RAFAEL GUSTAVO ROSELLI

Extravasor labirinto em aproveitamentos hidrelétricos

São Paulo - SP
2012

RAFAEL GUSTAVO ROSELLI

Extravasor Labirinto em Aproveitamentos Hidrelétricos

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo,
no âmbito do Curso de Pós Graduação em
Engenharia Hidráulica

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica

Orientador: Prof. Dr. Podalyro Amaral de
Souza

São Paulo - SP
2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de agosto de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Roselli, Rafael Gustavo

Extravasor labirinto em aproveitamentos hidrelétricos / R.G.

Roselli. -- São Paulo, 2012.

138 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

1. Estruturas hidráulicas 2. Vertedores I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental II. t.

Nome: ROSELLI, Rafael Gustavo

Título: Extravasor labirinto em aproveitamentos hidrelétricos

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de mestre em Hidráulica.

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Rubens e minha mãe Jurema, pais exemplares que batalharam e ensinaram os caminhos corretos e vitoriosos para cada um de seus cinco filhos. A minha avó Amabile, sou grato por tudo o que tens feito por mim, tenho certeza que sem você meus sonhos não estariam realizados. E a minha esposa Tamiris, exemplo de superação que me ensinou o verdadeiro caminho de Deus.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof^o Podalyro pela simplicidade, apoio e incentivo no ensino durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho.

Aos Engenheiros: Antônio Eurides Conte da Empresa ENGECON, Sérgio Mascarenhas – Empresa NEOENERGIA, Jamil Paes Rodrigues – Empresa S.A. PAULISTA pelo apoio e permissão na utilização dos dados de cada sistema extravasor referente aos estudos de caso das PCH's avaliadas no presente trabalho.

A todos meus amigos e companheiros do Grupo Energia, em especial aos engenheiros: Guilherme Palfi e Ricardo Silva pelo incentivo no trabalho diário e nos estudos, e Newton Bitencourt, pela colaboração nos estudos das PCH's Alto Fêmeas e Sítio Grande do estado da Bahia. Ao geólogo Nobutugu Kaji, pela experiência e apoio no desenvolvimento do meu trabalho, e ao projetista Luiz Mansano, pelo auxílio nos estudos de caso.

A todos meus familiares, principalmente a minha tia Marines pelo carinho e apoio em toda minha trajetória. Meus irmãos Marcio, Rodrigo, Renato e Marcos, que sempre lutaram e estiveram ao meu lado nos momentos difíceis de minha vida.

Agradeço a Deus por toda a benção, conquistas e saúde até agora, mas peço a Ele para me dar sabedoria para conquistar muito mais.

RESUMO

O presente trabalho apresenta soluções e análises desenvolvidas em estruturas extravasoras em aproveitamentos a fio d'água, envolvendo análises nos critérios de operação de diversos tipos de descarregadores, tais como: soleira normal, labirinto, tulipa e comportas específicas. Para tanto se faz necessário o estudo e comparação de resultados a serem desenvolvidos em cada projeto com relação aos fatores hidráulicos, hidrológicos, geológicos, topográficos e dos riscos envolvendo prejuízos decorrentes de falhas nas estruturas hidráulicas.

A avaliação de extravasores labirinto em aproveitamentos hidrelétricos de projetos aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL tem o objetivo de analisar a segurança em relação à construção e à operação, com foco no desenvolvimento de descarregadores adequados para cada estudo de caso presentes neste trabalho. Esta avaliação indica as condições geométricas, econômicas e hidráulicas do extravasor labirinto adequado para cada situação de aproveitamento hidrelétrico a fio d'água.

Palavras-Chave: Estruturas Hidráulicas; Vertedor; Descarregador Labirinto

ABSTRACT

This paper studies solutions and analysis developed in spillways structures in hydroelectric development trickle, involving analysis of the operation criteria of several types of dischargers, such as threshold normal maze, morning glory and specific gates. For this purpose it is necessary to study and compare the results to be developed in each project about the factors hydraulic, hydrologic, geologic, topographic and risks involving losses due to failures in hydraulic structures.

The evaluation of spillways maze in hydroelectric of projects approved by the National Agency of Electric Energy - ANEEL aims to analyze the safety for the construction and operation, focusing on the development of suitable dischargers for each case study in this work. This assessment indicates the geometric, economic and hydraulic conditions of the most suitable spillways maze for each situation of hydroelectric development trickle.

Keywords: Hydraulic Structures, Spillway, Spillway Labyrinth

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVOS GERAIS	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	JUSTIFICATIVA E METODOLOGIA	4
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1	EXTRAVASORES	5
4.1.1	Vazões de Projeto do Sistema Extravasor	7
4.1.2	Extravasor Livre	9
4.1.3	Extravasor de Fundo	15
4.1.4	Extravasor em Poço (Tulipa)	18
4.1.5	Extravasor em Degraus	24
4.1.6	Comporta Flap	25
4.2	EXTRAVASOR LABIRINTO	28
4.2.1	Extravasores Labirintos registrados na literatura	29
4.2.2	Extravasores Labirintos em PCH's no Brasil	31
4.2.3	Casos especiais de Extravasor Labirinto	33
4.3	CRITÉRIOS DE GEOMETRIA DO EXTRAVASOR LABIRINTO	36
4.3.1	Características geométricas do Extravasor Labirinto Trapezoidal	36
4.3.2	Características da crista do Extravasor Labirinto	38
4.4	DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DO EXTRAVASOR LABIRINTO	40
4.4.1	Considerações sobre crista Linear e Labirinto	40
4.4.2	Método de Magalhães	43
4.4.3	Método Tullis	46
4.4.4	Relação da carga de projeto e afogamento no canal de descarga	49
4.4.5	Relação da carga de projeto e submersão no canal de descarga	51
4.4.6	Orientações gerais para a seleção dos parâmetros	56
4.5	DISSIPACÃO DE ENERGIA	57
4.6	ESCOLHA DO TIPO DE EXTRAVASOR	61
5	ESTUDOS DE CASO	62
5.1	PCH Figueirópolis – MT	62
5.1.1	Características gerais de arranjo e do Sistema Extravasor	64

5.1.2	Determinação das curvas de descargas teóricas – Vertedor Labirinto.....	66
5.1.3	Avaliação do comportamento hidráulico do Vertedor Labirinto.....	69
5.1.4	Considerações sobre a dissipação de energia da PCH Figueirópolis	73
5.1.5	Alternativas do Vertedor Labirinto.....	74
5.1.6	Estudo de alternativas de Extravasores	80
5.1.7	Quantitativos civis das alternativas Extravasoras	84
5.2	PCH Alto Fêmeas – BA	89
5.2.1	Características gerais de arranjo e do Sistema Extravasor Misto	90
5.2.2	Determinação das curvas de descargas teóricas – Vertedor Labirinto.....	92
5.2.3	Avaliação do comportamento hidráulico do Vertedor Labirinto.....	95
5.2.4	Condição Hipotética de submersão no canal de descarga – Método Tullis (2007)	98
5.3	PCH Sítio Grande – BA	99
5.3.1	Características gerais de arranjo e do sistema extravasor	100
5.3.2	Determinação das curvas de descargas teóricas do Vertedor Labirinto.....	103
5.3.3	Avaliação do comportamento hidráulico do Vertedor Labirinto.....	105
5.3.4	Avaliação do canal de descarga e dissipação de energia	107
5.4	PCH Sete Quedas – MT	112
5.4.1	Características gerais de arranjo e do sistema extravasor	113
5.4.2	Acionamento das Comportas FLAPS – PCH Sete Quedas – MT.....	114
5.4.3	Escoamento semelhante à parede delgada – Comporta FLAP	115
5.4.4	Escoamento semelhante à parede espessa – Comporta FLAP	116
5.4.5	Escoamento semelhante ao Orifício – Comporta Flap	117
5.4.6	Escoamento semelhante à Soleira livre – Comporta Flap.....	117
5.4.7	Determinação da curva de descarga teórica – Comportas FLAPS	118
5.4.8	Alternativas com vertedor labirinto.....	122
5.4.9	Curvas de descargas – Vertedor Labirinto e Comportas Flaps	127
5.4.10	Quantitativos civis das alternativas Extravasoras	130
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	133
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Vertedor de parede delgada - Fonte: Porto (1999)	6
Figura 4.2: Crista ou soleira – Fonte: Porto (1999)	6
Figura 4.3: Vertedor de parede espessa – Fonte: Netto <i>et al.</i> (1998)	7
Figura 4.4: Forma característica da crista de um vertedor de soleira normal - Fonte: <i>US Army Corps of Engineers, Maynard</i> (1985)	10
Figura 4.5: Quadrante de montante elíptico - Fonte: <i>US Army Corps of Engineers,</i> <i>Maynard</i> (1985)	11
Figura 4.6: Cavitação em um vertedor de soleira normal - Fonte: Linsley & Franzini (1978)	12
Figura 4.7: Zona de cavitação - Fonte: US Army Corps of Engineers, Maynard (1985)	12
Figura 4.8: Coeficiente de Vazão dimensional do vertedor linear de soleira normal – adaptado Schreiber (1977)	13
Figura 4.9: Pilares com cantos vivos e formas afiladas	14
Figura 4.10: Válvula difusora – UHE Funil, Rio Paraíba do Sul / RJ – Foto: R. G. Roselli (2010)	16
Figura 4.11: Comporta de Fundo, do tipo setor – (SCHREIBER, 1977)	17
Figura 4.12: Escoamento sob uma adufa (comporta vertical)	18
Figura 4.13: Vertedouro em poço de eixo vertical e em poço de eixo inclinado - Fonte: <i>Hydraulic Design of Spillways</i> (1987)	19
Figura 4.14: Vertedouro em poço Condição I – Superfície	20
Figura 4.15: Vertedouro em poço Condição II – Orifício	20
Figura 4.16: Vertedouro em poço Condição III – Conduto forçado	20
Figura 4.17: Condições hidráulicas do descarregador em poço - <i>Design of Small</i> <i>Dams</i> (1987)	21
Figura 4.18: Aspecto geral vertedor Tulipa – <i>Design of Small Dams</i> (1987)	22
Figura 4.19: Coeficiente de Descarga – Vertedor do tipo Tulipa – Adaptado <i>Hydraulic</i> <i>Design Criteria</i> (1987)	23
Figura 4.20: Dissipador em degraus (Tamada, 1994)	24
Figura 4.21: Dissipador em queda livre (Tamada, 1994)	24
Figura 4.22: Instalação das comportas Flaps - PCH Sete Quedas - MT (Fonte: S.A Paulista, 2011)	25
Figura 4.23: Corte da comporta Flap – PCH Sete Quedas – MT (Fonte: Adaptado S.A Paulista, 2011)	26

Figura 4.24: Correção do coeficiente de descarga Perfil Creager - Adaptado <i>Design of Small Dams</i> (1987)	27
Figura 4.25: PCH Figueirópolis - MT – Foto: A. Conte (2010).....	31
Figura 4.26: Vertedor Misto - PCH Alto Fêmeas – Foto: N. Bitencourt (2011)	32
Figura 4.27: PCH Sítio Grande - BA – Foto: N. Bitencourt (2011).....	32
Figura 4.28: Esquema de funcionamento de uma comporta fusível Fonte: HIDROPLUS® 2009 Edição ICOLD	34
Figura 4.29: Escoamento sobre a crista das comportas fusíveis da Barragem de MacClure, Novo México, EUA – Fonte: HIDROPLUS® 2009 Edição ICOLD	34
Figura 4.30: Instalação da comporta fusível em Alto Layang, Malásia Fonte: HIDROPLUS® 2009 Edição ICOLD	35
Figura 4.31: Esquema descarregador Labirinto – adaptado (Magalhães, 1983)..	37
Figura 4.32: Dois ciclos do vertedor labirinto, Matos & Chanson (2006)	37
Figura 4.33: Perfis de crista – Adaptado Tullis <i>et al.</i> (1995).....	38
Figura 4.34: Detalhes em planta do vertedor labirinto – Adaptado Tullis <i>et al.</i> (1995)	39
Figura 4.35: Perfil da crista indicado para o extravasor labirinto, onde H_d é a carga de projeto – Falvey (2003)	40
Figura 4.36: Coeficiente de descarga de vertedor linear – Adaptado Tullis <i>et al.</i> (1995).....	42
Figura 4.37: Coeficiente de vazão adimensional de soleiras com forma trapezoidal em planta (Magalhães, 1983).....	43
Figura 4.38: Vista do escoamento no modelo reduzido (CTH, 1995).....	45
Figura 4.39: Avaliação de vazões de cheia e carga sobre a soleira - Matos & Chanson (2006)	46
Figura 4.40: Coeficiente de descarga vertedor labirinto - Tullis <i>et al.</i> (1995)	48
Figura 4.41: Submersão no canal de descarga (Adaptado Lewit 1958).....	49
Figura 4.42: Parâmetros de escoamento livre e submerso – Adaptado Tullis <i>et al.</i> (2007).....	51
Figura 4.43: Superposição submersa - Tullis <i>et al.</i> (2007)	52
Figura 4.44: Relação do escoamento submerso para vertedor labirinto – Adaptado Tullis <i>et al.</i> (2007).....	53
Figura 4.45: Comparação de dados de crista labirinto e linear relacionados a submersão (Modificado Tullis <i>et al.</i> , 2007).....	55
Figura 4.46: Ângulo máximo do vertedor labirinto triangular – Falvey (2003)	57

Figura 4.47: Dados geométricos para dimensionamento da bacia de dissipação	58
Figura 4.48: Tipos de Bacias de dissipação x Froude (Adaptado Tamada, 1994)	58
Figura 4.49: Esquema do Ressalto Hidráulico	59
Figura 5.1: Localização da PCH Figueirópolis – MT (Fonte: adaptado ANEEL/SIGEL 2011)	63
Figura 5.2: Planta de um ciclo do vertedor labirinto– PCH Figueirópolis MT (Fonte: ENGECON)	65
Figura 5.3: Corte da estrutura extravasora – PCH Figueirópolis MT (Fonte: ENGECON)	66
Figura 5.4: Curvas de descargas teóricas – PCH Figueirópolis - MT	69
Figura 5.5: Perfil da crista – PCH Figueirópolis – MT (Fonte: adaptado ENGECON)	72
Figura 5.6: Pontos do perfil da crista - U.S. Army Corps of Engineers – PCH Figueirópolis - MT	73
Figura 5.7: Planta do vertedor labirinto – alternativa 1 com 8 ciclos e ângulo de 35° – PCH Figueirópolis - MT	75
Figura 5.8: Planta do vertedor labirinto – alternativa 2 com 12 ciclos e ângulo de 25° – PCH Figueirópolis - MT	76
Figura 5.9: Planta do vertedor labirinto – alternativa 3 com 20 ciclos e ângulo de 6° – PCH Figueirópolis - MT	77
Figura 5.10: Curvas de descargas método de Tullis et al (1995) – alternativas PCH Figueirópolis – MT	79
Figura 5.11: Perfis Creager Soleira livre e Soleira com comportas Flaps – PCH Figueirópolis - MT	85
Figura 5.12: Alternativa com Perfil Tulipa – 2 unidades – PCH Figueirópolis - MT	85
Figura 5.13: Alternativa Perfil Tulipa e transição (corte central perfil Tulipa – 3 dimensões) – PCH Figueirópolis - MT	86
Figura 5.14: Planta do sistema extravasor – PCH Alto Fêmeas - BA (Fonte: adaptado Neoenergia 2011)	90
Figura 5.15: Corte da estrutura extravasora – PCH Alto Fêmeas - BA (Fonte: adaptado Neoenergia)	92
Figura 5.16: Curvas de descargas teóricas – PCH Alto Fêmeas - BA	95
Figura 5.17: Vazão do labirinto submerso com ângulo de 20° - PCH Alto Fêmeas – BA	99

Figura 5.18: Planta do extravasor – PCH Sítio Grande (Fonte: adaptado Neoenergia 2011).....	101
Figura 5.19: Corte da estrutura extravasora com representação dos níveis operacionais – PCH Sítio Grande –BA (Fonte: adaptado Neoenergia).....	102
Figura 5.20: Curvas de descargas teóricas – PCH Sítio Grande - BA	105
Figura 5.21: Verificação da bacia de dissipação - PCH Sítio Grande (Fonte: adaptado Neoenergia)	111
Figura 5.22: Construção da PCH Sitio Grande – BA (Imagem de satélite Google Earth. Acesso em 22/06/2010).....	111
Figura 5.23: Corte da estrutura extravasora – PCH Sete Quedas – MT (Fonte: adaptado S.A. Paulista, 2011).....	114
Figura 5.24: Planta das Comportas Flaps – PCH Sete Quedas – MT (Fonte: Adaptado S.A. Paulista, 2011)	115
Figura 5.25: Pontos da fórmula de Francis para vertedor de parede delgada - Fonte: Netto <i>et al.</i> (1998)	116
Figura 5.26: Tipos de escoamentos observados na PCH Sete Quedas - MT	118
Figura 5.27: Curva de Descarga Total – PCH Sete Quedas - MT	121
Figura 5.28: Perfis Creager e labirinto gerados para carga de 1,5 metros - alternativas labirinto PCH Sete Quedas-MT.....	123
Figura 5.29: Planta do vertedor labirinto – alternativa 1 com 3 ciclos e ângulo de 35º - PCH Sete Quedas - MT	124
Figura 5.30: Planta do vertedor labirinto – alternativa 2 com 03 ciclos e ângulo de 25º - PCH Sete Quedas - MT	125
Figura 5.31: Planta do vertedor labirinto – alternativa 3 com 04 ciclos e ângulo de 8º - PCH Sete Quedas - MT	126
Figura 5.32: Curvas de descargas método de Tullis <i>et al.</i> . (1995) – alternativas PCH Sete Quedas – MT	128
Figura 5.33: Métodos de curva de descarga vertedor labirinto – Alternativa 3 PCH Sete Quedas - MT	129
Figura 5.34: Comportas Flaps sem os contra pesos - PCH Sete Quedas – MT Foto acessada em 09/08/2011: http://www.sapaulista.com.br/area.barr.php130	

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Características dos Vertedores Labirintos registrados na literatura ..	29
Tabela 4.2: Relações de níveis e fator do efeito do afogamento para crista linear	55
Tabela 5.1: Informações gerais da PCH Figueirópolis – MT (Fonte: ANEEL/SIGEL 2011).....	64
Tabela 5.2: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Magalhães (1983) – PCH Figueirópolis - MT.....	67
Tabela 5.3: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Tullis <i>et al.</i> (1995) – PCH Figueirópolis - MT.....	68
Tabela 5.4: Parâmetros e relação de carga fixa das alternativas – PCH Figueirópolis – MT	78
Tabela 5.5: Resultados das alternativas do vertedor labirinto – PCH Figueirópolis – MT	78
Tabela 5.6: Relações do vertedor Tulipa – Alternativa PCH Figueirópolis - MT...	84
Tabela 5.7: Custos Unitários Adotados (Agosto de 2011).....	86
Tabela 5.8: Resumo dos quantitativos e custos das alternativas Vertedor Labirinto / degraus e Vertedor Creager – PCH Figueirópolis - MT	87
Tabela 5.9: Resumo dos quantitativos e custos das alternativas Vertedor Creager com comportas Flaps e Vertedor Tulipa – PCH Figueirópolis - MT	88
Tabela 5.10: Informações gerais da PCH Alto Fêmeas – BA (Fonte: Neoenergia 2011).....	89
Tabela 5.11: Características do sistema extravasor da PCH Alto Fêmeas – BA (Fonte: Neoenergia 2011)	91
Tabela 5.12: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Magalhães (1983) – PCH Alto Fêmeas - BA	93
Tabela 5.13: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Tullis <i>et al.</i> (1995) – PCH Alto Fêmeas - BA	94
Tabela 5.14: Relações hipotéticas - Cálculo de submersão da PCH Alto Fêmeas - BA	98
Tabela 5.15: Informações gerais da PCH Sítio Grande – BA (Fonte: Neoenergia 2011).....	100
Tabela 5.16: Características do sistema extravasor da PCH Sítio Grande – BA (Fonte: Neoenergia 2011)	101
Tabela 5.17: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Magalhães (1983) – PCH Sítio Grande - BA	104

Tabela 5.18: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Tullis <i>et al.</i> (1995) – PCH Sítio Grande - BA	104
Tabela 5.19: Dados geométricos para dimensionamento da bacia de dissipação - PCH Sítio Grande	108
Tabela 5.20: Iterações bacia de dissipação – PCH Sítio Grande - BA.....	110
Tabela 5.21: Informações gerais da PCH Sete Quedas – MT (Fonte:S.A. Paulista 2011).....	113
Tabela 5.22: Vazões vertidas a cada centímetro – PCH Sete Quedas - MT.....	119
Tabela 5.23:Parâmetros e relação de carga fixa das alternativas – PCH Sete Quedas – MT	127
Tabela 5.24: Resultados das alternativas do vertedor labirinto – PCH Sete Quedas – MT	127
Tabela 5.25: Resumo dos quantitativos e custos das alternativas do Vertedor Labirinto – PCH Sete Quedas - MT.....	130
Tabela 5.26: Resumo dos quantitativos e custos das alternativas Vertedor Creager com comportas Flaps e sem comportas Flaps – PCH Sete Quedas - MT ..	131

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

a:	vértice do vertedor labirinto [m]
A:	vértice interno do vertedor labirinto trapezoidal [m]
b:	distância da parede lateral do vertedor labirinto [m]
c:	altura da onda trapezoidal em planta representada pelo vertedor labirinto [m]
C:	correção do coeficiente de vazão [$m^{0,5}/s$]
C_d :	coeficiente de vazão adimensional [-]
C_0 :	coeficiente de vazão dimensional [$m^{0,5}/s$]
C_T :	coeficiente de descarga tulipa [$m^{0,5}/s$]
D:	vértice externo do labirinto trapezoidal [m]
e:	altura do vão (orifício) [m]
F_r :	Froude [-]
g:	aceleração da gravidade [m/s^2]
l:	desenvolvimento total de um módulo da soleira do vertedor labirinto [m]
L_e :	largura aparente (efetiva) da crista linear [m]
L' :	largura real da crista linear [m]
L_d :	Largura do Dissipador [m]
L_y :	comprimento do ressalto hidráulico [m]
L_T :	comprimento total da crista do labirinto [m]
L_1 :	tamanho total da parede lateral do labirinto [m]
L_2 :	tamanho efetivo da parede lateral [m]
h:	carga de projeto no centro do vão (orifício) [m]
H_0 :	diferença de elevação entre o nível do reservatório e a elevação da crista do vertedor para vazão de projeto [m]
H^* :	carga Total sobre a crista (condição submersa a jusante) [m]

- H_e : diferença de elevação entre o nível do reservatório e a elevação da crista do vertedor para vazão diferente de projeto [m]
- H_t : carga Total sobre a crista (condição não submersa a jusante) [m]
- h_d : altura piezométrica a jusante [m]
- H_d : submersão de jusante (Energia Total) [m]
- K_p : coeficiente de forma do pilar [-]
- K_a : coeficiente de contração do pilar [-]
- n : número de pilares [-]
- N : número de módulos (ciclos) da soleira do vertedor labirinto [-]
- P : distância do fundo do canal de aproximação até a cota da crista da soleira [m]
- P' : distância do fundo do canal de restituição até o nível de jusante [m]
- q : vazão específica [$m^3/s/m$]
- Q_a : vazão da parcela do escoamento livre acima das comportas acionadas [m^3/s]
- Q_b : vazão da parcela do escoamento de fundo abaixo das comportas acionadas [m^3/s]
- Q_L : vazão com o fator de submersão de crista labirinto [m^3/s]
- Q_P : vazão de projeto [m^3/s]
- Q_S : vazão com o fator de submersão de crista linear [m^3/s]
- Q_{S1} : vazão sem o fator de submersão com condição de escoamento livre associado com H_t [m^3/s]
- Q_{S2} : Vazão com o fator de submersão e condição de escoamento associado com H_d [m^3/s]
- Q_T : vazão total do extravasor [m^3/s]
- Q_1 : Parcela do descarregador livre [m^3/s]
- Q_2 : Parcela do orifício afogado [m^3/s]

- R_T : raio da Tulipa [m];
- w : largura total frontal ao escoamento de um módulo ou ciclo da soleira do vertedor labirinto [m]
- W : largura total frontal ao escoamento de todos os módulos da soleira do vertedor labirinto [m]
- y_1 : altura conjugada do ressalto hidráulico a montante [m]
- y_2 : altura conjugada do ressalto hidráulico a jusante [m]
- t : espessura da parede do vertedor labirinto [m]
- v : velocidade [m/s]
- v_1 : velocidade de aproximação [m/s]
- α : ângulo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento do vertedor labirinto [°]
- σ : coeficiente de assimetria [-]
- $\emptyset$: fator do efeito do afogamento produzido pela elevação de jusante [-]
- μ_w : coeficiente de vazão adimensional de soleiras com forma trapezoidal [-]

- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
- CCR: Concreto Compactado a Rolo
- CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
- DNAEE: Departamento Nacional de Águas e Energia
- PCH: Pequena Central Hidrelétrica
- SIGEL: Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico
- UHE: Usina Hidrelétrica
- USBR: United States Bureau of Reclamation
- UWRL: Utah Water Research Laboratory
- WES: Waterways Experiment Station

1 INTRODUÇÃO

O potencial de energia hidrelétrica por unidade de força gravitacional é o produto das vazões e quedas de água, e como decorrência, tem o mesmo caráter aleatório das vazões, principal característica de tal fonte de energia. Desta forma a disponibilidade da energia hidrelétrica está associada aos riscos hidrológicos.

Em aproveitamentos Hidrelétricos, particularmente nas Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH's, o extravasor ocupa grande parte da área construída na barragem, sendo responsável por parcela considerável no custo total da obra. Portanto, serão objetivos de estudo neste trabalho os diferentes tipos de extravasores em poço, labirinto, comportas específicas entre outros.

Contudo, muitas das soluções empregadas no setor hidrelétrico são oriundas de estudos empíricos estrangeiros. Observa-se no setor, através de estudos e projetos de novos aproveitamentos hidrelétricos, que existe a necessidade de desenvolvimento de soluções baseadas na realidade brasileira e que propiciem uma melhora na segurança e dos índices custo-benefício das obras.

Nota-se que, em geral, os projetos procuram otimizações que atendam as necessidades das obras, no lugar de analisar otimizações baseadas nas necessidades da operação, com pelo menos 30 anos de duração. Recentes acidentes envolvendo PCH's (Apertadinho, Espora, etc.) demonstram a necessidade de um maior rigor nos estudos de projetos e soluções, tanto de operação como de construção.

O extravasor é um dos itens de segurança da barragem, pois ele descarrega as maiores cheias sem prejudicar a própria barragem ou qualquer uma das estruturas auxiliares, além de permitir que se mantenha o nível das águas no reservatório abaixo de certo nível máximo definido no projeto.

No Capítulo 4 é apresentada a revisão dos principais conceitos teóricos e critérios para o dimensionamento dos principais extravasores, bem como são descritas as principais estruturas usualmente empregadas no contexto das obras no Brasil. No mesmo capítulo são apresentados os critérios de projeto do extravasor labirinto do tipo trapezoidal e na sequência (capítulo 5) serão apresentados os estudos de caso

com avaliação de alternativas do vertedor labirinto em quatro aproveitamentos hidrelétricos situados em diferentes regiões do Brasil, com comportamento de vazões extremas característicos de cada região.

A principal função do extravasor é a manutenção da integridade das estruturas com o escoar das cheias. Ademais, pode ter a função secundária de manter uma vazão remanescente para jusante ou eliminar sedimentos, ou até mesmo para esvaziar o reservatório.

Para cada objetivo de controle de saída de água dispõe-se de alguns dispositivos, cada qual com uma característica específica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Aprofundar conhecimentos na área de geração hidráulica de energia elétrica visando aperfeiçoar os aproveitamentos hidrelétricos, particularmente as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's), com escolha de extravasores específicos para cada tipo de arranjo, com o objetivo de melhoria de operação, do custo-benefício e da segurança.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudos de extravasores específicos e avaliação dos critérios utilizados para o dimensionamento hidráulico dos estudos de caso de projetos aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com proposição de alternativas de arranjos de extravasores do tipo labirinto trapezoidal.

Serão analisadas alternativas de diversos tipos de extravasores para posteriores comparações de resultados nos estudos de caso, principalmente em cada particularidade de operação hidráulica a fio d'água.

3 JUSTIFICATIVA E METODOLOGIA

O estudo inicial da dissertação a ser desenvolvida no curso de mestrado sobre as estruturas extravasoras em aproveitamentos a fio d'água, será realizado de acordo com a revisão bibliográfica envolvendo estudos já pesquisados como, por exemplo, os vertedores em degressos conforme descrito por Simões (2008) e os vertedores labirintos com artigos internacionais publicados no *Journal of Hydraulic Engineering* - ASCE.

Na sequência do trabalho, realizam-se as análises objetivas de soluções para estruturas extravasoras, em particular os critérios de dimensionamento envolvendo operação de vertedouros.

Adicionalmente, serão realizados estudos de vertedouros em poço (tulipa), labirinto, comportas específicas, e de outros tipos de descarregadores, além das análises de projetos aprovados pela ANEEL e da operação de obras no país, que deverão ser foco de análises e comparações de resultados a serem desenvolvidos no presente trabalho. Os estudos de caso envolvendo PCH's aprovadas pela ANEEL serão alvos de análises dos métodos empregados na avaliação de vertedores específicos para cada tipo de arranjo hidráulico, com abordagem nas comparações e posteriores avaliações dos critérios de dimensionamento.

A proposição de otimização de arranjos referentes às estruturas extravasoras do tipo labirinto trapezoidal visando melhoria da segurança, da construção e da operação hidráulica adequada proporcionarão o desenvolvimento do objetivo proposto.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão apresentados os principais tipos de extravasores em aproveitamentos hidrelétricos com critérios de dimensionamento, base teórica e suas relações com os casos práticos de algumas aplicações em obras no Brasil.

4.1 EXTRAVASORES

O sistema extravasor é um conjunto composto por cinco estruturas: Canal de aproximação, estruturas de controle (vertedor ou extravasor), condução, dissipação e canal de restituição. Serão descritos a seguir os princípios básicos de operação dos principais extravasores.

Segundo Souza (1999), extravasor ou descarregador é um dispositivo utilizado para controlar ou medir a vazão em um escoamento por um canal, no caso de uma barragem o extravasor tem objetivo de escoar o excesso de água acumulado pelo reservatório, evitando assim o risco do nível de água atingir a crista da barragem.

O estudo dos escoamentos através de vertedores se faz com uma base teórica simples que, na maioria dos casos, não dispensa o acompanhamento de resultados de investigação experimental, na forma de coeficientes corretivos (PORTO, 1999).

De acordo com Porto (1999) as principais partes constituintes de um vertedor são:

- Crista ou soleira: parte superior da parede em que há contato com a lâmina vertente. Se o contato da lâmina se limitar, como nos orifícios de parede fina, a uma aresta biselada, o vertedor é de parede delgada (Figura 4.1); já se o contato ocorrer em uma espessura apreciável da parede, o vertedor é de parede espessa;
- Carga sobre a soleira (h): diferença de cota entre o nível d'água a montante, em uma região fora da curvatura da lâmina, onde a distribuição de pressão seja hidrostática, e o nível da soleira;
- Altura do vertedor (P): é a diferença de cotas entre a crista da soleira e o fundo do canal de chegada;

- Largura ou luz da soleira (L) (Figura 4.2): é a dimensão da soleira através da qual há escoamento.

Figura 4.1 - Vertedor de parede delgada - Fonte: Porto (1999)

Segundo Lencastre (1983) os descarregadores de soleira delgada possuem dimensões de espessura da crista muito reduzidas. Esses tipos de descarregadores são dispositivos muito precisos para a medição de vazões.

Figura 4.2: Crista ou soleira – Fonte: Porto (1999)

Já os vertedores com paredes espessas ocorrem quando a soleira é suficientemente espessa para que na veia aderente se estabeleça o paralelismo dos filetes (Netto *et al.*, 1998). A seguir, a Figura 4.3 apresenta este tipo de vertedor.

Figura 4.3: Vertedor de parede espessa – Fonte: Netto *et al.* (1998)

Segundo Porto (1999), os vertedores podem ser classificados quanto:

- Forma geométrica da abertura: retangular, triangular, trapezoidal, circular, parabólico;
- Altura relativa da soleira: Descarga livre se $P > P'$ (mais utilizados) e descarga submersa se $P < P'$, isto é, se o nível d'água de saída for superior ao nível da soleira;
- Natureza da parede: Parede delgada se a espessura da parede inferior for inferior a dois terços da carga, $(e) < 2/3h$, e de parede espessa caso contrário, $(e) > 2/3h$;
- Largura relativa da soleira: comprimento útil da crista do extravasor;
- King *et al.* (1957) apresentam a classificação dos vertedores quanto à forma da abertura pela qual escoar o líquido: retangulares, triangulares, trapezoidais, circulares, parabólicos ou de qualquer feitio.

A seguir serão apresentados os critérios utilizados para dimensionamento hidráulico e geométrico dos diferentes tipos de descarregadores. Para cada tipo de vertedouro deve-se projetar a estrutura hidráulica de maneira a conduzir as cheias, com restituição a jusante em condições seguras.

4.1.1 Vazões de Projeto do Sistema Extravasor

A capacidade de projeto necessária de um extravasor (vazão máxima através do extravasor) depende da cheia de projeto (hidrograma do afluxo do reservatório). Para a determinação da cheia de projeto de um extravasor deve-se relacionar o grau

de proteção que se deva proporcionar à barragem, que por sua vez depende do tipo da barragem (terra, concreto) e das consequências de uma eventual ruptura.

No dimensionamento das estruturas extravasoras em pequenos aproveitamentos hidrelétricos, em geral, utiliza-se para o dimensionamento a vazão com período de retorno de 1.000 anos, e verificação das estruturas em 10.000 anos (crista da barragem).

Deve-se analisar a frequência de cheias, homogeneidade da série de vazões para a escolha da melhor distribuição probabilística.

A escolha da distribuição a adotar em estudos de frequência de cheias é um problema crítico em projetos de vertedores de grandes barragens, devido basicamente à necessidade de extrapolar a experiência empírica.

De acordo com o “Guia para Cálculo de Cheia de Projeto de Vertedores publicado pela Eletrobrás (1987)” a distribuição exponencial de dois parâmetros é utilizada quando o coeficiente de assimetria (σ) da expressão (1) se encontra entre 1,0 e 2,5, e caso o hidrólogo tenha a convicção de que a assimetria da população esteja muito próxima do valor unitário, utiliza-se a distribuição de Gumbel. A mesma conclusão é verificada nas “Diretrizes para estudos e projetos de PCH's – ELETROBRÁS (2000)”, conforme equação a seguir:

$$\sigma = \frac{n}{(n-1) \cdot (n-2)} \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s^3} \right] \quad (1)$$

Onde:

n: número de dados da série analisada [-];

x: variável analisada (no caso, vazão máxima) [m^3/s];

s: desvio padrão [m^3/s].

No caso de uma barragem alta localizada a montante de uma região habitada, deve-se atribuir um grau de proteção bem elevado. Para este caso deve-se determinar a máxima cheia provável, utilizada nesse tipo de projeto (Linsley & Franzini, 1978).

Determina-se a Cheia Máxima Provável numa dada seção de um rio como o resultado da transformação da Precipitação Máxima Provável em vazão. Utiliza-se o modelo de transformação chuva-vazão.

Para a combinação ideal entre a capacidade de armazenamento do reservatório e a capacidade do vertedor em ajustar-se à enchente máxima, devem ser considerados:

- Hidrologia: frequência de cheias;
- Estruturas Hidráulicas;
- Prejuízos que seriam causados com falhas nas estruturas hidráulicas;
- Disposição das estruturas e equipamentos;
- Custos e segurança;
- Efeitos das falhas em barragens e vertedores a montante do barramento em estudo.

4.1.2 Extravasor Livre

O extravasor ideal deve ter um perfil que se assemelha à face inferior da veia que escoar sobre o vertedor de soleira delgada, quando a vazão corresponder à capacidade máxima de projeto do extravasor.

O vertedor em forma de ogiva (vertedor com soleira normal ou perfil Creager – Figura 4.4) descrito a seguir é uma forma que segue os princípios de balística e equações da cinemática. A figura a seguir apresenta a forma característica da crista do vertedor de soleira normal, onde a forma da ogiva se aproxima do ideal, isto é, o objetivo do perfil Creager (quadrante de jusante da Figura 4.5) é a ocorrência da pressão em todos os pontos da superfície praticamente iguais à pressão atmosférica. Nesta estrutura de descarga, as relações entre carga e vazão são unívocas.

Figura 4.4: Forma característica da crista de um vertedor de soleira normal - Fonte: *US Army Corps of Engineers, Maynard (1985)*

Onde:

H_d é a carga de projeto [m].

Abecassis (1961 *apud* Maynard, 1985), adotou o procedimento de análise do lado esquerdo do eixo da crista (quadrante de montante) da figura anterior para eliminar a descontinuidade de aproximação do escoamento do vertedor de soleira normal com a utilização de três raios de circunferência, aplicável a uma ampla gama de velocidades de aproximação. Posteriormente o autor Murph (1973 *apud* Maynard, 1985) propôs a forma elíptica no quadrante de montante (Figura 4.5) aplicável a uma ampla gama de velocidades de aproximação e inclinação de montante.

Figura 4.5: Quadrante de montante elíptico - Fonte: *US Army Corps of Engineers, Maynard (1985)*

A equação a seguir, de acordo com Maynard (1985), apresenta os coeficiente A e B da expressão anterior para a condição ($P/H_d \geq 2.0$):

$$\frac{X^2}{(0.280 \cdot H_d)^2} + \frac{Y^2}{(0.167 \cdot H_d)^2} = 1 \quad (2)$$

Para o caso de grandes barragens é indispensável que o escoamento se processe suavemente sobre a soleira, com um mínimo de turbulência. Se a água descarregada perder o contato com a superfície do extravasor, haverá tendência de formar vácuo no local onde a veia líquida se desloca, e poderá haver cavitação. A Figura 4.6 a seguir mostra um vertedor de soleira normal, com vazão maior que a de projeto.

Figura 4.6: Cavitação em um vertedor de soleira normal - Fonte: Linsley & Franzini (1978)

O exemplo a seguir apresenta a zona de cavitação de acordo com a variação da carga sobre a soleira (H_e) e a carga de projeto (H_d).

Figura 4.7: Zona de cavitação - Fonte: US Army Corps of Engineers, Maynord (1985)

A expressão a seguir, mostra a lei de vazão do descarregador livre:

$$Q = C_0 \cdot L \cdot H_0^{3/2} \quad (3)$$

Onde:

Q = Vazão de projeto [m^3/s];

C_0 = Coeficiente de vazão [$\text{m}^{0,5}/\text{s}$];

L = largura do vertedor [m];

H_0 = carga sobre a soleira do vertedor [m].

O coeficiente de vazão pode ser determinado por gráficos como, por exemplo, o apresentado na Figura 4.8 a seguir.

Figura 4.8: Coeficiente de Vazão dimensional do vertedor linear de soleira normal – adaptado Schreiber (1977)

É comum determinarem-se os valores dos coeficientes dos extravasores por meio de ensaios em modelos reduzidos. O coeficiente de vazão dimensional C_0 [$\text{m}^{0,5}/\text{s}$], obtido através do gráfico anterior, pode sofrer correções de acordo com a:

- Face de montante inclinada;
- Linha de carga total não coincidir com aquela para a qual a soleira foi projetada;
- Influência da altura do nível d'água de jusante.

No cálculo da capacidade do descarregador livre, além das considerações citadas anteriormente para a determinação do coeficiente de descarga, devem ser consideradas as contrações laterais na entrada dos extravasores provocadas por pilares, pois estes reduzem a largura efetiva da soleira (L_e). A seguir nota-se a diferença na interferência do escoamento com pilares de cantos em ângulo reto e pilares hidrodinâmicos.

As Equações (4) e (5) a seguir representam a largura efetiva da soleira em virtude das condições hidrodinâmicas dos pilares com cantos vivos e com pilar projetado com forma afilada respectivamente, de acordo com a Figura 4.9.

Pilar com cantos vivos

Pilar projetado com forma afilada

Figura 4.9: Pilares com cantos vivos e formas afiladas

Para Pilares com cantos vivos, tem-se:

$$L_e = (L' - 0,2 \cdot h)$$

(4)

Para Pilares com formas afiladas, tem-se:

$$L_e = (L' - 0,02 \cdot h)$$

(5)

De acordo com Design of Small Dams (1987), a largura efetiva da crista do vertedouro é dado por:

$$L_e = L' - 2 \cdot (n \cdot k_p + k_a) \cdot H_e$$

(6)

Onde:

L_e = largura aparente (efetiva) da crista [m];

L' = largura real da crista [m];

n = número de pilares [-];

K_p = coeficiente de forma do pilar [-];

K_a = coeficiente de contração do pilar [-];

H_e = carga sobre o vertedor [m].

4.1.3 Extravasor de Fundo

As finalidades de um extravasor ou descarregador de fundo (*bottom outlet*) são: desviar o rio durante a construção da barragem, escoar total ou parcialmente as águas de enchente, liberar água durante a parada completa das turbinas, esvaziar o reservatório quando for necessário e liberar sedimentos do reservatório (parcialmente).

A Figura 4.10, a seguir, mostra o descarregador de fundo através da válvula difusora da UHE Funil no rio Paraíba do Sul-RJ.

Figura 4.10: Válvula difusora – UHE Funil, Rio Paraíba do Sul / RJ – Foto: R. G. Roselli (2010)

A UHE Funil, no rio Paraíba do Sul com área contribuinte de 13.410 km², possui barragem do tipo Abóboda de concreto com dupla curvatura (altura de 85 m). Sua capacidade instalada é de 216 MW, possui vertedores de superfície e de fundo com controle. A capacidade total de descarga é de 4.400 m³/s. Adicionalmente, o vertedor de fundo (válvula difusora – jato cônico), com capacidade total de 210 m³/s, próximo da tomada d'água, evita a entrada de areia e de outros sólidos nas turbinas.

A descarga de fundo aberta retira os sólidos somente em sua vizinhança, porém pode ser eficiente próximo da tomada d'água com a abertura periódica, evitando a entrada de areia e de outros sólidos nas turbinas.

Segundo Linsley & Franzini (1978), o coeficiente de descarga de válvulas cônicas (Figura 4.10) C_d [-] é, aproximadamente, 0,9. A capacidade de vazão é dada através da expressão a seguir:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

(7)

Onde:

Q = Vazão de projeto [m^3/s];

C_d = Coeficiente de descarga [-];

A = Área de entrada da Válvula [m^2];

h = carga total sobre a válvula [m].

As curvas de vazões para encontrar o coeficiente de descarga de outros tipos de válvulas são determinadas pelos fabricantes.

São vários os tipos de comportas e válvulas utilizados no fechamento das descargas de fundo. No caso de reparos e manutenções na comporta principal, sempre são previstas a montante, ranhuras para inserir uma comporta de emergência (stop-logs).

A Figura 4.11 a seguir mostra uma comporta de fundo do tipo setor. De acordo com Schreiber (1977), tal tipo de descarregador de fundo deve ser dimensionado para altura de barramento entre 20 e 30 metros, aproximadamente.

Figura 4.11: Comporta de Fundo, do tipo setor – (SCHREIBER, 1977)

Caso o barramento tenha altura inferior a 20 metros, será difícil dispor de espaço suficiente para ajustar, dentro do corpo da barragem, para o funcionamento da comporta de fundo totalmente aberta e dos guinchos de levantamento.

Já para o caso onde a altura do barramento encontra-se acima de 30 metros, a velocidade de escoamento no descarregador de fundo pode apresentar valores muito altos de acordo com a relação de área total dos vãos das comportas e da carga total (H) sobre a comporta (acima de 30 metros). A Figura 4.12 a seguir, apresenta o esquema de escoamento sob uma comporta vertical (adufa).

Figura 4.12: Escoamento sob uma adufa (comporta vertical)

A vazão sob a comporta vertical desafoçada a jusante é dada pela Equação a seguir.

$$Q = 0,70 \cdot l \cdot e \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (8)$$

4.1.4 Extravasor em Poço (Tulipa)

No extravasor em poço a água escoar verticalmente, ou inclinada, até um conduto horizontal que a conduz através da barragem. É utilizado nos casos onde não há espaço para construção de outros tipos de vertedores. Caso a topografia não permita a construção de um canal extravasor ou canal lateral por fora da barragem, pode ser analisada a construção de um descarregador em poço, onde o conduto de saída passe pelo subsolo abaixo do terreno onde se funda a barragem.

Conforme afirma Lencastre (1983), este tipo de descarregador é constituído por uma soleira descarregadora com diâmetro variável seguido de uma galeria.

A concepção do vertedouro em poço pode apresentar o eixo vertical ou eixo inclinado (Figura 4.13) até a galeria horizontal dependendo das condições topográficas e geológicas no local.

Figura 4.13: Vertedouro em poço de eixo vertical e em poço de eixo inclinado -
Fonte: Hydraulic Design of Spillways (1987)

Quando a altura da barragem é pequena, e a altura do poço é pequena, não há necessidade de entrada do tipo especial, mas para grandes alturas utiliza-se a entrada em formas suaves, denominado vertedor Tulipa. Esse descarregador geralmente é projetado em concreto armado para suportar esforços de empuxo.

A seguir são apresentadas as condições hidráulicas do vertedor do tipo Poço. Segundo Design of Small Dams (1987) existem 3 condições hidráulicas observadas neste tipo de descarregador:

- Condição I de superfície: Esta condição é observada na Figura 4.14, onde o escoamento ocorre como superficial em todo o diâmetro da soleira descarregadora com uma lâmina baixa.

Figura 4.14: Vertedouro em poço Condição I – Superfície

- Condição II de orifício: Esta condição é observada na Figura 4.15, onde o escoamento ocorre como um orifício no entorno da soleira descarregadora.

Figura 4.15: Vertedouro em poço Condição II – Orifício

- Condição III de conduto forçado: Esta condição é observada na Figura 4.16, onde o escoamento ocorre como um conduto forçado em toda extensão do descarregador, ou seja, desde a crista da soleira até o fim da galeria (túnel).

Figura 4.16: Vertedouro em poço Condição III – Conduto forçado

- As condições de escoamento apresentadas anteriormente estão expressas no gráfico a seguir na forma esquemática da variação do nível do reservatório e da capacidade de descarga.

Figura 4.17: Condições hidráulicas do descarregador em poço - Design of Small Dams (1987)

A equação que descreve a descarga neste tipo de vertedor é dada por:

$$Q_P = C_T \cdot (2 \cdot \pi \cdot R) \cdot H_d^{3/2} \quad (9)$$

Onde:

Q_P = Vazão de projeto [m^3/s];

C_T = Coeficiente de descarga tulipa [$m^{0.5}/s$];

R_T = Raio da Tulipa [m];

H_d = carga total sobre a crista [m].

Figura 4.18: Aspecto geral vertedor Tulipa – *Design of Small Dams* (1987)

O coeficiente de descarga pode ser obtido através do seguinte gráfico:

Figura 4.19: Coeficiente de Descarga – Vertedor do tipo Tulipa – Adaptado *Hydraulic Design Criteria* (1987)

Posteriormente, no item 5 - Estudos de Caso, serão avaliadas as alternativas relacionadas ao comportamento hidráulico e levantamentos dos benefícios econômicos do extravasor do tipo Tulipa para comparações com outros tipos de extravasores.

4.1.5 Extravasor em Degraus

Uma das vantagens do concreto compactado a rolo (CCR) é que são normalmente mais rápidas na execução da obra. A comparação de custos entre obras executadas em concreto convencional e com CCR indica que a segunda opção é a mais vantajosa economicamente.

Simões (2008) apresenta o pré-dimensionamento de vertedores em degraus sob diversos regimes de escoamento, com método adimensional, prática importante para a averiguação da dissipação de energia promovida pelos degraus.

A Figura 4.20 e Figura 4.21 apresentam os principais parâmetros para o cálculo do dissipador em degraus. A Figura 4.21 apresenta a aeração necessária para não ocorrer a oscilação da lâmina de água, oscilação esta que pode induzir vibração da estrutura.

Figura 4.20: Dissipador em degraus (Tamada, 1994)

Figura 4.21: Dissipador em queda livre (Tamada, 1994)

4.1.6 Comporta Flap

O funcionamento deste tipo de comporta Flap tem como princípio o desequilíbrio entre o nível d'água acima das comportas e os contra pesos instalados na base das comportas (Figura 4.22). A Figura 4.23 representa a abertura das comportas divididas em grupos através da variação de nível acima do NA normal.

Figura 4.22: Instalação das comportas Flaps - PCH Sete Quedas - MT (Fonte: S.A Paulista, 2011)

O objetivo deste dispositivo é de reduzir a altura da ogiva do vertedor de soleira normal, em virtude do complemento da altura proporcionado pelas comportas acima da soleira. Como o NA normal ficará estabelecido na elevação das comportas fechadas (Figura 4.23 (a)), quando ocorrer o desequilíbrio através do NA acima do normal e dos contra pesos ocorrerá o tombamento das comportas conforme Figura 4.23 (b) e o escoamento ocorrerá da seguinte forma:

Figura 4.23: Corte da comporta Flap – PCH Sete Quedas – MT (Fonte: Adaptado S.A Paulista, 2011)

Posteriormente, na Figura 5.24 serão avaliadas as aberturas das comportas através dos diferentes níveis para cada grupo de comportas da PCH Sete Quedas.

Os escoamentos observados neste tipo de comporta assemelham-se aos que ocorrem em:

1. Parede delgada;
2. Parede espessa;
3. Soleira livre;
4. Orifício.

O tipo de escoamento (1) é observado entre os níveis “a” e “b” conforme Figura 4.23. Já o tipo de escoamento (2) ocorrerá de acordo com a relação do item 4.1 sobre parede espessa (Figura 4.3).

O escoamento (3) ocorrerá quando a comporta estiver tombada a 90° e o escoamento acima da comporta será considerado sobre o vertedor creager, seguindo a variação do coeficiente de descarga, de acordo com a variação de nível até a carga de projeto, segundo relação da Figura 4.24:

Figura 4.24: Correção do coeficiente de descarga Perfil Creager - Adaptado *Design of Small Dams* (1987)

Onde:

C = Correção do Coeficiente de vazão [$m^{0,5}/s$];

C_0 = Coeficiente de vazão de projeto [$m^{0,5}/s$];

H_e = Carga diferente de Projeto [m];

H_0 = Carga de Projeto [m].

Por fim, o escoamento (4) ocorrerá como orifício abaixo da comporta totalmente tombada.

A vantagem deste tipo de comporta, além da redução da altura da ogiva do vertedor quando comparado ao vertedor apenas de soleira livre, é a ocorrência da redução do comprimento vertente devido à maior carga sobre a soleira quando todos os grupos de comportas flaps são ativados por desequilíbrio dos contra pesos, conforme explicado anteriormente.

Posteriormente, serão realizados dimensionamentos de vertedores labirinto no local da estrutura extravasora existente da PCH Sete Quedas, com análise das curvas de descargas teóricas do extravasor original e das alternativas de desenvolvimento da crista do labirinto, com as vantagens e avaliações dos critérios de dimensionamento adotados e análise posterior no item 5 - Estudos de Caso.

4.2 EXTRAVASOR LABIRINTO

O extravasor do tipo labirinto fornece comprimento adicional da crista com relação à largura linear total do extravasor de superfície livre com uma série de paredes trapezoidais ou triangulares na largura total, em planta, do vertedouro (*Design of Small Dams*, 1987).

A revisão bibliográfica sobre este tipo de extravasor será apresentada de acordo com os trabalhos pioneiros, como por exemplo, os primeiros estudos registrados em 1854, em trabalhos clássicos já consagrados, como por exemplo, critérios de projetos de extravasores labirintos produzidos em meados das décadas de 1980, 1990 e 2000 (item 4.3), e por fim trabalhos modernos desenvolvidos a partir do ano de 2000 como os apresentados em revistas especializadas sobre o assunto.

Gentilini (1941) afirma que os trabalhos pioneiros sobre este tipo de vertedor de forma poligonal em planta surgiram em 1854 com Boileau e em 1907 com Aichel.

De acordo com o trabalho clássico de Magalhães (1983), o descarregador labirinto é caracterizado por apresentar, em planta, uma soleira cuja crista se desenvolve segundo uma linha quebrada, repetindo em geral módulos ou ciclos de forma poligonal. Desta forma, este tipo de descarregador apresenta um maior desenvolvimento da crista do que um descarregador frontal que ocupe a mesma largura.

O coeficiente de descarga deste tipo de vertedor envolve diversos fatores na geometria do tipo de labirinto, e exige ensaios em modelos, pois os padrões de escoamento no vertedor labirinto são muito complexos. Em alguns trabalhos modernos são observadas a utilização de ferramentas computacionais como redes neurais artificiais para a estimativa do coeficiente de descarga com a entrada de parâmetros como comprimento, altura, ângulo entre os módulos do vertedor labirinto e o número de Froude, podendo se alcançar bons resultados conforme trabalho apresentado por Emiroglu e outros (2011). No trabalho apresentado pelos autores, verificou-se que o modelo de redes neurais artificiais tem um desempenho melhor do que os modelos de regressões lineares e não lineares tradicionais.

No contexto do conjunto composto das estruturas de um sistema extravasor, conforme apresentado no item 4.1, é importante a análise da estrutura de dissipação de energia, que será tratado no item 4.5. Em conjunto com a estrutura de controle do extravasor do tipo labirinto deverá ser realizada a análise da dissipação de energia a jusante desta estrutura de controle.

O vertedor do tipo labirinto apresenta uma maior capacidade de vazão de projeto se comparado ao descarregador de soleira normal (linear) para uma mesma carga e largura desenvolvida. Recentes trabalhos envolvendo descarregadores do tipo labirinto trapezoidais no Brasil foram aplicados nos últimos anos e serão apresentados na sequência. A eficiência deste tipo de descarregador reduz com o aumento de carga sobre a soleira. A confirmação deste fato será mostrada nos itens a seguir.

4.2.1 Extravadores Labirintos registrados na literatura

O presente item apresenta os principais extravasores labirintos registrados na literatura. Foram selecionados alguns extravasores labirintos de acordo com características de capacidade de vazão, carga de projeto e altura da estrutura. Segundo Falvey (2003), a Tabela 4.1 mostra em ordem cronológica alguns extravasores labirintos notáveis. Os parâmetros da Tabela 4.1 podem ser observados na Figura 4.31 e na Figura 4.32.

Tabela 4.1: Características dos Vertedores Labirintos registrados na literatura

Nome	País	Ano de construção	Q (m ³ /s)	H ₀ (m)	P (m)	W (m)	L (m)	n	Fonte
Woronora	Austrália	1941	1.020	1,36	2,13	13,41	31,23	11	Afshar (1988)
Beni Bahdel	Algeria	1944	1.000	0,5	*	4,00	62,5	20	Afshar (1988)

Nome	País	Ano de construção	Q (m³/s)	H ₀ (m)	P (m)	W (m)	L (m)	n	Fonte
Sarno	Algeria	1952	360	1,5	6,0	*	27,9	8	Afshar (1988)
Estancia	Venezuela	1967	661	3,01	*	32,0	65,0	1	Magalhães (1989)
Avon	Austrália	1970	1.420	2,16	3,0	13,5	26,5	10	Darvis (1971)
Carty	USA	1977	387	1,8	2,8/4,3	18,3	54,6	2	Afshar (1988)
Boardman	USA	1978	387	1,77	2,76**	18,3	53,5	2	Babb (1976)
Pacoti	Brasil	1980	3.400	2,72	4,0	8,0	41,52	15	Magalhães (1989)
Cimia	Itália	1982	1.100	1,50	15,5	30,0	87,5	4	Lux / Hinchliff (1985)
Juturnaíba	Brasil	1983	862	0,7	*	*	*	*	Afshar (1988)
Bartletts Ferry	USA	1983	5.920	2,19	3,43	18,3	70,3	20,5	Mayer (1980)
Ute	USA	1983	15.570	5,79	9,14	18,3	73,7	14	Lux (1989)
Saco	Brasil	1986	640	1,5	*	45	248,5	*	Quin <i>et al.</i> (1988)
Calde	Portugal	2001	21	0,6	2,5	7,4	28,19	1	Quintel <i>et al.</i> (2000)
Kizilcapinar	Turquia	*	2.270	4,6	4,0	75,4	263,9	5	Yildiz (1996)

* Sem informação

4.2.2 Extravasores Labirintos em PCH's no Brasil

No Brasil existem casos de soluções mistas de vertedor a fio d'água. A Figura 4.25 apresenta a estrutura hidráulica com um tipo de vertedor misto, em degraus e labirinto com formato trapezoidal simétrico. A altura do barramento é formada pelo vertedor labirinto, altura (P), e pela altura do vertedor em degraus.

Foto A: Vertedor em degraus e labirinto

Foto B: Estrutura Hidráulica em operação

Figura 4.25: PCH Figueirópolis - MT – Foto: A. Conte (2010)

A PCH Figueirópolis será avaliada no presente trabalho, por meio dos critérios de dimensionamento adotados e análise posterior no item 5 - Estudos de Caso.

Existem soluções extravasoras em empreendimentos hidrelétricos com mais de uma estrutura vertente como é o caso da PCH Alto Fêmeas – BA (Figura 4.26).

Figura 4.26: Vertedor Misto - PCH Alto Fêmeas – Foto: N. Bitencourt (2011)

A estrutura de controle da PCH Alto Fêmeas - BA é composta por:

- 1 comporta segmento;
- 3 ciclos de vertedor labirinto trapezoidal;
- 1 vertedor lateral.

Nos casos onde as condições topográficas, geológicas e hidrológicas favorecem a implantação de uma estrutura compacta de extravasor, como é o caso da PCH Sítio Grande – BA com um ciclo de vertedor labirinto, verifica-se que esta solução pode apresentar condições econômicas e hidráulicas adequadas de projeto, verificada na Figura 4.27 a seguir.

Foto A: 1 ciclo de Vertedor labirinto

Foto B: Canal de descarga

Figura 4.27: PCH Sítio Grande - BA – Foto: N. Bitencourt (2011)

No item 4.3 serão apresentados os diversos critérios de projeto de vertedor labirinto do tipo trapezoidal com a bibliografia clássica e moderna.

Vale ressaltar, que as PCH's Alto Fêmeas - BA e Sítio Grande – BA fazem parte das análises no presente trabalho, com a avaliação dos critérios de dimensionamento adotados e análise posterior no item 5 - Estudos de Casos.

4.2.3 Casos especiais de Extravasor Labirinto

Notam-se em recentes estudos, alguns casos especiais de extravasores labirintos que foram desenvolvidos em aplicações de engenharia. Como descrito por Falvey (2003), casos especiais de labirinto são encontrados em trabalhos recentes como, por exemplo, comporta basculante (*Fusegate*), barragem de retenção de cheias com utilização extravasora mista (labirinto e descarregador de fundo com blocos a jusante) e chapas metálicas fixas em formato trapezoidal (*Sheet Piling*).

Será descrito a seguir o caso especial de extravasor labirinto metálico com operação do tipo comporta basculante (*Fusegate*). O valor do coeficiente de descarga deste tipo de estrutura se encontra abaixo do extravasor labirinto trapezoidal em concreto armado. Apesar da menor capacidade de descarga das cheias de projeto, este extravasor possui um propósito prático na engenharia.

Alguns descarregadores labirintos são projetados para, além de aumentar a taxa de escoamento para um dado nível do reservatório, ser usado como uma estrutura de retenção como, por exemplo, enchentes caracterizadas por grande pico de cheia e pequeno volume.

Estruturas de retenção são projetadas com capacidade suficiente para deter a inundação, ao mesmo tempo deixando a água escorrer para fora da estrutura lentamente durante um período prolongado de tempo (Falvey, 2003).

Comporta Fusível (*Fusegates*)

Ferreira e Filho (2004) apresentam a análise operacional de comportas do tipo fusível como principal característica, o fato de funcionar como um “fusível” de proteção (Figura 4.28), isto é, ela executa a função designada pelo projeto, porém

sua operação só acontece uma vez em situações extremas definidas em projeto, respeitando uma prerrogativa muito importante quando se fala de barragem que é a segurança.

Figura 4.28: Esquema de funcionamento de uma comporta fusível Fonte: HIDROPLUS® 2009 Edição ICOLD

Figura 4.29: Escoamento sobre a crista das comportas fusíveis da Barragem de MacClure, Novo México, EUA – Fonte: HIDROPLUS® 2009 Edição ICOLD

A vantagem observada neste tipo de dispositivo é que este funciona de forma semelhante ao vertedor do tipo labirinto trapezoidal. No caso das cheias moderadas

a água passa sobre as comportas fusíveis. Já para o caso quando o reservatório atingir uma cota específica, a água começa a penetrar no duto, que em seguida enche a câmara situada na parte inferior (Figura 4.30). As comportas fusíveis basculam em torno da base de fixação, girando a jusante em virtude da pressão exercida rapidamente.

Figura 4.30: Instalação da comporta fusível em Alto Layang, Malásia Fonte: HIDROPLUS® 2009 Edição ICOLD

Falvey (2003) apresenta este tipo de comporta e afirma que quando várias comportas fusíveis são colocadas lado a lado sobre a crista do extravasor livre (perfil Creager), a sua forma em planta se assemelha ao extravasor labirinto trapezoidal. De acordo com a descrição do autor, existe um poço que fornece água para a câmara aberta abaixo da comporta (caçamba) na base da estrutura metálica. Se o nível do reservatório atingir uma elevação acima da entrada do poço, a água irá fluir sobre o poço e pressurizar as câmaras abertas (base da comporta). Esta pressurização é suficiente para a comporta fusível girar em torno do eixo a jusante.

4.3 CRITÉRIOS DE GEOMETRIA DO EXTRAVASOR LABIRINTO

Neste item serão apresentados os critérios de projeto para o dimensionamento do extravasor labirinto do tipo trapezoidal, considerando as características geométricas e hidráulicas com suas respectivas particularidades. Com o objetivo principal de fornecer o comprimento adicional da crista quando comparado a um descarregador frontal, conforme apresentado no item 4.2, nos itens seguintes serão abordados os principais fatores do extravasor labirinto, que envolvem principalmente a complexidade do escoamento.

4.3.1 Características geométricas do Extravasor Labirinto Trapezoidal

De acordo com Magalhães (1983), os vertedores na forma de labirinto podem apresentar varias formas, porém a mais indicada é o formato trapezoidal simétrico. A forma é definida pela relação do desenvolvimento total de um módulo, ou ciclo, da soleira (l) sobre a largura total de um módulo da soleira (w) e das relações do ângulo (α) formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento e pelo número de módulos ou ciclos da soleira (N). Para as condições limites tem-se a forma retangular ($\alpha = 0$) e a forma triangular para o qual α é máximo, para um dado valor de l/w . A distância do fundo do canal de aproximação até a cota da crista da soleira corresponde a altura (P), e a altura da onda trapezoidal em planta representada por (c). Estes dados geométricos estão explícitos na Figura 4.31.

Segundo Roselli (2011), a análise de alternativas de vertedor do tipo Labirinto trapezoidal são necessárias para verificar as condições geométricas, relacionadas ao custo benefício da obra, e condições hidráulicas, para capacidade deste tipo de estrutura extravasora.

— desenvolvimento total de um módulo da soleira (l)

Figura 4.31: Esquema descarregador Labirinto – adaptado (Magalhães, 1983)

A Figura 4.32 a seguir apresenta os parâmetros de dois ciclos do vertedor labirinto.

Figura 4.32: Dois ciclos do vertedor labirinto, Matos & Chanson (2006)

Onde:

B = Comprimento da parede no sentido paralelo ao escoamento [m];

P = Distância do fundo do canal de aproximação até a cota da crista da soleira, correspondente a altura do vertedor labirinto trapezoidal [m];

w = Largura frontal de um módulo da soleira [m];

α = Ângulo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento [°];

a = Metade da largura menor de um módulo da soleira (chamado de vértice) [m];

N = Número de módulos (ciclos do vertedor labirinto) [-].

A forma e as características da crista do parâmetro geométrico (P), indicado nas figuras anteriores serão detalhadas no item seguinte.

4.3.2 Características da crista do Extravasor Labirinto

Tullis *et al.* (1995), apresenta as formas da crista e os detalhes em planta com as características do comprimento total e efetivo da crista do vertedor labirinto para a determinação dos cálculos hidráulicos. A Figura 4.33 indica os perfis da crista e a Figura 4.34 apresenta os detalhes em planta de acordo com o autor.

Figura 4.33: Perfis de crista – Adaptado Tullis *et al.* (1995)

Figura 4.34: Detalhes em planta do vertedor labirinto – Adaptado Tullis *et al.* (1995)

Sendo que:

L_e : Comprimento efetivo da crista [m]:

$$L_e = 2 \cdot N \cdot (A + L_2) \quad (10);$$

L_T : Comprimento total da crista [m]:

$$L_T = N \cdot (2 \cdot L_1 + A + D) \quad (11);$$

L_1 : Tamanho total da parede lateral [m];

L_2 : Tamanho efetivo da parede lateral [m];

c : Altura da onda trapezoidal em planta [m];

W : Largura total frontal do vertedor labirinto [m];

N : Número de ciclo trapezoidal [-].

Falvey (2003) apresenta a forma recomendada de crista para o vertedor labirinto, sendo a forma da crista prolongada para jusante como mostra a Figura 4.35. O autor afirma que o coeficiente de descarga para este tipo de perfil deve se assemelhar ao coeficiente da Figura 4.36. Nota-se a semelhança no quadrante de jusante da forma característica da crista de um vertedor de soleira normal apresentada anteriormente na Figura 4.4. Já o quadrante de montante da Figura 4.35 (destacado em vermelho) apresenta apenas dois raios de circunferência ao invés de três raios conforme observado para o vertedor de soleira normal.

Figura 4.35: Perfil da crista indicado para o extravasor labirinto, onde H_d é a carga de projeto – Falvey (2003)

4.4 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DO EXTRAVASOR LABIRINTO

Os padrões de escoamento no vertedor labirinto são muito complexos. Os principais parâmetros que envolvem seu dimensionamento são: o comprimento da crista da largura por ciclo, a carga sobre o vertedouro, o ângulo das paredes laterais do vertedouro com relação ao fluxo, e a relação entre a largura total desenvolvida do vertedouro (ciclos) e a altura do vertedouro (Design of Small Dams, 1987).

4.4.1 Considerações sobre crista Linear e Labirinto

Segundo Tullis *et al.* (1995), o método proposto para a concepção de um vertedor labirinto é o mesmo da equação básica desenvolvida para vertedores lineares:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot L_e \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H_t^{1.5} \quad (12)$$

Onde:

C_d : Coeficiente adimensional para a crista [-];

L_e : Comprimento efetivo da crista [m];

H_t : Carga total sobre a crista (condição não submersa a jusante) [m].

No vertedor do tipo labirinto, assim como nos descarregadores lineares a fio d'água, a carga total é normalmente determinada pelo nível de água acima da crista e o termo da velocidade do fluxo no ponto de medição (Figura 4.33). Para um vertedor com esta abordagem onde as perdas de entrada são desprezíveis, H_t é a diferença de elevação entre o nível do reservatório e a elevação da crista do vertedor.

Para um vertedor linear, sem contrações laterais, e com a configuração a fio d'água, o comprimento efetivo L_e é o comprimento real medido do vertedor. O coeficiente da crista é dependente de H_t/P , onde a espessura da parede (t) e a crista formam a configuração do escoamento do tipo aerado ou não-aerado. A Figura 4.36 mostra a variação do coeficiente da crista de acordo com H_t/P para uma crista aerada de vertedor linear com $t/P = 1/6$, sendo uma crista arredondada no lado de montante ($1/4$ de circunferência) com raio de $P/12$. Tullis *et al.* (1995) formou três conjuntos de dados obtidos por três pesquisadores diferentes na "Utah Water Research Laboratory" (UWRL): Amanian 1987; Baasiri et al. 1992; Waldron 1994, apresentados na Figura 4.36 para o vertedor linear com perfil de crista aerada.

O estabelecimento de dados confiáveis para o vertedor labirinto é importante na análise dos coeficientes de crista destes vertedores porque representa o limite superior dos valores C_d . Para um vertedor do tipo labirinto trapezoidal, os parâmetros geométricos para o cálculo do comprimento efetivo (L_e) para ser usado de acordo com a equação (12) está indicado na Figura 4.34. O coeficiente de descarga do vertedor labirinto depende das mesmas variáveis que influenciam um vertedor linear, porém deve-se ter a consideração adicional da configuração geométrica do labirinto trapezoidal, principalmente com relação ao ângulo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento do vertedor labirinto.

Figura 4.36: Coeficiente de descarga de vertedor linear – Adaptado Tullis *et al.* (1995)

De acordo com Tullis *et al.* (1995), a forma construtiva mais prática da crista do vertedor labirinto é o formato de $\frac{1}{4}$ de circunferência (crista arredondada no lado de montante). Segundo o autor, este tipo de crista é eficiente mesmo com coeficiente de descarga baixo para a condição de ($H_t/P < 0,5$), quando comparado com uma crista de meia volta completa. O procedimento proposto pelo autor assume as condições de (t) e (P) conforme Figura 4.33. Caso a parede seja mais grossa por razões estruturais, este tem pouco efeito sobre o coeficiente de crista. No entanto, uma diminuição significativa na espessura da parede corresponde a uma redução no raio de curvatura e ocorre uma redução do coeficiente da crista.

Vale ressaltar que o coeficiente (C_d) do vertedor de soleira linear atinge um valor máximo e torna-se constante em grandes valores de H_t/P (Figura 4.36). Já o vertedor de soleira com formato trapezoidal, com o aumento da carga, o coeficiente para este tipo de estrutura continua a diminuir até as condições próximas de escoamento do vertedor linear, ou seja, o comprimento efetivo iguala-se à largura do vertedor linear. Portanto, é necessário limitar a relação de H_t/P para manter a eficácia do vertedor labirinto.

Segundo Tullis *et al.* (1995), os autores sobre o assunto recomendam que a relação H_t/P para a vazão de projeto, deve ser inferior a cerca de 0,9. O labirinto ainda

funciona com carga maior, porém a vantagem dessa estrutura do tipo labirinto continua a diminuir à medida que a carga aumenta. A decisão final será baseada em critérios econômicos, objetivo apresentado no presente estudo, conforme item 5 - Estudos de caso.

4.4.2 Método de Magalhães

A seguir, a Figura 4.37 apresenta o coeficiente de vazão de soleiras com forma trapezoidal em planta de acordo com Magalhães (1983).

Figura 4.37: Coeficiente de vazão adimensional de soleiras com forma trapezoidal em planta (Magalhães, 1983)

Este ábaco permite obter o valor de μ_w , para utilização na expressão da lei de vazão da equação (13) a seguir, em função dos parâmetros l/w e h/p . De acordo com

Darvas (1971 *apud* Magalhães, 1983), os ensaios com esta expressão deram origem ao ábaco anterior segundo as condições de:

- Soleira labirinto com fundo horizontal e formato trapezoidal e perfil no formato de $\frac{1}{4}$ de circunferência;
- Escoamento na soleira não afogado;
- $1 \leq l/w \leq 8$;
- $0,2 \leq h/p \leq 0,6$;
- $\alpha/\alpha_{máx} \geq 0,8$;
- $w/p \geq 2$.

O ábaco da Figura 4.37 apresenta o valor de μ_w adimensional e as unidades: desenvolvimento total de um módulo (l) e largura frontal de um módulo da soleira (w) em metros. A expressão da capacidade de vazão é dada por:

$$Q = \mu_w \cdot W \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{1,5} \quad (13)$$

Magalhães (1983) afirma que ensaios realizados no LNEC e em outros laboratórios com modelos de diferentes descarregadores do tipo labirinto comprovam a proximidade do coeficiente de vazão (μ_w) com os obtidos através deste ábaco, apresentado na Figura 4.37.

O ensaio em modelo reduzido do escoamento neste tipo de vertedor é realizado para determinação do coeficiente de vazão e é importante para confrontar estes resultados com os cálculos teóricos de diferentes métodos. Em outubro de 1995, foi realizado pela FCTH /SP (Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica) uma aferição de um medidor Venturi através de um vertedor “Bico de Pato” (vertedor labirinto trapezoidal). Com o modelo reduzido representado na Figura 4.38, construído na escala 1:2,667, obteve-se os pares de valores (Q_{modelo} , h_{vertedor}) e calculou-se o coeficiente de vazão (μ) através da expressão:

$$\mu = \frac{Q_{\text{modelo}}}{L \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_{\text{vert}}^{1,5}} \quad (14)$$

onde:

Q_{modelo} = vazão escoada do modelo reduzido [m^3/s];

L = Comprimento Total da soleira do modelo reduzido [m];

h_{vert} = Leitura da carga sobre a soleira vertente, medida com a ponta limnimétrica descontado o valor de Z (cota desta mesma soleira) [m].

Figura 4.38: Vista do escoamento no modelo reduzido (CTH, 1995)

Tomou-se o cuidado necessário, no exemplo anterior, para que o modelo reduzido representasse fidedignamente as mesmas condições hidráulicas do protótipo com relação à aeração da soleira e na aproximação do escoamento.

Embora Magalhães (1983) afirme que os métodos de projeto não são apropriados para a proporção w/p inferior a 2,0, o desempenho hidráulico no estudo empírico de Matos e Chanson (2006) obteve valores inferiores desta relação com bons resultados. Outros testes para definir o comportamento hidráulico do labirinto para esses valores mais baixos w/p são recomendados.

Matos e Chanson (2006) afirmam que quando o fluxo é considerado totalmente aerado, segundo a Figura 4.39 os métodos de Tullis e Lux apresentam resultados muito semelhantes para as relações H (carga sobre a crista do vertedor) e P (altura do vertedor).

Figura 4.39: Avaliação de vazões de cheia e carga sobre a soleira - Matos & Chanson (2006)

Uma observação importante a ser considerada no vertedor do tipo labirinto é que com o aumento das vazões sobre a crista da soleira ocorre um aumento da vazão específica, principal problema neste tipo de vertedor, ou seja, o aumento da relação entre vazão e o comprimento vertente ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) tende a tornar crítico a capacidade de vazão desta estrutura hidráulica.

4.4.3 Método Tullis

Tullis *et al.* (1995), apresenta oito equações de regressão para determinação do (C_d), para utilização na expressão da lei de vazão da equação (12), baseados na relação H_t/P com validade para as seguintes condições:

- $t \leq A \leq 2t$;
- $H_t/P < 0,9$;
- $t \cong P/6$;

- Forma da crista com $\frac{1}{4}$ de circunferência (lado de montante);
- $R = P/12$.

$$C_d = 0,49 - 0,24 \cdot \left(H_t/P\right) - 1,20 \cdot \left(H_t/P\right)^2 + 2,17 \cdot \left(H_t/P\right)^3 - 1,03 \cdot \left(H_t/P\right)^4$$

Para $\alpha = 6^\circ$ (15)

$$C_d = 0,49 + 1,08 \cdot \left(H_t/P\right) - 5,27 \cdot \left(H_t/P\right)^2 + 6,79 \cdot \left(H_t/P\right)^3 - 2,83 \cdot \left(H_t/P\right)^4$$

Para $\alpha = 8^\circ$ (16)

$$C_d = 0,49 + 1,06 \cdot \left(H_t/P\right) - 4,43 \cdot \left(H_t/P\right)^2 + 5,18 \cdot \left(H_t/P\right)^3 - 1,97 \cdot \left(H_t/P\right)^4$$

Para $\alpha = 12^\circ$ (17)

$$C_d = 0,49 + 1,00 \cdot \left(H_t/P\right) - 3,57 \cdot \left(H_t/P\right)^2 + 3,82 \cdot \left(H_t/P\right)^3 - 1,38 \cdot \left(H_t/P\right)^4$$

Para $\alpha = 15^\circ$ (18)

$$C_d = 0,49 + 1,32 \cdot \left(H_t/P\right) - 4,13 \cdot \left(H_t/P\right)^2 + 4,24 \cdot \left(H_t/P\right)^3 - 1,50 \cdot \left(H_t/P\right)^4$$

Para $\alpha = 18^\circ$ (19)

$$C_d = 0,49 + 1,51 \cdot \left(H_t/P\right) - 3,83 \cdot \left(H_t/P\right)^2 + 3,40 \cdot \left(H_t/P\right)^3 - 1,05 \cdot \left(H_t/P\right)^4$$

Para $\alpha = 25^\circ$ (20)

$$C_d = 0,49 + 1,69 \cdot \left(\frac{H_t}{P} \right) - 4,05 \cdot \left(\frac{H_t}{P} \right)^2 + 3,62 \cdot \left(\frac{H_t}{P} \right)^3 - 1,10 \cdot \left(\frac{H_t}{P} \right)^4$$

Para $\alpha = 35^\circ$ (21)

$$C_d = 0,49 + 1,46 \cdot \left(\frac{H_t}{P} \right) - 2,56 \cdot \left(\frac{H_t}{P} \right)^2 + 1,44 \cdot \left(\frac{H_t}{P} \right)^3$$

Para $\alpha = 90^\circ$ e $H_t/P < 0,7$ (22)

A Figura 4.40 apresenta as equações anteriores em forma gráfica.

Figura 4.40: Coeficiente de descarga vertedor labirinto - Tullis *et al.* (1995)

Com relação à avaliação econômica considerando a eficiência hidráulica para este tipo de estrutura, Tullis *et al.* (1995) afirmam que pode-se fazer uma economia preliminar variando o número de ciclos e / ou o ângulo do tamanho total da parede lateral (L_1), indicado na Figura 4.34 efetuando a comparação com o volume de concreto.

4.4.4 Relação da carga de projeto e afogamento no canal de descarga

De acordo com a formulação de Lewitt (1958) sobre a relação da carga de projeto e afogamento no canal de descarga, o seguinte esquema mostra o escoamento para esta situação.

Figura 4.41: Submersão no canal de descarga (Adaptado Lewit 1958)

A vazão total do esquema anterior é a somatória da parcela do descarregador livre (Q_1) e da parcela do orifício afogado (Q_2), conforme expressões a seguir.

Descarregador livre:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot B \int_0^{(H_1 - H_2)} h^{1/2} dh \\
 &= \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot B \cdot \left[h^{3/2} \right]_0^{(H_1 - H_2)} \\
 &= \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot B \cdot (H_1 - H_2)^{3/2}
 \end{aligned}$$

(23)

Orifício Afogado:

$$Q_2 = C_d \cdot \text{Área} \cdot V_2$$

$$Q_2 = C_d \cdot V_2 \cdot H_2 \cdot B$$

$$Q_2 = C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_1 - H_2)} \cdot H_2 \cdot B$$

(24)

$$Q_{Afogada} = Q_1 + Q_2$$

(25)

Substituindo as expressões (23) e (24) em (25) tem-se:

$$Q_{Afogada} = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot B \cdot (H_1 - H_2)^{3/2} + C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_1 - H_2)} \cdot H_2 \cdot B$$

$$Q_{Afogada} = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot B \cdot (H_1)^{3/2} \cdot \left[\frac{(H_1 - H_2)^{3/2}}{(H_1)^{3/2}} + \frac{3}{2} \cdot \frac{(H_1 - H_2)^{1/2} \cdot H_2}{(H_1)^{3/2}} \right]$$

Reordenado os termos da expressão anterior, tem-se:

$$Q_{Afogada} = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot B \cdot (H_1)^{3/2} \cdot \left[\frac{(H_1)^{3/2} \cdot \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right)^{3/2}}{(H_1)^{3/2}} + \frac{3}{2} \cdot \frac{(H_1)^{1/2} \cdot \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right)^{1/2} \cdot H_2}{(H_1)^{1/2} \cdot H_1} \right]$$

$$Q_{Afogada} = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot B \cdot (H_1)^{3/2} \cdot [\emptyset]$$

(26)

Sendo:

$$\phi = \left[\left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right)^{3/2} + \frac{3}{2} \cdot \left(1 - \frac{H_2}{H_1}\right)^{1/2} \cdot \frac{H_2}{H_1} \right] \quad (27)$$

O coeficiente apresentado na expressão (27) é o fator do efeito do afogamento produzido pela elevação de jusante de acordo com o conceito apresentado por Lewitt (1958).

4.4.5 Relação da carga de projeto e submersão no canal de descarga

Segundo Tullis *et al.* (2007), a submersão ocorre quando o nível de jusante em condições de cheias ultrapassa a crista do vertedor (Figura 4.42), causando uma interferência com relação a uma condição de descarga livre, interferência esta apresentada na Figura 4.43. Geralmente para medição de vazão ou controle de vazão, os vertedores são projetados para condições de fluxo livre, onde o nível de jusante para as condições de cheia está abaixo da crista do vertedor. Porém, o maior problema encontrado para os descarregadores livres, principalmente de baixa altura, é esta condição de submersão, onde se deve levar em consideração a redução do coeficiente de descarga.

Figura 4.42: Parâmetros de escoamento livre e submerso – Adaptado Tullis *et al.* (2007)

Sendo:

H^* : Carga total sobre a crista (condição submersa a jusante) [m];

H_t : Carga Total sobre a crista (condição não submersa a jusante) [m];

H_d : Submersão de jusante (Energia Total) [m];

h_d : altura piezométrica a jusante [m].

Figura 4.43: Superposição submersa - Tullis *et al.* (2007)

$$Q_s = Q_{s1} - Q_{s2} \quad (28)$$

$$\frac{Q_s}{Q_{s1}} = 1 - \frac{Q_{s2}}{Q_{s1}} \quad (29)$$

$$\frac{Q_s}{Q_{s1}} = \left(1 - \frac{h_d^{3/2}}{h^{*3/2}} \right)^{0,385} \quad (30)$$

$$\frac{Q_L}{Q_{s1}} = \left(1 - \frac{h_d^{3/2}}{h^{*3/2}} \right)^{0,385} \quad (31)$$

Considera-se:

Q_s : Vazão com o fator de submersão de crista linear [m³/s];

Q_L : Vazão com o fator de submersão de crista labirinto [m³/s];

Q_{s1} : Vazão sem o fator de submersão com condição de escoamento livre associado com H_t [m³/s];

Q_{S2} : Vazão com o fator de submersão e condição de escoamento associado com H_d [m^3/s].

Para o dimensionamento do vertedor labirinto, a jusante do canal de restituição deve-se prever uma inclinação para evitar a submersão da crista (Tullis *et al.*, 1995).

Caso ocorra a submersão, utiliza-se relações de escoamento submerso para o vertedor labirinto com H^*/H_t e H_d/H_t conforme Figura 4.44.

Figura 4.44: Relação do escoamento submerso para vertedor labirinto – Adaptado Tullis *et al.* (2007)

As equações dos trechos do gráfico anterior estão expressas a seguir.

Para $0 \leq \left(\frac{H_d}{H_t}\right) \leq 1,53$ tem-se a seguinte equação:

$$\frac{H^*}{H_t} = 0,3320 \cdot \left(\frac{H_d}{H_t}\right)^4 + 0,2008 \cdot \left(\frac{H_d}{H_t}\right)^2 + 1 \quad (32)$$

Para $1,53 \leq \left(\frac{H_d}{H_t}\right) \leq 3,5$ tem-se a seguinte equação:

$$\frac{H^*}{H_t} = 0,9379 \cdot \left(\frac{H_d}{H_t}\right) + 0,2174 \quad (33)$$

Para $3,5 \leq \left(\frac{H_d}{H_t}\right)$ tem-se a seguinte equação:

$$H^* = H_t \quad (34)$$

O gráfico da Figura 4.45 a seguir apresenta os dados comparativos com o efeito de submersão entre os dados experimentais de Vilemonte (1947 *apud* Tullis *et al.*, 2007) para crista linear, e dados obtidos por Tullis *et al.* (2007), para crista em labirinto com variação de 3 ângulos formados pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento. Adicionalmente, inseriram-se os dados de acordo com a formulação de Lewitt (1958) para a crista linear apresentada no item 4.4.4, sendo que:

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{H_d}{H^*}$$

$$\frac{Q_{Afogada}}{\frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot B \cdot H_1^{3/2}} = \frac{Q_s}{Q_{s1}}$$

Substituem-se na expressão anterior as expressões (26) e (27):

$$\phi = \frac{Q_s}{Q_{s1}}$$

Em seguida, verifica-se o coeficiente ϕ relacionado ao fator do efeito do afogamento produzido pela elevação de jusante, apresentado na expressão (27), para cada relação de H_d / H^* :

Tabela 4.2: Relações de níveis e fator do efeito do afogamento para crista linear

H_d / H^*	ϕ
0,0	1,000
0,1	0,996
0,2	0,984
0,3	0,962
0,4	0,930
0,5	0,884
0,6	0,822
0,7	0,739
0,8	0,626
0,9	0,459
1,0	0,000

Figura 4.45: Comparação de dados de crista labirinto e linear relacionados a submersão (Modificado Tullis *et al.*, 2007)

Verifica-se a semelhança entre os dados de Villemonte (1947) e Lewitt (1958) para a crista linear.

4.4.6 Orientações gerais para a seleção dos parâmetros

A seguir são descritos as relações hidráulicas mais importantes para a seleção dos parâmetros do vertedor labirinto.

A relação de carga, apresentada anteriormente é a carga total na crista do vertedor dividido pela altura do vertedor, H_0 / P . Como o coeficiente de descarga diminui com aumento da carga, os vertedores labirintos têm a maior aplicação quando a carga é baixa. Segundo Lux (1989 *apud* Falvey, 2003) recomenda-se que a relação de carga máxima deve estar na faixa de 0,45 e 0,50. No entanto, alguns vertedores labirintos foram projetados com proporções próximas da unidade. A proporção máxima da relação de carga é uma questão de como foram determinados os modelos de coeficientes de descarga apresentados com um intervalo de valores.

Através de testes em laboratório, a relação de carga máxima para Tullis *et al.* (1995) foi de $H_0/P = 0,9$. Conforme Figura 4.40, as equações a serem utilizadas na análise são válidas até este limite de relação de carga. No caso de relações de cargas mais elevadas, como por exemplo, no caso apresentado no item 4.2.1 (vertedor labirinto de *Kizilcapinar* na Turquia) com relação de carga de 1,15 serão necessários estudos em modelos físicos das estruturas de controle.

A relação do aspecto vertical é determinado pela largura de um ciclo do vertedor labirinto dividido pela altura da estrutura, w / P . Taylor (1968 *apud* Falvey, 2003) recomenda que, para minimizar o efeito de interferência da lâmina d'água, a proporção vertical deve ser maior que 2. Para fins de projeto, um valor entre 2,0 e 2,5 é recomendado por Lux (1989 *apud* Falvey, 2003) para os cálculos iniciais.

A taxa de ampliação é o comprimento da crista do vertedor labirinto dividido pela largura do ciclo, I / w . O limite para as curvas de Tullis *et al.* (1995) é um ângulo de 6° , o que corresponde a uma taxa de ampliação de cerca de 9,5. A Figura 4.46 a seguir, mostra a redução rápida da eficácia de um vertedor labirinto à medida que a taxa de ampliação apresenta valor superior a 2,0.

Com um labirinto triangular, o ângulo da parede lateral e a ampliação estão interligados. O ângulo é dado por:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{W}{2 \cdot B}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1}{m}\right) \quad (35)$$

Sendo que m = taxa de ampliação [-].

A Figura 4.46 apresenta o ângulo máximo do vertedor labirinto triangular. No caso do vertedor labirinto trapezoidal, o ângulo da parede lateral será menor do que o mostrado nesta figura. Isto é, a relação entre a ampliação e o ângulo da parede lateral vai se encontrar abaixo da curva com um labirinto trapezoidal.

Figura 4.46: Ângulo máximo do vertedor labirinto triangular – Falvey (2003)

4.5 DISSIPACÃO DE ENERGIA

A água, ao atingir o pé da barragem, alcança elevada velocidade, havendo a necessidade de dissipar energia.

De acordo com o esquema abaixo, sobre dimensionamento de bacia de dissipação em aproveitamentos hidrelétricos, determina-se o tipo de bacia para a análise posterior dos resultados.

Figura 4.47: Dados geométricos para dimensionamento da bacia de dissipação

Com uma vazão de projeto e largura do dissipador aplicados nos dados acima, calcula-se o número de Froude e a altura y_2 , que é a profundidade conjugada fluvial do ressalto hidráulico, por iteração conforme expressão a seguir:

$$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot y_1}}$$

(36)

Para o valor encontrado de Froude, escolhe-se o tipo de bacia de acordo com a Figura 4.48.

Froude	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		RA ou BC LYAPIN											
			USBR II ou KUMIN - GUNKO - RB										
						USBR III							
								SALTO EM ESQUI					
	RB - ROLLER BUCKET												
		RA - RAMPA ASCENDENTE											
		BC - BACIA CURTA											

Figura 4.48: Tipos de Bacias de dissipação x Froude (Adaptado Tamada, 1994)

Figura 4.49: Esquema do Ressalto Hidráulico

O valor encontrado para o comprimento do ressalto hidráulico é dado inicialmente por Schreiber (1977):

$$L_y = (y_2 - y_1) \cdot 10,8 \cdot F_r^{-0,38} \quad (37)$$

Determinação de y_2 :

Vazão específica:

$$q = \frac{\text{Vazão de Projeto}}{\text{Largura do Dissipador}} \quad (38)$$

Calcula-se V_1 :

$$V_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(Z - \left(\frac{NA_{\text{mont}} - \text{Cota Crista}}{2} \right) \right)} \quad (39)$$

Calcula-se y_1 :

$$y_1 = \frac{q}{V_1} \quad (40)$$

Calcula-se F_1 :

Idem Equação (36).

Calcula-se y_2 :

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot F_1^2} - 1 \right) \quad (41)$$

1ª Iteração

Cota de Fundo = NA jusante – y_2

Z_1 = NA Montante – Cota de Fundo

$$V'_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(Z_1 - \left(\frac{NA_{mont} - Cota Crista}{2} \right) \right)}$$

$$y'_1 = \frac{q}{V'_1}$$

$$F'_1 = \frac{V'_1}{\sqrt{g \cdot y'_1}}$$

$$y'_2 = \frac{y'_1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot F'^2_1} - 1 \right)$$

Iterações

Do mesmo modo dos cálculos anteriores, efetua-se o procedimento das iterações seguintes até o valor de y_2 se igualar com a lâmina d'água existente para a vazão de projeto na zona da restituição.

4.6 ESCOLHA DO TIPO DE EXTRAVASOR

As análises de soluções para estruturas extravasoras, em particular estudos de riscos envolvendo operação de vertedouros de soleira livre, além de estudos de operação de vertedouros em degraus, labirinto e de descarregadores de fundo, necessitam de estudos e comparações de resultados a serem desenvolvidos nos projetos específicos envolvendo fatores hidráulicos, hidrológicos, geológicos, topográficos e dos riscos envolvendo prejuízos que seriam causados com falhas nas estruturas hidráulicas.

Outras formas e combinações de estruturas extravasoras podem ser bem avaliadas, dependendo das condições topográficas, hidrológicas, geológicas e de custo-benefício das obras. Dependendo destes fatores pode haver a necessidade de mais de uma estrutura hidráulica no sistema extravasor.

De acordo com Schreiber (1977) o custo do vertedouro ocupa cerca de 12 a 20% dos investimentos totais da obra, um aumento do custo do vertedouro em 10% significa um aumento total de 1,2 a 2% da obra. Por este motivo uma economia dessa ordem não compensaria a diminuição da segurança de toda a obra. Custos diretos e indiretos de acidentes superam sobremaneira os custos de estruturas extravasoras.

A proposição de otimização de arranjos e de estruturas visando melhoria da segurança, da construção e da operação; assim como os estudos de modelos hidráulicos (físicos e/ou matemáticos em função da disponibilidade de recursos) proporcionam o desenvolvimento de descarregadores ideais para cada situação de projeto.

5 ESTUDOS DE CASO

Os estudos de caso envolvendo as PCH's a seguir serão os principais objetivos de avaliação no presente trabalho, com a análise dos critérios de dimensionamentos adotados, comparações com outros métodos e estudos de alternativas de arranjos das estruturas extravasoras. Serão detalhadas e desenvolvidas, nas fases seguintes, as análises geométricas e avaliação das condições hidráulicas nos diferentes estudos de caso.

A escolha do número de ciclos no vertedor labirinto influencia significativamente a largura, comprimento e outros detalhes do labirinto. Com disposições para cada projeto, existem numerosas possibilidades de variações geométricas. O mais adequado de cada projeto é determinado depois de considerar as limitações de cada local específico com suas particularidades geológicas, topográficas e hidrológicas, completando-se assim a análise econômica em paralelo com a análise hidráulica para a escolha do vertedor ideal para cada situação.

5.1 PCH FIGUEIRÓPOLIS – MT

Este item abordará alternativas geométricas e elaboração de curvas de descargas pelos métodos de dimensionamento hidráulico do vertedor labirinto, com análise do comportamento hidráulico observados na revisão bibliográfica, além da avaliação preliminar dos quantitativos civis de diversas alternativas de estruturas extravasoras a fio d'água.

A PCH Figueirópolis situa-se no rio Jauru, na bacia do Rio Paraná (Código DNAEE - 06), sub-bacia do Alto Paraguai (Código DNAEE – 66), nos municípios de Figueirópolis D'Oeste e Indiavaí, em Mato Grosso. A figura a seguir apresenta a localização das principais Usinas Hidrelétricas à montante do local em estudo, e nas bacias circunvizinhas.

Figura 5.1: Localização da PCH Figueirópolis – MT (Fonte: adaptado ANEEL/SIGEL 2011)

De acordo com o Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL), o trecho alto e médio da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Figueirópolis situa-se na formação Utiariti, com presença de arenito fino, favorecendo o amortecimento das vazões com redução dos picos de cheias.

Tabela 5.1: Informações gerais da PCH Figueirópolis – MT (Fonte: ANEEL/SIGEL 2011)

Estágio	Operação
Área Contribuinte (km ²)	2.926,00
Área do reservatório NA Normal (km ²)	7,44
NA Normal Montante (m)	190,00
NA Normal Jusante (m)	174,51
Potência Instalada (MW)	19,41
Proprietário	Companhia Hidrelétrica Figueirópolis S/A

5.1.1 Características gerais de arranjo e do Sistema Extravador

O circuito de geração é do tipo compacto, com a estrutura de tomada d'água compondo o barramento e a adução é feita por meio de condutos forçados. O sistema extravasor é composto de vertedor do tipo labirinto trapezoidal e em degraus, com restituição a jusante com uma laje de concreto de 8,27 metros.

A seguir são apresentadas as principais características do sistema extravasor com esquemas de planta de um ciclo do vertedor labirinto, corte da estrutura extravasora (labirinto e degraus), assim como detalhes do perfil da crista do vertedor labirinto.

A Figura 5.2 apresenta as principais dimensões de um ciclo de vertedor labirinto, do total de 13 ciclos existentes da PCH Figueirópolis.

*Medidas em metros

Figura 5.2: Planta de um ciclo do vertedor labirinto– PCH Figueirópolis MT (Fonte: ENGECON)

De acordo com Tullis *et al.* (1995), o esquema da Figura 4.34 mostra as principais características geométricas da figura anterior:

- Ângulo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento: $\alpha = 20^\circ$;
- Ângulo máximo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento: $\alpha_{\text{máx.}} = 24,89^\circ$ (vértice = 0);
- Tamanho total da parede lateral: $L_1 = 5,32$ m;
- Tamanho efetivo da parede lateral: $L_2 = 4,83$ m;
- Largura frontal de um módulo da soleira: $w = 6,62$ m;
- Largura total frontal do vertedor labirinto: $W = 86,06$ m;
- Altura do vertedor labirinto trapezoidal: $P = 3,40$ m;
- Altura da onda trapezoidal em planta: $C = 5,00$ m;
- Vértice externo do labirinto trapezoidal: $D = 1,98$ m;
- Vértice interno do vertedor labirinto trapezoidal: $A = 1,00$ m;
- Espessura da parede: $t = 0,40$ m

Figura 5.3: Corte da estrutura extravasora – PCH Figueirópolis MT (Fonte: ENGECON)

Além dos 13 ciclos do vertedor labirinto da PCH Figueirópolis, observa-se o prolongamento nas extremidades da crista, prolongamento este que adiciona 4,0 m no desenvolvimento total da crista. Serão avaliados somente os 13 ciclos completos do vertedor labirinto, com capacidade aproximada de 643,0 m³/s, compondo a largura frontal total de 86,1 m.

5.1.2 Determinação das curvas de descargas teóricas – Vertedor Labirinto

Este item abordará a curva de descarga do vertedor da PCH Figueirópolis de acordo com as considerações anteriores para posteriores verificações das alternativas com possibilidades de variações geométricas e considerações da dissipação de energia do sistema extravasor existente.

O comprimento efetivo da crista existente é dado pela expressão (10):

$$L_e = 2 \cdot N \cdot (A + L_2) = 2 \cdot 13 \cdot (1,00 + 4,83) = 151,58 \text{ m}$$

A seguir serão verificadas as curvas de descarga do vertedor labirinto pelos métodos de Magalhães (1983) e Tullis *et al.* (1995).

Magalhães (1983)

A curva de descarga teórica pelo método de Magalhães (1983) segue a expressão (13), e o coeficiente de descarga adimensional aproximado da crista segue a Figura 4.37.

O desenvolvimento total de um ciclo da soleira (l) é calculado de acordo com o esquema da Figura 4.31.

$$l = 4 \cdot a + 2 \cdot b = 4 \cdot 0,5 + 2 \cdot 4,83 = 11,66 \text{ m}$$

Portanto, a relação l/w para a obtenção do coeficiente adimensional (μ) é dado por:

$$\frac{l}{w} = \frac{11,66}{6,62} = 1,76$$

Com a relação da expressão anterior, obtêm-se as cinco relações de (H / P) com os respectivos coeficientes de descarga.

Tabela 5.2: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Magalhães (1983) – PCH Figueirópolis - MT

H (m)	H / P	μ	Q (m ³ /s)
0,68	0,2	0,89	190,24
1,02	0,3	0,85	333,79
1,36	0,4	0,80	483,67
1,70	0,5	0,75	633,70
2,04	0,6	0,73	810,81

Tullis *et al.* (1995)

A curva de descarga teórica do vertedor labirinto da PCH Figueirópolis pode ser obtida de acordo com a expressão (12), considerando o comprimento efetivo da crista calculado anteriormente e o coeficiente de descarga adimensional aproximado da crista ($C_{\text{aprox. (20º)}}$), conforme Figura 4.40. Para efeitos comparativos, a expressão (19), representa a expressão mais próxima do ângulo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento ($C (18º)$):

Tabela 5.3: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Tullis *et al.* (1995) – PCH Figueirópolis - MT

NA (m)	H (m)	H/P	C (18º)	$C_{\text{aprox. (20º)}}$	Q (m ³ /s)
190,25	0,25	0,07	0,57	0,58	32,45
190,50	0,50	0,15	0,61	0,63	99,70
190,75	0,75	0,22	0,62	0,66	191,88
191,00	1,00	0,29	0,62	0,66	295,42
191,25	1,25	0,37	0,60	0,65	406,61
191,50	1,50	0,44	0,58	0,62	509,83
191,75	1,75	0,51	0,55	0,59	611,38
192,00	2,00	0,59	0,52	0,57	721,64
192,25	2,25	0,66	0,50	0,55	830,88
192,50	2,50	0,74	0,47	0,54	955,44

A figura a seguir apresenta as curvas de descargas encontradas pelos dois métodos apresentados nas tabelas anteriores.

Figura 5.4: Curvas de descargas teóricas – PCH Figueirópolis - MT

5.1.3 Avaliação do comportamento hidráulico do Vertedor Labirinto

Segundo a revisão bibliográfica do vertedor labirinto, apresentado anteriormente, as seguintes relações serão avaliadas:

l/w (ou m: taxa de ampliação):

O desenvolvimento total de um ciclo da soleira (l) foi de 11,66 m, conforme cálculo anterior. Portanto, a taxa de ampliação é determinada por: $l / w = 11,66 / 6,62 = 1,76$.

Conforme apresentado no item 4.4.2, Magalhães (1983) afirma que para um escoamento não afogado, a taxa de ampliação deve respeitar o intervalo entre 1 e 8. O valor encontrado de 1,76 está dentro do intervalo proposto.

No item 4.4.6, Falvey (2003) relaciona esta taxa de ampliação com a redução rápida da eficácia de um vertedor labirinto à medida que a taxa de ampliação apresenta valor superior a 2,0 (Figura 4.46). Vale ressaltar que a relação entre a ampliação e o ângulo da parede lateral vai se encontrar abaixo desta curva para o labirinto trapezoidal.

H_t / P (relação de carga):

Uma das principais relações verificadas na revisão bibliográfica é a relação de carga H_t/P . Segundo o trabalho clássico de Magalhães (1983), esta relação deve compreender o intervalo entre 0,2 e 0,6. Já Tullis *et al.* (1995), afirma que para este tipo de estrutura deve-se observar esta relação menor que 0,9. Por fim, segundo Falvey (2003 apud Lux, 1989) recomenda-se que a relação de carga máxima deve estar na faixa de 0,45 e 0,50.

O valor encontrado de 0,53 está dentro do intervalo proposto para os diferentes métodos de trabalhos observados, com exceção da recomendação de Falvey (2003 apud Lux, 1989).

w / P (aspecto vertical)

A relação encontrada foi de $w/P = 1,95$. Conforme observado na revisão bibliográfica, para valores abaixo de 2,0 é recomendado realizar testes para definir o comportamento hidráulico da estrutura. Valores acima de 2,0 minimizam o efeito de interferência e oscilação da lâmina d'água.

De acordo com o projeto da PCH Figueirópolis as características geométricas do vertedor labirinto são semelhantes ao modelo físico da PCH Bocaiúva no rio Cravari – MT. Posteriormente (item 5.1.4) serão discutidos alguns aspectos referentes à utilização deste modelo reduzido para efeitos comparativos da curva de descarga em ambos os empreendimentos, com algumas características geométricas, geológicas, hidrológicas e hidráulicas semelhantes.

$\alpha / \alpha_{\text{máx}}$

A relação do ângulo (α) formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento e a forma triangular para o qual α é máximo foi de $\alpha/\alpha_{\text{máx}} = 0,80$. De acordo com Magalhães (1983) esta relação deve ser maior ou igual a 0,8 para a utilização do ábaco da Figura 4.37.

Espessura da parede (t)

A espessura da parede encontrada para a PCH Figueirópolis foi de 0,40 m. Segundo Tullis *et al.* (1995) o valor ideal da espessura da parede (t) da PCH Figueirópolis seria de aproximadamente $P/6 = 0,57$. Com relação ao quadrante de montante (Figura 4.33), este deve ter a forma aproximada de $R = P/12$. O valor de (R) encontrado foi de aproximadamente 0,28.

Conforme considerações anteriores, uma diminuição significativa na espessura da parede corresponderia a uma redução no raio de curvatura e a ocorrência da redução do coeficiente da crista. Porém, o formato de crista utilizado corresponde ao da Figura 5.5, com raio do quadrante de montante igual a 0,36. Portanto, o valor do raio da aproximação está adequado e não interferirá no coeficiente da crista da Figura 4.40.

Carga de projeto e perfil da crista

De acordo com as considerações anteriores, o método de Tullis et al (1995) determinou a condição de maior carga dentre os dois métodos apresentados para a vazão de projeto.

$$H = 0,0218 \cdot Q^{0,6830} = 0,0218 \cdot (643,0)^{0,6830} = 1,8049 \text{ m}$$

Deste modo, verificou-se o perfil de crista adotado para a PCH Figueirópolis. A Figura 5.5 mostra as principais dimensões de projeto. Na sequência, verificou-se o perfil de acordo com a bibliografia apresentada anteriormente.

*Medidas em metros

Figura 5.5: Perfil da crista – PCH Figueirópolis – MT (Fonte: adaptado ENGECON)

O perfil da crista indicado para o extravasor labirinto da PCH Figueirópolis, segue o perfil da Figura 4.35, conforme verificação a seguir:

$$R_1 = 0,5 \cdot H_d = 0,5 \cdot 1,8 = 0,90 \text{ m}$$

$$R_2 = 0,2 \cdot H_d = 0,2 \cdot 1,8 = 0,36 \text{ m}$$

Largura do perfil da crista (largura do topo da crista considerando os 2 raios de circunferência e equação do perfil da crista da Figura 4.35:

$$L_C = 0,4 \cdot H_d = 0,4 \cdot 1,8 = 0,7 \text{ m}$$

Foi verificada a compatibilidade do perfil da crista de acordo a equação do U.S. Army Corps of Engineers (Figura 4.35).

$$X^{1,85} = 2,0 \cdot (1,80)^{0,85} \cdot Y$$

$$X^{1,85} = 3,2962 \cdot Y$$

Figura 5.6: Pontos do perfil da crista - U.S. Army Corps of Engineers – PCH Figueirópolis - MT

A condição de escoamento verificada na estrutura extravasora da PCH Figueirópolis indica o não afogamento a jusante para a condição de projeto (Figura 5.3).

5.1.4 Considerações sobre a dissipação de energia da PCH Figueirópolis

Com relação à dissipação de energia da PCH Figueirópolis, o vertedor labirinto, estrutura em degraus e o trecho de 8,27 metros de laje de concreto, formam a estrutura de dissipação de energia do sistema extravasor.

Para este trabalho não foram avaliadas estas estruturas de dissipação, pois a complexidade deste tipo de análise necessita de maiores informações como, por exemplo, curva chave para determinação do nível de restituição a jusante, vazão utilizada para o dimensionamento do sistema extravasor (geralmente utilizada a cheia com período de retorno de 100 anos), além da verificação do comportamento do escoamento entre o vertedor labirinto e a estrutura em degraus que necessita de uma avaliação em modelo físico.

Vale ressaltar que o modelo físico utilizado para a PCH Figueirópolis, seguiu apenas as características geométricas baseadas no perfil e no desenvolvimento da crista do vertedor labirinto da PCH Bocaiúva no rio Cravari-MT.

As características do comportamento de vazões extremas observadas em ambos os empreendimentos são próximas, visto que existem semelhanças entre as áreas contribuintes, formato aproximado das bacias hidrográficas (formas alongadas), geologia (arenito da chapada dos parecis) e pluviometria da região.

O modelo físico utilizado para a PCH Bocaiúva-MT não apresenta a estrutura em degraus observada na PCH Figueirópolis. Este modelo físico foi utilizado apenas para a verificação da curva de descarga e capacidade da estrutura, visto que em ambos os casos não existem condições de afogamento a jusante para a situação de projeto.

5.1.5 Alternativas do Vertedor Labirinto

Este item apresenta alternativas referentes ao número de ciclos e geometria do desenvolvimento da crista do vertedor labirinto, sem alteração da altura (P) e da onda trapezoidal (altura (c) do vertedor labirinto em planta) existente. A característica da estrutura em degraus não irá sofrer modificações com relação à altura, e largura total frontal (W), isto é, distância entre os muros que limitam lateralmente a soleira do vertedor labirinto. As limitações citadas são necessárias para a avaliação da curva de descarga considerando somente as variações de ciclos, com consequentes alterações na geometria e principalmente nos ângulos mínimos e máximos observados na literatura como, por exemplo, a Figura 4.40.

Ressalta-se que os níveis operacionais de montante, NA normal máximo (190,0 m) e NA *máximo maximorum* (191,80 m) devem ser respeitados para não interferir nos níveis operacionais de jusante da PCH Salto-MT, localizada logo a montante da PCH Figueirópolis, observada na localização da Figura 5.1.

Para esta avaliação, decidiu-se não alterar a seção transversal da estrutura em degraus, pois uma alteração modificaria a estabilidade da estrutura com relação ao tombamento e flutuação. Por esse motivo, não se alterou a altura da estrutura do

vertedor labirinto (P), pois proporcionaria uma alteração da elevação existente da base desta estrutura, abaixo da elevação 186,60 m (Figura 5.3). Da mesma forma, um aumento da altura (P) proporcionaria um aumento da onda trapezoidal (c).

As figuras das alternativas a seguir mostram o desenvolvimento do vertedor labirinto representado por cada uma das 3 alternativas desenvolvidas no presente trabalho, com variação de ciclos e ângulos formados pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento. No detalhe das figuras são apresentadas as dimensões em metros e os ângulos máximos simulados para o labirinto triangular de um ciclo. Após o detalhe da geometria serão verificadas as mesmas relações apresentadas no item 5.1.3, e por fim elaboradas as curvas de descargas das alternativas.

Alternativa 1

8 ciclos e ângulo de 35°

*Medidas em metros

Figura 5.7: Planta do vertedor labirinto – alternativa 1 com 8 ciclos e ângulo de 35° – PCH Figueirópolis - MT

Alternativa 2**12 ciclos e ângulo de 25°**

*Medidas em metros

Figura 5.8: Planta do vertedor labirinto – alternativa 2 com 12 ciclos e ângulo de 25°
– PCH Figueirópolis - MT

Alternativa 3

20 ciclos e ângulo de 6°

*Medidas em metros

Figura 5.9: Planta do vertedor labirinto – alternativa 3 com 20 ciclos e ângulo de 6° – PCH Figueirópolis - MT

Resultados das alternativas e curvas de descargas

As tabelas a seguir apresentam os parâmetros, relação de carga fixa, comprimentos efetivos e aspectos dos resultados das alternativas da PCH Figueirópolis.

Tabela 5.4: Parâmetros e relação de carga fixa das alternativas – PCH Figueirópolis – MT

Altura do vertedor labirinto	P (m)	3,4
Altura da onda trapezoidal	c (m)	5,0
Largura frontal total	W (m)	86,06
Carga de projeto	H _t (m)	1,80
Espessura da parede	t (m)	0,70
Relação de carga	H _t / P	0,53

Tabela 5.5: Resultados das alternativas do vertedor labirinto – PCH Figueirópolis – MT

Alternativa		1	2	3	Projeto original
Número de ciclos	n	8	12	20	13
Ângulo	α (°)	35,00	25,00	6,00	20,00
Ângulo máximo (triangular)	α máximo (°)	40,42	28,59	11,57	24,89
Desenvolvimento de 1 ciclo	l (m)	14,64	11,76	10,80	11,66
Largura frontal de 1 ciclo	w (m)	10,76	7,17	4,30	6,62
Comprimento efetivo da crista	L _e (m)	117,12	141,12	216,00	151,58
Comprimento total da crista	L _t (m)	127,66	162,53	221,00	177,08
Taxa de ampliação	m = l / w	1,36	1,64	2,51	1,76
Aspecto vertical	w / P	3,16	2,11	1,27	1,95
Relação de ângulos	α / α máx	0,87	0,87	0,52	0,80
Vazão com a carga de projeto	Q _{calc} (m ³ /s)	582,48	636,05	410,92	640,00

As curvas de descargas das alternativas a seguir apresentam os resultados teóricos de acordo com os cálculos dos parâmetros e relações encontradas. A curva de descarga do projeto original da PCH Figueirópolis apresentou a proximidade pelo método de Tullis et al (1995).

Figura 5.10: Curvas de descargas método de Tullis et al (1995) – alternativas PCH Figueirópolis – MT

Nota-se que a alternativa 3 com maior desenvolvimento efetivo da crista, apresenta perda de eficiência notável a partir da carga de 1,0 metro sobre a crista. De acordo com o item 4.4.6 para valores de taxa de ampliação superiores a 2,0 observa-se uma redução rápida da eficácia do vertedor labirinto. Outra relação verificada foi o aspecto vertical inferior a 2,0, que causa o efeito de interferência da lâmina d'água para a condição de projeto.

Verifica-se que a alternativa 1 apresenta coeficiente de vazão superior as demais alternativas devido ao maior ângulo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento. Porém o comprimento total efetivo apresenta o menor valor das alternativas, o que resulta na menor capacidade de vazão quando comparada com a alternativa 2 e com a geometria do vertedor labirinto original.

Por fim, a alternativa 2 e a geometria original do projeto da PCH Figueirópolis, apresentaram resultados muito próximos de curva de descarga, principalmente para a condição de projeto. Vale ressaltar que a literatura indica o valor superior a 2,0 do aspecto vertical, verificado para a alternativa 2.

5.1.6 Estudo de alternativas de Extravasores

Este item apresenta alternativas de vertedores a fio d'água referentes à revisão bibliográfica (item 4). Para efeitos comparativos dos benefícios econômicos das alternativas com a mesma capacidade de descarga de projeto, os mesmos níveis operacionais da PCH Figueirópolis serão utilizados para as comparações referentes ao valor da largura total frontal do vertedor labirinto (W), ou seja, distância entre os muros que limitam lateralmente a soleira.

Vertedor livre (perfil Creager)

Considerou-se a expressão (3) e a Figura 4.8 (coeficiente de vazão dimensional do vertedor linear de soleira normal) para o cálculo da lei de vazão do descarregador livre. A relação encontrada para P / H_0 é de 12,6.

$$Q = C_0 \cdot L \cdot H_0^{3/2} = 2,2 \cdot L \cdot (1,8)^{3/2}$$

Portanto, o valor da largura total encontrado para o vertedor livre (perfil Creager) é de 121,03 m.

Comportas Flap

Esta alternativa segue o item 4.1.6 para dimensionamento de comportas do tipo Flap, com estruturas metálicas posicionadas na crista do perfil Creager. Seguiram-se as especificações e dimensões das comportas fabricadas para a PCH Sete Quedas – MT. Esta alternativa será avaliada para posterior elaboração de custos com valores próximos aos praticados atualmente no mercado.

O dimensionamento para a capacidade de descarga de projeto segue as mesmas características do item anterior para o perfil Creager, sendo que, para a presente alternativa, considera-se a carga de projeto de 2,80 metros. Esta adição de carga, mantendo os mesmos níveis operacionais de montante foi proporcionada através da adição de 1,0 metro da estrutura metálica composta por grupos de comportas flaps

ativadas por desequilíbrio com os contra pesos, conforme explicado anteriormente. A curva de descarga para esse tipo de estrutura não será avaliada na presente alternativa, pois esta análise de comportamento hidráulico será avaliada posteriormente no estudo de caso da PCH Sete Quedas – MT.

A vazão total do extravasor será:

$$Q_T = Q_a + Q_b$$

Onde:

Q_T = Vazão total do extravasor [m^3/s];

Q_a = Vazão da parcela do escoamento livre acima das comportas acionadas [m^3/s];

Q_b = Vazão da parcela do escoamento de fundo abaixo das comportas acionadas [m^3/s].

Parcela do escoamento livre

Considerou-se a expressão (3) e a Figura 4.8 (coeficiente de vazão dimensional do vertedor linear de soleira normal) para o cálculo aproximado da lei de vazão do descarregador livre, uma vez que a presença e o funcionamento deste tipo de estrutura metálica reduzem o coeficiente de descarga apresentado.

Esta avaliação preliminar se aproxima das condições reais de número de comportas, largura e altura do perfil Creager para efeitos da elaboração dos quantitativos realizados para comparações de alternativas a fio d'água.

A relação encontrada para P / H_0' é obtida por:

$$\frac{P}{H_0'} = \frac{(El. da Soleira - El. Canal de Aproximação)}{(NA \max \max - El. da comporta tombada)} = \frac{(189,00 - 167,40)}{(191,80 - 189,50)} = 9,39$$

O coeficiente de descarga encontrado é de 2,2 ($m^{0,5}/s$). Não se considerou o fator de redução previsto com a presença da estrutura metálica (comporta Flap) para efeitos práticos de levantamento dos quantitativos civis. Porém, a ogiva dimensionada para a carga de projeto de 2,8 metros difere da alternativa anterior (descarregador livre) com relação à altura da ogiva e com relação ao perfil Creager e será apresentado no item seguinte.

$$Q_1 = C_0 \cdot L \cdot H_0^{3/2} = 2,2 \cdot L \cdot (191,80 - 189,50)^{3/2} = 7,674 \cdot L$$

Parcela do escoamento de fundo (orifício)

Considerou-se a expressão (8) para o cálculo aproximado da lei de vazão do descarregador de fundo, isto é, parcela referente ao escoamento de fundo com todas as comportas acionadas (tombadas).

Sendo que:

l = largura efetiva de todos os vãos (orifícios) abaixo das comportas, [m];

L' = largura real de todos os vãos abaixo das comportas [m];

$e = 0,32$ [m] (altura do vão);

$h = 2,64$ [m] (carga de projeto no centro do vão).

Consideraram-se a influência dos pilares no escoamento de fundo, através da expressão (4), para pilares com cantos vivos. Cada pilar possui 10 centímetros de largura. Substituindo-se a expressão (4) em (8), tem-se:

$$\begin{aligned} Q_2 &= 0,70 \cdot l \cdot e \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = 0,70 \cdot (L' - 0,2 \cdot 2,64) \cdot 0,32 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2,64} \\ &= 1,612 \cdot (L' - 0,528) \end{aligned}$$

De acordo com a expressão de Vazão total do extravasor, tem-se:

$$Q_T = 7,674 \cdot L + 1,612 \cdot (L' - 0,528)$$

Admitindo a vazão total como a vazão de projeto de 643,00 m³/s, encontra-se a largura aproximada:

$$643 = 7,674 \cdot L + 1,612 \cdot (66,36 - 0,528)$$

Portanto, o valor da largura total encontrada para o vertedor livre (perfil Creager) é de 70,0 m. Considerando como dimensão das comportas metálicas a largura de 2,0 m para cada Flap e altura igual a 1,0 m, temos aproximadamente 35 unidades metálicas sobre a crista do perfil Creager.

Vertedor poço (Tulipa)

Este tipo de vertedor, com as características da PCH Figueirópolis, possui o perfil da crista com entrada especial, ou seja, perfil do tipo Tulipa devido à altura da estrutura. Será verificada neste item a capacidade desta estrutura em concreto armado.

O dimensionamento é realizado com a galeria de jusante não afogada, com 75% da seção cheia (condição encontrada na literatura), e carga de projeto no presente estudo de 1,80 m. A seguir, são verificadas as relações (P / R) e (H_d / R) para determinação do coeficiente de descarga. Por iteração encontra-se o raio de 10 metros, para atingir a capacidade de descarga para a condição de projeto, dividida em duas estruturas em concreto armado do vertedor Tulipa, conforme sequência apresentada a seguir.

As relações encontradas são: P / R = 2,26, e H_d / R = 0,18 para a carga de projeto de 1,80 metros. De posse dessas duas relações e com o auxílio do gráfico da Figura 4.19, obtém-se o coeficiente de descarga 2,126 (m^{0,5}/s).

Utiliza-se a expressão (9) para o dimensionamento de uma estrutura Tulipa.

$$Q = C \cdot (2 \cdot \pi \cdot R) \cdot H_d^{3/2} = 2,13 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 10,0) \cdot 1,80^{3/2} = 323,20 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

A seguir, apresentam-se os valores convertidos para o Sistema Internacional de Unidades:

- Capacidade de 1 Estrutura Tulipa: 323,20 m³/s
- Capacidade de 2 Estruturas Tulipas: 646,40 m³/s

Para a verificação do perfil Tulipa e a transição para o trecho de poço, utilizaram-se ábacos do HDC - *Hydraulic Design of Spillways* (1987). A tabela a seguir informa as principais relações encontradas para as características do extravasor.

Tabela 5.6: Relações do vertedor Tulipa – Alternativa PCH Figueirópolis - MT

Relação		Fonte: Gráficos HDC (1987)
P / R	2,26	---
H _d / R	0,18	Gráfico 140 – 1/1
H _s / Hd	1,11	Gráfico 140 – 1/6
H _s / R	0,20	---
Hs	2,00	---

No item a seguir serão calculados os volumes das alternativas das estruturas extravasoras para posterior análise de custo preliminar de acordo com as características de projeto da PCH Figueirópolis.

5.1.7 Quantitativos civis das alternativas Extravasoras

A figura a seguir apresenta duas seções com perfil Creager, com carga de 1,8 m sobre a crista (perfil Creager soleira livre), e com carga de 2,8 m com a comporta Flap sobre a crista (perfil Creager soleira livre). Estes perfis são necessários para os cálculos dos volumes proporcionados pelas estruturas de concreto convencional e concreto massa. Os perfis das estruturas foram gerados de acordo com a geometria da Figura 4.5.

Figura 5.13: Alternativa Perfil Tulipa e transição (corte central perfil Tulipa – 3 dimensões) – PCH Figueirópolis - MT

Por fim, serão avaliadas as alternativas e o projeto original do vertedor Labirinto da PCH Figueirópolis.

A tabela a seguir resume os principais volumes e custos unitários, com as alternativas extravasoras avaliadas para a PCH Figueirópolis, considerando o vertedor de cada alternativa e o fechamento do barramento.

Tabela 5.7: Custos Unitários Adotados (Agosto de 2011)

Item	Unidade	Custo (R\$)
Cimento	t	420,00
Concreto sem cimento (estrutural)	m ³	240,00
Concreto sem cimento (massa)	m ³	180,00
Concreto sem cimento (CCR)	m ³	120,00
Comporta Flap (Altura = 1,0m x Largura = 2,0m)	Metro linear na soleira	350,00
Armadura	t	6.000,00

Item	Unidade	Custo (R\$)
Aterro compactado	m ³	8,00
Enrocamento	m ³	13,00
Transições / Filtros	m ³	30,00
Proteção Talude de montante (Enrocamento)	m ³	5,00
Proteção Talude de jusante (grama)	m ²	4,00

Tabela 5.8:Resumo dos quantitativos e custos das alternativas Vertedor Labirinto / degraus e Vertedor Creager – PCH Figueirópolis - MT

Discriminação	Unidade	Vertedor Labirinto / degraus		Vertedor Creager	
		Quantidade	Custo Total	Quantidade	Custo Total
Fechamento com barragem de concreto	m	40,00	---	10,00	---
Largura Frontal	m	86,06	---	121,03	---
Cimento	t	2.646,90	1.111.696,21	2.824,53	1.186.302,33
Concreto sem Cimento (convencional)	m ³	3.565,10	855.624,97	4.066,03	975.846,19
Concreto sem Cimento (CCR)	m ³	21.945,25	2.633.429,60	22.600,29	2.712.034,36
Armadura	t	35,65	213.906,24	40,66	243.961,55
Total	---	---	4.814.657,03	---	5.118.144,43

Tabela 5.9: Resumo dos quantitativos e custos das alternativas Vertedor Creager com comportas Flaps e Vertedor Tulipa – PCH Figueirópolis - MT

Discriminação	Unidade	Vertedor Creager com Comportas Flaps		Vertedor Tulipa	
		Quantidade	Custo Total	Quantidade	Custo Total
Cimento	t	2.583,20	1.084.943,05	2.717,54	1.141.366,76
Concreto sem Cimento (convencional)	m³	3.634,54	872.289,40	10.870,16	2.608.838,30
Concreto sem Cimento (CCR)	m³	20.932,04	2.511.844,42	---	---
Armadura	t	36,35	218.072,35	108,70	652.209,58
Largura Frontal (Comportas FLAP)	m	70,00	24.500,00	---	---
Fechamento com barragem	m	61,20 *	---	131,20 **	---
Aterro compactado	m³	---	---	177.654,06	1.421.232,50
Enrocamento	m³	---	---	15.065,68	195.853,84
Transições / Filtros	m³	---	---	7.000,00	210.000,00
Proteção Talude de montante (Enrocamento)	m³	---	---	4.150,00	20.750,00
Proteção Talude de jusante (grama)	m²	---	---	7.500,00	30.000,00
Limpeza e tratamento de fundação	---	---	---	---	200.000,00
Total	(R\$)	---	4.711.649,22	---	6.480.250,98

* Concreto

** Terra e Enrocamento

De acordo com os resultados obtidos, o vertedor Creager com comportas Flaps apresentou melhor benefício econômico, seguido do vertedor Labirinto / degraus. A alternativa com duas estruturas do tipo Tulipa apresentou maiores custos das soluções extravasoras avaliadas. Salienta-se que os custos preliminares das alternativas se basearam em custos unitários recentes praticados no mercado.

5.2 PCH ALTO FÊMEAS – BA

Este item abordará as curvas de descargas pelos métodos de dimensionamento hidráulico do vertedor labirinto, observados na revisão bibliográfica, além da avaliação do afogamento e estudos de submersão da estrutura extravasora.

A PCH Alto Fêmeas situa-se no rio das Fêmeas, na bacia do Rio São Francisco (código DNAEE - 04), sub-bacia código DNAEE – 45, localizada no município de São Desidério, no estado da Bahia. O início de sua operação ocorreu no ano de 1992.

De acordo com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), todo o trecho da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Alto Fêmeas situa-se na formação Urucuia, com presença de arenito fino, favorecendo o amortecimento das vazões com redução dos picos de cheias. Existe intensa atividade agrícola em toda a bacia hidrográfica contribuinte, com expressiva retirada de água no período de estiagem.

Tabela 5.10: Informações gerais da PCH Alto Fêmeas – BA (Fonte: Neoenergia 2011)

Área Contribuinte (km ²)	6.294,35
NA Normal Montante (m)	619,20
NA Normal Jusante (m)	585,15
Cheia de projeto TR = 1.000 anos (m ³ /s)	195,90
Potência Instalada - Outorgada e Fiscalizada (MW)	10,65
Proprietário	Afluente Geração e Transmissão de Energia Elétrica S/A

5.2.1 Características gerais de arranjo e do Sistema Extravasor Misto

O circuito de geração é do tipo derivação, com presença de um canal de concreto de 1.065 metros de extensão até a tomada d'água incorporada à câmara de carga. Na sequência do circuito de geração, segue um conduto até a trifurcação para 3 unidades de turbina do tipo Francis Dupla. O sistema extravasor é composto de vertedor do tipo labirinto trapezoidal, descarregador lateral e comporta segmento, com restituição a jusante no leito rochoso do rio das Fêmeas conforme Figura 4.26 apresentada anteriormente.

A Figura 5.14 apresenta as principais dimensões do desenvolvimento total do vertedor labirinto (3 ciclos), vertedor lateral (início da entrada no canal de adução) e comporta segmento de fundo para manutenção constante da vazão residual (vazão remanescente no trecho entre o barramento e casa de força do rio das Fêmeas). Esse descarregador de fundo possui as mesmas finalidades citadas no item 4.1.3.

*Medidas em metros

Figura 5.14: Planta do sistema extravasor – PCH Alto Fêmeas - BA (Fonte: adaptado Neoenergia 2011)

Tabela 5.11: Características do sistema extravasor da PCH Alto Fêmeas – BA
(Fonte: Neoenergia 2011)

Característica	Vertedor Labirinto	Comporta Segmento - Fundo	Vertedor Lateral do canal de adução
Capacidade de projeto (m ³ /s)	95,50	60,80	39,60
Carga de projeto (m)	0,60	4,5	0,35
Altura da estrutura (m)	5,5	4,5	4,5
Elevação da soleira (m)	619,20	615,30	619,45
Desenvolvimento Total da crista (m)	120,49	3,95	90,60
Largura Total do extravasor (m)	52,19	3,95	90,60

De acordo com Tullis *et al.* (1995), o esquema da Figura 4.34 mostra as principais características geométricas da figura anterior:

- Ângulo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento: $\alpha = 20^\circ$;
- Ângulo máximo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento: $\alpha_{\text{máx.}} = 23^\circ$ (vértice = 0);
- Tamanho total da parede lateral: $L_1 = 18,15$ m;
- Tamanho efetivo da parede lateral: $L_2 = 17,80$ m;
- Largura frontal de um módulo da soleira: $w = 17,40$ m;
- Largura total frontal do vertedor labirinto: $W = 52,19$ m;
- Altura do vertedor labirinto trapezoidal: $P = 5,50$ m;
- Altura da onda trapezoidal em planta: $C = 17,00$ m;
- Vértice externo do labirinto trapezoidal: $D = 2,69$ m;
- Vértice interno do vertedor labirinto trapezoidal: $A = 2,00$ m;
- Espessura da parede: $t = 0,50$ m

Não foi possível obter informações de projeto referente à crista da estrutura do labirinto da PCH Alto Fêmeas. A figura a seguir apresenta o corte da estrutura extravasora com representação dos níveis operacionais.

Figura 5.15: Corte da estrutura extravasora – PCH Alto Fêmeas - BA (Fonte: adaptado Neoenergia)

5.2.2 Determinação das curvas de descargas teóricas – Vertedor Labirinto

Este item abordará a curva de descarga teórica do vertedor da PCH Alto Fêmeas de acordo com as considerações da revisão bibliográfica para posteriores verificações e avaliações geométricas e hidráulicas.

O comprimento efetivo da crista existente é dado pela expressão (10):

$$L_e = 2 \cdot N \cdot (A + L_2) = 2 \cdot 3 \cdot (2,00 + 17,80) = 118,80 \text{ m}$$

A seguir serão verificadas as curvas de descarga do vertedor labirinto pelos métodos de Magalhães (1983) e Tullis *et al.* (1995).

Magalhães (1983)

A curva de descarga teórica pelo método de Magalhães (1983) segue a expressão (13), e o coeficiente de descarga adimensional aproximado da crista segue a Figura 4.37.

O desenvolvimento total de um ciclo da soleira (l) é calculado de acordo com o esquema da Figura 4.31.

$$l = 4 \cdot a + 2 \cdot b = 4 \cdot 1,0 + 2 \cdot 17,80 = 39,60 \text{ m}$$

Portanto, a relação l/w para a obtenção do coeficiente adimensional (μ) é dado por:

$$\frac{l}{w} = \frac{39,60}{17,40} = 2,28$$

Com a relação da expressão anterior, obtêm-se as cinco relações de (H / P) com os respectivos coeficientes de descarga.

Tabela 5.12: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Magalhães (1983) – PCH Alto Fêmeas - BA

H (m)	H / P	μ	Q (m ³ /s)
1,10	0,2	1,16	308,48
1,65	0,3	1,05	514,56
2,20	0,4	1,04	781,54
2,75	0,5	0,98	1.028,36
3,30	0,6	0,91	1.259,78

Tullis *et al.* (1995)

A curva de descarga teórica do vertedor labirinto da PCH Alto Fêmeas pode ser obtida de acordo com a expressão (12), considerando o comprimento efetivo da crista calculado anteriormente e o coeficiente de descarga adimensional aproximado da crista ($C_{\text{aprox. (20º)}}$), conforme Figura 4.40. Para efeitos comparativos, a expressão (19), representa a expressão mais próxima do ângulo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento ($C (18º)$):

Tabela 5.13: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Tullis *et al.* (1995) – PCH Alto Fêmeas - BA

NA (m)	H (m)	H/P	C (18º)	$C_{\text{aprox. (20º)}}$	Q (m³/s)
619,45	0,25	0,05	0,54	0,55	24,12
619,70	0,50	0,09	0,58	0,59	73,18
619,95	0,75	0,14	0,60	0,62	141,27
620,20	1,00	0,18	0,62	0,64	224,52
620,45	1,25	0,23	0,62	0,64	313,78
620,70	1,50	0,27	0,62	0,65	418,91
620,95	1,75	0,32	0,61	0,65	527,89
621,20	2,00	0,36	0,60	0,64	635,04
621,45	2,25	0,41	0,59	0,63	745,91
621,70	2,50	0,45	0,57	0,62	859,76

A figura a seguir apresenta as curvas de descargas encontradas pelos dois métodos apresentados nas tabelas anteriores.

Figura 5.16: Curvas de descargas teóricas – PCH Alto Fêmeas - BA

Nota-se que o método de Magalhães (1983) não apresenta valores teóricos para vazões abaixo de 300 m³/s devido à relação de carga de projeto (H_t / P) apresentar valor abaixo de 0,2.

5.2.3 Avaliação do comportamento hidráulico do Vertedor Labirinto

Segundo a revisão bibliográfica do vertedor labirinto, apresentado anteriormente, as seguintes relações serão avaliadas:

l/w (ou m: taxa de ampliação):

O desenvolvimento total de um ciclo da soleira (l) foi de 39,6 m, e a taxa de ampliação é de 2,28 conforme cálculos anteriores.

Conforme apresentado no item 4.4.2, Magalhães (1983) afirma que para um escoamento não afogado, a taxa de ampliação deve respeitar o intervalo entre 1 e 8. O valor encontrado de 2,28 está dentro do intervalo proposto. A condição de afogamento será verificada posteriormente.

No mesmo item, Tullis (1994) relaciona esta taxa de ampliação com a redução rápida da eficácia de um vertedor labirinto à medida que a taxa de ampliação apresenta valor superior a 2,0 (Figura 4.46). Vale ressaltar que a relação entre a ampliação e o ângulo da parede lateral vai se encontrar abaixo desta curva para o labirinto trapezoidal.

H_t / P (relação de carga):

Uma das principais relações verificadas na revisão bibliográfica é a relação de carga H_t/P .

O valor encontrado de 0,11 está dentro do intervalo proposto para os diferentes métodos de trabalhos observados, com exceção do intervalo proposto e recomendado por Magalhães (1983), onde esta relação deve compreender o intervalo entre 0,2 e 0,6.

w / P (aspecto vertical)

Esta relação encontrada foi de $w/P = 3,16$. Conforme observado na revisão bibliográfica, para valores abaixo de 2,0 é recomendado realizar testes para definir o comportamento hidráulico da estrutura. Valores acima de 2,0 minimizam o efeito de interferência e oscilação da lâmina d'água.

$\alpha / \alpha_{\text{máx}}$

A relação do ângulo (α) formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento e a forma triangular para o qual α é máximo foi de $\alpha/\alpha_{\text{máx}} = 0,87$. De acordo com Magalhães (1983) esta relação deve ser maior ou igual a 0,8 para a utilização do ábaco da Figura 4.37.

Espessura da parede (t)

A espessura da parede encontrada para a PCH Alto Fêmeas foi de 0,50 m. Segundo Tullis *et al.* (1995) o valor ideal da espessura da parede (t) desta PCH seria de aproximadamente $P/6 = 0,92$. Com relação ao quadrante de montante (Figura 4.33),

este deve ter a forma aproximada de $R = P/12$. O valor de (R) para esta condição é de aproximadamente 0,46.

Conforme considerações anteriores, uma diminuição significativa na espessura da parede corresponderia a uma redução no raio de curvatura e a ocorrência da redução do coeficiente da crista. Porém, não foi possível determinar o raio do quadrante de montante do projeto original. Portanto, o valor do raio da aproximação existente poderá interferir no coeficiente da crista da Figura 4.40.

Carga de projeto

De acordo com as avaliações anteriores, o método de Tullis et al (1995) determinou a condição de carga máxima para as características geométricas encontradas para a vazão de projeto, segundo aproximação da equação da Figura 5.16.

Vale ressaltar que existe a condição do escoamento complexo provocado pelo vertedor lateral, que interfere no nível de jusante do canal de descarga da estrutura do vertedor labirinto, além da capacidade máxima da comporta segmento de fundo com abertura total (4,5 metros) que interfere no nível de jusante para as condições de vazões extremas do sistema extravasor (vertedor Labirinto, comporta segmento e vertedor lateral do canal).

Como afirma Tullis *et al.* (1995), a jusante do canal de restituição deve-se prever uma inclinação para evitar o afogamento ou até mesmo a submersão da crista para estruturas baixas. De acordo com as relações de escoamento submerso para o vertedor labirinto, apresentado por Tullis *et al.* (2007), não se verifica as relações de superposição submersa dos parâmetros de jusante e montante da Figura 4.42 para a estrutura da PCH Alto Fêmeas.

5.2.4 Condição Hipotética de submersão no canal de descarga – Método Tullis (2007)

A seguir será considerada uma condição hipotética de submersão no canal de descarga de acordo com o item 4.4.5 para comparações no comportamento da estrutura do vertedor labirinto da PCH Alto Fêmeas.

A vazão Q_{s1} da expressão (31) é o valor correspondente ao valor calculado sem o fator de submersão com condição de escoamento livre associado com a carga de projeto.

$$Q_{s1} = Q_{Sem Afogamento} = \frac{2}{3} \cdot 0,60 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 118,80 \cdot (0,60)^{3/2} = 97,83 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para a avaliação da submersão hipotética com o valor de H_t como a carga de projeto de 0,60 m, consideraram-se as características dos níveis da Figura 4.42, relações do gráfico sobre submersão da Figura 4.44 com a equação (32), de acordo com o intervalo proposto para a simulação do comportamento de submersão para H_d , ou seja, distância entre nível de jusante acima da crista do labirinto e a cota da crista do labirinto.

Logo após, calcularam-se as relações de H_d utilizando a expressão (31), com as 6 relações propostas de submersão do vertedor labirinto para a determinação da capacidade com essa estrutura submersa, conforme tabela a seguir.

Tabela 5.14: Relações hipotéticas - Cálculo de submersão da PCH Alto Fêmeas - BA

H_d	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
H_d/H_t	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00
H^*/H_t	1,006	1,022	1,051	1,092	1,145	1,213
H^*	0,603	0,613	0,631	0,655	0,687	0,728
Q_L/Q_{s1}	0,973	0,924	0,858	0,779	0,689	0,588
Q_L	95,23	90,37	83,94	76,21	67,36	57,49

O gráfico a seguir apresenta a vazão do labirinto submerso com apresentação das relações do gráfico proposto por Tullis et al (2007) de acordo com a Figura 4.45 para um ângulo de 20° formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento.

Figura 5.17: Vazão do labirinto submerso com ângulo de 20° - PCH Alto Fêmeas – BA

5.3 PCH SÍTIO GRANDE – BA

Este item abordará as curvas de descargas pelos métodos de dimensionamento hidráulico do vertedor labirinto, observados na revisão bibliográfica, além da avaliação da segurança da barragem de terra e verificação da estrutura de dissipação de energia, com suas particularidades de arranjo.

A PCH Sítio Grande situa-se no rio das Fêmeas, 10 km a jusante da PCH Alto Fêmeas, na bacia do Rio São Francisco (código DNAEE - 04), sub-bacia código DNAEE – 45, localizada no município de São Desidério, no estado da Bahia. O início de sua operação ocorreu no ano de 2010.

Tabela 5.15: Informações gerais da PCH Sítio Grande – BA (Fonte: Neoenergia 2011)

Área Contribuinte (km ²)	6.550,00
Altura aproximada do barramento (m)	40,00
Crista do barramento (m)	591,00
NA Normal Montante (m)	587,00
NA Jusante (Canal de Fuga) (m)	510,00
NA Jusante (Fim do Canal de Restituição) (m)	548,00
Cheia de projeto TR = 1.000 anos (m ³ /s)	200,00
Cheia TR = 100 anos (m ³ /s)	155,00
Potência Instalada - Outorgada e Fiscalizada (MW)	25,00
Proprietário	Grupo Neoenergia

5.3.1 Características gerais de arranjo e do sistema extravasor

O circuito de geração é do tipo derivação, com presença de um canal de concreto de 1.350 metros de extensão até a chaminé de equilíbrio, tomada d'água e 185 metros de condutos forçados até a chegada nas unidades geradoras.

O sistema extravasor é composto de vertedor do tipo labirinto trapezoidal, com restituição a jusante por meio de um canal até o leito rochoso do rio das Fêmeas, conforme Figura 4.27 apresentada anteriormente.

Devido à baixa vazão de projeto encontrada para a PCH Sítio Grande, com altura de 40 metros de barragem de terra e enrocamento, o projeto considerou a estrutura compacta de um ciclo de extravasor labirinto, posicionado na ombreira direita para se apoiar em rocha, seguido de um canal de descarga e bacia de dissipação até o leito do rio das Fêmeas. Deste modo reduziram-se as estruturas de concreto devido às condições topográficas, geológicas e hidrológicas favoráveis para este tipo de arranjo.

A Figura 5.18 apresenta as principais dimensões do desenvolvimento total do vertedor labirinto (1 ciclo).

*Medidas em metros

Figura 5.18: Planta do extravasor – PCH Sítio Grande (Fonte: adaptado Neoenergia 2011)

Tabela 5.16: Características do sistema extravasor da PCH Sítio Grande – BA (Fonte: Neoenergia 2011)

Característica	Vertedor Labirinto
Altura da estrutura (m)	6,40
Elevação da soleira (m)	587,0
Desenvolvimento Total da crista (m)	46,68
Largura Total do extravasor (m)	7,06

A seguir estão as características geométricas da figura anterior:

- Ângulo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento: $\alpha = 6^\circ$;
- Ângulo máximo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento: $\alpha_{\text{máx.}} = 10^\circ$ (vértice = 0);
- Tamanho total da parede lateral: $L_1 = 20,27$ m;
- Tamanho efetivo da parede lateral: $L_2 = 19,91$ m;
- Largura frontal do módulo da soleira: $w = 7,06$ m;
- Largura total frontal do vertedor labirinto: $W = 7,06$ m;
- Altura do vertedor labirinto trapezoidal: $P = 6,40$ m;
- Altura da onda trapezoidal em planta: $C = 19,87$ m;
- Vértice externo do labirinto trapezoidal: $D = 6,14$ m;
- Vértice interno do vertedor labirinto trapezoidal: $A = 2,8$ m;
- Espessura da parede (crista): $t = 1,0$ m
- Espessura da parede (base): $t = 2,0$ m

A figura a seguir apresenta a crista da estrutura do labirinto da PCH Sitio Grande com as principais dimensões e níveis operacionais de montante, necessários para a avaliação da capacidade extravasora da estrutura.

Figura 5.19: Corte da estrutura extravasora com representação dos níveis operacionais – PCH Sítio Grande –BA (Fonte: adaptado Neoenergia)

Com relação ao final do canal de descarga e a estrutura de dissipação de energia, o item 5.3.4 abordará as características da bacia de dissipação com a restituição no leito do rio.

5.3.2 Determinação das curvas de descargas teóricas do Vertedor Labirinto

Este item abordará a curva de descarga teórica do vertedor da PCH Sítio Grande de acordo com as considerações da revisão bibliográfica, para posteriores verificações e avaliações geométricas e hidráulicas.

A expressão (10) não representa o comprimento efetivo da crista existente para o caso da PCH Sítio Grande, pois o extravasor não é formado por um ciclo completo:

$$L_e = (2 \cdot N \cdot L_2) + A = (2 \cdot 1 \cdot 19,91) + 2,8 = 42,62 \text{ m}$$

A seguir serão verificadas as curvas de descarga do vertedor labirinto pelos métodos de Magalhães (1983) e Tullis *et al.* (1995).

Magalhães (1983)

A curva de descarga teórica pelo método de Magalhães (1983) segue a expressão (13), e o coeficiente de descarga adimensional aproximado da crista segue a Figura 4.37.

O desenvolvimento total do ciclo da soleira (l), ou seja, o comprimento efetivo calculado pela expressão anterior é de 42,62 m. Portanto, a relação l/w para a obtenção do coeficiente adimensional (μ) é dado por:

$$\frac{l}{w} = \frac{42,62}{7,06} = 6,04$$

Com a relação da expressão anterior, obtêm-se as cinco relações de (H / P) com os respectivos coeficientes de descarga.

Tabela 5.17: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Magalhães (1983) – PCH Sítio Grande - BA

H (m)	H / P	μ	Q (m ³ /s)
1,28	0,2	2,70	122,49
1,92	0,3	2,37	197,47
2,56	0,4	1,96	251,63
3,20	0,5	1,67	298,29
3,84	0,6	1,46	344,64

Tullis *et al.* (1995)

A curva de descarga teórica do vertedor labirinto da PCH Sítio Grande pode ser obtida de acordo com a expressão (12), considerando o comprimento efetivo da crista calculado anteriormente e o coeficiente de descarga adimensional da crista ($C_{\text{aprox. (6º)}}$), conforme Figura 4.40.

Tabela 5.18: Resultados teóricos e coeficientes de descarga - método de Tullis *et al.* (1995) – PCH Sítio Grande - BA

NA (m)	H (m)	H/P	C (6º)	Q (m ³ /s)
587,25	0,25	0,04	0,479	7,53
587,50	0,50	0,08	0,465	20,69
587,75	0,75	0,12	0,449	36,68
588,00	1,00	0,16	0,431	54,23
588,25	1,25	0,20	0,412	72,47
588,50	1,50	0,23	0,393	90,79
588,75	1,75	0,27	0,373	108,75
589,00	2,00	0,31	0,354	126,09
589,25	2,25	0,35	0,336	142,66
589,50	2,50	0,39	0,319	158,45

A figura a seguir apresenta as curvas de descargas encontradas pelos dois métodos apresentados nas tabelas anteriores.

Figura 5.20: Curvas de descargas teóricas – PCH Sítio Grande - BA

De acordo com o método de Tullis *et al.* (1995) para a vazão de projeto temos:

$$H = 0,0148 \cdot Q + 0,1725 = 3,13 \text{ m}$$

De acordo com o valor encontrado de 3,13 m de carga de projeto, tem-se o valor de 0,87 metros de borda livre até a crista das estruturas.

Para a mesma capacidade de vazão de projeto, o método de Magalhães (1983) apresenta valor teórico de carga de aproximadamente 1,94m. O item seguinte apresenta as comparações, avaliações e considerações dos dois métodos e as características principais desta diferença.

5.3.3 Avaliação do comportamento hidráulico do Vertedor Labirinto

Segundo a revisão bibliográfica do vertedor labirinto, apresentado anteriormente, as seguintes relações serão avaliadas:

I/w (ou m: taxa de ampliação):

O desenvolvimento total do ciclo da soleira (I) foi de 42,62 m, e a taxa de ampliação é de 6,04, conforme cálculos anteriores.

Conforme apresentado no item 4.4.2, Magalhães (1983) afirma que para um escoamento não afogado, a taxa de ampliação deve respeitar o intervalo entre 1 e 8. O valor encontrado está dentro do intervalo proposto. Não se verifica a condição de afogamento para o extravasor.

No mesmo item, Tullis (1994) relaciona esta taxa de ampliação com a redução rápida da eficácia de um vertedor labirinto à medida que a taxa de ampliação apresenta valor superior a 2,0 (Figura 4.46). Vale ressaltar que a relação entre a ampliação e o ângulo da parede lateral vai se encontrar abaixo desta curva para o labirinto trapezoidal. Deste modo nota-se a redução rápida da eficácia para este extravasor labirinto.

H_t / P (relação de carga):

Uma das principais relações verificadas na revisão bibliográfica é a relação de carga H_t/P .

O valor encontrado de 0,49 está dentro do intervalo proposto para os diferentes métodos de trabalhos observados. O extravasor do presente estudo de caso segue a recomendação de Falvey (2003 *apud* Lux, 1989), onde a relação de carga máxima deve estar na faixa de 0,45 e 0,50

w / P (aspecto vertical)

Esta relação encontrada foi de $w/P = 1,10$. Conforme observado na revisão bibliográfica, para valores abaixo de 2,0 é recomendado realizar testes para definir o comportamento hidráulico da estrutura. Valores acima de 2,0 minimizam o efeito de interferência e oscilação da lâmina d'água. O valor encontrado encontra-se abaixo da proposta do método de Magalhães.

$\alpha / \alpha_{\text{máx}}$

A relação do ângulo (α) formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento e a forma triangular para o qual α é máximo foi de $\alpha/\alpha_{\text{máx}} = 0,60$. De acordo com Magalhães (1983) esta relação deve ser maior ou igual a 0,8 para a utilização do ábaco da Figura 4.37.

Espessura da parede (t)

A espessura da parede encontrada para a PCH Sítio Grande varia de 1,0 m na crista da estrutura labirinto e 2,0 m para a base desta estrutura. Segundo Tullis *et al.* (1995) o valor ideal da espessura da parede (t) desta PCH seria de aproximadamente $P/6 = 1,07$. Com relação ao quadrante de montante (Figura 4.33), este deve ter a forma aproximada de $R = P/12$. O valor de (R) para esta condição é de aproximadamente 0,53.

Conforme considerações anteriores, uma diminuição significativa na espessura da parede corresponderia a uma redução no raio de curvatura e a ocorrência da redução do coeficiente da crista. O raio do quadrante de montante do projeto original é de 0,50 m. Portanto, o valor do raio da aproximação existente encontra-se próximo do valor ideal para a determinação do coeficiente da crista da Figura 4.40.

Carga de projeto

De acordo com as avaliações anteriores, o método de Tullis *et al.* (1995) determinou a condição de carga máxima para as características geométricas encontradas para a vazão de projeto, segundo aproximação da equação da Figura 5.20. O método de Magalhães (1983) foi descartado em virtude dos valores do aspecto vertical e da relação dos ângulos encontrarem-se fora do intervalo proposto pelo autor.

5.3.4 Avaliação do canal de descarga e dissipação de energia

Este item segue as considerações sobre dissipação de energia segundo o item 4.5. A cheia utilizada para o dimensionamento da PCH Sítio Grande foi a cheia referente ao período de retorno de 100 anos ($155,00 \text{ m}^3/\text{s}$). Considerando a equação teórica

da curva de descarga encontrada pelo método de Tullis (ver Figura 5.20), tem-se a carga sobre a soleira:

$$H = 0,0148 \cdot (155,00) + 0,1725 = 2,5 \text{ m}$$

Do início do canal de descarga até o término da bacia de dissipação, com o trecho de enrocamento, soma-se uma distância aproximada de 170 m.

Tabela 5.19: Dados geométricos para dimensionamento da bacia de dissipação - PCH Sítio Grande

NA Montante (m)	589,50
Cota Crista (m)	587,00
Cota do Leito (m)	550,00
NA Jusante (m)	551,50
Vazão 100 anos (m ³ /s)	155,00
L _d (Largura do Dissipador) (m)	14,00
Z = NA mont.-Cota Leito (m)	39,50

Vale ressaltar que a jusante da largura total frontal ao escoamento do ciclo da soleira do vertedor labirinto, existe uma transição, após 60 metros do início do canal de descarga ($W = 7,06 \text{ m}$) para a largura do dissipador ($L_d = 14,00 \text{ m}$).

A vazão específica é determinada pela expressão (38):

$$q = \frac{\text{Vazão de Projeto (TR = 100 anos)}}{\text{Largura do Dissipador}} = \frac{155,00}{14,00} = 11,07 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

A velocidade V_1 , no fim do canal de descarga (início da bacia de dissipação) é dada pela expressão (39):

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \left(39,50 - \left(\frac{589,5 - 587,00}{2} \right) \right)} = 27,39 \text{ m/s}$$

A altura y_1 do ressalto hidráulico é dada pela expressão (40):

$$y_1 = \frac{q}{V_1} = \frac{11,07}{27,39} = 0,40 \text{ m}$$

Com a vazão centenária e largura do dissipador, calcula-se o número de Froude expressão (36) e a altura y_2 expressão (41), que é a profundidade conjugada fluvial do ressalto hidráulico.

$$F_r = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot y_1}} = \frac{27,39}{\sqrt{9,81 \cdot 0,40}} = 13,76$$

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot F_1^2} - 1 \right) = \frac{0,40}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot 13,76^2} - 1 \right) = 7,66 \text{ m}$$

De acordo com o item 4.5, encontra-se a cota de fundo da bacia de dissipação através de iterações até o valor de y_2 se igualar com a lâmina d'água existente para a vazão de projeto na zona da restituição. Este procedimento é necessário para o dimensionamento da bacia de dissipação.

1ª Iteração

$$\text{Cota de Fundo} = \text{NA jusante} - y_2 = 551,50 - 7,66 = 543,84 \text{ m}$$

$$Z_1 = \text{NA Montante} - \text{Cota de Fundo} = 589,50 - 543,84 = 45,66 \text{ m}$$

$$V_1' = \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(Z_1 - \left(\frac{NA_{\text{mont}} - \text{Cota Crista}}{2} \right) \right)} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \left(45,66 - \left(\frac{589,50 - 587,00}{2} \right) \right)} \\ = 29,52 \text{ m/s}$$

$$y_1' = \frac{q}{v_1'} = \frac{11,07}{29,52} = 0,38 \text{ m}$$

$$F_1' = \frac{V_1'}{\sqrt{g \cdot y_1'}} = \frac{29,52}{\sqrt{9,81 \cdot 0,38}} = 15,39$$

$$y_2' = \frac{y_1'}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot F_1'^2} - 1 \right) = \frac{0,38}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot 15,39^2} - 1 \right) = 7,98 \text{ m}$$

A tabela a seguir apresenta as iterações da mesma forma da 1ª iteração anterior.

Tabela 5.20: Iterações bacia de dissipação – PCH Sítio Grande - BA

	1º iteração	2º iteração	3º iteração	4º iteração
NA _{jusante} - y ₂	543,84	543,52	543,51	543,51
Z ₁	45,66	45,98	45,99	45,99
V ₁ '	29,52	29,62	29,63	29,63
y ₁ '	0,38	0,37	0,37	0,37
F ₁ '	15,39	15,47	15,47	15,48
y ₂ '	7,98	7,99	7,99	7,99

Os valores destacados em vermelho da tabela anterior representam a convergência para o valor 543,51 m referente a cota do fundo da bacia.

O esquema a seguir apresenta os dados encontrados de acordo com os cálculos anteriores e com os dados geométricos do projeto original da PCH Sítio Grande.

*Medidas em metros

Figura 5.21: Verificação da bacia de dissipação - PCH Sítio Grande (Fonte: adaptado Neoenergia)

Observa-se na Figura 4.27 (Foto B), ao final do muro da bacia de dissipação (elevação 554,00), que existe uma abertura para a passagem da água, antes da chegada da proteção com enrocamento. A figura a seguir apresenta a posição do muro observada na época da construção do empreendimento.

Figura 5.22: Construção da PCH Sítio Grande – BA (Imagem de satélite Google Earth. Acesso em 22/06/2010)

De acordo com a expressão (37), obtém-se o valor inicial do comprimento do ressalto hidráulico.

$$L_y = (y_2 - y_1) \cdot 10,8 \cdot F_r^{-0,38} = (7,99 - 0,37) \cdot 10,8 \cdot 15,48^{-0,38} = 29,06 \text{ m}$$

O comprimento da bacia de dissipação apresenta comprimento acima do valor inicial calculado na expressão acima, de acordo com Schreiber (1977). A elevação do muro na cota 544,00 m é suficiente para a altura y_2 expressão (41), que é a profundidade conjugada fluvial do ressalto hidráulico.

5.4 PCH SETE QUEDAS – MT

Este item abordará as curvas de descargas das comportas Flaps e das alternativas desenvolvidas do vertedor labirinto, com comparações de custos e considerações do comportamento hidráulico de ambas as estruturas extravasoras.

A PCH Sete Quedas situa-se no rio Ibó, na bacia do Rio Paraná (Código DNAEE - 06), Sub - Bacia do Rio Alto Paraguai (66), município de Juscimeira no estado de Mato Grosso.

De acordo com o Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL), grande parcela da bacia hidrográfica contribuinte da PCH Sete Quedas apresenta formação em arenito, favorecendo o amortecimento das vazões com redução dos picos de cheias.

Tabela 5.21: Informações gerais da PCH Sete Quedas – MT (Fonte:S.A. Paulista 2011)

Estágio	Operação
Área Contribuinte (km ²)	392,00
Vazão de projeto TR 1.000 anos (m ³ /s)	120,00
Vazão de verificação das estruturas TR 10.000 anos (m ³ /s)	180,00
Largura do vertedor Creager (m)	17,00
Elevação da crista das estruturas (m)	368,00
NA máximo maximorum (m)	366,50
NA Normal Montante (m)	365,00
Elevação da soleira Creager (m)	364,00
NA Jusante (Canal de Fuga) (m)	208,00
NA Jusante (Fim da Bacia de Dissipação) (m)	354,00
Potência Instalada (MW)	22,00
Proprietário	Ibó Energética Ltda

5.4.1 Características gerais de arranjo e do sistema extravasor

O circuito de geração é do tipo derivação, com a estrutura de tomada d'água compondo o barramento e a adução é feita por meio de canal. O sistema extravasor é composto de vertedor Creager com comportas Flaps (Figura 4.22). A dissipação de energia é realizada por meio de uma bacia curta de 23 metros de extensão, com restituição a jusante na cota 354m.

A seguir são apresentadas as principais características do sistema extravasor com esquemas de planta e detalhes das comportas Flaps e perfil da crista do vertedor Creager.

A Figura 5.23 apresenta as principais dimensões do vertedor Creager, com a indicação da comporta do tipo Flap no topo da crista da PCH Sete Quedas.

*Medidas em metros

Figura 5.23: Corte da estrutura extravasora – PCH Sete Quedas – MT (Fonte: adaptado S.A. Paulista, 2011)

5.4.2 Acionamento das Comportas FLAPS – PCH Sete Quedas – MT

De acordo com a especificação das comportas do tipo Flap, apresentadas na Figura 4.23, os contra pesos são fixados na base da estrutura metálica para funcionarem em conjuntos distintos, ou seja, quando ocorrer o desequilíbrio com a carga acima do nível normal no topo da estrutura metálica, ocorrerá o tombamento das comportas para cada conjunto com pesos diferentes.

A abertura das comportas funcionará da seguinte forma:

- Primeiro grupo de comportas: NA 365,10 m;
- Segundo grupo de comportas: NA 365,20 m;
- Terceiro grupo de comportas: NA 365,30 m;
- Quarto grupo de comportas: NA 365,40 m.

A partir do quarto grupo de comportas, todas as nove comportas serão ativadas por desequilíbrios e permanecerão tombadas (Figura 4.23 b) com o nível acima de

365,40 m. A figura a seguir mostra a vista de montante do conjunto com as estruturas metálicas no topo da crista do perfil Creager.

*Medidas em metros

Figura 5.24: Planta das Comportas Flaps – PCH Sete Quedas – MT (Fonte: Adaptado S.A. Paulista, 2011)

Na sequência das análises, os itens a seguir apresentam os quatro tipos de escoamentos observados para a determinação da curva de descarga do vertedor da PCH Sete Quedas, de acordo com as considerações do item 4.1.6.

5.4.3 Escoamento semelhante à parede delgada – Comporta FLAP

Para o início da verificação da curva de descarga da estrutura estravasora da PCH Sete Quedas, observa-se inicialmente o escoamento semelhante à parede delgada. De acordo com o gráfico a seguir, apresentam-se pontos da fórmula de Francis (vazão por metro linear de soleira) para vertedores retangulares em paredes delgadas de acordo com Netto *et al.* (1998), semelhantes as comportas do tipo Flap.

Figura 5.25: Pontos da fórmula de Francis para vertedor de parede delgada - Fonte: Netto *et al.* (1998)

5.4.4 Escoamento semelhante à parede espessa – Comporta FLAP

Logo após o tombamento da comporta, observa-se o escoamento semelhante a parede espessa, acima desta estrutura metálica. Consideraram-se as observações do item 4.1, referentes à parede espessa, isto é, a altura da comporta deve apresentar valores maiores que 2/3 da carga acima da estrutura metálica tombada, isto é:

$$e > \frac{2}{3} \cdot h$$

Onde:

e = altura da comporta (quando tombada) = 1,0 m;

h = carga sobre a comporta tombada.

Logo, o contato do escoamento deve ocorrer para alturas menores que:

$$h < 0,667$$

Como afirma Netto *et al.* (1998), para esta condição utiliza-se a expressão (3) com coeficiente de descarga $C_0 = 1,71 \text{ (m}^{0,5}\text{/s)}$, para cargas sobre as comportas tombadas inferiores a 0,667 m.

$$Q = 1,71 \cdot L \cdot H^{3/2}$$

5.4.5 Escoamento semelhante ao Orifício – Comporta Flap

Abaixo da comporta tombada, verifica-se o escoamento semelhante a um orifício. De acordo com a expressão (8), obtém-se a parcela vertida sob a estrutura metálica.

Vale ressaltar que esta parcela sempre ocorrerá para cargas superiores a 365,40 m referentes ao último acionamento do quarto grupo de comportas, ou seja, para valores entre 365,40 m e 366,50 m todas as comportas estarão vertendo abaixo da comporta tombada.

5.4.6 Escoamento semelhante à Soleira livre – Comporta Flap

Acima da comporta tombada, nas elevações entre 364,50 m e 366,50 m verifica-se o escoamento semelhante à soleira livre. De acordo com a expressão (3), e os diferentes coeficientes corretivos da Figura 4.24 relacionados às diferentes cargas, obtém-se a parcela vertida sob o escoamento na soleira livre.

Na sequência das análises, a figura a seguir apresenta os quatro tipos de escoamentos observados para a determinação da curva de descarga do vertedor da PCH Sete Quedas.

Figura 5.26: Tipos de escoamentos observados na PCH Sete Quedas - MT

5.4.7 Determinação da curva de descarga teórica – Comportas FLAPS

A seguir serão verificadas as curvas de descarga do vertedor Creager com as comportas Flaps instaladas na PCH Sete Quedas.

A tabela a seguir apresenta as vazões vertidas a cada centímetro da soleira do tipo Creager de acordo com as considerações dos escoamentos observados nos itens anteriores.

Tabela 5.22: Vazões vertidas a cada centímetro – PCH Sete Quedas - MT

NA (m)	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
365,00	0,00	1,55	1,57	1,60	1,62	1,65	1,68	1,71	1,75	1,78
365,10	5,97	8,22	8,36	8,49	8,63	8,77	8,91	9,06	9,20	9,35
365,20	14,76	17,76	18,01	18,27	18,54	18,80	19,06	19,33	19,60	19,87
365,30	29,71	32,90	33,30	33,71	34,11	34,52	34,93	35,34	35,75	36,17
365,40	46,51	47,10	47,69	48,28	48,88	49,47	50,08	50,68	51,29	51,90
365,50	52,52	53,14	53,76	54,38	55,01	55,64	56,28	56,92	57,56	58,21
365,60	58,85	59,50	60,16	60,82	61,48	62,14	62,81	63,48	64,16	64,83
365,70	65,51	66,20	66,88	67,57	68,27	68,96	69,66	70,37	71,07	71,78
365,80	72,49	73,21	73,92	74,65	75,37	76,10	76,83	77,56	78,30	79,04
365,90	79,78	80,52	81,27	82,02	82,78	83,54	84,30	85,06	85,83	86,60
366,00	87,37	88,14	88,92	89,70	90,49	91,27	92,06	92,85	93,65	94,45
366,10	95,25	96,05	96,86	97,67	98,48	99,30	100,12	100,94	101,76	102,59
366,20	103,42	104,25	105,08	105,92	106,76	107,60	108,45	109,30	110,15	111,00
366,30	111,86	112,72	113,58	114,45	115,31	116,18	117,06	117,93	118,81	119,69
366,40	120,57	121,46	122,34	123,24	124,13	125,02	125,92	126,82	127,73	128,63
366,50	129,54	130,45	131,36	132,28	133,20	134,12	135,04	135,97	136,89	137,82
366,60	138,76	139,69	140,63	141,57	142,51	143,46	144,40	145,35	146,30	147,26
366,70	148,21	149,17	150,13	151,09	152,06	153,03	154,00	154,97	155,94	156,92
366,80	157,89	158,88	159,86	160,84	161,83	162,82	163,81	164,80	165,80	166,80
366,90	167,79	168,80	169,80	170,81	171,81	172,82	173,83	174,85	175,86	176,88
367,00	177,90	178,92	179,95	180,97	182,00	183,03	184,06	185,09	186,13	187,16
367,10	188,20	189,24	190,28	191,33	192,37	193,42	194,47	195,52	196,58	197,63
367,20	198,69	199,74	200,80	201,87	202,93	203,99	205,06	206,13	207,20	208,27
367,30	209,34	210,42	211,49	212,57	213,65	214,73	215,81	216,90	217,98	219,07

NA (m)	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
367,40	220,16	221,25	222,34	223,43	224,52	225,62	226,72	227,81	228,91	230,01
367,50	231,12	232,22	233,32	234,43	235,54	236,65	237,76	238,87	239,98	241,09
367,60	242,21	243,33	244,44	245,56	246,68	247,80	248,92	250,05	251,17	252,30
367,70	253,42	254,55	255,68	256,81	257,94	259,07	260,20	261,34	262,47	263,61
367,80	264,74	265,88	267,02	268,16	269,30	270,44	271,58	272,72	273,87	275,01
367,90	276,16	277,30	278,45	279,60	280,75	281,89	283,04	284,19	285,35	286,50
368,00	287,65	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Para efeitos comparativos, o gráfico a seguir apresenta os pontos da tabela anterior com a influência das comportas Flaps na soleira Creager, e os pontos na soleira livre na cota 364,00 m, sem as comportas Flaps.

Figura 5.27: Curva de Descarga Total – PCH Sete Quedas - MT

Nota-se que para a carga de projeto na cota 366,50 m a soleira com a influência das comportas flaps apresenta uma redução de cerca de 13 % quando comparado à soleira livre sem comportas.

5.4.8 Alternativas com vertedor labirinto

Este item apresenta alternativas referentes ao número de ciclos, geometria do desenvolvimento da crista do vertedor labirinto e larguras frontais (W) maiores que a largura existente da PCH Sete Quedas, ou seja, distância entre os muros que limitam lateralmente a soleira do vertedor labirinto.

A largura frontal deverá ser superior a largura existente da PCH Sete Quedas, visto que, o cálculo da capacidade de projeto para a mesma largura e com menor carga proporcionada pela estrutura labirinto ($H_0 = 1,5\text{m}$), quando comparada à carga da comporta Flap ($H_0 = 2,5\text{m}$), apresenta valores abaixo da capacidade de projeto. Na sequência dos cálculos, observa-se que a capacidade para a carga de 1,50 m, e desenvolvimento das alternativas do labirinto, apresentam valores superiores à largura frontal existente de 17,0 m.

Para esta avaliação, é necessário alterar a seção transversal da estrutura do perfil Creager, pois somente com a substituição das comportas Flaps pela estrutura do labirinto (altura de 1,0 m), observa-se que a relação de carga (H_0 / P) seria igual a 1,5. Conforme revisão bibliográfica, item 4.4.6, esta relação deve permanecer no valor máximo de 0,9. Logo, para este limite, temos o valor definido para a altura da estrutura labirinto de 1,7m.

Porém, para esta altura de estrutura, obtém-se apenas 3,1 m de onda trapezoidal (c). Decidiu-se deste modo, aumentar a altura da estrutura do labirinto para 3,0 m, obtendo-se desta forma o valor de 4,16 m de onda trapezoidal acima da ogiva do perfil Creager gerado para a carga de 1,5 m, conforme figura a seguir. Na mesma figura, obteve-se o perfil da estrutura do extravasor labirinto e os parâmetros de raios e espessura da parede, de acordo com o perfil WES da Figura 4.35.

Figura 5.28: Perfis Creager e labirinto gerados para carga de 1,5 metros - alternativas labirinto PCH Sete Quedas-MT

Salienta-se que não foi verificada a estabilidade da estrutura com relação ao tombamento e flutuação para a opção de redução de 2,00m na altura da ogiva do perfil Creager do projeto original. Caso necessário, para efeitos de verificação da estabilidade, deve-se obter um maior acréscimo do volume da estrutura da ogiva, acréscimo este que deverá ser proporcionado pelo aumento da inclinação do paramento de montante ou pelo acréscimo da fundação da base da ogiva.

As figuras das alternativas a seguir mostram o desenvolvimento do vertedor labirinto representado por cada uma das 2 alternativas desenvolvidas no presente item, com variação de ciclos e ângulos formados pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento. No detalhe das figuras são apresentadas as dimensões em metros e os ângulos máximos simulados para o labirinto triangular de um ciclo. Após o detalhe da geometria serão verificadas as relações características do vertedor labirinto, e por fim elaboradas as curvas de descargas das alternativas.

Alternativa 1**2 ciclos e ângulo de 35°** ***Medidas em metros**

Figura 5.29: Planta do vertedor labirinto – alternativa 1 com 3 ciclos e ângulo de 35° - PCH Sete Quedas - MT

Alternativa 2

3 ciclos e ângulo de 25°

*Medidas em metros

Figura 5.30: Planta do vertedor labirinto – alternativa 2 com 03 ciclos e ângulo de 25°
- PCH Sete Quedas - MT

Alternativa 3

4 ciclos e ângulo de 8º

*Medidas em metros

Figura 5.31: Planta do vertedor labirinto – alternativa 3 com 04 ciclos e ângulo de 8º - PCH Sete Quedas - MT

Resultados das alternativas

As tabelas a seguir apresentam os parâmetros, relação de carga fixa, comprimentos efetivos e aspectos dos resultados das alternativas da PCH Sete Quedas.

Tabela 5.23: Parâmetros e relação de carga fixa das alternativas – PCH Sete Quedas – MT

Altura do vertedor labirinto	P (m)	3,0
Altura da onda trapezoidal	c (m)	4,16
Carga de projeto	H_t (m)	1,50
Espessura da parede	t (m)	0,50
Relação de carga	H_t / P	0,50

Tabela 5.24: Resultados das alternativas do vertedor labirinto – PCH Sete Quedas – MT

Alternativa		1	2	3
Número de ciclos	n	2	3	4
Ângulo	α (°)	35	25	08
Ângulo máximo (triangular)	α máximo (°)	50	35	31
Desenvolvimento de 1 ciclo	l (m)	15,42	11,12	13,28
Largura frontal de 1 ciclo	w (m)	12,65	7,73	8,66
Largura Frontal Total	W (m)	25,29	23,19	34,63
Comprimento efetivo da crista	L_e (m)	30,83	33,36	53,13
Comprimento total da crista	L_t (m)	32,92	37,20	57,92
Taxa de ampliação	$m = l / w$	1,22	1,44	1,53
Aspecto vertical	w / P	4,22	2,58	2,89
Relação de ângulos	$\alpha / \alpha_{\text{máx}}$	0,70	0,71	0,26
Vazão com a carga de projeto	Q_{calc} (m ³ /s)	119,84	119,97	120,07

5.4.9 Curvas de descargas – Vertedor Labirinto e Comportas Flaps

As curvas de descargas das alternativas a seguir apresentam os resultados teóricos de acordo com os cálculos dos parâmetros e relações encontradas pelo método de

Tullis *et al.* (1995). O método de Magalhães (1983) se distancia dos valores encontrados pelo método de Tullis principalmente na alternativa 3, onde a relação de ângulos ($\alpha / \alpha_{\text{máx}}$) apresenta valor significativo abaixo do recomendado. Como afirma Magalhães (1983), para a utilização do ábaco da Figura 4.37 é necessária a condição de valores inferiores a 0,80 para esta relação.

A curva de descarga da PCH Sete Quedas é a mesma obtida anteriormente (Figura 5.27).

Figura 5.32: Curvas de descargas método de Tullis *et al.* (1995) – alternativas PCH Sete Quedas – MT

Observa-se que o dimensionamento realizado para as três alternativas do vertedor labirinto resultam, para a mesma carga de projeto, em valores próximos da capacidade de vazão de projeto (120,00 m³/s). A capacidade para a carga de projeto, de acordo com o cálculo da curva de descarga da PCH Sete Quedas, apresenta valor superior a 8% com relação à vazão de projeto.

Nota-se que a alternativa 3 com maior desenvolvimento efetivo da crista, apresenta perda de eficiência notável a partir da carga de projeto sobre a crista. De acordo com o item 4.4.6, os valores de taxa de ampliação e aspecto vertical encontram-se na

faixa dos valores recomendados para não reduzir a eficácia e não ocorrer o efeito de interferência da lâmina d'água para a condição de projeto. Observa-se no gráfico a seguir, a diferença notável entre os métodos de obtenção das curvas de descargas. Verificou-se na alternativa 3, a maior diferença entre os métodos observados entre as alternativas desenvolvidas de vertedor labirinto.

Figura 5.33: Métodos de curva de descarga vertedor labirinto – Alternativa 3 PCH Sete Quedas - MT

Nota-se um comportamento semelhante para a alternativa 3 da PCH Figueirópolis – MT (Figura 5.10), sendo que os valores de taxa de ampliação e aspecto vertical encontram-se fora da faixa dos valores recomendados, conforme explicado anteriormente. Além disso, nota-se também que a relação de ângulos ($\alpha / \alpha_{\text{máx}}$) apresenta valor abaixo do recomendado Tabela 5.5.

Segundo gráfico da Figura 4.40, verifica-se que a alternativa 1 apresenta coeficiente de vazão superior às demais alternativas devido ao maior ângulo formado pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento. Porém o comprimento total efetivo apresenta o menor valor das alternativas, o que resulta na menor capacidade de vazão, quando comparada com a alternativa 2 e principalmente com a geometria do vertedor labirinto da alternativa 3.

Por fim, a alternativa 2 da PCH Sete Quedas, apresentou resultados muito próximos da curva de descarga da alternativa 1, principalmente para a condições superiores de projeto.

5.4.10 Quantitativos civis das alternativas Extravasoras

Adotaram-se os mesmos custos unitários apresentados anteriormente para a PCH Figueirópolis – MT (Tabela 5.7). Salienta-se que o projeto original existente apresenta largura frontal do vertedor de 17,0 m, e fechamento de barragem de terra na margem direita de aproximadamente 110,0 m.

Figura 5.34: Comportas Flaps sem os contra pesos - PCH Sete Quedas – MT
Foto acessada em 09/08/2011: <http://www.sapaulista.com.br/area.barr.php>

Tabela 5.25: Resumo dos quantitativos e custos das alternativas do Vertedor Labirinto – PCH Sete Quedas - MT

Discriminação	Unidade	Vertedor labirinto – Alternativa 01		Vertedor labirinto – Alternativa 02	
		Quantidade	Custo Total	Quantidade	Custo Total
Largura Frontal	m	25,29	---	23,19	---
Cimento	t	234,55	98.509,65	217,80	91.476,11
Concreto sem Cimento (convencional)	m ³	572,47	137.393,63	535,86	128.605,23

Discriminação	Unidade	Vertedor labirinto – Alternativa 01		Vertedor labirinto – Alternativa 02	
		Quantidade	Custo Total	Quantidade	Custo Total
Concreto sem Cimento (Massa)	m³	1.142,86	205.713,92	1.047,96	188.632,10
Armadura	t	5,72	34.348,41	5,36	32.151,31
Fechamento com barragem de terra e enrocamento	m	101,71	---	103,81	---
Aterro compactado	m³	32.786,76	262.294,06	33.463,70	267.709,63
Enrocamento	m³	25.528,09	331.865,19	26.055,17	338.717,19
Total	(R\$)	---	1.070.124,85	---	1.047.291,57

Tabela 5.26: Resumo dos quantitativos e custos das alternativas Vertedor Creager com comportas Flaps e sem comportas Flaps – PCH Sete Quedas - MT

Discriminação	Unidade	Perfil Creager sem comportas (Soleira = 365,00)		Perfil Creager com comportas (Soleira = 364,00)	
		Quantidade	Custo Total	Quantidade	Custo Total
Largura Frontal	m	30,00	---	17,00	---
Cimento	t	292,61	122.894,15	163,40	68.629,53
Concreto sem Cimento (convencional)	m³	675,55	162.132,48	388,38	93.211,27

Discriminação	Unidade	Perfil Creager sem comportas (Soleira = 365,00)		Perfil Creager com comportas (Soleira = 364,00)	
		Quantidade	Custo Total	Quantidade	Custo Total
Concreto sem Cimento (Massa)	m³	1.546,46	278.363,52	828,86	149.194,28
Armadura	t	6,76	40.533,12	3,88	23.302,82
Comportas FLAP	m	---	----	17,00	5.950,00
Fechamento com barragem de terra e enrocamento	m	97,00	---	110,00	---
Aterro compactado	m³	31.268,46	250.147,71	35.459,08	283.672,66
Enrocamento	m³	24.345,93	316.497,13	27.608,79	358.914,27
Total	(R\$)	---	1.170.568,11	---	982.874,83

De acordo com os resultados obtidos, o vertedor Creager com comportas Flaps apresentou melhores benefícios econômicos, seguido das alternativas 2 e 1 do vertedor Labirinto / Creager respectivamente. A alternativa com perfil Creager no NA normal 365,00 apresentou maiores custos das soluções extravasoras avaliadas.

Vale ressaltar que os custos do fechamento com barragem de terra e enrocamento não consideraram as transições / filtros, proteção do talude de montante (enrocamento), proteção do talude de jusante (grama) e limpeza e tratamento de fundação, pois estes custos não impactariam na escolha das alternativas considerando somente os benefícios econômicos, visto que a diferença de custos das alternativas para estas considerações, são baixas com relação à diferença da extensão total do barramento entre os alternativas.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Verificaram-se através da revisão bibliográfica, os critérios de dimensionamento hidráulico dos diversos tipos de extravasores a fio d'água, principalmente do extravasor labirinto do tipo trapezoidal. Apresentaram-se os trabalhos pioneiros, clássicos já consagrados, trabalhos modernos e casos especiais deste tipo de extravasor, com característica principal de fornecer o comprimento adicional da crista em planta.

As orientações gerais para a seleção dos parâmetros através das relações hidráulicas do extravasor labirinto, foram importantes para o desenvolvimento dos estudos de caso, com características extravasoras particulares, envolvendo os diversos aspectos do sistema extravasor.

Os quatro estudos de caso apresentaram características hidrológicas similares com relação aos comportamentos de cheias, com presenças de arenitos nas bacias hidrográficas contribuintes, favorecendo o amortecimento das vazões com redução dos picos de cheias, ideal para a estrutura de controle do tipo labirinto. As vazões encontradas para as PCH's Figueirópolis e Sete Quedas no estado do Mato Grosso possuem valores compatíveis com as cheias em bacias de arenito similares em outras regiões. Porém, as vazões específicas de cheias, para o período de retorno de 1.000 anos, encontradas para as PCH's Alto Fêmeas e Sítio Grande no estado da Bahia são extremamente baixas, cerca de 30 L/s/km^2 .

A principal característica observada no extravasor labirinto, é a redução da eficiência à medida que a carga aumenta. Principalmente no estudo de caso da PCH Sítio Grande-BA, onde se observa uma carga de projeto elevada de cerca de 3 metros, segundo cálculos teóricos efetuados no presente trabalho. O valor de borda livre encontrado até o coroamento da barragem de terra é de aproximadamente 0,9 metros, observado para este estudo de caso. Esta situação pode se tornar o principal fator crítico de segurança da barragem de terra de 40 metros de altura.

Foram verificadas as espessuras de paredes do vertedor labirinto de acordo com a bibliografia, além da consideração sobre a aproximação do quadrante de montante do perfil hidráulico da crista, observados nos projetos originais dos estudos de caso e nas alternativas do labirinto com cálculos de perfis das cristas desenvolvidas.

Com relação ao fator de afogamento (submersão) em estruturas baixas do vertedor labirinto, como por exemplo, o estudo de caso envolvendo a PCH Alto Fêmeas-BA, observou-se o comportamento crítico da vazão do labirinto submerso com apresentação das relações do gráfico proposto por Tullis *et al.* (2007). Esta condição hipotética de submersão pode se tornar ainda mais crítico com o aumento da relação entre vazão e o comprimento vertente ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$), principalmente para valores acima da capacidade de projeto desta estrutura hidráulica.

Outro fator importante a ser avaliado em estruturas do tipo labirinto é a condução das cheias para o dimensionamento da estrutura de bacia de dissipação de energia, como verificado para o estudo de caso da PCH Sítio Grande-BA.

Comparado a um extravasor linear frontal, o extravasor labirinto ocupa uma largura menor de dissipador de energia, dada pela distância entre os muros laterais que limitam o extravasor, e deve-se tomar o cuidado no dimensionamento e na verificação da condução, dissipação e no canal de restituição, pois a vazão por metro linear do dissipador ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) tende a aumentar significativamente para o tipo de estrutura de controle labirinto, e dependendo do caso, até mesmo inviabilizar economicamente esta estrutura devido ao alto custo do dissipador de energia.

Portanto, a escolha deste tipo de estrutura leva em consideração não somente os fatores de benefícios econômicos entre alternativas, mas a relação hidráulica referente a um evento extremo de cheia ou até mesmo a verificação da redução da eficácia, conforme alternativas observadas nas PCH's Figueirópolis-MT e Sete Quedas-MT, que apresentaram perda de eficiência em ângulos baixos.

Com relação às alternativas propostas do vertedor labirinto com ângulos de 6° e 8° formados pelas paredes laterais e a direção principal do escoamento, verificou-se que quando não é respeitada a relação de ângulos e a condição de taxa de ampliação, observadas na literatura, pode ocorrer a redução da eficiência da capacidade da estrutura rapidamente. A relação do aspecto vertical e o possível efeito de interferência da lâmina d'água, foi notadamente observada na alternativa 3 da PCH Figueirópolis – MT através desta relação numérica com consequente redução da eficiência.

De acordo com a relação dos benefícios econômicos encontrados, a avaliação das comportas do tipo Flap, mostrou-se mais vantajosa entre as alternativas

extravasoras dos estudos de caso das PCH's Figueirópolis-MT e Sete Quedas-MT. Porém, periodicamente deve ocorrer a manutenção para a operação adequada destas comportas, com consequente deplecionamento de 1 metro do reservatório.

Recomenda-se, para a determinação da capacidade de projeto desta estrutura e o comportamento da curva de descarga teórica, a verificação em modelo físico do comportamento hidráulico, além da avaliação e inspeção da vedação entre as comportas e o acionamento através do desequilíbrio entre os níveis das comportas e os contra pesos.

Por fim, os estudos de caso apresentaram as diversas possibilidades de definições das estruturas labirinto compondo o sistema extravasor, com características próprias em cada situação. Observaram-se nos estudos de caso, as variações dos parâmetros e custos encontrados para as diversas alternativas extravasoras a fio d'água, principalmente com as avaliações das condições hidráulicas e benefícios econômicos para cada configuração de geometria das alternativas do extravasor labirinto.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica: Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico. ANEEL/SIGEL. disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 11/07/2011.

EMIROGLU, M. E., BILHAN, O., KISI, O., Neural networks for estimation of discharge capacity of triangular labyrinth side-weir located on a straight channel, Published in: Journal Expert Systems with Applications: An International Journal archive Volume 38 Issue 1, January, 2011.

FALVEY, H.T. - Hydraulic Design of Labyrinth Weirs. ASCE – American Society of Civil Engineers, 2003, 162 p.

FERREIRA, A. C; FILHO, G. L. T – Artigo “Análise Operacional de uma Comporta Fusível”, UNIFEI/CERPCH, Itajubá, 2004.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. Relatório de Aferição de um Medidor Venturi de 2750 mm na estação de tratamento de esgoto de Barueri. Consórcio JNS – STENGEL – MULTISERVICE, Outubro de 1995.

GENTILINI, B., Stramazzi con Cresta a Pianta Obliqua e a Zig-Zag. Memorie e Studi dell' Instituto di Idraulica e Construzioni Idrauliche, nº 48, Milano, 1941.

KING, H. W.; WISLER, C. O.; WOODBURN, J. O. Hidráulica, Rio de Janeiro, 1957.

HIDROPLUS®, Edição 2009 – Fusegate News; International Commission on Large Dams (ICOLD).

LENCASTRE, A. Hidráulica Geral – HIDROPROJECTO Edição Luso-Brasileira, 1983.

LEWITT, E., H. – Hydraulics And Fluid Mechanics – 10^a edition. London, 1958.

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. Engenharia de Recursos Hídricos; São Paulo, editora da Universidade de São Paulo, Mcgraw-Hill do Brasil Ltda., 1978.

MAGALHÃES, S. P. – Descarregadores em Labirinto, Memória LNEC N°605, Lisboa, 1983.

MATOS, J.; CHANSON, H., Labyrinth Spillways: Comparison of Two Popular U.S.A. Design Methods and Consideration of Non-Standard Approach Conditions and Geometries. “International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, 2006”.

MAYNORD, S. T. General Spillway Investigation – Hydraulic Model Investigation. US Army Corps of Engineers; Washington, 1985.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – “Guia Prático para Cálculo de Cheia de Projeto de Vertedores”, Eletrobrás, Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 1987.

NETTO, A. N; FERNANDEZ, M. F.; ARAÚJO, R., ITO, A. E. Manual de Hidráulica 8^a edição; São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1998.

PORTO, R. M. Hidráulica Básica 2a edição. São Carlos: EESC-USP, 1999. 540 p.

ROSELLI, R. G. – Artigo “Otimização e análise de alternativas de vertedor do tipo Labirinto trapezoidal”, UNIFEI/CERPCH, Itajubá, 2011.

SCHREIBER, G., P., Usinas Hidrelétricas – ENGEVIX S.A. Estudos e Projetos de Engenharia, 1977.

SIMÕES, A., L., A., Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus – Metodologias adimensionais para pré-dimensionamento. Dissertação apresentada ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2008.

SOUZA, Z.; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. C. (1999). Centrais Hidrelétricas: Estudos para implantação. Rio de Janeiro: Eletrobrás.

TAMADA, K. – Dissipação de Energia Hidráulica, Escola Politécnica de São Paulo PHD 5727, 1991/1994.

TULLIS, J. P; A. NOSRATOLLAH, A.; WALDRON, D., Design of Labyrinth Spillways JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING - ASCE (1995).

TULLIS, B. P.; M.ASCE; J. C. YOUNG; M. A. CHANDLER, Head-Discharge Relationships for Submerged Labyrinth Weirs, JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING - ASCE (2007).

US Army Corps of Engineers Hydraulic Design Criteria, United States: Coastal and Hydraulic Laboratory, 1987.

US Department of Interior Design of Small Dams, 3rd edition, Bureau of Reclamation, Denver, 1987.