quando o controle hidráulico da estação permanece estável. Entretanto, os erros podem ser muito grandes quando as condições de controle mudam (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003).

Outro processo de extrapolação é o que consiste na determinação da área em função da cota a partir do levantamento topobatimétrico da seção de medições. Esse gráfico

geralmente representa uma forma de “S”, com ponto de inflexão acima da cota média. Diferente do processo anterior esse método apresenta bons resultados para o trecho inferior da curva e resultados que nem sempre são razoáveis para o superior. Isso é devido à falta de diretriz para extrapolar a velocidade média, que apresenta variações nem sempre previsíveis nas vazões altas (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003).

Existe ainda o método que realiza a extrapolação com base em fórmulas do regime uniforme em canais. Este método consiste em aceitar como válidas as fórmulas de Chezy ou de Manning para o escoamento uniforme em canais. “O método Stevens é a forma mais clássica desta maneira de extrapolar uma curva-chave e baseia-se na fórmula de Chezy”. (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003)

O último método citado é a extrapolação da curva-chave por meio de cálculo de remanso a partir do controle hidráulico. “Esse é o único processo que permite levar em conta a eventual mudança de controle, pois o cálculo de remanso pode ser feito partindo-se alternativamente de duas seções de controle, devendo-se adotar o nível mais elevado.” (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003)

Para traçar a curva-chave pode-se aproximar a relação cota-descarga por uma expressão exponencial do tipo (PORTO; FILHO; SILVA, p. 38):

$$Q = a \cdot (H - H_0)^b \quad (3)$$

onde a , b e H_0 são parâmetros de ajuste, H é o nível do rio, e Q é a vazão.

H_0 é o valor para o qual a vazão é nula e pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo da posição do zero da escala com relação ao fundo do rio (PORTO; FILHO; SILVA, p. 38).

Para determinar os parâmetros de ajuste a expressão geral é linearizada, determinando-se H_0 por tentativa e erro, e a e b por regressão linear, utilizando a equação (PORTO; FILHO; SILVA, p. 38-39):

$$\log Q = \log a + \log b \cdot (H - H_0) \quad (4)$$

Após definida a curva-chave é necessário apenas monitorar o nível da água para se obter a vazão do rio, mas o “acúmulo das pequenas variações das características da seção

ao longo dos anos faz com que a relação determinada seja associada a um período de validade.” (PORTO; FILHO; SILVA, p. 29-36)

2.4.1.2 Fluviograma

Hidrógrafa, hidrografa, ou fluviograma é o gráfico que representa as vazões em função do tempo para uma seção transversal do rio (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 93).

O fluviograma pode ser representado com as “vazões instantâneas, médias diárias, semanais, mensais ou anuais, máximas e mínimas semanais, mensais ou anuais” (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p. 58).

A obtenção desse gráfico parte de leituras diárias feitas em uma régua instalada na seção para a qual já se determinou a curva-chave. Essas leituras devem ser feitas diariamente, de preferência nos horários da 7h30, 13h30 e 17h30 (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 93).

A média diária é a média aritmética das três alturas, que permite traçar os gráficos semanais (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 93).

“A combinação adequada da curva-chave e do gráfico das alturas permite o traçado do fluviograma.” (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 94)

Segundo Souza, Santos e Bortoni (2009, p. 59) os fluviogramas são os que melhor representam visualmente o comportamento no passado do rio, e também permitem visualizar com facilidade “a extensão e a distribuição temporal de secas e enchentes ao longo do período de observações” (STUDART, p. 2).

2.4.1.3 Curva de permanência ou de frequência

A curva de permanência, também conhecida como curva de frequência, é o gráfico representativo da porcentagem de tempo em que uma dada vazão é igualada ou excedida (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 94; BARBOSA, p. 1).

Essa curva é construída com base nos registros das vazões em uma estação fluviométrica. A curva pode ser traçada para vazões diárias, mensais ou anuais. Como, em geral, as vazões de um rio mantêm um valor médio anual aproximadamente constante, a curva de permanência das vazões médias anuais será uma linha quase horizontal (BARBOSA, p. 1).

Para a construção do gráfico primeiramente é feita uma divisão em classes, dispostas em ordem decrescente, da faixa total das vazões utilizadas na análise. O tamanho do intervalo é calculado segundo:

$$\Delta Q = \frac{(Q_{m\acute{a}x} - Q_{m\acute{i}n})}{Np} \quad (5)$$

onde ΔQ é o tamanho do intervalo de classe, $Q_{m\acute{a}x}$ é a vazão máxima, $Q_{m\acute{i}n}$ é a vazão mínima e Np é o número de pontos de plotagem, que depende do tamanho da série de registros, mas, em geral, são utilizados dez ou mais pontos (BARBOSA, p. 1).

Em seguida é feito um levantamento do número de observações dentro de cada classe. Esse número é então acumulado a partir do intervalo que contém a vazão máxima, fazendo uma classificação decrescente (BARBOSA, p. 2).

O próximo passo é dividir os valores acumulados pelo número total de registros de vazão e multiplicar o resultado por 100, obtendo a contagem das observações acumuladas em porcentagem (BARBOSA, p. 2).

Por último é lançado no gráfico os valores das vazões em ordenada e as contagens percentuais acumuladas em abscissa, traçando uma linha suave através dos pontos plotados (BARBOSA, p. 2).

A forma da curva de permanência é um indicativo das características do curso d'água. Uma curva plana sugere a presença de armazenamentos naturais a montante da seção fluviométrica. Já uma curva com forte declividade indica a ausência de armazenamentos significativos na calha do rio (BARBOSA, p. 2).

A potencialidade do rio pode ser tirada da curva de permanência, e é igual a potência disponível para vazões entre 90% e 100% do tempo. “Pressupõe, evidentemente, ausência de regularização, pois se baseia nas vazões naturais.” (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 96)

2.4.1.4 Diagrama de Rippl

Denomina-se curva de massa, de volumes acumulados ou diagrama de Rippl a curva integral do fluviograma, que representa as áreas do fluviograma da origem ao tempo respectivo em ordenadas, e na abscissa este tempo (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 96).

$$V = \int_{t_i}^{t_f} Q \cdot dt \cong \sum_{t_i}^{t_f} Q_i \cdot \Delta t_i \quad (6)$$

A partir do fluviograma é feita uma tabela com as vazões médias mensais para um ano e a partir dos valores dessa tabela é construído o diagrama de Rippl (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 97).

Nesse diagrama, as vazões são dadas pela tangente a essa curva (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 97):

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

Esta curva é fundamental no estudo de regularização de cursos de água, e permite também determinar o período crítico e a vazão média deste período (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 98; SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p. 69).

2.4.1.5 Curva dos volumes da bacia

É uma curva representativa dos volumes acumulados na bacia em função das alturas da água ou alturas represadas (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 98).

Sobre cartas geográficas, na menor escala possível, delimita-se a área da bacia hidrográfica a montante da seção de regularização para a obtenção de sua área e do fator de transposição f_t (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 98).

Em seguida, com auxílio de um planímetro, determina-se a área limitada pela curva de nível inferior, que é cortada pela linha do centro da barragem. As áreas limitadas pelas curvas de nível imediatamente em níveis superiores são então igualmente determinadas até a cota considerada como a máxima inundável (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 98).

O volume contido por dois planos que passam por suas curvas de nível vizinhas são obtidos pela equação:

$$V_i = \frac{A_{i-1} + A_i}{2} \cdot h \text{ [m}^3\text{]}, \quad (8)$$

onde h é a diferença de nível entre duas curvas consecutivas (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 99).

O volume acumulável é obtido pela soma dos n volumes (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 99):

$$V_n = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_{i-1} + A_i}{2} \right) \cdot h \text{ [m}^3\text{]} \quad (9)$$

“Do volume total obtido, uma parte, ΔV , não é aproveitável para a produção de energia e isso deve ser considerado nos estudos.” (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 99)

2.4.1.6 Complementação de séries

A falta de todos os dados diários nos postos fluviométricos leva a falhas nos dados mensais e anuais, o que faz necessário a complementação dessas séries, para não invalidar futuros estudos (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p. 52).

É possível completar uma série de vazões fazendo uma correlação com dados de um outro posto fluviométrico próximo, preferencialmente da mesma bacia, desde que haja semelhança sob todos os aspectos entre as respectivas áreas de drenagem. Neste caso, pode-se estabelecer a seguinte correlação (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p. 52-53):

$$q_i(t) = a \cdot q_s(t) + b + \varepsilon \quad (10)$$

onde $q_i(t)$ é a vazão unitária no posto de interesse no instante t, $q_s(t)$ é a vazão unitária no posto semelhante no instante t, e ε é o erro ou ruído.

Os estimadores de a e de b podem ser calculados por mínimos quadrados, a partir de um conjunto de valores de q_i e de q_s (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p. 53).

Utilizando-se o método de Monte Carlo, sorteia-se o erro, permitindo estimar a vazão de interesse (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p. 53).

$$Q_i(t') = A_{di} \cdot [\hat{a} \cdot q_s(t') + \hat{b} + \varepsilon] \quad (11)$$

onde $Q_i(t')$ é a vazão sorteada, no posto de interesse, no instante da falha de dado, (t'); \hat{a} e \hat{b} são estimadores de a e b, calculados por regressão linear; ε é o erro sorteado; e A_{di} é a área de drenagem no posto de interesse.

2.4.1.7 Curva de transposição de vazões

É a “curva obtida para uma determinada seção de um curso de água em função da curva conhecida para uma outra seção do mesmo ou de outro curso de água.” (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 100)

É comum não ter o histórico de vazões do local de interesse, fazendo-se necessária a transposição de dados de outros postos fluviométricos, que devem estar próximos e terem áreas de drenagem semelhantes às do local de estudo (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p. 55).

A área de drenagem é a “área, em planta, da superfície do solo capaz de coletar a água das precipitações e conduzi-las ao ponto do rio de interesse, diretamente ou através de seus afluentes” (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p. 51).

Os postos fluviométricos para a transposição devem estar preferencialmente dentro da mesma bacia, mas se estiverem longe ou em outras bacias devem pelo menos estar na mesma faixa de paralelos terrestres do posto de interesse (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p. 55).

Assim, a vazão no local de interesse pode ser calculada por (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p. 55):

$$\bar{Q}_i = \frac{A_{di}}{A_{ds}} \cdot Q_s \quad (12)$$

onde i indica o posto de interesse e s o posto semelhante.

Para obter dados mais preciso pode-se efetuar medições de vazão no ponto de estudo em diversas épocas do ano, obtendo valores que se relacionam com as vazões do local de onde se pretende transpor os dados, nas mesmas datas das medições, resultando então em um fator de transposição que pode ser usado para conseguir a história do local de interesse a partir de um local semelhante (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p. 100-101):

$$f_t = \frac{Q_i}{Q_s} \quad (13)$$

2.5 MEDIÇÃO DA VAZÃO

2.5.1 Definição de vazão

A vazão de um rio é o volume de água que passa por uma determinada seção transversal em um intervalo de tempo considerado (SANTOS et al., 2001 apud PITON, 2007, p.23)².

A vazão não é influenciada apenas pelo nível de água, que é uma variável temporal, mas também pela declividade do curso d'água e a forma da seção, variáveis atemporais (AVIX GEO AMBIENTAL, 2011). O nível de água é influenciado pelas estações do ano, sendo menor quando as taxas de evaporação são maiores, e pelo clima, aumentando durante os períodos chuvosos e diminuindo durante os períodos secos (EMBRAPA, 2007, p.1).

A vazão volumétrica (Q) é expressa no Sistema Internacional de Unidades (SI) em m³/s, e é comum encontrar também l/s, l/h, cm³/min, entre outras (SCHNEIDER, 2007, p.2).

² SANTOS, I.; BUBA, H.; REGINA, J. V. **Batimetria qualitativa com ADCP: levantamento do canal de adução da UHE Salto Santiago**. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS, 14, Aracaju, 2001. **Anais...** Aracaju: ABRH, 2001, 1 CD-ROM.

2.5.2 Importância da medição de vazão para o projeto de uma usina hidrelétrica

O conhecimento do comportamento dos cursos d'água é de fundamental importância para os cálculos técnicos e econômicos de uma central hidrelétrica (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p.67).

A importância da medição de vazões em um aproveitamento hidrelétrico está presente desde a determinação de seu potencial, estendendo-se à definição da vazão de projeto, ensaios nos grupos geradores e monitoramento da geração. (CERPCH, 2008, p.1).

A vazão será responsável pelo diâmetro da tubulação, o tipo de turbina, a velocidade rotacional, o tamanho do gerador, etc. (CANYON HYDRO, entre 2004 e 2011, p.12).

A determinação precisa do rendimento de uma usina hidrelétrica em tempo real depende fortemente da precisão da determinação da vazão (CPH, 2001).

Para determinar a capacidade reguladora de um reservatório é indispensável o conhecimento das características dos ciclos, que podem ser obtidas através dos chamados tempo de regularização e tempo de enchimento. Para o cálculo destes tempos é necessário o conhecimento da vazão média do ciclo hidrológico (SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009, p.39).

2.5.3 Métodos de medição de vazão

Existem diversos métodos para se determinar a descarga líquida de um curso de água.

“A escolha do método adequado para medição da vazão do efluente em escoamento livre é feita em função da vazão esperada.” (AGÊNCIA..., 2004, p.3).

Entre os processos para se medir a vazão de forma expedita, os mais simples são aqueles realizados por meio de flutuadores ou por meio de vertedores (ELETROBRÁS, 1985, p.40).

2.5.3.1 Método da calha Parshall

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.1) este método consiste na utilização de um

dispositivo com seção convergente, com fundo em nível, seção estrangulada ou garganta, com fundo em declive e seção divergente, com fundo em aclave. A vazão deve ser determinada a partir da leitura, em escala, da lâmina líquida na seção convergente.

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.3) este é um método de operação simples que pode ser aplicado a todas as vazões, tendo um custo médio de instalação.

Os medidores de Parshall compõem-se de três partes: uma seção convergente, uma seção estrangulada (garganta) e uma seção divergente, conforme apresentado na Figura 6 (AGÊNCIA..., 2004, p.9).

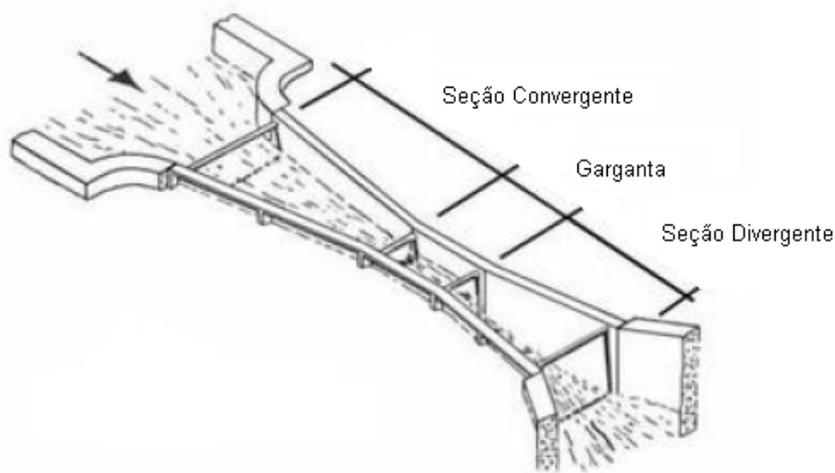


Figura 6 – Esquema da calha de Parshall com suas seções principais
Fonte: Adaptado de AVIX GEO AMBIENTAL (2011).

O nível do fundo do canal na seção convergente deve ser mais alto do que o nível na seção divergente, com o fim de assegurar que esta não trabalhe no regime de fluxo submerso. A altura da lâmina d'água na seção convergente é a medida do fluxo através da calha (AGÊNCIA..., 2004, p.9).

“Quando a calha for usada afogada, ou seja, quando o nível de água a jusante for suficientemente elevado para influenciar o escoamento, deve ser necessária leitura de escala em duas seções.” (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.4).

“A calha Parshall não sofre influência de líquidos contendo materiais em suspensão e por isso é recomendada para essa condição.” (AGÊNCIA..., 2004, p.4).

A equação de descarga usada para este método é dada por (AGÊNCIA..., 2004, p.9):

$$Q = 2,2WH^{3/2} \quad (14)$$

onde Q é a vazão em m³/s, W é a largura da garganta em polegadas e em pés, e H é a altura da lâmina d'água, em m, medida a montante da garganta, em um poço auxiliar.

Segundo a CPRH N 2.004 (AGÊNCIA..., 2004, p.9) as seguintes condições devem ser observadas quando da utilização deste método:

O medidor Parshall deve ser instalado em canais retos com paredes perfeitamente verticais. O tamanho do medidor deve ser determinado em função da vazão estimada e de tal modo que não provoque inundação no canal de aproximação a montante do vertedor. O fundo do canal de saída deve ser inferior ao do canal de aproximação. O canal de aproximação deve ter um trecho reto superior à 20H, a montante da garganta de medição.

“Obedecidas às condições acima, estima-se uma precisão de 1% nas determinações de vazão.” (AGÊNCIA..., 2004, p.9)

2.5.3.2 Método dos flutuadores

Existem várias formas e tipos de flutuadores, porém, são normalmente esféricos, ocos ou de metal. Tem por finalidade medir a velocidade de um filete da superfície, podendo também medir a velocidade de filetes abaixo da superfície através da utilização de um conjunto flutuante, formado por uma esfera auxiliar presa à primeira. A velocidade deste conjunto é aproximadamente a média aritmética dos filetes da superfície e interno. Para o cálculo da velocidade é cronometrado o tempo para a esfera, ou o conjunto, percorrer uma distância conhecida (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983).

Este método é indicado para pré-avaliação por ser um método rápido, mas também precário, devido à necessidade de aplicação de um coeficiente, de determinação incerta, para se obter a velocidade média na seção. “Pode ser utilizado mesmo com grandes concentrações de materiais em suspensão.” (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.4).

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.3) este é um método de operação simples que pode ser aplicado a todas as vazões, tendo um custo baixo de instalação, e pode apresentar erros de até 20%.

Segundo a Eletrobrás (1985, p.40) a medição da vazão pode ser feita escolhendo-se um trecho reto do curso d’água, preferencialmente com mais de 10 metros de comprimento, cujo leito seja uniforme e onde a água flua serenamente, marcando-se o seu início e o seu fim, conforme é ilustrado na Figura 7. Sugere-se o uso de cordas para a marcação do trecho escolhido (EMBRAPA, 2007, p.2).

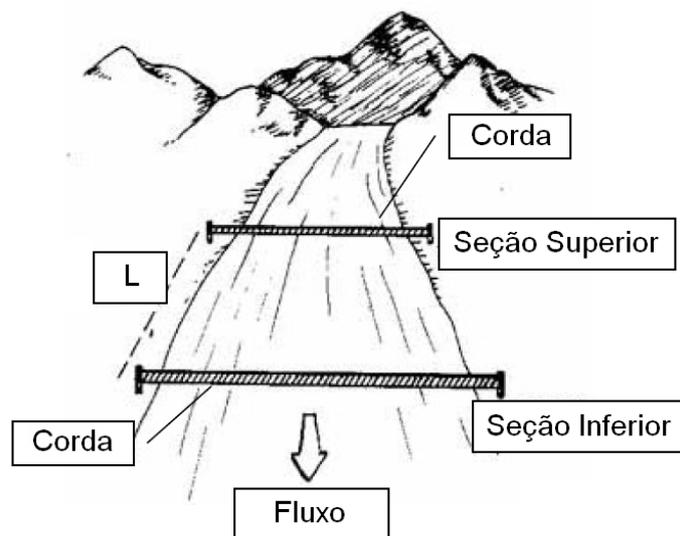


Figura 7 – Marcação do trecho no rio para medição da vazão pelo método dos flutuadores
Fonte: Adaptado de EPA (apud EMBRAPA, 2007, p.2)³.

Em seguida coloca-se no meio do leito, a alguns metros a montante do início do trecho escolhido, um flutuador e determina-se o tempo que o flutuador gasta para percorrer o trecho escolhido (ELETROBRÁS, 1985, p.40).

Quanto maior o número de repetições mais precisos serão os resultados, recomenda-se realizar a medição no mínimo três vezes. O resultado do tempo será a soma dos tempos medidos dividido pelo número de repetições. (EMBRAPA, 2007, p.3).

³ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Stream flow. In: ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Volunteer stream monitoring: a methods manual. Washington: EPA 1997. Cap. 1, p. 134-138.

As áreas das seções transversais limitadas pelos níveis d'água e o fundo do córrego devem ser determinadas, no mínimo, para o ponto inicial e final do trecho de medição (ELETROBRÁS, 1985, p.40). “A área do rio é o produto da largura do rio pela média da profundidade.” (EMBRAPA, 2007, p.2).

Para determinar a média da profundidade da seção superior e inferior devem-se marcar intervalos iguais ao longo da corda e dividir o total das profundidades medidas pelo número de intervalos mais um (soma-se um ao cálculo da média pela necessidade de se considerar a profundidade zero), conforme ilustrado na Figura 8. (EMBRAPA, 2007, p.2).

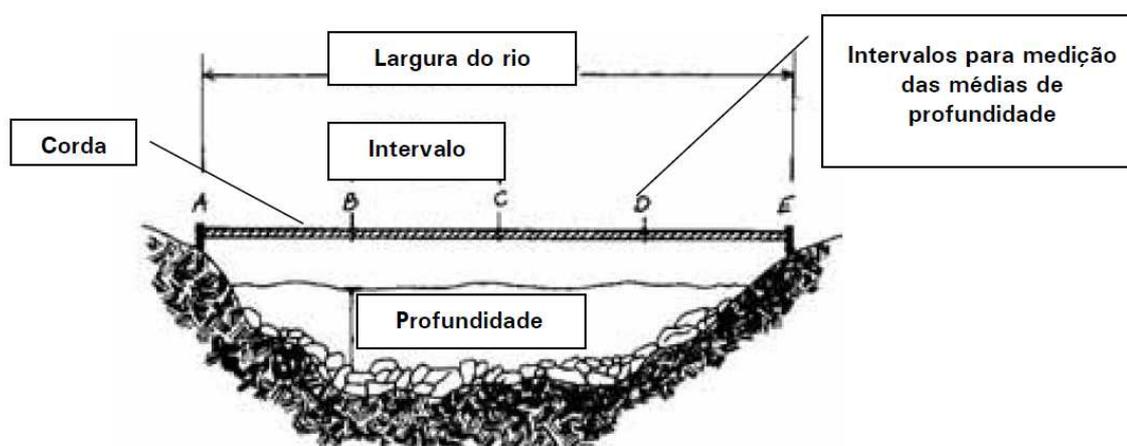


Figura 8 – Marcação dos intervalos para medição das médias de profundidade
 Fonte: Adaptado de EPA (apud EMBRAPA, 2007, p.3)⁴.

A vazão Q, em m³/s, pode ser calculada pela equação (ELETROBRÁS, 1985, p.40) e (EMBRAPA, 2007, p.1):

$$Q = \frac{C \cdot L \cdot \bar{A}}{t} \quad (15)$$

onde L é o comprimento do trecho medido em m, \bar{A} é a média das áreas das seções transversais, levantadas ao longo do trecho, em m², t é o tempo de percurso do flutuador em s, e C é o coeficiente de correção de velocidade superficial para velocidade média na seção de medição (0,8 para rios com fundo pedregoso ou 0,9 para rios com fundo barrento).

⁴ ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Stream flow. In: ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Volunteer stream monitoring: a methods manual. Washington: EPA 1997. Cap. 1, p. 134-138.

2.5.3.3 Método magnético (eletromagnético)

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.2) este é um “método que utiliza, para determinar a vazão, medidas da tensão induzida na corrente líquida ao passar por um campo magnético.”

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.3) este é um método que exige operação especializada, podendo ser utilizado para vazões acima de 30l/s e apresenta um alto custo de instalação.

É possível obter uma alta precisão, com erro entre 2 e 5%, sendo a velocidade mínima detectável 0,001 m/s, mas é suscetível à presença de campos elétricos e magnéticos na área, e também a turbulência e vórtices (intenso movimento espiral de parte da massa líquida). (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.2 e p.6).

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.6) este método é “particularmente útil no caso de fluidos corrosivos, ou quando não é desejável perfurar as paredes do canal” e também

é tolerante ao crescimento vegetal aquático; à presença de gases; à estratificação de temperatura; à presença de sólidos suspensos, material flutuante; à deposição de material na membrana isolante; e a remanso.

2.5.3.4 Método do molinete

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.2) este é um

método que utiliza a determinação da velocidade de um fluido, por meio da sua correlação com o número de rotações de uma hélice ou conchas de um dispositivo chamado molinete.

“A medição de vazão com molinetes hidrométricos exige, dependendo das dimensões do rio, no mínimo 20 medições individuais ao longo da seção, que geralmente compreendem várias horas de trabalho.” (CERPCH, 2008, p.4).

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.6) este método pode ser empregado com precisão (erros de até 5%) para seções grandes e/ou irregulares, mas não deve

ser aplicado em regimes turbulentos ou na presença de grandes concentrações de sólidos suspensos.

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.3) este é um método que exige operação especializada e é recomendado para vazões acima de 30l/s. Apresenta um alto custo de operação, devido ao preço do equipamento.

O molinete deve ser posicionado em diversos pontos da seção do curso d'água para o levantamento do perfil de velocidades. Depois de levantado o perfil de velocidades, Figura 9, deve-se calcular a velocidade média de cada perfil e então determinar a vazão (AVIX GEO AMBIENTAL, 2011) e (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003).

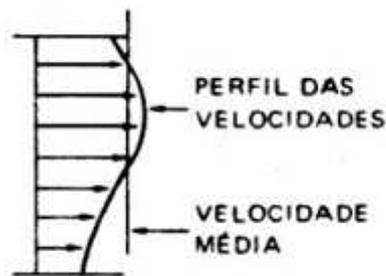


Figura 9 – Perfil de velocidades
Fonte: TUCCI, PEREIRA e NETO (2003).

Os pontos de cada vertical onde devem ser posicionados os molinetes dependem da profundidade do curso d'água. A Tabela 5 fornece as posições nas quais o molinete deve estar em relação à profundidade (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003).

Tabela 5 – Posição do molinete em cada vertical em relação à profundidade

<i>Profundidades</i>	<i>Posição</i>
0,15 a 0,60	0,6P (1)
0,60 a 1,20	0,2P e 0,8P
1,20 a 2,00	0,2P; 0,6P e 0,8P
2,00 a 4,00	S (2); 0,2P; 0,4P; 0,6P e 0,8P
Acima de 4,00	S; 0,2P; 0,4P; 0,6P; 0,8P e F (3)

Fonte: TUCCI, PEREIRA e NETO (2003).

Notas:

(1) P corresponde à profundidade do rio.

(2) S (superfície) correspondente à profundidade de 0,10m.

(3) F (fundo) correspondente à profundidade determinada pelo comprimento da haste de sustentação do lastro.

A Figura 10 ilustra a distribuição dos pontos de medição em uma seção de um curso d'água de comprimento L, sendo a referência definida na margem esquerda (GEN, 1999).

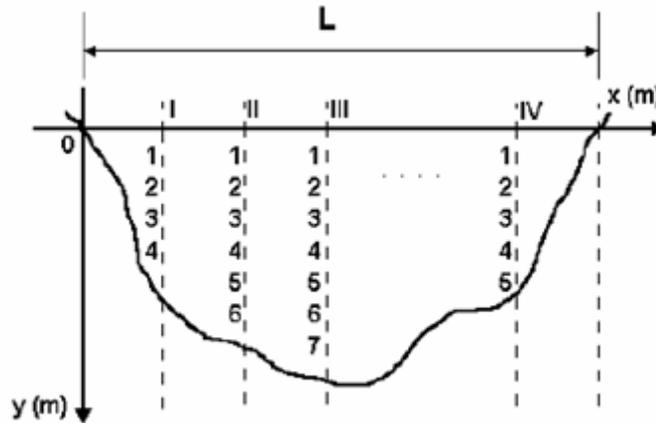


Figura 10 – Distribuição dos pontos de medida
Fonte: GEN (1999).

“A velocidade do fluxo da água é linearmente proporcional ao número de rotações da hélice” (MELCHIOR, 2006, p.37) e para calculá-la deve-se medir o tempo entre alguns sinais enviados pelo aparelho, que ocorrem após determinado número de rotações (AVIX GEO AMBIENTAL, 2011).

O equipamento possui uma curva calibrada do tipo (MELCHIOR, 2006, p.37):

$$V = a \cdot \left(\frac{N}{t} \right) + b \quad (16)$$

onde a é o passo da hélice, b é a inércia da hélice, t é o tempo medido entre os sinais, e N é o número de rotações entre esses sinais. Sendo a e b características do aparelho, e, portanto, constantes.

“As velocidades limites que podem ser medidas com molinete são de cerca de 2,5 m/s com haste e de 5 m/s com lastro. Acima destes valores os riscos para o operador e o equipamento passam a ser altos.” (AVIX GEO AMBIENTAL, 2011).

A vazão é determinada pelo somatório do produto de cada velocidade média por sua área de influência, conforme Figura 11 (TUCCI; PEREIRA; NETO, 2003).

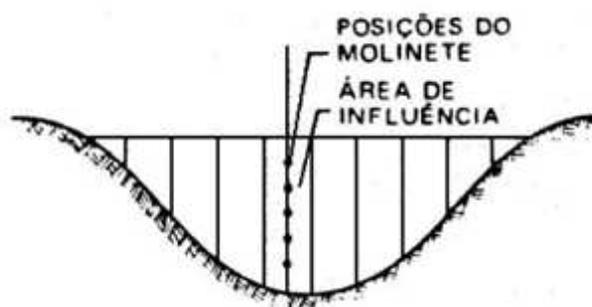


Figura 11 – Área de influência para cada posição do molinete
Fonte: TUCCI, PEREIRA e NETO (2003).

“Caso o molinete não seja fixo numa haste, deve-se prendê-lo a um lastro (peso entre 10 e 100 kg) para que fique aproximadamente na vertical.” Este lastro tem a forma parecida com a de um peixe, como mostra a Figura 12 (AVIX GEO AMBIENTAL, 2011).

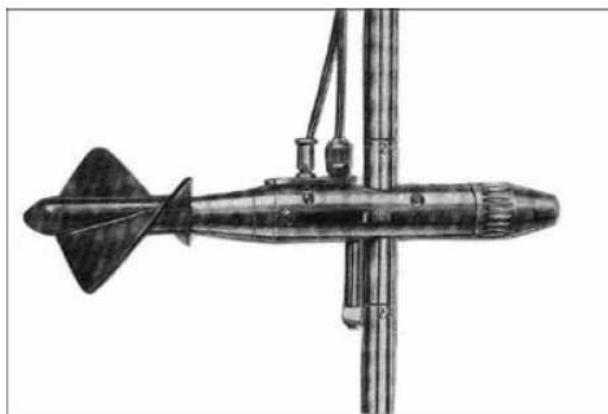


Figura 12 – Lastro para fixação do molinete
Fonte: AVIX GEO AMBIENTAL (2011).

2.5.3.5 Método dos orifícios, bocais e tubos curtos

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.5) este método apresenta simplicidade de operação e baixo custo, mas seu uso é limitado pela presença de sólidos suspensos, quando existir possibilidade de obstrução e assoreamento.

Um orifício é uma abertura, de forma geométrica definida, feita na parede de um reservatório e de onde escoa o fluido contido (FUNDAÇÃO..., p.1).

Constata-se, experimentalmente, que o jato d’água se contrai logo após sair do orifício, sendo necessário o uso de um coeficiente de contração que é (FUNDAÇÃO..., p.1):

$$C_c \cong 0,62 \quad (17)$$

O coeficiente de velocidade pode ser deduzido através equação de Bernoulli, e é dado por (FUNDAÇÃO..., p.1):

$$C_v \cong 0,98 \quad (18)$$

Já o coeficiente de vazão é (FUNDAÇÃO..., p.2):

$$C_Q = C_c \cdot C_v \cong 0,61 \quad (19)$$

A vazão de um orifício é dada então por (FUNDAÇÃO..., p.2):

$$Q = 0,61A\sqrt{2gh} \quad (20)$$

Onde A é a área do orifício, g é a gravidade, e h é a distância entre a superfície do reservatório e o orifício (FUNDAÇÃO..., p.1).

Bocais e tubos curtos são peças tubulares adaptadas aos orifícios com a finalidade de dirigir o jato. Sendo que o bocal tem o comprimento entre 1,5 e 5 vezes o diâmetro do orifício, já o tubo curto tem o comprimento entre 5 e 100 vezes o diâmetro do orifício (FUNDAÇÃO..., p.3).

2.5.3.5.1 Orifícios afogados

“Diz-se que o orifício está afogado quando o jato não descarrega na atmosfera, mas sim numa massa líquida.” Neste caso h será dado pela diferença das cargas de montante e de jusante, conforme mostra a Figura 13. (FUNDAÇÃO..., p.2).

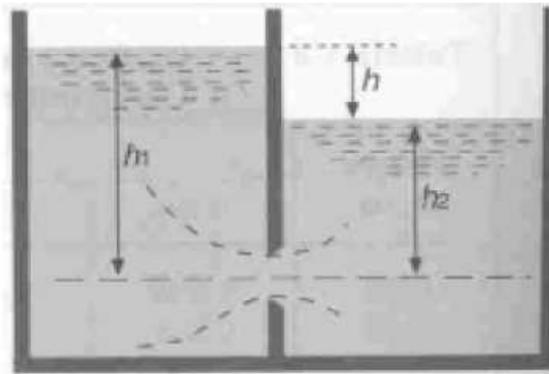


Figura 13 – Orifício afogado

Fonte: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (p.2).

2.5.3.5.2 Orifícios de grandes dimensões

“A hipótese de que todos os pontos da área do orifício estão sujeitos à mesma carga não pode ser assumida nesta situação. Mas, em cada faixa horizontal dh , muito pequena, da área do orifício, a carga h é a mesma.” (FUNDAÇÃO..., p.2).

Supondo um orifício retangular de largura L , pode-se escrever a expressão da vazão através da largura dh (FUNDAÇÃO..., p.2):

$$dQ = C_Q \cdot L \cdot dh \cdot \sqrt{2gh} \quad (21)$$

Integrando a Eq. 10 para toda a altura do orifício $(h_2 - h_1)$, obtém-se (FUNDAÇÃO..., p.2-3):

$$Q = \frac{2}{3} C_Q L \sqrt{2g} (h_2^{3/2} - h_1^{3/2}) \quad (22)$$

2.5.3.5.3 Bocal cilíndrico externo

Tem-se um bocal cilíndrico externo quando a parede do reservatório é espessa ou quando um tubo é adicionado externamente ao orifício, como na Figura 14, de modo que o jato líquido possa fluir colado à parede (SOUZA; ALFREDINI; MARTINS, 2004, p.3).

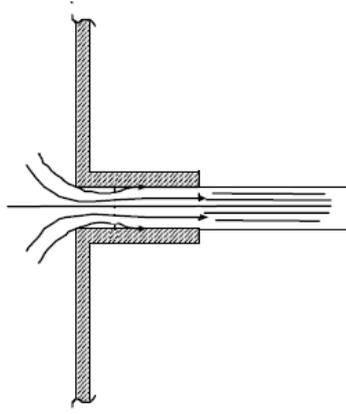


Figura 14 – Corte de um bocal cilíndrico externo
Fonte: Adaptado de SOUZA, ALFREDINI e MARTINS (2004, p.3).

Esse tipo de bocal não apresenta área de seção contraída, e tem uma perda de carga maior que um orifício de iguais dimensões, sendo, portanto, o coeficiente de vazão dado por (FUNDAÇÃO..., p.4):

$$C_q \cong 0,82 \quad (23)$$

2.5.3.5.4 Bocal cilíndrico interno ou bocal de borda

Tem-se um bocal cilíndrico interno quando um tubo curto é adicionado internamente a um orifício, como mostrado na Figura 15 (SOUZA; ALFREDINI; MARTINS, 2004, p.3).

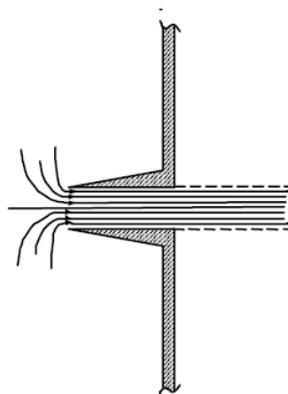


Figura 15 – Corte de um bocal cilíndrico interno
Fonte: Adaptado de SOUZA, ALFREDINI e MARTINS (2004, p.4).

Neste tipo de bocal a distribuição de pressões na parede é hidrostática e o jato é estável. O coeficiente de vazão dado por (FUNDAÇÃO..., p.4):

$$C_Q \cong 0,51 \quad (24)$$

2.5.3.5.5 Bocal cônico convergente

Os bocais cônicos têm a peculiaridade de aumentar a vazão, sendo a vazão máxima obtida com $\theta = 13^{\circ}30'$, conforme Figura 16. (FUNDAÇÃO..., p.4).

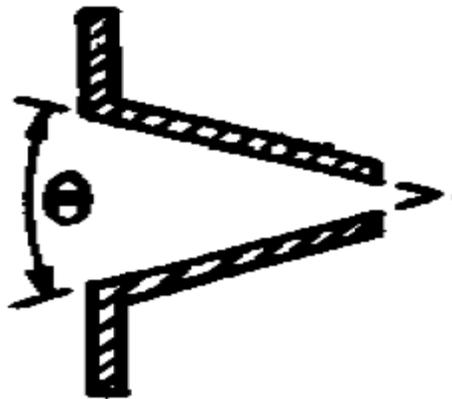


Figura 16 – Bocal cônico convergente
Fonte: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (p.4).

O coeficiente de vazão varia com o ângulo de convergência, e é aproximadamente igual a 0,94 (FUNDAÇÃO..., p.4).

2.5.3.6 Método dos traçadores

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.2) este é um “método que introduz substâncias químicas no escoamento, de forma a determinar a velocidade e/ou concentração e, a partir destas, a vazão.”

Os métodos dos traçadores por velocidade ou por concentração têm muitos requisitos comuns. O método por velocidade baseia-se na cronometragem do tempo em que o traçador percorre uma distância conhecida. O traçador é aplicado de forma intermitente (NBR13403, 1995, p.5).

O método por diluição

consiste em lançar no curso de água em estudo uma vazão constante de uma solução que não seja encontrada em grande quantidade nessas águas e, a jusante, medir a concentração dessa solução comparando-a com a concentração natural do curso (SOUZA, FUCHS; SANTOS, 1983, p. 105).

“Este método deve ser utilizado em águas turbulentas para garantir uma boa dissolução da substancia, evitando, assim, um mascaramento do processo” (SOUZA, FUCHS; SANTOS, 1983, p. 105).

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.3) este método exige operação especializada, podendo ser aplicado para vazões de até 5000 l/s, apresentando um erro de até 5%.

O método por concentração não necessita de conhecimento da seção transversal e é mais preciso que o de velocidade, mas exige maior quantidade de traçador, introduzindo mais agentes poluidores no meio (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.5).

O método por velocidade necessita de seção transversal uniforme e constante, de forma a evitar represamento do traçador e também um comprimento a jusante do ponto de aplicação que possibilite minimizar erros de cronometragem (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.5).

2.5.3.7 Método acústico (ultra-sônico)

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.2) este é um “método que utiliza a emissão de ondas ultra-sônicas para, por meio de sensores ultra-sônicos adequadamente posicionados, medir a velocidade média de um escoamento.”

Os tipos usualmente mais utilizados são contador-propagador (time-of-flight) e reflexão (Doppler). O primeiro é utilizado para águas limpas e o segundo, para águas com materiais em suspensão. Podem ser instalados em estação acústica permanente ou por meio de aparelhos portáteis (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.6).

“Os perfiladores Doppler, conhecidos comercialmente como ADCPs e ADPs tiveram sua origem em aplicações oceanográficas, sendo posteriormente adaptados para a medição de vazão em rios e canais.” (CERPCH, 2008, p.3).

Os perfiladores Doppler

utilizam ondas acústicas em faixas tipicamente compreendidas entre 300 e 3.000 kHz para medir a vazão, através da mudança de frequência das ondas refletidas por material em suspensão (efeito Doppler). [...] A profundidade é obtida através da reflexão de ondas específicas no fundo do rio. (HIRSCH, R. M.; COSTA, J.E., 2004 apud CERPCH, 2008, p.3)⁵.

Os medidores dividem cada vertical em cada célula, dentro das quais é feita uma medição detalhada de um grande número de velocidades pontuais, gerando perfis reais (GAMARO, P. E. M., 2007 apud CERPCH, 2008, p.4)⁶.

Este método apresenta alta precisão (erro entre 2 e 5%) e pode ser utilizado para vazões acima de 30l/s (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.6). Mas, apesar de exigir menor quantidade de mão-de-obra para realizar as medições, esta deve ser capacitada. Além do alto custo do equipamento, tornando este inacessível à grande maioria dos centros hidrométricos (CERPCH, 2008, p.4).

2.5.3.8 Método do vertedor

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.2) este é um

método que utiliza dispositivo, introduzido perpendicularmente às linhas de corrente, que possui abertura por onde o fluxo passa. A vazão deve ser determinada a partir da leitura da carga hidráulica no vertedor.

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.4) este método é suscetível a avarias causadas por materiais flutuantes, que afetam a equação de vazão, mas apresenta um baixo custo de instalação, com operação simples, e erros de até 3%.

⁵ HIRSCH, R. M., COSTA, J. E. (2004) – “U.S. Stream Flow Measurement and Data Dissemination Improve”. Artigo publicado na revista EOS, Transactions American Geophysical Union, Washington.

⁶ GAMARO, P. E. M. (2007) – “Curso de medidores acústicos de vazão Doppler”. ITAIPU, EPAGRI, UNIFEI, Itajubá.

Os vertedores em geral só permitem leituras em obras já concluídas e são necessários alguns cuidados, como evitar que a leitura seja próxima do vertedor, para não sofrer influência do abaixamento superficial. É recomendável uma distância de 1,80 a 5,00m a montante (SOUZA, FUCHS; SANTOS, 1983, p. 104).

Os vertedores retangulares são mais indicados para vazões acima de 300 L/s, por possuírem coeficientes de vazão mais bem definidos, já os triangulares oferecem maior precisão para vazões menores que 30 L/s (NBR13403, 1995, p.4).

Para a medição da vazão com um vertedor barra-se o curso d'água com um painel de tábuas que tenha uma abertura retangular no centro, suficiente para a passagem de toda a água. “A largura do vertedor deve ter de metade até dois terços da largura do curso d'água.” (ELETROBRÁS, 1985, p.41).

Vedam-se então todas as fendas do painel e crava-se a um ou dois metros a montante do vertedor uma estaca cuja extremidade superior fique no nível em que está a crista do vertedor. Quando o escoamento estiver ocorrendo normalmente mede-se a altura h do nível d'água sobre o topo da estaca (ELETROBRÁS, 1985, p.41).

2.5.3.8.1 Vertedor retangular contraído de placa delgada

“São os vertedores cuja largura é inferior à do canal em que se encontram instalados ($b < B$), conforme Figura 17.” (AGÊNCIA..., 2004, p.7).

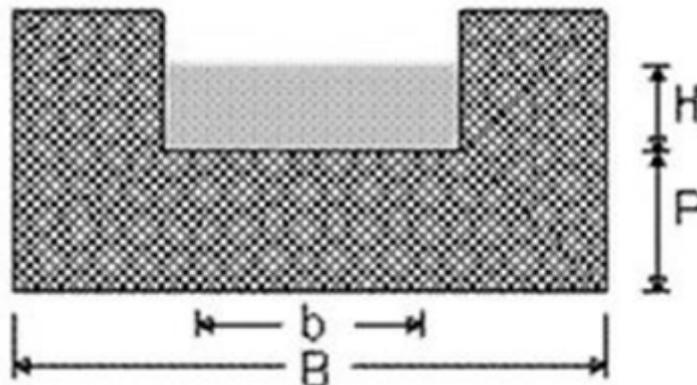


Figura 17 – Vertedor retangular contraído
Fonte: AVIX GEO AMBIENTAL (2011).

A equação de descarga para este tipo de vertedor é dada por (AGÊNCIA..., 2004, p.7):

$$Q = 1,838(B - 0,2H)H^{3/2} \quad (25)$$

onde B é a largura do canal em metros, b é a largura da contração em metros, e H é a altura da lâmina d'água sobre a crista do vertedor em metros (AVIX GEO AMBIENTAL, 2011).

A largura da contração deve ser no mínimo 30cm, e é dada pela equação (AGÊNCIA..., 2004, p.7):

$$b = B - 0,2H \quad (26)$$

A altura P do vertedor deve ser no mínimo igual a 30cm e duas vezes a altura da lâmina d'água sobre a crista do vertedor, e esta última deve estar compreendida entre 7,5cm e 60cm (AGÊNCIA..., 2004, p.7).

2.5.3.8.2 Vertedor retangular sem contração de placa delgada

São vertedores de placa delgada fina cuja largura é igual à largura do canal de aproximação (AGÊNCIA..., 2004, p.6).

“Desprezando-se a contração lateral da lâmina d'água, a descarga pode ser calculada pela fórmula de Francis” (AGÊNCIA..., 2004, p.6) e (ELETROBRÁS, 1985, p.41):

$$Q = 1,838bh^{3/2} \quad (27)$$

onde Q é a vazão, em m³/s, b é a largura da abertura do vertedor, em m, e h a altura do nível d'água sobre a crista do vertedor, em m, medida a montante desta, no local onde foi cravada a estaca.

A altura P do vertedor não deverá ser menor que 10cm, e sua altura H deve estar entre 3 e 75cm. A razão entre a altura H e P não deve ser maior que um. A largura b do vertedor deve ser igual à do canal e no mínimo igual a 30cm. (AGÊNCIA..., 2004, p.6).

2.5.3.8.3 Vertedor triangular de placa delgada com contração

O vertedor triangular de placa delgada é o mais preciso mecanismo de medida de vazão em canal aberto em escoamento livre, ilustrado na Figura 18 (AGÊNCIA..., 2004, p.8).

O vertedor triangular com contração é o vertedor cuja base do triângulo de medida é menor que a largura do canal ($b < B$). (AGÊNCIA..., 2004, p.8).

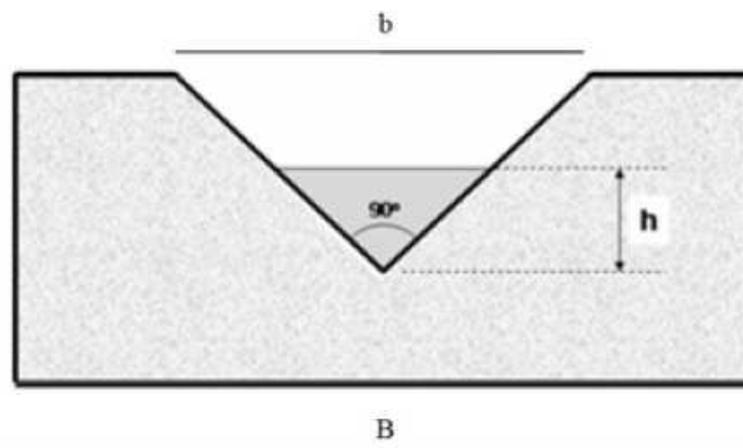


Figura 18 – Vertedor triangular com contração
Fonte: AVIX GEO AMBIENTAL (2011).

Em um vertedor triangular com ângulo de 90° , a relação entre cota e vazão é dada por (AVIX GEO AMBIENTAL, 2011):

$$Q = 1,4h^{\frac{5}{2}} \quad (28)$$

onde Q é a descarga, em m^3/s e h é a altura do nível d'água sobre o vértice inferior do vertedor, em m, medida a montante deste, no local onde foi cravada a estaca (ELETROBRÁS, 1985, p.42).

A altura medida a partir do vértice do triângulo não deve ser menor que 5cm ou maior que 38cm. A altura do vértice do triângulo, a partir do fundo do canal, deverá ser maior que 45cm. A largura do canal não deverá exceder 90cm (AGÊNCIA..., 2004, p.8).

2.5.3.9 Método volumétrico e gravimétrico

Este método consiste em desviar o curso para um reservatório conhecido, conforme Figura 19, e depois de um tempo verificar o acréscimo de volume, obtendo-se a vazão média (SOUZA, FUCHS; SANTOS, 1983, p.102).

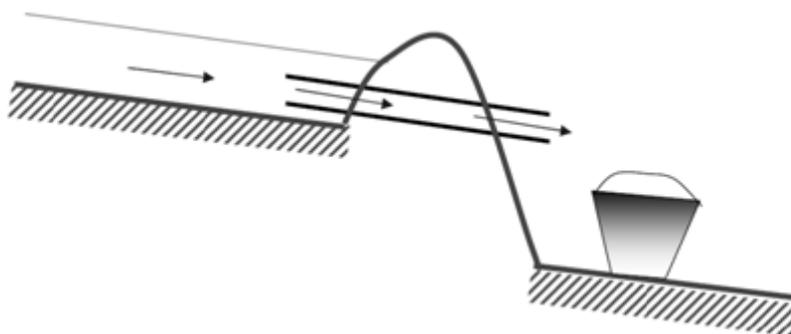


Figura 19 – Desvio do curso d’água para medição pelo método volumétrico ou gravimétrico
Fonte: Adaptado de PEREIRA e MELLO (2011, p.2) .

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.3) este é um método prático, aplicável especialmente a pequenas vazões (até 5l/s), de baixo custo e boa precisão (erros de até 2%). Mas deve-se conciliar o volume do recipiente com a vazão esperada, e determina apenas vazões médias.

Recomenda-se realizar no mínimo três repetições, e a vazão então será a média das vazões encontradas (PEREIRA; MELLO, p.2).

A vazão, para o método volumétrico, pode ser calculada através da equação (PEREIRA; MELLO, p.1):

$$Q = \frac{\text{vol}}{t} \quad (29)$$

onde Q é a vazão em m³/s, vol é o volume do recipiente em m³, e t é o tempo que o fluxo de água gastou para ocupar o recipiente.

Já para o método gravimétrico, é utilizada a equação (PEREIRA; MELLO, p.2).

$$Q = \frac{P}{\rho \cdot t} \quad (30)$$

onde Q é a vazão em m³/s, P é a massa do volume de água em kg, ρ é a massa específica da água em kg/m³, e t é o tempo que o fluxo de água gastou para ocupar o recipiente.

2.5.3.10 Método Winter-Kennedy

Este método usa um fator que relaciona a vazão com a diferença de pressão, medida entre dois pontos, determinado com modelo reduzido e depois aplicado na instalação. Ele possui a vantagem de utilizar equipamentos de baixo custo, além de aplicar-se a condutos com qualquer diâmetro. Uma desvantagem é a necessidade de um modelo em escala reduzida. (PUCP, 2007).

Este método é indicado para novos projetos, uma vez que a construção de um modelo reduzido somente para a medição da vazão é inviável (ANDRADE et al., 2010).

2.5.3.11 Método de Allen

Este método, também conhecido como Método da Mancha Salgada, utiliza o cloreto de sódio (sal) como traçador, e baseia-se no fato de que a solução salgada aumenta a condutividade da água. A condutividade da água é monitorada em postos de amostragem a jusante, e o tempo de passagem da mancha de água salgada é medida entre dois postos. (SOUSA, 1997, p.22).

“Para o cálculo da vazão é necessário que o volume compreendido entre os dois postos de amostragem seja conhecido”. E a vazão será calculada dividindo o volume entre os dois postos de amostragem e o tempo de passagem da mancha salgada pelos mesmos. (SOUSA, 1997, p.22).

A utilização do sal, como previsto por Allen, não é possível, devido às altas vazões envolvidas. Para uma usina com vazão de aproximadamente $130\text{m}^3/\text{s}$, considerando o tempo de passagem da nuvem de traçador igual a dois minutos, seria necessário em torno de uma tonelada de sal (SOUSA, 1997, p.23-24).

A utilização deste método fica restrita a poucos casos, uma vez que “as tubulações das usinas hidrelétricas geralmente não são expostas ao ar livre, impedindo a instalação dos equipamentos apropriados nos postos de amostragem.” (SOUSA, 1997, p.25).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

3.1.1 Localização da Usina Roncador

A Usina Roncador está localizada no município de Bocaiúva do Sul localizado na Região Metropolitana Norte de Curitiba ao Leste do Estado do Paraná. Suas coordenadas são 25°11'13,94''S e 49°08'13,56''W. A Figura 20 mostra uma vista aérea da usina com seu reservatório e o local da casa de máquinas.



Figura 20 – Localização da Usina Roncador
Fonte: Google (2011).

A usina situa-se no curso d'água Rio Santana que pertence à sub-bacia do Rio Capivari, este um dos principais rios da região e da Bacia Hidrográfica do Atlântico trecho Sudeste.

Com relação à precipitação na região, a Tabela 6 mostra a densidade pluviométrica anual entre 2001 e 2011 para a Região Metropolitana Norte de Curitiba.

Tabela 6 – Densidade pluviométrica anual de 2001 a 2011 para a Região Metropolitana Norte de Curitiba.

<i>jan</i>	<i>fev</i>	<i>mar</i>	<i>abr</i>	<i>mai</i>	<i>jun</i>	<i>jul</i>	<i>ago</i>	<i>set</i>	<i>out</i>	<i>nov</i>	<i>dez</i>
226	159	123	92	90	74	118	82	122	144	139	158

Fonte: SIMEPAR (2011).

3.1.2 Instalações existentes no local

A Usina Roncador foi desativada há mais de 40 anos e grande parte das instalações existentes na época de seu funcionamento hoje está deteriorada pelo tempo ou por atos de vandalismo. As Figuras 21.a, 21.b e 21.c mostram a casa de máquinas, o conduto forçado e a barragem, respectivamente.



(a) – Casa de máquinas



(b) – Conduto forçado



(c) - Barragem

Figura 21 – Instalações da Usina Roncador
Fonte: Própria.

3.1.3 Materiais para medições de vazão pelo método do vertedouro

Para medição da vazão pelo método do vertedouro foi utilizado um linímetro (régua) para medição das cotas do reservatório, conforme mostra a Figura 22. O linímetro foi instalado pelo Instituto de Águas do Paraná.



Figura 22 – Linímetro instalado no reservatório
Fonte: Própria.

3.1.4 Materiais para medições de vazão pelo método do flutuador

Para a medição da vazão pelo método do flutuador foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Trena com 30m de comprimento;
- b) Régua com 01m de comprimento para batimetria;
- c) Estacas e linha de Nylon para delimitações das distâncias;
- d) 01 Flutuador - uma garrafa plástica de 200ml com $\frac{3}{4}$ d'água;
- e) 01 Cronômetro;
- f) Ferramentas diversas.

As Figuras 23.a e 23.b mostram o flutuador e a régua utilizada para batimetria, respectivamente.

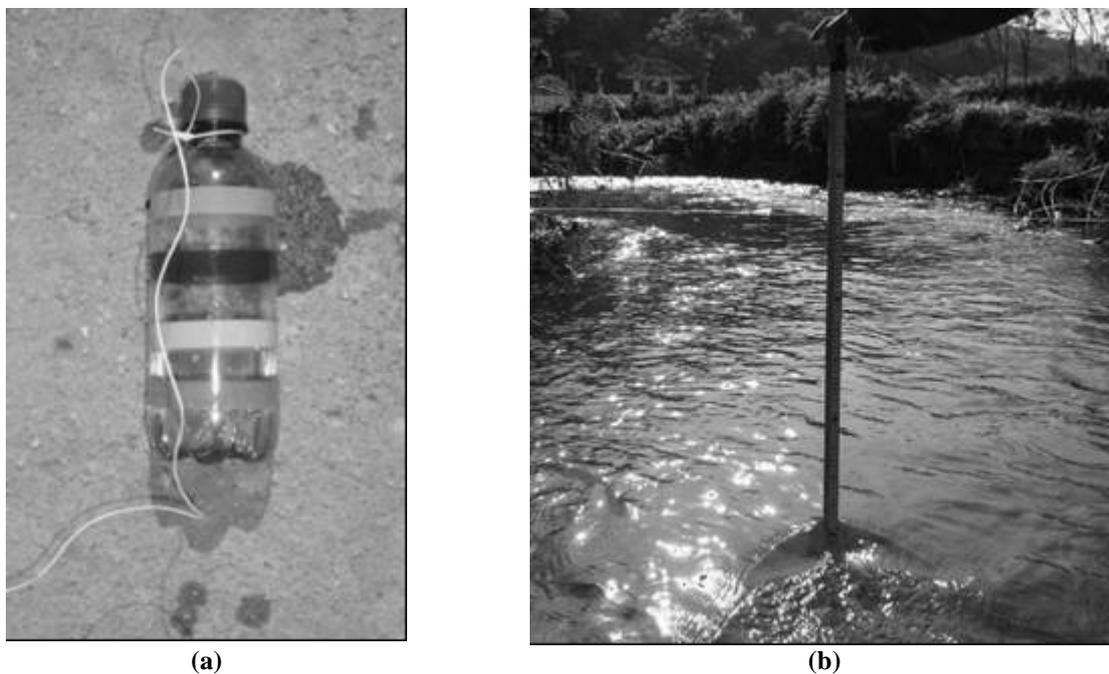


Figura 23 – Materiais usados para medição de vazão pelo método do flutuador

Fonte: Própria.

3.2 MÉTODO

Para medição da vazão foram realizadas 05 (cinco) visitas de campo à Usina Roncador, entre os dias 03/09/2011 e 12/10/2011, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Visitas de campo para medição de vazão

<i>Medição</i>	<i>Dia</i>	<i>Hora</i>
1	03/09/2011	15h15
2	17/09/2011	11h38
3	25/09/2011	09h20
4	01/10/2011	08h30
5	12/10/2011	08h45

Fonte: Própria.

Em cada campanha para medição de vazão foi inicialmente medida a cota no reservatório da usina, e depois se passou à aplicação do método do flutuador num ponto à jusante do reservatório, próximo ao local da casa de máquinas.

3.2.1 Medição da vazão pelo método do vertedouro

A Figura 24 mostra o vertedouro existente na barragem da usina. Este tipo de vertedouro é caracterizado como retangular, de soleira espessa e com 02 (duas) contrações laterais. Para este tipo de vertedouro, a vazão é obtida por: (WHITE, 2002, p.447)

$$Q(H') = 1,71(L - 0,2H')H'^{\frac{3}{2}} \quad (31)$$

onde, Q é a vazão (m^3/s), L é o comprimento do vertedouro (m) e H' é a carga d'água sob o vertedouro (m) que deve ser medida numa distância de no mínimo $5H'$ a montante do mesmo.



Figura 24 – Vertedouro da Usina Roncador
Fonte: Própria.

Para aplicação da Equação (31) na obtenção da vazão, inicialmente foi feito um levantamento das dimensões do vertedouro e a aferição de suas cotas no linímetro do reservatório. Seu comprimento foi aferido em 7,08m. A Figura 25 ilustra as principais dimensões e cotas do vertedouro.

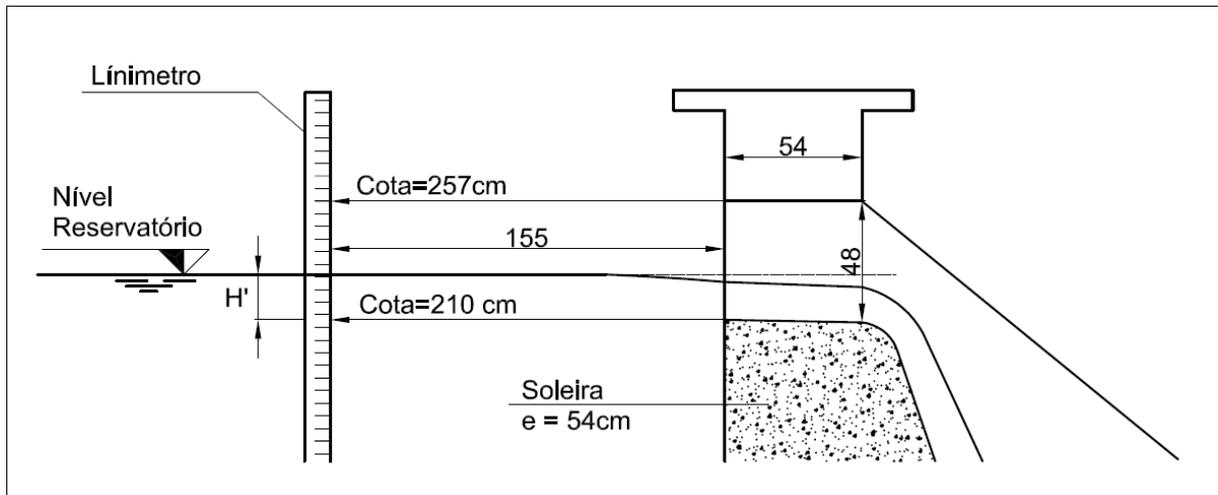


Figura 25 –Corte do vertedouro com as principais dimensões e cotas
Fonte: Própria.

Como a soleira do vertedouro corresponde à cota 210cm na régua, a carga sob o vertedouro pode ser determinada por $H' = H - 2,10$ e a Equação (31) reescrita de forma que a vazão seja obtida em função do nível do reservatório indicado no linímetro.

$$Q(H) = 1,71[L - 0,2(H - 2,10)](H - 2,10)^{\frac{3}{2}} \quad (32)$$

onde H é a cota indicada no linímetro (m).

3.2.2 Medição da vazão pelo método do flutuador

A aplicação do método do flutuador na determinação da vazão de um rio implica no conhecimento de duas grandezas: a área da seção transversal e a velocidade média de escoamento no local da medição.

Para aplicação do método, inicialmente escolhe-se um trecho retilíneo do rio onde são fixadas estacas para demarcação das seções transversais com linhas esticadas entre as duas margens para a seção de entrada (1) e a seção de saída (2), conforme indica a Figura 26.

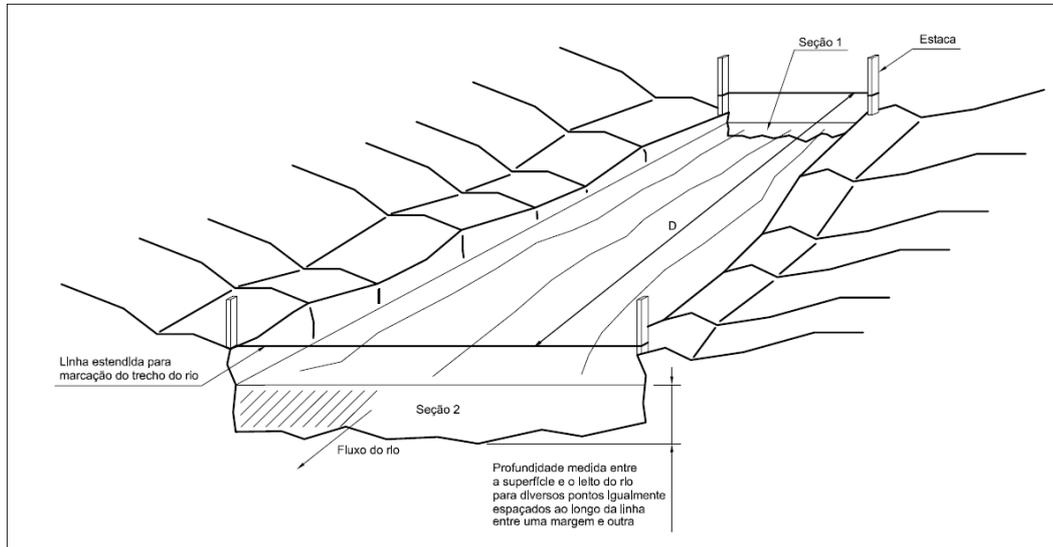


Figura 26 – Configuração utilizada para aplicação do método do flutuador
Fonte: Própria.

Para determinação da área de cada seção transversal foi medida a profundidade do rio em pontos ao longo das linhas estendidas entre as margens. Ao longo de cada seção foram tomados 11 (onze) pares (x_n, p_n) , onde x_n corresponde à distância medida ao longo da linha a partir de uma das margens e p_n à profundidade, ambas em centímetros, conforme mostrado na Figura 27.

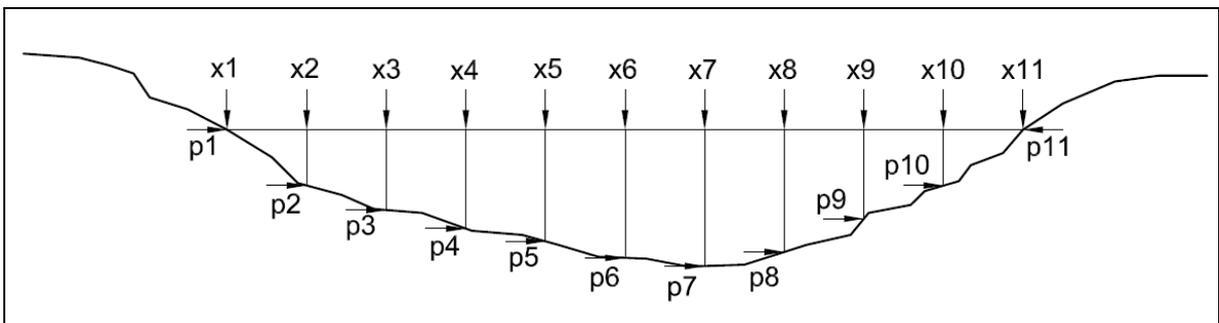


Figura 27 – Esquema ilustrando batimetria na seção transversal do rio
Fonte: Própria.

Com os pontos obtidos, utiliza-se do método de integração dos trapézios para se obter a área da seção transversal do rio (RUGGIERO; LOPES, 1997, p.296):

$$A^i = \frac{1}{2} \sum_{n=2}^{11} (p_n^i + p_{n-1}^i)(x_n^i - x_{n-1}^i) \quad (33)$$

onde A^i é a área da seção transversal em cada seção transversal do rio (cm^2). Para o cálculo da vazão recomenda-se utilizar a área média entre as seções de entrada e saída no local da medição (EMBRAPA, 2007, p.1). Dessa forma, a área da seção transversal do rio para o cálculo da vazão é dada por:

$$A = 10^{-4} \frac{(A^1 + A^2)}{2} \quad (34)$$

onde A é a área da seção transversal, dada em (m^2).

Para determinação da velocidade média do escoamento, inicialmente mediu-se a velocidade superficial do escoamento lançando um flutuador no rio e cronometrando-se o tempo necessário para que o mesmo percorresse a distância D entre as duas seções demarcadas, conforme indicado na Figura 26.

A velocidade superficial de escoamento foi obtida por

$$v_{Superfície} = \frac{D}{\Delta t} \quad (35)$$

onde, $v_{Superfície}$ é a velocidade superficial (m/s), D a distância percorrida entre as duas seções demarcadas (m) e Δt é o tempo (s). Este procedimento foi realizado 10 (dez) vezes e foi adotada a média dos valores como a velocidade superficial do escoamento.

Nos escoamentos em canais a velocidade superficial é superior à velocidade média. Dessa forma, recomenda-se aplicar um fator de correção à velocidade superficial. Neste trabalho foi adotado o valor de 0,80 para o fator de correção, por tratar-se de um rio com fundo pedregoso (EMBRAPA, 2007, p.1). Assim, a velocidade média do escoamento pode ser escrita como:

$$\bar{v} = 0,80v_{Superfície} \quad (36)$$

onde \bar{v} é a velocidade média do escoamento (m/s).

Multiplicando-se a velocidade média pela área da seção transversal obtém-se a vazão do rio, isto é

$$Q = \bar{v}A \quad (37)$$

onde Q é a vazão (m^3/s).

3.2.3 Determinação da potência aproveitável

De acordo com Alves (2007), a potência aproveitável em um curso d'água, é dada por

$$P = 7,6 \cdot H_B \cdot \bar{Q} \quad (38)$$

onde P é a potência disponível para a geração de energia (kW), H_B é a queda bruta entre o nível d'água no reservatório e a casa de máquinas (m), e \bar{Q} é a vazão de projeto (m^3/s).

A diferença de altura entre a barragem e a casa de máquinas é de 15,1m. Considerando que a barragem corresponde à cota 2,57m no linímetro, a queda bruta é obtida por

$$H_B = 12,53 + \bar{H} \quad (39)$$

onde H_B é a queda bruta entre o nível d'água no reservatório e a casa de máquinas (m) e H é a média das leituras linimétricas no período em estudo (m).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

Os métodos mais comuns de medição de vazão para o projeto de micro e minicentrals hidrelétricas encontrados na literatura e que foram analisados no presente trabalho são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Métodos de medição de vazão

Método	Característica	Erro
Calha Parshall	Requer a instalação de uma calha Parshall	1%
Vertedouro	Requer a instalação de um vertedouro	3%
Molinetes	Utiliza equipamentos especiais para a medição (molinetes)	5%
Flutuador	Utiliza equipamentos de baixo custo e de fácil aquisição	20%
	Requer um trecho retilíneo do curso d'água com 10 metros de comprimento no mínimo	

Fonte: NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995).

Os métodos com menores erros associados são aqueles que necessitam de uma infraestrutura instalada junto ao curso d'água para serem aplicados. O método dos molinetes não solicita a existência de nenhuma instalação, entretanto requer a utilização de um equipamento especial. O método do flutuador utiliza equipamentos de baixo custo e fácil aquisição, porém os erros associados ao método podem chegar a 20%.

4.2 MEDIÇÃO DE VAZÃO PELO MÉTODO DO VERTEDOURO

A vazão pelo método do vertedouro foi obtida a partir do nível indicado no linímetro e da Equação (32). A Tabela 9 mostra os resultados obtidos para a vazão, as leituras linimétricas no reservatório bem como os dias em que foram realizadas as medições.

Tabela 9 – Vazão medida pelo método do vertedouro

<i>Dia</i>	<i>Nível do reservatório (m)</i>	<i>Q_{Vertedouro} (m³/s)</i>
03/09/2011	2,29	0,997
17/09/2011	2,28	0,920
25/09/2011	2,28	0,920
01/10/2011	2,26	0,771
12/10/2011	2,29	0,997
Média		0,921
Desvio padrão		0,092

Fonte: Própria.

A Figura 28 mostra o fluviograma obtido a partir de vazões medidas pelo método do vertedouro e a média dos valores obtidos.

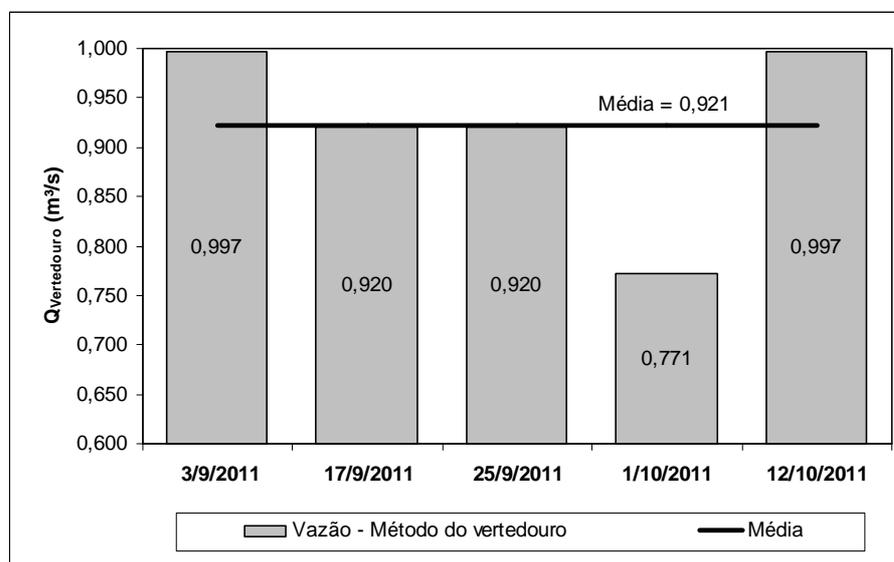


Figura 28 – Fluviograma com vazões obtidas pelo método do vertedouro
Fonte: Própria.

A Figura 29 mostra a curva-chave do reservatório levantada no período entre 03/09/2011 e 12/10/2011 para medições pelo método do vertedouro. Neste caso, a curva representada corresponde à Equação (32).

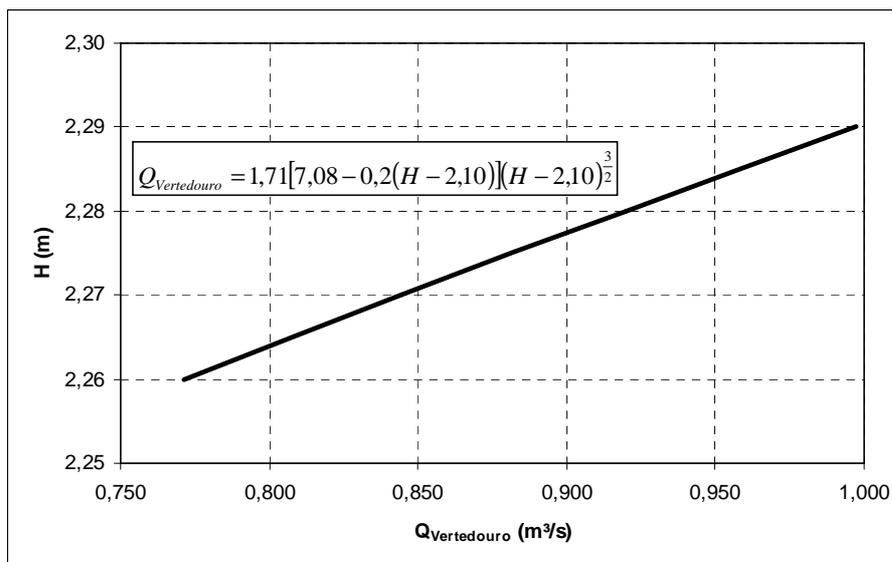


Figura 29 – Curva-chave com dados obtidos entre 03/09/2011 e 12/10/2011 – Método do vertedouro
Fonte: Própria.

O método do vertedouro foi de fácil aplicação devido à infraestrutura já existente na Usina Roncador. Assim, para aplicá-lo foi necessário apenas medir as dimensões do reservatório e, a cada medição, anotar o nível do reservatório indicado no linímetro.

Segundo a NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.4) o erro associado à aplicação do método para vertedores retangulares é da ordem de 3%. Dessa forma, o valor médio da vazão no período considerado pode variar entre 0,893 m³/s e 0,949 m³/s.

A vazão pelo método do vertedouro depende basicamente da leitura do nível do reservatório indicado no linímetro. Souza, Fuchs e Santos (1983, p.93) recomendam que a leitura seja realizada 03 (três) vezes ao dia (às 07h30, às 13h30 e às 17h30) sendo então considerada a média entre os três valores. A principal dificuldade dos autores na aplicação deste método foi dispor de tempo e pessoas para realização de três leituras diárias, dessa forma optou-se por realizar apenas uma leitura em cada campanha de medição.

4.3 MEDIÇÃO DE VAZÃO PELO MÉTODO DO FLUTUADOR

A vazão pelo método do flutuador foi obtida a partir de medições da área da seção transversal do rio e da velocidade média de escoamento num local à jusante do reservatório. A Tabela 10 mostra os resultados obtidos em cada campanha de medição. No Apêndice A são

mostrados os resultados obtidos para a área da seção transversal, intervalos de tempo e velocidades em cada campanha de medição.

Tabela 10 – Vazão medida pelo método do flutuador

Dia	Nível do reservatório (m)	Q _{Flutuador} (m ³ /s)
03/09/2011	2,29	1,340
17/09/2011	2,28	0,914
25/09/2011	2,28	0,851
01/10/2011	2,26	0,730
12/10/2011	2,29	1,007
Média		0,968
Desvio padrão		0,231

Fonte: Própria.

A Figura 30 mostra o fluviograma com vazões obtidas pelo método do flutuador e a média dos valores no período de estudos.

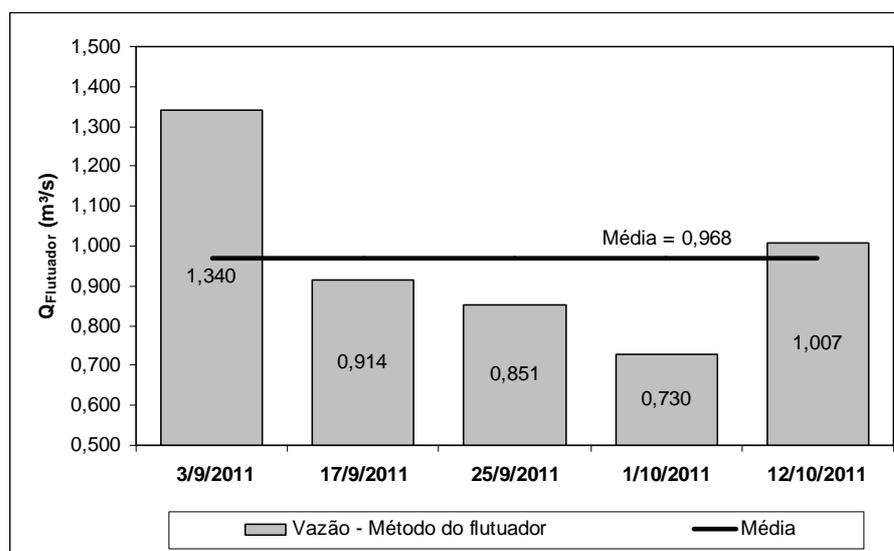
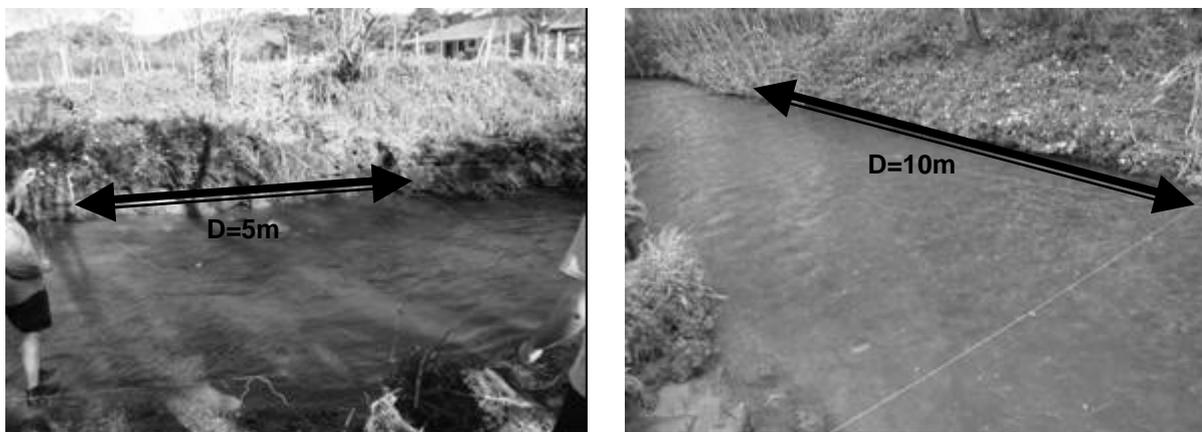


Figura 30 – Fluviograma com vazões obtidas pelo método do flutuador
Fonte: Própria.

Analisando a Tabela 9 percebe-se que nos dias 03/09/2011 e 12/10/2011 o linímetro indicou o mesmo valor (2,29m) e as vazões nestes dias foram 1,340m³/s e 1,007m³/s, respectivamente, o que representa uma diferença de 33,3%.

A Eletrobrás (1985, p.40) recomenda que o método do flutuador seja aplicado num trecho retilíneo do rio, com 10m de comprimento e livre de corredeiras. No dia 03/09/2011 o método foi aplicado num trecho curvo, com 5m de comprimento e com

corredeiras, conforme mostra a Figura 31.a. A Figura 31.b mostra o trecho ideal de acordo com as recomendações da literatura e que foi utilizado nas demais medições.



(a) – 03/09/2011 – D = 5m

(b) – 12/10/2011 – D = 10m

Figura 31 – Trechos do rio onde foi aplicado o método do flutuador
Fonte: Própria.

Assim, optou-se por desconsiderar a vazão obtida pelo método do flutuador no dia 03/09/2011. A Figura 32 mostra o fluviograma com vazões obtidas pelo método do flutuador, já excluído o valor obtido no dia 03/09/2011.

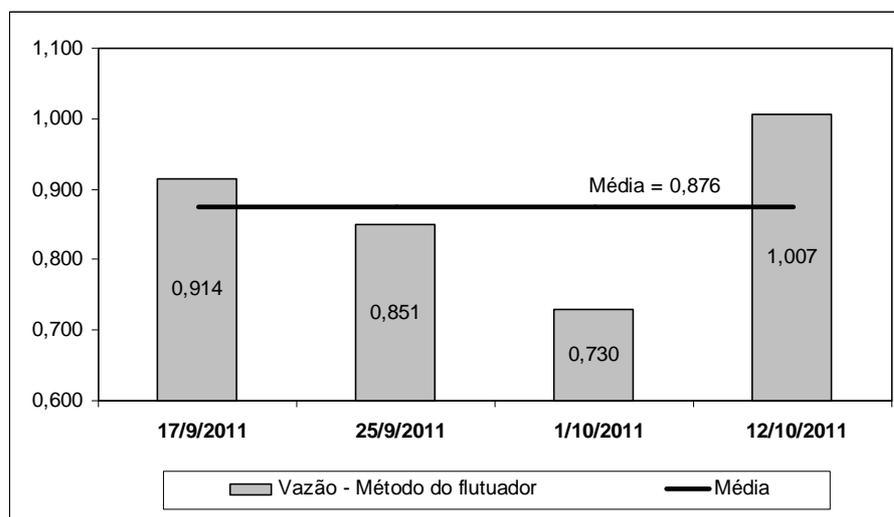


Figura 32 – Fluviograma com vazões obtidas pelo método do flutuador, excluído o valor obtido no dia 03/09/2011
Fonte: Própria.

A Figura 33 mostra a curva-chave para vazões medidas pelo método do flutuador no período entre 17/09/2011 e 12/10/2011, em relação ao nível d'água indicado no linímetro instalado no reservatório da usina.

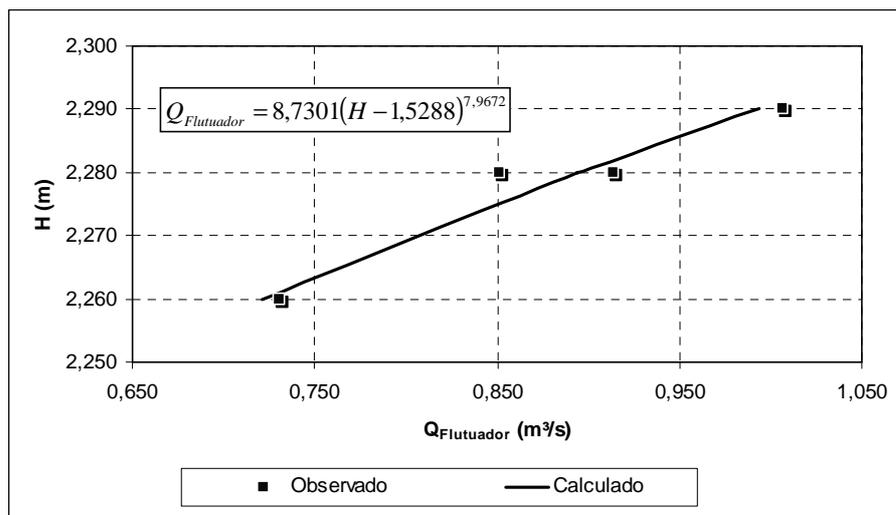


Figura 33 – Curva-chave com dados obtidos entre 17/09/2011 e 12/10/2011 – Método do flutuador
Fonte: Própria.

A curva-chave foi obtida a partir do ajuste de pontos pelo método dos mínimos quadrados (PORTO; FILHO; SILVA, 2001, p.39). A Equação (40) representa a curva-chave para o método do flutuador.

$$Q_{Flutuador} = 8,7301(H - 1,5288)^{7,9672} \quad (40)$$

onde $Q_{Flutuador}$ é a vazão (m³/s) e H é o nível d'água no reservatório indicado no linímetro (m).

O método do flutuador é considerado um método precário na obtenção de vazão, entretanto é um método rápido de ser aplicado e de baixo custo, pois não necessita de instalações ou equipamentos especiais (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.4).

Os erros associados ao método do flutuador estão associados a dois fatores principais: fator local e fator humano. O primeiro diz respeito ao local onde será realizada a medição: um trecho retilíneo do rio com pelo menos 10m de comprimento e livre de corredeiras. O segundo está associado às dificuldades em realizar medições no rio (comprimento do trecho, largura e batimetria) e à sensibilidade humana nas medidas de tempo.

A NBR 13403 (ASSOCIAÇÃO..., 1995, p.3) cita que os erros associados a vazões obtidas pelo método do flutuador podem chegar a 20%. Assim, o valor médio da vazão obtida pelo método do flutuador no período considerado pode variar de 0,701m³/s a 1,051m³/s

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM OS MÉTODOS DO VERTEDOIRO E DO FLUTUADOR

A Tabela 11 mostra os resultados das medições para os dois métodos utilizados: método do vertedouro e método do flutuador. Para comparação entre os métodos, foram utilizadas as vazões obtidas entre os dias 17/09/2011 e 12/10/2011, uma vez que a vazão pelo método do flutuador no dia 03/09/2011 foi desconsiderada.

Tabela 11 – Comparativo entre as medições pelos métodos do vertedouro e do flutuador

<i>Dia</i>	<i>Nível do reservatório (m)</i>	<i>Q_{Vertedouro} (m³/s)</i>	<i>Q_{Flutuador} (m³/s)</i>	<i>Erro %</i>
17/09/2011	2,28	0,920	0,914	0,64%
25/09/2011	2,28	0,920	0,851	7,49%
01/10/2011	2,26	0,771	0,730	5,36%
12/10/2011	2,29	0,997	1,007	0,97%
<i>Média</i>		<i>0,902</i>	<i>0,876</i>	<i>2,95%</i>
<i>Desvio padrão</i>		<i>0,095</i>	<i>0,116</i>	<i>-</i>

Fonte: Própria.

O erro percentual foi calculado pela Equação (41).

$$Erro\% = \frac{|Q_{Vertedouro} - Q_{Flutuador}|}{Q_{Vertedouro}} \times 100 \quad (41)$$

onde *Erro%* é o erro percentual (adimensional), *Q_{Vertedouro}* é a vazão obtida pelo método do vertedouro (m³/s) e *Q_{Flutuador}* é a vazão obtida pelo método do flutuador (m³/s).

Nos dias 25/09/2011 e 01/10/2011 a vazão obtida pelo método do flutuador foi inferior à vazão obtida pelo método do vertedouro em 7,49% e 5,36%, respectivamente. Como o erro associado ao método do flutuador é da ordem de 20%, estes dois desvios são aceitáveis e válidos na comparação com o resultado obtido pelo método do vertedouro.

A Figura 34 mostra um comparativo entre as vazões médias obtidas pelos dois métodos. Como a diferença percentual foi de 2,95%, pode-se considerar que ambos os métodos são válidos na determinação da vazão no período considerado.

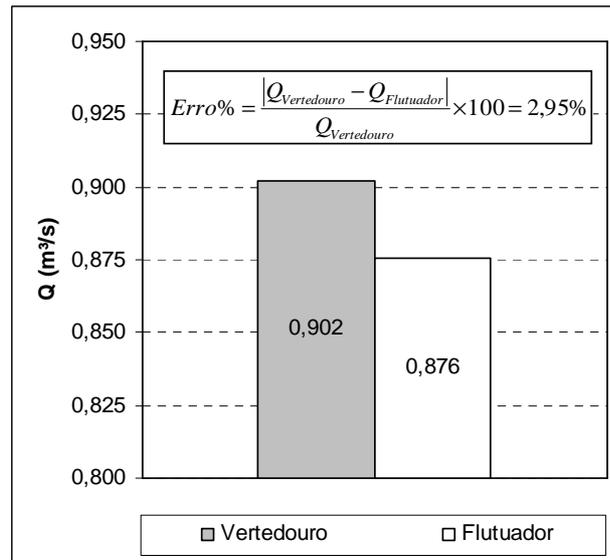


Figura 34 – Comparação entre as vazões médias obtidas com os dois métodos
Fonte: Própria.

A Figura 35 mostra um comparativo entre as curvas-chave dos dois métodos.

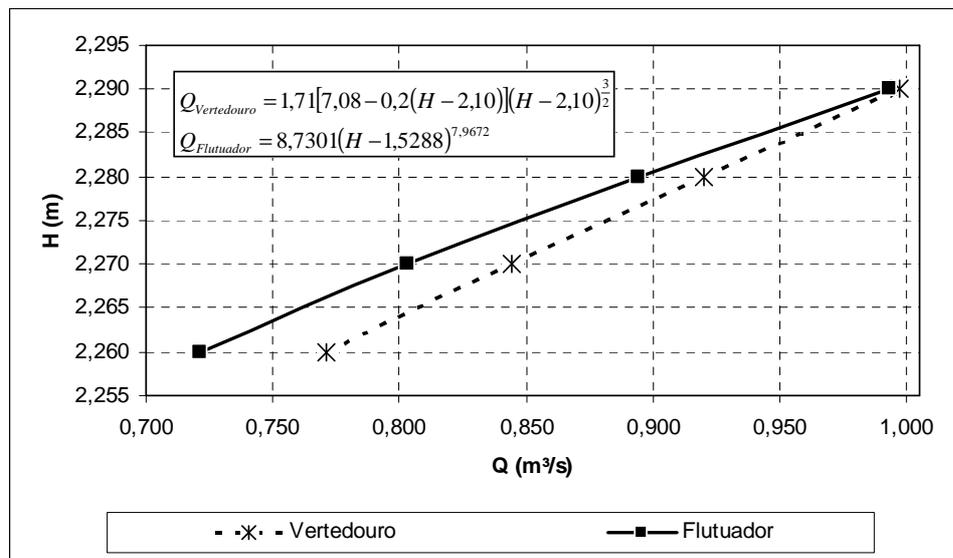


Figura 35 – Comparação entre as curvas-chave obtidas com os dois métodos
Fonte: Própria.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS COM OS MÉTODOS: VERTEDOIRO, FLUTUADOR E MOLINETES.

O Instituto de Águas do Paraná fez uma medição de vazão no reservatório da Usina Roncador no dia 04/07/2011, às 14h30, utilizando o método dos molinetes. Na ocasião o linímetro indicava $2,34m$ e a vazão obtida foi de $1,013m^3/s$.

Como nas medições de vazão com os métodos do vertedouro e do flutuador não foram observadas cotas de $2,34m$ (o valor máximo observado foi $2,29m$), não é possível fazer uma comparação direta com o resultado obtido pelo Instituto de Águas do Paraná. Entretanto, admitindo-se que as curvas-chave são válidas para qualquer valor de H , é possível estimar a vazão para os métodos do vertedouro e do flutuador pela substituição da cota $2,34m$ nas Equações (32) e (40), respectivamente.

A Tabela 12 mostra um comparativo entre a vazão obtida pelo método dos molinetes e a vazão estimada para os métodos do vertedouro e do flutuador para uma leitura linimétrica de $2,34m$.

Tabela 12 – Vazão obtida pelo método dos molinetes e vazão estimada para os métodos do vertedouro e do flutuador para $H=2,34m$.

<i>Molinetes</i> <i>Q (m³/s)</i>	<i>Vertedouro</i> <i>Q (m³/s)</i>	<i>Flutuador</i> <i>Q (m³/s)</i>
1,013	1,414	1,614
Erro%	40%	63%

Fonte: Própria

As vazões estimadas para os métodos do vertedouro e do flutuador apresentaram erros de 40% e 63%, respectivamente, quando comparados com a vazão obtida com método dos molinetes. Uma possível justificativa para desvios tão elevados está no fato de que as vazões pelos dois métodos não foram medidas, mas sim estimadas por extrapolação das curvas-chave.

4.6 TRANSPOSIÇÃO DE VAZÕES

Os estudos hidroenergéticos para a implantação de uma usina hidrelétrica precisam ser desenvolvidos com base em séries históricas levantadas num período de tempo o mais extenso possível.

A Agência Nacional de Águas – ANA (2011) mantém um banco de dados on-line⁷ para consulta de dados hidrométricos de todo o território nacional. Entretanto, como a Usina Roncador foi desativada há mais de 40 anos, não há informações disponíveis quanto à sua série histórica.

Neste trabalho foram realizadas 05 (cinco) medições num período de aproximadamente 40 (quarenta) dias, o que representa um período muito breve com valores que, de acordo com a literatura, não seriam representativos para determinação da vazão de projeto.

Dada a indisponibilidade de dados, para se obter a série histórica de vazões da Usina Roncador é necessário realizar uma transposição de vazões, que consiste em obter uma relação entre a vazão num curso d'água com série histórica desconhecida e a vazão num curso d'água com série conhecida. Este procedimento só é válido para o caso de cursos d'água presentes numa mesma bacia hidrográfica. (SOUZA; FUCHS; SANTOS, 1983, p.100)

Para a transposição de vazões foram utilizados dados do reservatório da Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza (Usina GPS), localizado no Rio Capivari, à jusante do Reservatório da Usina Roncador.

O primeiro passo foi obter os níveis do reservatório e a vazão para a Usina GPS nos mesmos dias e horários em que foram medidas as vazões na Usina Roncador. A Tabela 13 mostra os níveis do reservatório e as vazões para as Usinas Roncador e GPS.

Tabela 13 – Níveis dos reservatórios e vazões para as Usinas Roncador e GPS

<i>Dia</i>	<i>Hora</i>	<i>H_{Roncador} (m)</i>	<i>Q_{Roncador} (m)</i>	<i>H_{GPS} (m³/s)</i>	<i>Q_{GPS} (m³/s)</i>
03/09/2011	15h15	2,29	0,997	844,77	22,1
17/09/2011	11h38	2,28	0,920	844,15	25,3
25/09/2011	09h20	2,28	0,920	843,71	18,0
01/10/2011	08h30	2,26	0,771	843,29	18,9
12/10/2011	08h45	2,29	0,997	842,77	26,0
Média		2,28	0,921	843,74	22,1

Fonte: Própria.

⁷ Hidroweb

A Figura 36 mostra o nível dos reservatórios das duas usinas. Percebe-se que há uma relação linear entre as cotas, com exceção do dia 12/10/2011, em que o nível do reservatório na Usina GPS diminuiu e na Usina Roncador aumentou. Isto é justificável pelo fato de que neste dia houve um aumento na vazão da Usina GPS e uma conseqüente diminuição no volume de água no reservatório.

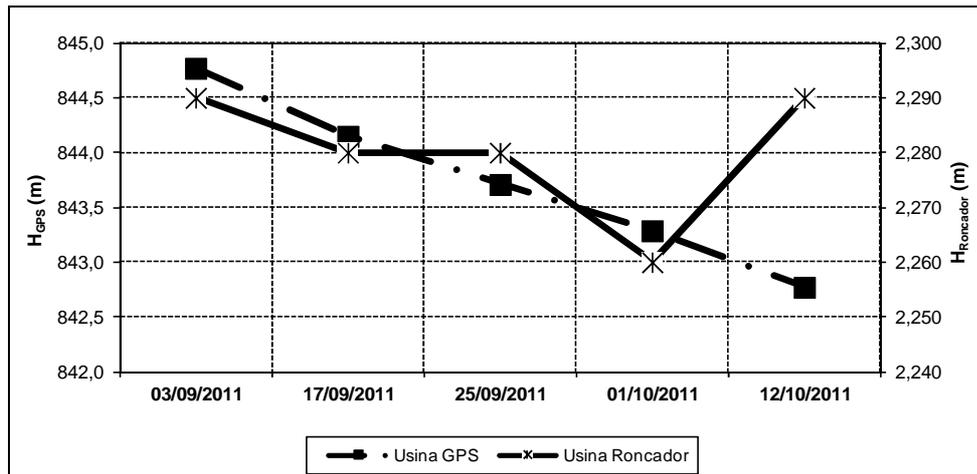


Figura 36 – Comparativo entre os níveis dos reservatórios das Usinas Roncador e GPS
Fonte: Própria.

A Figura 37 mostra a vazão para as duas usinas.

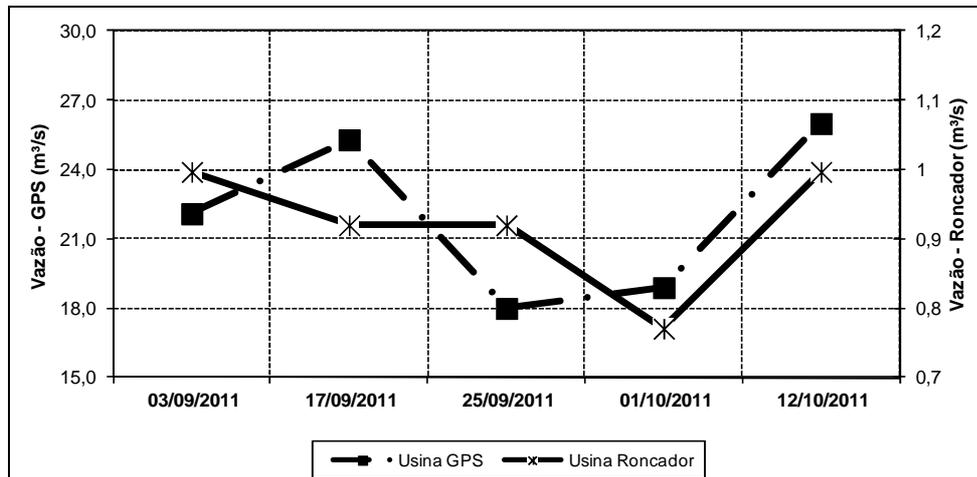


Figura 37 – Comparativo entre as vazões Usinas Roncador e GPS
Fonte: Própria.

O próximo passo, consistiu no cálculo do fator de transposição, dado por

$$FT = \frac{\bar{Q}_{Roncador}}{Q_{GPS}} \quad (42)$$

onde FT é o fator de transposição (adimensional), $\bar{Q}_{Roncador}$ é a vazão média observada na Usina Roncador (m^3/s) e \bar{Q}_{GPS} é a vazão média observada na Usina GPS (m^3/s). Substituindo os valores da Tabela 12, obtém-se $FT = 0,0417$.

Para obter a série histórica de vazões da Usina Roncador, multiplica-se o fator de transposição pela série histórica da Usina GPS que se encontra disponível na base de dados hidrométricos *Hidroweb* (AGÊNCIA..., 2011).

Foi utilizada a série histórica do posto fluviométrico Capivari-Montante, código 81299000, que apresenta vazões da Usina GPS de 1984 a 2005 e alguns meses de 2010. No Anexo A são apresentadas informações de identificação do posto fluviométrico. Como as informações do primeiro ano do intervalo e de 2010 estavam incompletas, foi considerado na análise o intervalo de 21 anos, entre 1985 e 2005.

4.7 FLUVIOGRAMA

As Figura 38 e 39 mostram os fluviogramas de vazões médias mensais obtidos entre 1985 e 2005 para as Usinas GPS e Roncador, respectivamente. O fluviograma da Usina Roncador foi obtido pela aplicação do fator de transposição ao fluviograma da Usina GPS, resultando que ambas as curvas apresentam o mesmo formato diferindo apenas na escala.

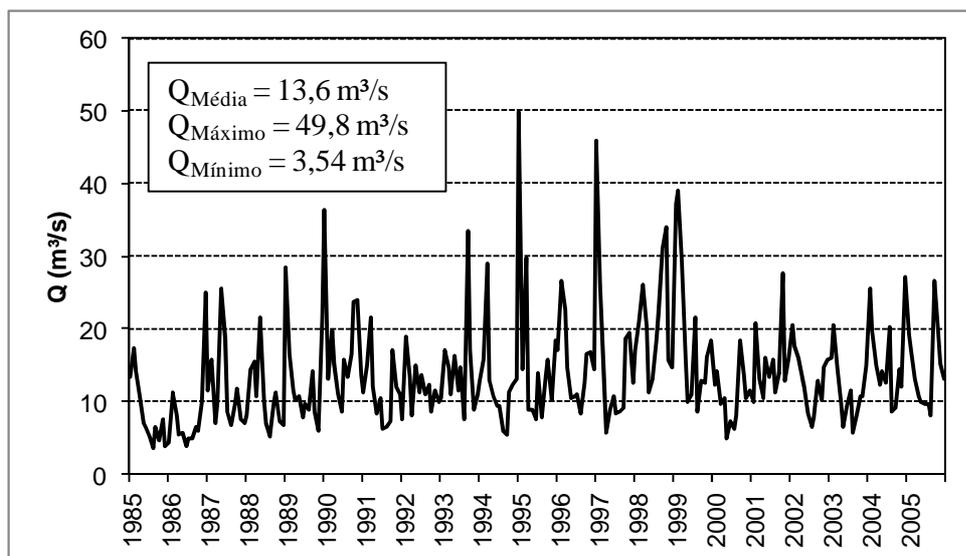


Figura 38 – Fluviograma de vazões médias mensais para a Usina GPS

Fonte: Própria.

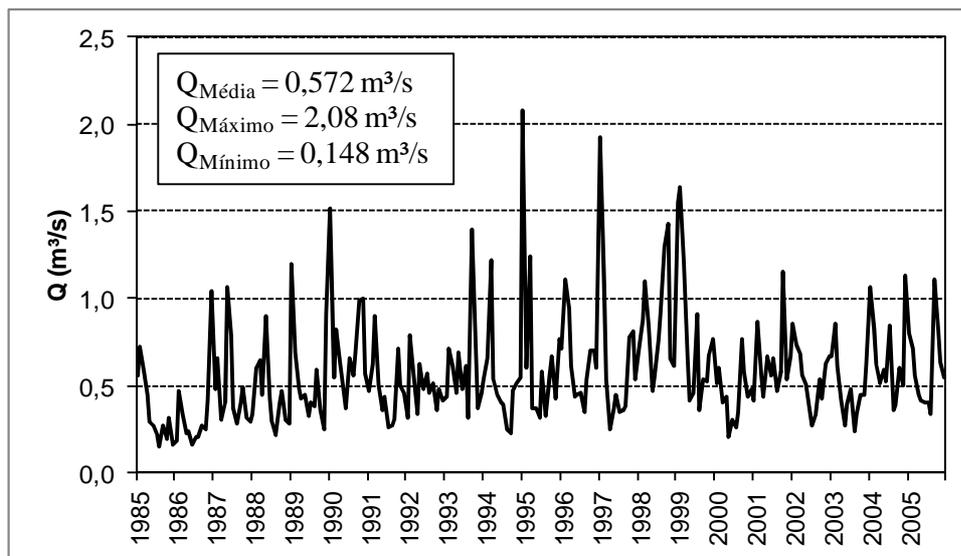
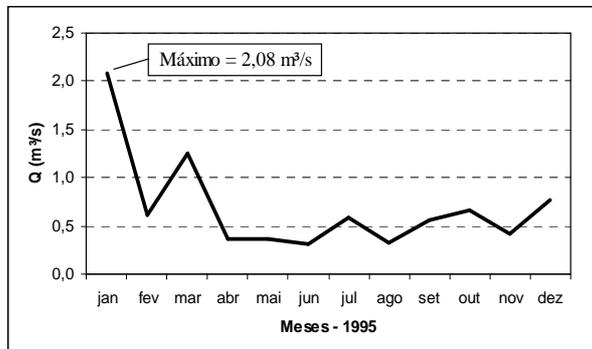
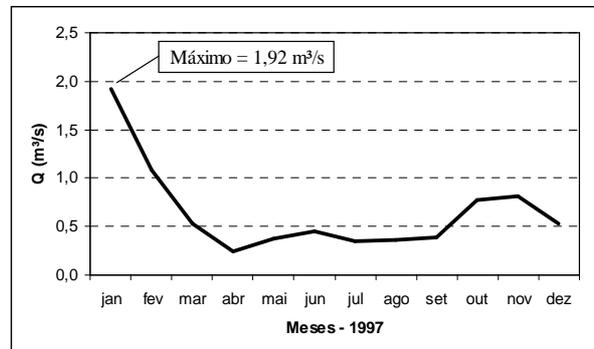


Figura 39 – Fluviograma de vazões médias mensais para a Usina Roncador
Fonte: Própria.

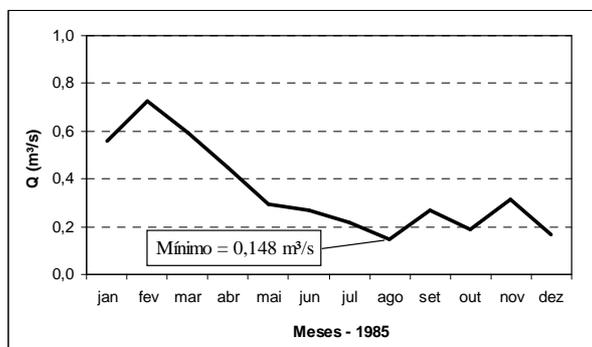
Pelo fluviograma foi possível calcular a vazão média na Usina Roncador para um período de 21 (vinte e um) anos. O valor encontrado ($0,572 \text{ m}^3/\text{s}$) é 38% inferior ao valor médio obtido nas 05 (cinco) medições realizadas no local ($0,921 \text{ m}^3/\text{s}$).



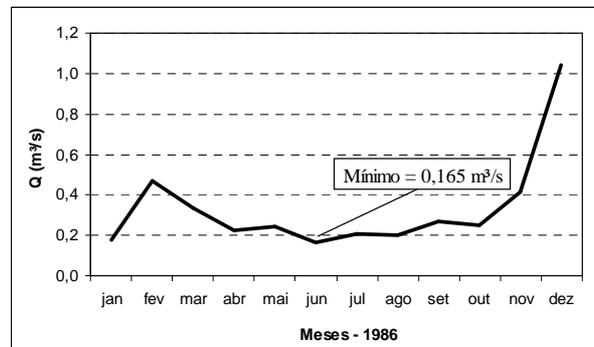
(a) – 1995: Máxima



(b) – 1997: Máxima



(c) – 1985: Mínima



(d) – 1986: Mínima

Figura 40 – Fluviogramas estratificados para os anos em que ocorreram máximas (1995 e 1997) e mínimas (1985 e 1986).
Fonte: Própria

A Figura 40 mostra que as vazões máximas foram observadas no mês de Janeiro (Figuras 40.a e 40.b), que corresponde a um mês do chamado período úmido, isto é, no período no qual as chuvas são mais intensas e que vai de Dezembro de um ano a Abril do ano seguinte. Da mesma forma, verifica-se que as vazões mínimas ocorreram no período seco (Figuras 40.c e 40.d), que vai de Maio a Novembro (SÓRIA; FILIPINI, 2010). Tais resultados estão de acordo com a precipitação pluviométrica mensal na região, mostrada na Tabela 6.

4.8 CURVA DE PERMANÊNCIA

A Figura 41 mostra a curva de permanência para a Usina Roncador.

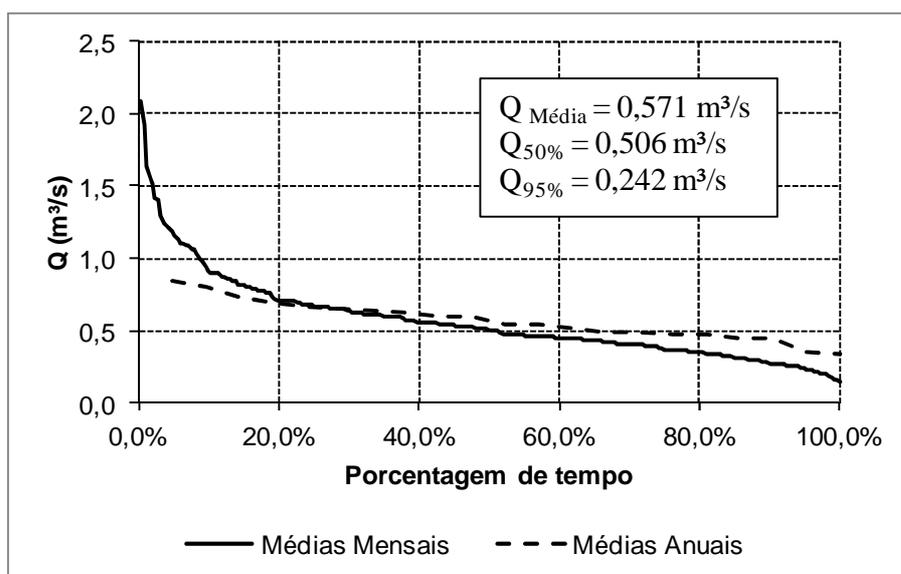


Figura 41 – Curva de permanência da Usina Roncador no período entre 1985 e 2005
Fonte: Própria.

4.9 QUEDA BRUTA

A queda bruta corresponde à diferença de altura entre o nível d'água no reservatório e a casa de máquinas. Neste trabalho ela foi obtida a partir das leituras linimétricas realizadas no período de medição e da Equação (39). A Figura 42 indica as leituras linimétricas e a média dos valores.

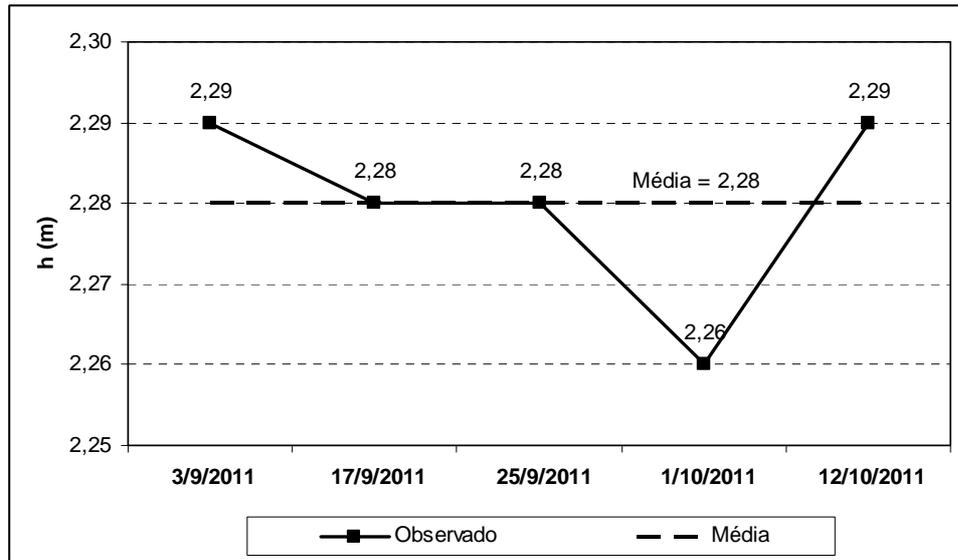


Figura 42 – Níveis d'água no reservatório indicados no linímetro
Fonte: Própria.

Substituindo a média das leituras linimétricas na Equação (39), obtém-se a queda bruta entre o nível do reservatório e a casa de máquinas, isto é,

$$H_B = 12,53 + \bar{H} = 12,53 + 2,28 = 14,81m \quad (43)$$

onde H_B é a queda bruta (m) e \bar{H} é a média das leituras linimétricas observadas durante o período considerado (m).

4.10 POTÊNCIA APROVEITÁVEL

Com o valor da queda bruta, $H_B = 14,81m$, é possível obter a potência aproveitável do curso d'água, em kW, através da Equação (38). A Tabela 14 mostra as principais vazões para a Usina Roncador, obtidas a partir da série histórica mensal entre 1985 e 2005, com as respectivas potências aproveitáveis.

Tabela 14 – Principais vazões e potências.

<i>Vazão</i>	<i>Valor (m³/s)</i>	<i>Potência aproveitável (kW)</i>
Máxima	2,08	234
Média	0,572	64
Firme 50% do tempo	0,506	57
Firme 95% do tempo	0,242	27
Mínima	0,148	17

Fonte: Própria

5 CONCLUSÃO

Existem diversos métodos de medição de vazão citados na literatura. Dos principais métodos de medição de vazão utilizados em estudos de viabilidade de micro e minicentrals hidrelétricas, os que apresentaram menor e maior erro foram os métodos da calha Parshall e do flutuador, respectivamente. Contudo, o primeiro necessita de um local para instalação de uma calha Parshall devidamente aferida e o segundo, embora precário, é viável dado o baixo custo de aplicação.

Neste trabalho foram utilizados os métodos do vertedouro e do flutuador. O método do flutuador só foi possível de ser aplicado dada a existência de um vertedouro no local e de uma régua linimétrica. De acordo com a literatura, o erro inerente ao método do vertedouro é de 3% e do método do flutuador é 20%.

Foram realizadas 05 (cinco) campanhas de medições, e os resultados obtidos pelos dois métodos foram satisfatórios, uma vez que apresentaram erro inferior a 10% em 04 (quatro) das 05 (cinco) medições realizadas. A única vez que o erro entre os métodos foi superior a 10% ocorreu na ocasião em que o método do flutuador foi aplicado num trecho curvo do rio com 5m de comprimento, indo contra as recomendações da literatura para que se utilize um trecho retilíneo com no mínimo 10m de comprimento.

Como a Usina Roncador está na mesma bacia hidrográfica que a Usina Hidrelétrica Gov. Pedro Viriato Parigot de Souza, foi possível obter a série histórica da primeira em função da série histórica da segunda, uma vez que esta possui dados hidrométricos atualizados disponíveis nas bases de dados do governo brasileiro.

A série histórica utilizada possui registro de 1985 a 2005, totalizando 21 (vinte e um) anos. Com a série histórica obteve-se o fluviograma e a curva de permanência e, a partir destas, obteve-se as principais vazões da Usina Roncador que poderão ser utilizadas como parâmetros para as próximas etapas de sua revitalização.

Considerando a vazão máxima observada, a potência aproveitável é de 234kW, o que caracteriza a Usina Roncador como uma minicentral hidrelétrica. Entretanto, considerando-se a vazão mínima, a potência aproveitável é de 17kW, o que a caracteriza como uma microcentral hidrelétrica (ELETROBRÁS, 2011).

REFERÊNCIAS

8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2007, Cusco. **Despacho ótimo de máquinas hidráulicas considerando as eficiências individualizadas.** San Miguel: PUCP, 2007. Não Paginado. Disponível em: <
<http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/06/06-43.pdf> > . Acesso em: 31 mai. 2011.

VI SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 2008, Belo Horizonte. **Análise e aplicação de perfiladores acústicos Doppler para medição de vazão em pequenas centrais hidrelétricas.** Belo Horizonte: CERPCH, 2008. Disponível em: <
<http://www.cerpch.unifei.edu.br/Adm/artigos/03322dc4adeee3602bdcbf76c5e88463.pdf> > . Acesso em: 31 mai. 2011.

IX ENCUESTRO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE SOBRE PEQUEÑOS APROVECHAMIENTOS HIDROENERGÉTICOS, [2001], Neuquén. **Sistemas de monitoramento de rendimento em usinas hidrelétricas.** Não paginado. Belo Horizonte: CPH, 2001. Disponível em: < <http://www.cph.eng.ufmg.br/nova/projetodoc/57.pdf> > . Acesso em: 22 mai. 2011.

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **CPRH N 2.004: Medição de vazão de efluentes líquidos: escoamento livre.** [2004]. Disponível em: <
<http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/normas-cprh-2004.pdf> > . Acesso em: 31 mai. 2011.

ALTERIMA. **Micro usina hidrelétrica.** Disponível em:
<<http://www.alterima.com.br/projetomicrousina.htm>> . Acesso 05 mar. 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Hidroweb. Disponível em: <hidroweb.ana.gov.br> . Acesso em: 21.out.2011.

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

ANDRADE, Luiz A.; MARTINEZ, Carlos B.; FILHO, Jair N.; AGUIRRE, Luis A. **Estudo comparativo dos métodos de medição de vazão – uma aplicação em comissionamento de turbinas hidráulicas.** Centro de Pesquisas em Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 73-79, 2010.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. BANCO DE INFORMAÇÃO DA GERAÇÃO (BIG). **Capacidade de Geração do Brasil.** Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>> . Acesso em: 27 mai. 2011

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução n.º394, de 04 de dezembro de 1988**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res1998394.pdf>> . Acesso em: 03 abr. 2011.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução n.º652, de 09 de dezembro de 2003**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2003652.pdf>> . Acesso em: 03 abr. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13403: Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores – Escoamento livre**. Rio de Janeiro, 1995.

AVIX GEO AMBIENTAL. **Medição de vazões**. 2011. Não paginado. Disponível em: <<http://www.avix.com.br/mediccedilatildeo-de-vazotildees.html>> . Acesso em: 31 mai. 2011.

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

BARBOSA, Antenor R. **Curva de permanência de vazão** Disponível em: <<http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~carloveduardo/1Curva%20de%20Permanencia.pdf>> . Acesso em: 27 ago. 2011.

BOYLE, Godfrey. **Renewable Energy: Power for a Sustainable Future**. New York: Oxford, 2004

CANYON HYDRO. **The guide to hydropower**. [entre 2004 e 2011]. Disponível em: <<http://www.canyonhydro.com/guide/Guide%20to%20Hydropower.pdf>> . Acesso em: 15 mai. 2011.

CARVALHO, Daniel F.; SILVA, Leonardo D. B. **Hidrologia**. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap1-INTRO.pdf>> . Acesso em: 28 ago. 2011.

ELETROBRÁS. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de microcentrais hidrelétricas**. 344p. Rio de Janeiro: [sn], 1985.

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

ELETROBRÁS. **Diretrizes para projetos de PCH**. Disponível em: <<http://www.portalpch.com.br>> . Acesso em 06 abr. 2011.

_____. **Alternativas tecnológicas**. Disponível em: <<http://www.eletronorte.com/elb/main.asp?ViewID={B03EC78A-0D5A-48CA-B2DC-475FC8536A12}¶ms=itemID={8F2D038C-9E0E-4BF8-A0E415B1B2FB3920};&UIPartUID={9E178D3B-9E55-414B-A540-EB790C1DF788}>>> . Acesso em: 10 mai. 2011.

ELETRONORTE. **Introdução às energias renováveis**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br>> . Acesso em: 05 mai. 2011.

EMBRAPA. Comunicado técnico nº455, de julho de 2007. **Medição da vazão em rios pelo método do flutuador**. Concórdia, SC. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/down.php?tipo=publicacoes&cod_publicacao=1017> . Acesso em: 31 mai. 2011.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. **Orifícios, bocais e aberturas**. Disponível em: <http://www.fcth.br/fesparquivos/CH2_TEORIA/Orifícios,%20Bocais%20e%20Vertedores.pdf> . Acesso em: 31 mai. 2011.

GRUPO DE TRABAJO SOBRE HIDROMECAÁNICA, [1999], Montevideú. **Aplicação de pacotes gráficos para o cálculo de vazões em canais abertos**. Não paginado. Itajubá: GEN, 1999. Disponível em: <<http://www.gen.unifei.edu.br/artigos/Artigo%20GEN%208.pdf>> . Acesso em: 31 mai. 2011.

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

MELCHIOR, Clodoaldo. **Comparativo de resultados de medição de vazão pelos métodos: convencional e acústico**. 2006. 72f. Trabalho de final de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – União Dinâmica de Faculdades Cataratas, Foz do Iguaçu, 2006. Disponível em: <<http://www.udc.edu.br/monografia/Mono13.pdf>> . Acesso em: 10 fev. 2011.

MONTEIRO, Claudio. **Mini-hídricas**. Disponível em: <http://www.energiasrenovaveis.com/docs/PTE2_minihidrica.pdf> . Acesso em: 07 abr. 2011.

PEREIRA, Geraldo M.; MELLO, Carlos R. Aula prática de hidrometria. Curso promovido pela Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG. Disponível em: <http://www.deg.ufla.br/site/_adm/upload/file/6_Aula%20pratica%206.pdf> . Acesso em: 10 fev. 2011.

PITON, Cristiane L. **Evolução tecnológica nas medições de vazões em rios**. 2007. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil. Faculdade Dinâmica das Cataratas, Foz do Iguaçu, 2007.

PORTO, Rubem L. P.; FILHO, Kamel Z; SILVA, Ricardo M. **Medição de vazão e curva-chave**. Disponível em: <http://www.unilasalle.edu.br/canoas/assets/upload/eng_ambiental/medicao_de_vazao_e_curva_chave.pdf> . Acesso em: 27 ago. 2011.

_____. Apostila de Hidrologia Aplicada. Escola Politécnica da USP. São Paulo: 2001. Disponível em: <http://200.144.189.36/phd/LeArq.aspx?id_arq=3859> . Acesso em: 06 set. 2011.

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

RUGGIERO, M. A. G. & LOPES, V. L. R. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais**. 2.ed. São Paulo, Makron, 1997.

SANTOS, Afonso Henriques Moreira. **As fontes alternativas de energia e o empresarismo descentralizado: potencialidades e obstáculos para a sua expansão no Brasil**. Itajubá: CERNE – UNIFEI, 2003.

SCHNEIDER, Paulo Smith. **Medição de velocidade e vazão de fluidos**. 24 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SIMEPAR, Instituto Tecnológico. Precipitação pluviométrica na Região Metropolitana Norte de Curitiba nos anos de 2001 a 2011. 2011.

SÓRIA, A. F. da S. & FILIPINI, F. A. **Eficiência Energética**. Curitiba: Base Editorial, 2010.

SOUSA, Rui S. de. **Determinação de vazão turbinada com emprego de traçador fluorescente**. 1997. 125f. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/es/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=1552> . Acesso em: 10 fev. 2011.

SOUZA, Podalyro A.; ALFREDINI, Paolo; MARTINS, Reginaldo G. **Experiências de laboratório no curso de Hidráulica I**. Curso promovido pela Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. Disponível em: < http://200.144.189.36/phd/LeArq.aspx?id_arq=2718> . Acesso em: 01 jun. 2011.

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

SOUZA, Zulcy; SANTOS, Afonso H. M.; BORTONI, Edson da C. **Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1999.

_____. _____. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

STANO JUNIOR, Ângelo; BITENCOURT, Valdinéia Aparecida; TIAGO FILHO, Gilberto Lúcio. **Hidráulica**. 1ªed. Itajubá: FAPEPE, Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH, 2007.

STANO JUNIOR, Ângelo; TIAGO FILHO, Gilberto Lúcio. **Eletricidade**. 1ªed. Itajubá: FAPEPE, Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH, 2007.

STANO JUNIOR, Ângelo; TIAGO FILHO, Gilberto Lúcio. **Energias Renováveis**. 1ªed. Itajubá: FAPEPE, Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH, 2007.

STANO, Ângelo; VIANA, Augusto Nelson Carvalho. **Curso PCHs**. Campinas: AGRENER, 2002.

STUDART, Ticiania M. C. **Hidrologia**. Paginação irregular. Disponível em: < http://www.deha.ufc.br/ticiania/Arquivos/Graduacao/Apostila_Hidrologia_grad/Cap_12_Regularizacao_de_Vazoes.pdf> . Acesso em: 27 ago. 2011.

TIAGO FILHO, Geraldo Lucio. **Diário do legislativo de 22/11/2001**. Disponível em: <http://www.almg.gov.br/dia/A_2001/11/L221101.htm> . Acesso em: 12 mai. 2011

TUCCI, Carlos E. M.; PEREIRA, Régis da S.; NETO Adalmiro da S. **Princípios da Hidrometria**. In: _____. Porto Alegre: 2003. Paginação irregular. Disponível em: <<http://www.iph.ufrgs.br/posgrad/disciplinas/hip01/Cap13-Hidrometria.pdf>> . Acesso em: 31 mai. 2011.

White, F. M., **Mecânica dos Fluidos**. 4.ed., MacGraw-Hill. Rio de Janeiro: 2002.

APÊNDICE A – PLANILHAS DE CÁLCULO PARA OBTENÇÃO DA VAZÃO.

Medição de Vazão - Métodos: Flutuador e Vertedor							
Dia	3/set	Hora	15h30	Cota (m)	2,29	D _{Flutuador} (m)	5
SEÇÃO 1							
x (cm)	p (cm)	A (cm ²)					
0	0						
60	9	270					
120	17	780					
180	29	1380					
240	37	1980					
300	40	2310					
360	45	2550					
420	47	2760					
480	35	2460					
540	20	1650					
600	0	600					
SEÇÃO 2							
x (cm)	p (cm)	A (cm ²)					
0	0						
60	5	150					
120	8	390					
180	21	870					
240	25	1380					
300	31	1680					
360	37	2040					
420	40	2310					
480	43	2490					
540	24	2010					
580	0	480					
Áreas - Regra dos Trapézios							
Seção 1 (m ²)	1,67						
Seção 2 (m ²)	1,38						
Área média (m ²)	1,53						
Velocidade Superficial							
N	d (m)	Δt (s)	v = d/Δt				
1	5	4,79	1,04				
2	5	4,38	1,14				
3	5	4,53	1,10				
4	5	4,19	1,19				
5	5	4,66	1,07				
6	5	4,98	1,00				
7	5	4,50	1,11				
8	5	4,50	1,11				
9	5	4,55	1,10				
10	5	4,66	1,07				
Média	-	4,57	1,10				
DesvPad	-	0,22	0,05				
Velocidade Média							
V _{sup}	1,10						
fator	0,80						
V Média	0,88						
Vazão - Flutuador							
Área média (m ²)	1,53						
V Média (m/s)	0,88						
Vazão (m ³ /s)	1,34						
Vazão (l/s)	1338						
Vazão - Vertedor							
Largura (m)	7,08						
Carga d'água (m)	0,19						
Vazão (m ³ /s)	0,997						
Vazão (l/s)	997						

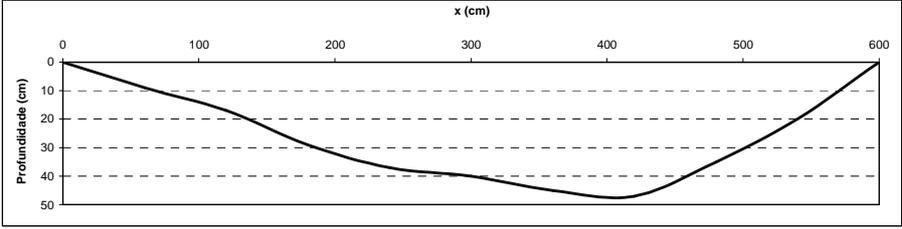
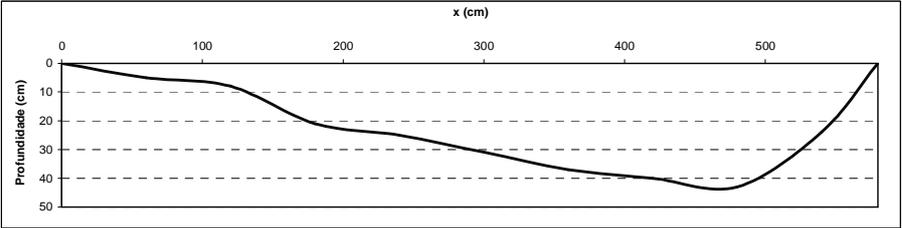



Figura A.1 – Planilha com dados do dia 03/09/2011 para cálculo da vazão

Fonte: Própria.

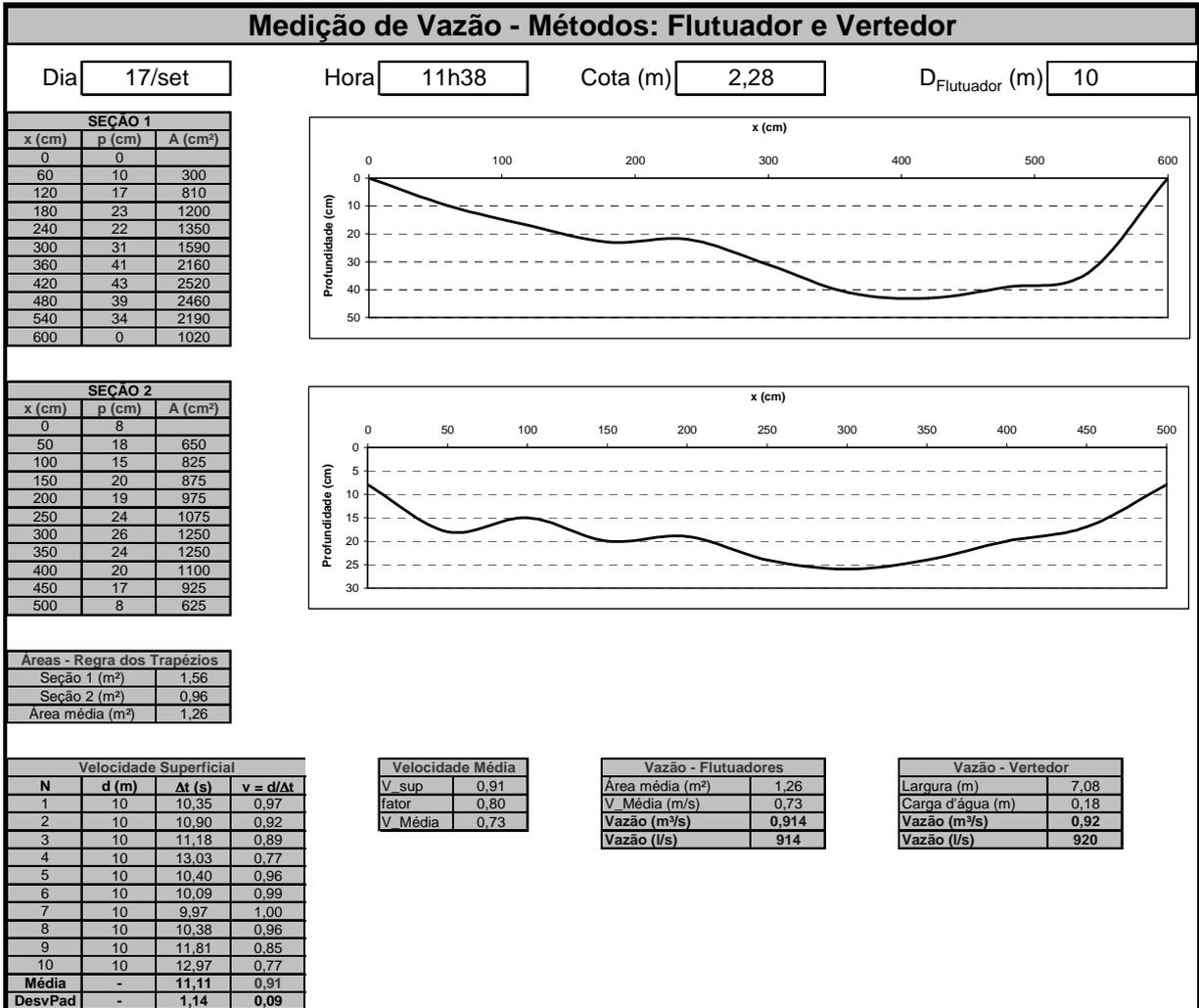


Figura A.2 – Planilha com dados do dia 17/09/2011 para cálculo da vazão
Fonte: Própria.

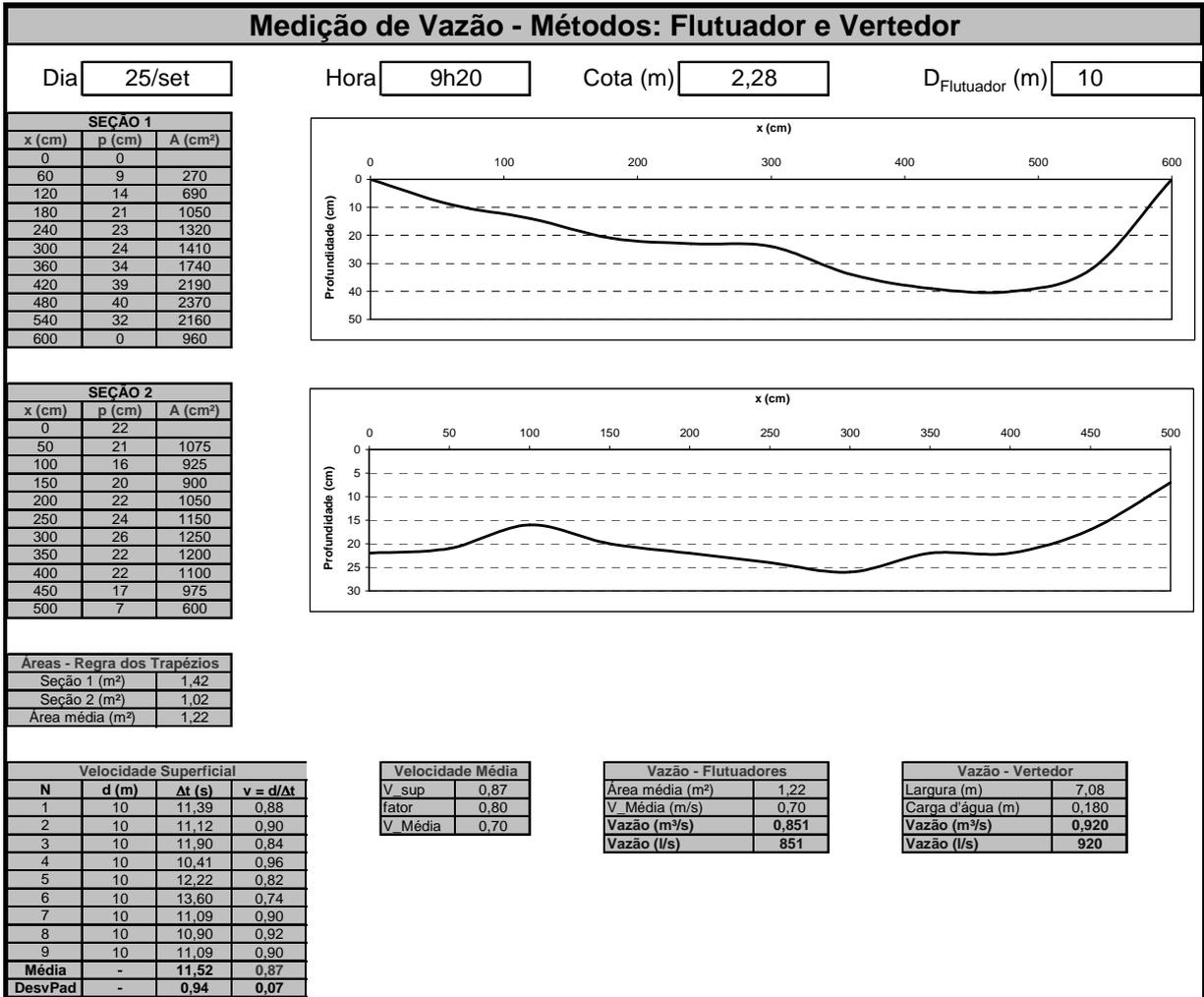


Figura A.3 – Planilha com dados do dia 25/09/2011 para cálculo da vazão
Fonte: Própria.

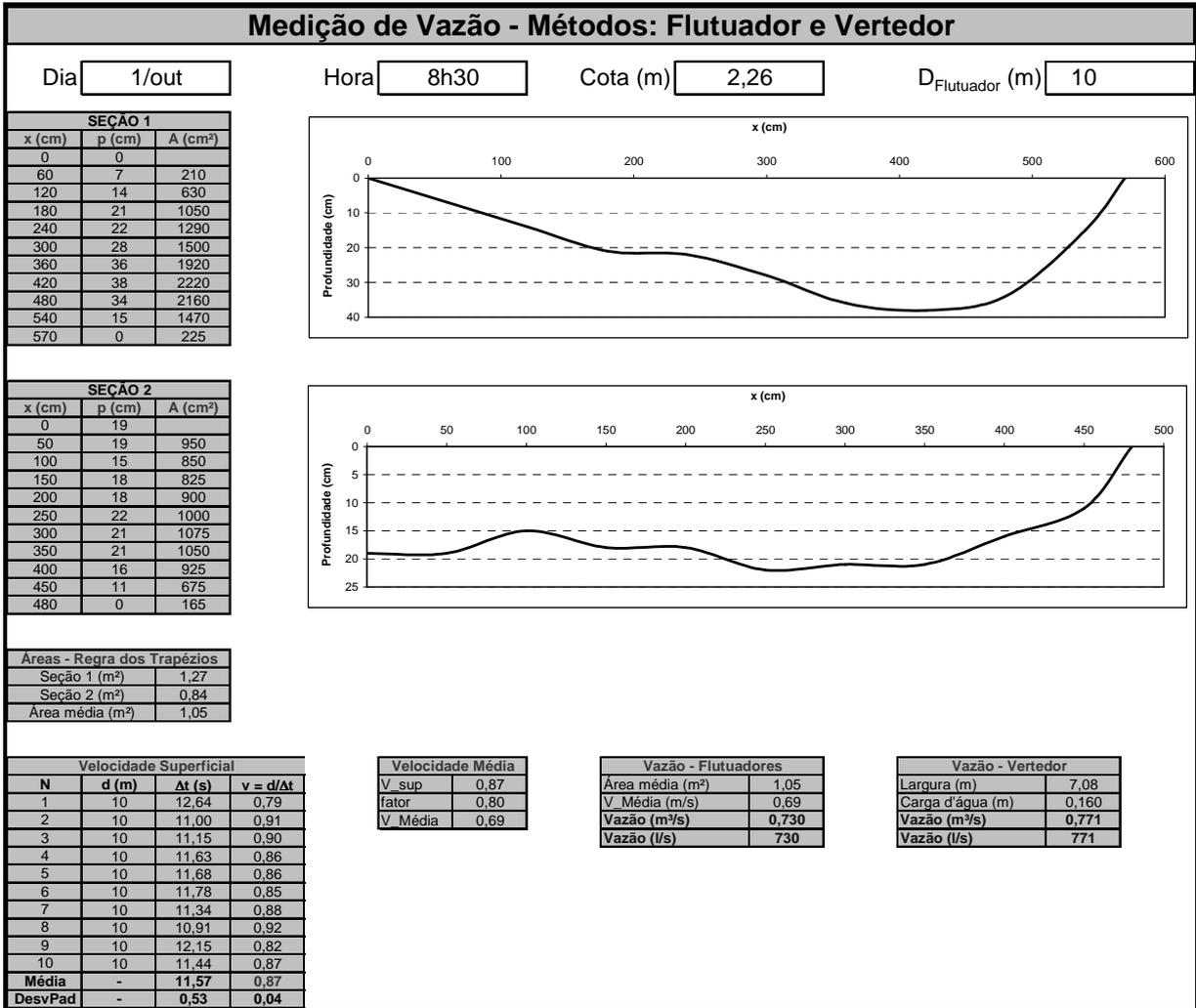


Figura A.4 – Planilha com dados do dia 01/10/2011 para cálculo da vazão
 Fonte: Própria.

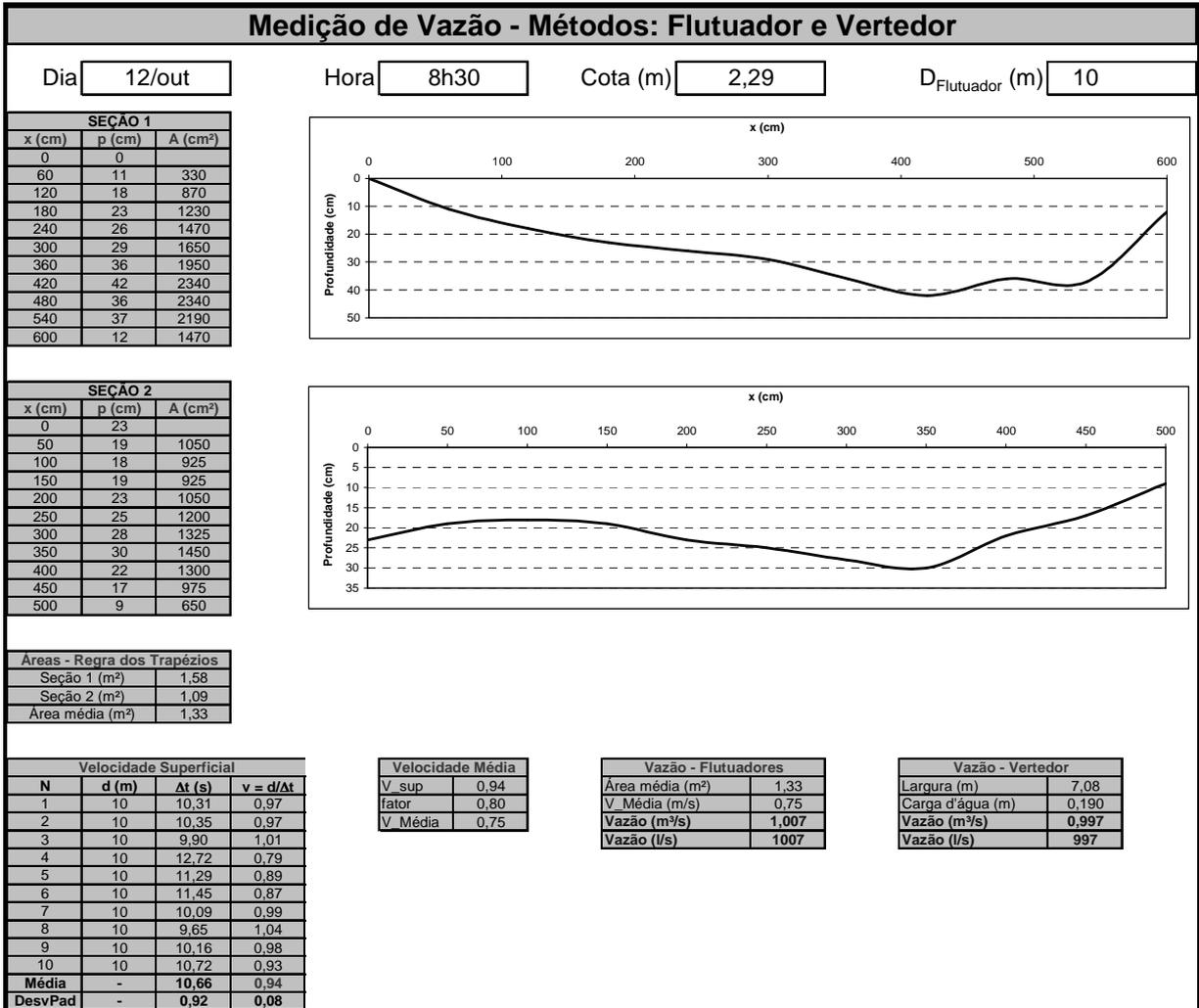


Figura A.5 – Planilha com dados do dia 12/10/2011 para cálculo da vazão
Fonte: Própria.

ANEXO A – INFORMAÇÕES DO POSTO FLUVIOMÉTRICO.

Dados da Estação	
Código	81299000
Nome	CAPIVARI - MONTANTE
Código Adicional	RESOLUÇÃO/396
Bacia	ATLÂNTICO, TRECHO SUDESTE (8)
Sub-bacia	RIO RIBEIRA DO IGUAPE (81)
Rio	RIO CAPIVARI
Estado	PARANÁ
Município	BOCAIÚVA DO SUL
Responsável	COPEL
Operadora	SUDERHSA
Latitude	-25:13:0
Longitude	-48:57:0
Altitude (m)	780
Área de Drenagem (km ²)	468

Figura A.1 – Informações sobre o posto fluviométrico
Fonte: Hidroweb (AGENCIA..., 2011).