

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**Desenvolvimento de mecanismo para ganho de  
capacidade de armazenamento em reservatório**

**Igor Renan Braga dos Santos**

Itajubá, março de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA

# **Desenvolvimento de mecanismo para ganho de capacidade de armazenamento em reservatório**

Dissertação submetida para defesa do tema no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia para obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Energia**.

**Área de Concentração:** Energia, sociedade e meio ambiente

**Orientador:** Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

**Co-orientador:** Prof. Dr. Oswaldo Honorato de Souza Júnior

Itajubá, março de 2018

---

## DEDICATÓRIA

*A todos os contribuintes do meu ser...*

---

## AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida e por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais, José Roberto e Nilva, e minha irmã, Sophia, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. À direita tenho meu pai, exemplo de força, raça, superação e fé. Meu braço direito independentemente do tamanho da batalha. À esquerda tenho minha mãe, mulher de um coração sem tamanho. Com ela aprendi a ter educação, respeito e principalmente, humildade. Estes dois seres humanos, com toda simplicidade do mundo, me deram duas coisas extremamente valiosas e eternas: humildade e fé. E junto a mim, minha irmã, que sempre comprovou que juventude e incentivo andam juntos. E com isso, tenho certeza que o mundo só está à minha espera para ser conquistado.

Ao meu orientador, Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho, pelo suporte durante todo o tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos. Ao meu co-orientador, Dr. Oswaldo Honorato de Souza Júnior, pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho, pelo apoio e confiança.

À Universidade Federal de Itajubá, seu corpo docente, direção e administração, que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH), pela oportunidade concedida, e a todos companheiros de labuta diária, por tornarem a caminhada mais leve e o dia mais alegre.

A todos meus amigos que estiveram ao meu lado, minha demonstração diária de gratidão.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

*Siga o seu sonho*

---

## RESUMO

O ganho de capacidade de armazenamento dos reservatórios já existentes se torna uma alternativa interessante, visto que cada vez mais vem se limitando a implantação de reservatórios seja devido às pressões socioambientais ou à limitação de áreas favoráveis. Propõe-se o desenvolvimento de um mecanismo visando o acréscimo de capacidade de armazenamento em reservatório de centrais hidrelétricas, sendo este auto-operado em função do nível do reservatório. Para isso, utilizou-se a Represa Lindolpho Pio da Silva Dias como objeto de estudo, a qual se localiza no município de Poços de Caldas/MG, com reservatório de acumulação de aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos. A condução dos materiais e métodos engloba, além da caracterização da área de estudo, a realização de um planejamento hidroenergético e o desenvolvimento do mecanismo em si. No planejamento hidroenergético, procurou-se determinar de quanto será o acréscimo de capacidade de volume no reservatório, advindo da alteração da cota de vertimento e o valor do incremento na vazão regularizada. Estipulou-se também o ganho energético nas hidrelétricas, em cascata, a jusante, e uma análise econômica preliminar para determinar se o lucro sucedido deste ganho, em vazão turbinada, é suficiente para a concessionária viabilizar o investimento para a alteração da cota de vertimento. No desenvolvimento do mecanismo em si, incorporou-se a determinação do melhor perfil hidrodinâmico e do balanço de momento físico, pivotado em eixo horizontal, com etapas de simulação computacional e de experimentação laboratorial. Com a alteração da cota de vertimento em 1 [m], a qual foi sugerida pela concessionária do reservatório, mantendo-se o nível de garantia de 95%, o planejamento apontou para um incremento de aproximadamente 0,21 [m<sup>3</sup>/s] na vazão regularizada e de 5 milhões de metros cúbicos na capacidade de armazenamento do reservatório. Isso permite um ganho energético de aproximadamente 3341 [MWh/ano], considerando todas hidrelétricas a jusante. Em relação ao desenvolvimento do mecanismo, observou-se o bom funcionamento do seu perfil hidrodinâmico. O mesmo apresentou operação de vertimento automática, realizando o seu processo de abertura e fechamento em função do nível, e boa estabilidade enquanto permitia a passagem da vazão de vertimento.

**Palavras-Chaves:** Regularização de Reservatórios Hidrelétricos; Comporta Automática; Aumento de Capacidade de Reservatório.

---

## ABSTRACT

The increase in storage capacity of existing reservoirs becomes an interesting alternative, since reservoirs are being increasingly restricted due to socio-environmental pressures or the limitation of favorable areas. It is proposed the development of a mechanism to increase the storage capacity in the reservoir of hydroelectric power plants, which is self-operated according to the level of the reservoir. For this, the Lindolpho Pio da Silva Dias Dam was used as study object, which is located in the municipality of Poços de Caldas / MG, with an accumulation reservoir of approximately 30 million cubic meters. The conduction of the materials and methods includes, besides the characterization of the study area, the accomplishment of hydroenergetic planning and the development of the mechanism itself. In hydropower planning, we tried to determine how much will be the volume capacity increase in the reservoir, resulting from the alteration of the discharge rate and the value of the increment in the regularized flow. The energy gain was also stipulated in the cascade hydroelectric dams, downstream, and a preliminary economic analysis was carried out to determine if the profit from this gain, in turbinated flow, is enough for the concessionaire to make feasible the investment to change the allocation quota. In the development of the mechanism itself, it was incorporated the determination of the best hydrodynamic profile and the physical momentum swing, pivoted on horizontal axis, with computational simulation and laboratory experimentation steps. With the alteration of the reservoir quota in 1 [m], which was suggested by the concessionaire of the reservoir, maintaining the 95% guarantee level, the planning indicated an increase of approximately 0.21 [m<sup>3</sup>/s] in the and 5 million cubic meters in the storage capacity of the reservoir. This allows an energy gain of approximately 3341 [MWh/year], considering all hydroelectric plants downstream. In relation to the development of the mechanism, the hydrodynamic profile was well functioning. The same presented an automatic pouring operation, performing its opening and closing process according to the level, and good stability while allowing the passage of the delivery flow.

**Keywords:** Regularization of Hydroelectric Reservoir; Automatic Floodgate; Increase in Storage Capacity of Existing Reservoirs.

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragem hidrostática, barreira e similares.....	8
Figura 2 – “Barragem” composta por painéis móveis ou rotativos que operam automaticamente.....	9
Figura 3 – Representação esquemática do elemento inflável de borracha.....	10
Figura 4 – Comporta para controle de fluxo .....	11
Figura 5 – “Flashboard” automático para estruturas hidráulicas.....	12
Figura 6 – Sistema de controle de nível de fluido .....	13
Figura 7 – Princípio de funcionamento da <i>Classic Fusegate</i> .....	14
Figura 8 – Princípio de funcionamento da <i>Fusegate Folding</i> .....	15
Figura 9 – Princípio de funcionamento da <i>Smart Fusegate</i> .....	17
Figura 10 – Barragem formada por comportas planas articuladas em torno de um eixo de rotação. ....	18
Figura 11 – Válvula automática em posições fechada e aberta, respectivamente. ....	19
Figura 12 – Barragem móvel e auto-operada. ....	20
Figura 13 - Obturador fusível. Vista lateral.....	21
Figura 14 – Obturador fusível. Vista frontal. ....	21
Figura 15 – Porta de controle de níveis em canais. ....	22
Figura 16 – Perfil hidrodinâmico transversal de um mecanismo semelhante a uma comporta fusível. ....	23
Figura 17 – Localização geral da bacia do ribeirão das Antas, bem como da área de estudo e sua partição de quedas, a jusante.....	27
Figura 18 – Localização do ribeirão das Antas e do ribeirão do Cipó. ....	28
Figura 19 – Aproveitamentos hidrelétricos na bacia do ribeirão das Antas.....	30
Figura 20 – Barragem, em aterro compactado, da Barragem do Cipó. ....	31
Figura 21 – Ombreira esquerda, onde se encontra o vertedouro, desincorporado da barragem. ....	32
Figura 22 – Vertedouro da Barragem do Cipó, visão de montante para jusante.....	33
Figura 23 – Vertedouro da Barragem do Cipó, visão de jusante para montante.....	33
Figura 24 – Vertedouro provido de degraus.....	34
Figura 25 – Tomada d’água da Barragem do Cipó. ....	35

Figura 26 – Níveis de operação do reservatório em relação ao vertedouro. ....	36
Figura 27 – Diagrama de Massas. ....	39
Figura 28 – Curva de massa das vazões (Curva de Rippl) .....	41
Figura 29 – Curva de massa residual das vazões .....	42
Figura 30 – Curva de regularização para diferentes probabilidades de falhas. ....	44
Figura 31 – Determinação da lei de regularização, dada à capacidade do reservatório. ....	45
Figura 32 – Turbina Michell-Banki e seus principais componentes. ....	48
Figura 33 – Barragem móvel e auto-operada. ....	49
Figura 34 – Perfil desenvolvimento para o mecanismo de ganho de capacidade. ....	49
Figura 35 – Angulação do perfil desenvolvido. ....	50
Figura 36 – Representação esquemática das forças atuantes no mecanismo (a) e seus respectivos braços de alavanca (b) .....	51
Figura 37 – Força hidrostática e centro de pressão para uma superfície plana arbitrária inclinada. ....	53
Figura 38 – Representação esquemática para determinação das forças hidrostáticas sobre superfícies planas inclinadas do mecanismo .....	55
Figura 39 - Força hidrostática e centro de pressão sobre uma superfície plana arbitrária, vertical e submersa. ....	56
Figura 40 – Representação esquemática determinação das forças hidrostáticas sobre superfícies planas verticais do mecanismo .....	57
Figura 41 – Representação esquemática do peso estrutural da peça. ....	58
Figura 42 – Representação esquemática do peso referente à massa de água retida na parte inclinada .....	59
Figura 43 – Zonas de condição de contorno da geometria desenvolvida para o modelo computacional.....	62
Figura 44 – Malha estruturada hexaédrica do modelo computacional.....	63
Figura 45 – Representação esquemática do processo de “n” posições de abertura do mecanismo.....	65
Figura 46 – Bancada de ensaios laboratoriais .....	66
Figura 47 – Representação do processo de montagem do modelo reduzido do mecanismo....	66
Figura 48 – Curva de permanência de vazões mensais afluentes à Barragem do Cipó .....	69
Figura 49 – Curva Cota <i>versus</i> Volume para o reservatório do Cipó.....	70
Figura 50 – Diagrama de massas para o reservatório da barragem do Cipó .....	72
Figura 51 – Diagrama de massas e curvas de demanda para o reservatório do Cipó.....	73

Figura 52 – Diagrama de massas para determinação de volume útil com regularização da vazão média em todos os meses do ano .....	74
Figura 53 – Diagrama de massas para determinação de volume útil com regularização da vazão média em seis meses .....	75
Figura 54 – Diagrama de Rippl residual e curvas de demanda para o reservatório do Cipó ...	76
Figura 55 – Diagrama de massas residual para determinação de volume útil com regularização da vazão média em todos os meses do ano.....	77
Figura 56 – Diagrama de massas residual para determinação de volume útil com regularização da vazão média em seis meses.....	78
Figura 57 – Curva de possibilidades de regularização, para o reservatório do Cipó, relacionando vazão regularizada e volume de armazenamento.....	79
Figura 58 – Curva de possibilidades de regularização para o reservatório do Cipó, relacionando vazão regularizada e cota de alteamento.....	80
Figura 59 – Hidrograma da série histórica utilizada para o reservatório do Cipó.....	82
Figura 60 – Identificação dos períodos úmidos e secos no hidrograma.....	82
Figura 61 – Diagrama de Conti-Varlet para o período de anos úmido e capacidade atual do reservatório .....	83
Figura 62 – Diagrama de Conti-Varlet para o período de anos úmido e capacidade do reservatório alteado.....	84
Figura 63 – Diagrama de Conti-Varlet para o período de anos seco e capacidade atual do reservatório .....	85
Figura 64 – Diagrama de Conti-Varlet para o período de anos seco e capacidade do reservatório alteado.....	85
Figura 65 – Relação entre investimento máximo realizável e tempo de retorno por meio de VPL e LCOE .....	89
Figura 66 – Perfil hidrodinâmico maciço e condições iniciais admitidas em função do local de implantação.....	90
Figura 67 – Representação da distribuição das forças atuantes no mecanismo, bem como suas intensidades a) e posições b), para as condições em campo.....	92
Figura 68 – Perfil hidrodinâmico maciço e condições admitidas em função do método experimental .....	93
Figura 69 – Representação da distribuição das forças atuantes no mecanismo, bem como suas intensidades a) e posições b), para o método experimental.....	94

Figura 70 – Variação da vazão volumétrica em função do ângulo de abertura do mecanismo no modelo computacional.....	96
Figura 71 – Comportamento do escoamento (distinção de fases) em função do ângulo de abertura do mecanismo: (a) – 5°; (b) – 10°; (c) – 15°; (d) – 20°; (e) – 25°; (f) – 30°; (g) – 35°; (h) – 40° e (i) – 45°.....	98
Figura 72 – Linhas de corrente de velocidade do escoamento em função do ângulo de abertura do mecanismo: (a) – 5°; (b) – 10°; (c) – 15°; (d) – 20°; (e) – 25°; (f) – 30°; (g) – 35°; (h) – 40° e (i) – 45°.....	100
Figura 73 – Variação do contorno de pressão estática em função do ângulo de abertura do mecanismo: (a) – 5°; (b) – 10°; (c) – 15°; (d) – 20°; (e) – 25°; (f) – 30°; (g) – 35°; (h) – 40° e (i) – 45°.....	102
Figura 74 – Representação da abertura máxima do mecanismo .....	105
Figura 75 – Relação entre ângulo de abertura e vazão de vertimento para o modelo reduzido .....	106
Figura 76 – Relação entre ângulo de abertura e vazão de vertimento para o modelo em escala real .....	106
Figura 77 – Variação de nível devido à operação de vertimento do mecanismo, no modelo reduzido .....	108
Figura 78 – Variação de nível devido à operação de vertimento do mecanismo, transposto para a escala real.....	109
Figura 79 – Representação do funcionamento e operação de vertimento do mecanismo.....	110
Figura 80 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura do modelo reduzido com vazão de vertimento de 0,33 [L/s] .....	110
Figura 81 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura do modelo reduzido com vazão de vertimento de 0,92 [L/s] .....	111
Figura 82 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura do modelo reduzido com vazão de vertimento de 1,69 [L/s] .....	111
Figura 83 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura do modelo reduzido com vazão de vertimento de 2,60 [L/s] .....	112
Figura 84 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura para vazão de vertimento de 1,30 [m³/s] utilizando os dados transpostos em escala real .....	112
Figura 85 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura para vazão de vertimento de 3,68 [m³/s] utilizando os dados transpostos em escala real .....	113

Figura 86 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura para vazão de vertimento de 6,76 [m <sup>3</sup> /s] utilizando os dados transpostos em escala real .....	113
Figura 87 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura para vazão de vertimento de 10,40 [m <sup>3</sup> /s] utilizando os dados transpostos em escala real .....	114
Figura 88 – Ensaio para análise do comportamento do nível a montante em função do ângulo de abertura para a vazão de vertimento de 1,69 [L/s].....	115
Figura 89 – Comparação do comportamento do fluido entre o modelo experimental (a) e modelo computacional representado em fases (b).....	116
Figura 90 – Curva de ângulo de abertura <i>versus</i> vazão para os métodos computacional e laboratorial.....	117

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aproveitamentos hidrelétricos na bacia do ribeirão das Antas. ....	29
Tabela 2 – Principais características estruturais do vertedouro da Barragem do Cipó. ....	32
Tabela 3 – Principais características estruturais da tomada d’água da Barragem do Cipó. ....	34
Tabela 4 – Condições de contorno do modelo computacional.....	64
Tabela 5 – Relação dos postos fluviométricos utilizados.....	68
Tabela 6 – Possibilidades de regularização para a atual capacidade de armazenamento.....	80
Tabela 7 – Relação entre vazão regularizada, volume útil necessário, e alteração da cota de vertimento, para diversos níveis de garantia. ....	81
Tabela 8 – Determinação da energia produzida anualmente a partir do incremento na vazão regularizada .....	87
Tabela 9 – Investimento máximo para implantação do mecanismo em função do tempo de retorno a partir do VPL.....	87
Tabela 10 – Investimento máximo para implantação do mecanismo em função do tempo de retorno a partir do LCOE.....	88
Tabela 11 – Determinação da posição das forças atuantes no mecanismo, em relação ao eixo, para as condições em campo .....	92
Tabela 12 – Determinação da posição das forças atuantes no mecanismo, em relação ao eixo, para o método experimental .....	94
Tabela 13 – Vazão mássica e volumétrica em função do ângulo de abertura do mecanismo no modelo computacional.....	96
Tabela 14 – Resultados laboratoriais referentes ao ensaio para determinação do ângulo de abertura máximo do mecanismo e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura .	104
Tabela 15 – Resultados laboratoriais, referentes ao ensaio para determinação do ângulo de abertura máximo do mecanismo e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura, transpostos para a escala real.....	104
Tabela 16 – Resultados laboratoriais referentes ao ensaio para determinação do nível a montante no instante da abertura do mecanismo.....	107
Tabela 17 – Resultados laboratoriais, referentes ao ensaio para determinação do nível a montante no instante da abertura do mecanismo, transpostos para a escala real .....	107

---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>Acritonitrila-butadieno-estireno</i>
APP	<i>Área de Preservação Permanente</i>
ASTM	<i>Sociedade Americana para Testes e Materiais (“American Society for Testing and Materials”)</i>
CAD	<i>Desenho auxiliado por computador (“Computer Aided Design”)</i>
CFD	<i>Dinâmica de Fluidos Computacional (“Computational Fluid Dynamics”)</i>
CMP	<i>Cheia máxima de projeto</i>
DME/PC	<i>Departamento Municipal de Eletricidade de Poços de Caldas</i>
EL.	<i>Elevação</i>
h	<i>Horas</i>
LCOE	<i>Custo nivelado de energia</i>
LHPCH	<i>Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas</i>
MG	<i>Minas Gerais</i>
MCH	<i>Média central hidrelétrica</i>
min	<i>Minutos</i>
N.A.	<i>Nível d’água</i>
PCH	<i>Pequena central hidrelétrica</i>
RANS	<i>Navier-Stokes em Médias de Reynolds (“Reynolds Averaged Navier Stokes”)</i>
TR	<i>Tempo de retorno</i>
UHE	<i>Usina hidrelétrica</i>
UNIFEI	<i>Universidade Federal de Itajubá</i>
VPL	<i>Valor presente líquido</i>
WOS	<i>ISI Web of Science</i>

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
B	Largura
C	Capacidade do reservatório
CG	Centro geométrico
cos	Cosseno
CP	Centro de pressão
D	Demanda do reservatório
d	Distância
E	Empuxo
$E_p$	Energia produzida
$E_v$	Evapotranspiração
F	Força hidrostática
$F_H$	Componente horizontal da força hidrostática
$F_i$	Força atuante
$F_v$	Componente vertical da força hidrostática
$F_c$	Fator de capacidade
g	Aceleração gravitacional
GW	Gigawatt
H	Queda líquida disponível
h	Altura
hCG	Profundidade do centro geométrico
h/ano	Hora por ano
$I_{xx}$	Momento de Inércia
$I_{xy}$	Produto de Inércia
k	Energia cinética turbulenta
$\text{kg/m}^3$	Quilograma por metro cúbico
km	Quilômetro
$\text{km}^2$	Quilômetro quadrado
M	Momento físico
m	Metro
$\text{m}^2$	Metro quadrados
$\text{m}^3$	Metro cúbicos
$\text{m}^4$	Metro a quarta
$\text{m/s}^2$	Metro por segundo ao quadrado
$\text{m}^3/\text{s}$	Metro cúbico por segundo
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
MWh/ano	Megawatt-hora por ano
N	Newton
N.m	Newton-metro
N/m	Newton por metro
$\text{N/m}^3$	Newton por metro cúbico
$N_p$	Número de anos da série histórica

$n^{\circ}$	<i>Número</i>
O	<i>Outras perdas no reservatório</i>
P	<i>Probabilidade</i>
$\rho$	<i>Massa específica</i>
Q	<i>Vazão</i>
$\bar{Q}$	<i>Vazão média</i>
$Q_r$	<i>Vazão regularizada</i>
R	<i>Confiabilidade</i>
R\$	<i>Real</i>
R\$/ano	<i>Real por ano</i>
R\$/MWh	<i>Real por Megawatt-hora</i>
sen	<i>Seno</i>
t	<i>Tempo</i>
V	<i>Volume</i>
W	<i>Força peso</i>
x	<i>Coordenada do eixo das abscissas</i>
y	<i>Coordenada do eixo das ordenadas</i>
$\Upsilon$	<i>Peso específico</i>
$\Delta$	<i>Varição</i>
$\epsilon$	<i>Taxa de dissipação</i>
$\Theta$	<i>Ângulo</i>
$^{\circ}$	<i>Grau</i>

---

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto.....	1
1.2 Relevância do tema.....	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo geral .....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Estrutura do trabalho.....	4
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 Revisão da literatura: mecanismos com função similar.....	6
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
3.1 Descrição geral.....	24
3.2 Caracterização da área de estudo .....	25
3.3 Planejamento hidroenergético.....	37
3.3.1 Métodos de determinação de volumes de armazenamento de reservatórios para regularização anual.....	37
3.3.1.1 Cálculo do volume do reservatório para atender uma lei de regularização	37
3.3.1.2 Diagrama de Rippl (Diagrama de Massas) .....	39
3.3.1.3 Diagrama de Rippl residual ou das diferenças totalizadas.....	41
3.3.1.4 Método da simulação da operação .....	42
3.3.2 Diagrama de Conti-Varllet (Regularização Máxima) .....	44
3.3.3 Estudo preliminar de viabilidade econômica .....	46
3.4 Desenvolvimento do mecanismo .....	47
3.4.1 Determinação do perfil hidrodinâmico do mecanismo.....	47
3.4.2 Equilíbrio de Momento Físico aplicado no eixo pivotado .....	50
3.4.2.1 Forças Atuantes .....	51
3.4.2.1.1 Forças Hidrostáticas.....	52
3.4.2.1.2 Forças Peso .....	57
3.4.2.1.3 Forças de Empuxo .....	60

3.4.3	Simulação computacional.....	60
3.4.4	Experimentação laboratorial.....	65
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>68</b>
4.1	Planejamento hidroenergético.....	68
4.1.1	Métodos de determinação de volumes de armazenamento de reservatórios para regularização anual .....	68
4.1.1.1	Cálculo do volume do reservatório de forma a atender a uma lei de regularização.....	68
4.1.1.2	Diagrama de Massas .....	71
4.1.1.3	Diagrama de Rippl residual ou das diferenças totalizadas.....	76
4.1.1.4	Método da simulação da operação .....	78
4.1.2	Diagrama de Conti-Varlet (Regularização Máxima).....	81
4.1.3	Estudo preliminar de viabilidade econômica .....	86
4.2	Desenvolvimento do mecanismo .....	90
4.2.1	Equilíbrio de momento físico .....	90
4.2.1.1	Condições em campo .....	90
4.2.1.2	Condições para o método experimental .....	93
4.2.2	Simulação computacional.....	95
4.2.3	Ensaio laboratoriais.....	103
4.2.3.1	Ensaio para determinação do ângulo de abertura máximo do mecanismo e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura .....	104
4.2.3.2	Ensaio para determinação do nível a montante no instante da abertura do mecanismo.....	107
4.2.3.3	Ensaio para análise do comportamento do nível a montante em função do ângulo de abertura e da vazão de vertimento .....	110
4.2.4	Avaliação entre os aspectos laboratorial e computacional .....	115
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>118</b>
5.1	Trabalhos futuros .....	119
<b>APÊNDICE A – Ensaio para determinação do ângulo de abertura máximo do mecanismo e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura.....</b>		<b>120</b>

<b>APÊNDICE B – Ensaio para determinação do nível a montante no instante da abertura do mecanismo.....</b>	<b>122</b>
<b>APÊNDICE C – Ensaio para análise do comportamento do nível a montante em função do ângulo de abertura e da vazão de vertimento.....</b>	<b>124</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>126</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto

Com o passar dos anos, a demanda hídrica apresenta uma tendência cada vez maior de crescimento, sendo que diversos fatores podem ser apontados como responsáveis, tais como: o crescimento populacional, a urbanização intensiva e implantação de indústrias de grande porte, a expansão agrícola e o aumento de demanda de eletricidade. Logo, para que se atendam, ao longo do tempo, todos os usos hídricos nas atividades humanas, de maneira segura e continuada, há a necessidade de armazenamento da água e um gerenciamento integrado deste recurso, buscando sua utilização de maneira eficiente.

O Brasil é um país favorável à implantação de reservatórios devido ao seu grande potencial hídrico. Estes reservatórios geralmente são de usos múltiplos, procurando suprir as necessidades de abastecimento d'água, irrigação, geração de energia elétrica, navegação, dentre outros (MÜLLER, 1995). No entanto, devido a diversos fatores, como a aceitação desses empreendimentos frente às pressões socioambientais, vem se limitando cada vez mais o aproveitamento dessa potencialidade. Com isso, o ganho de capacidade de armazenamento dos reservatórios já existentes se torna uma alternativa interessante.

Neste processo, pode-se perceber que a maioria das alternativas que visam o aumento de capacidade de um reservatório é elaborada propondo o alteamento da barragem, seja com a construção de estruturas incorporadas sobre a barragem antiga, seja com a construção de um novo núcleo, utilizando-se a barragem antiga apenas como uma ensacadeira durante a nova fase de construção. No entanto, obras estruturais que envolvem todo o corpo da barragem são relativamente caras, e, dependendo do alteamento, praticamente inviabilizam este processo, principalmente para pequenos reservatórios. Com isso, uma alternativa geralmente utilizada, quando a borda livre, isto é, a diferença entre a cota da crista do vertedouro e a crista da barragem, em relação à altura da barragem original é grande, se trata da realização do alteamento por meio da alteração da cota de vertimento do vertedouro. Salienta-se que todas as estruturas devem ser reavaliadas e que as análises de estabilidade permitam essa alternativa.

As principais estruturas que podem exercer essa função de alteamento sobre o vertedouro e condizem às situações acima expostas, apresentam vários inconvenientes, entre os quais se destaca: problemas com transporte sólido fluvial; mecanismos de comando complicados e de difícil conservação; e estruturas pouco robustas. A utilização desses mecanismos implica também em diversas imposições operativas, como a necessidade de que a

estrutura seja permanentemente assistida, com operadores sempre disponíveis, além de rotinas de testes e manutenções preventivas frequentes. Tais aspectos devem sempre ser ponderados para que se opte pela utilização desses mecanismos.

Portanto, visando contornar os entraves apresentados pelos usuais mecanismos, sem se esquecer da viabilidade econômica para a implantação, este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um mecanismo visando o acréscimo de capacidade de armazenamento em reservatório de centrais hidrelétricas, auto-operado em função do nível do reservatório.

O perfil hidrodinâmico de um mecanismo sugerido por Rodriguez (2014) constitui uma das principais referências deste trabalho, e será utilizado à priori para atingir os objetivos propostos. Tem-se, portanto, o intuito de comprovação de sua funcionalidade, e caso necessário, a sua modificação e adequação para que atinjam os objetivos do trabalho.

O reservatório utilizado como objeto de estudo se trata da Represa Lindolpho Pio da Silva Dias, também conhecida como Barragem Ribeirão do Cipó. A mesma se localiza na Rodovia do Contorno, no km 17, na zona rural do município de Poços de Caldas/MG, conforme as coordenadas geográficas, latitude  $21^{\circ}51'12.84''S$  e longitude  $46^{\circ}36'29.24''O$ . A sua barragem, instalada em 1999, propicia uma área alagada de aproximadamente  $4,60 \text{ km}^2$  e um volume total de aproximadamente  $30 \text{ milhões de m}^3$ , com volume útil de  $29 \text{ milhões de m}^3$  e vida útil de 2.000 anos. O mecanismo a ser desenvolvido, deverá ser instalado em seu vertedouro, o qual permitirá a alteração da cota de vertimento e, conseqüentemente, o aumento do nível máximo do reservatório. O vertedouro, em questão, é do tipo soleira livre, com perfil Creager, e está locado na ombreira esquerda, desincorporado da barragem.

## **1.2 Relevância do tema**

Atualmente, a aceitação de empreendimentos hidrelétricos frente aos movimentos socioambientais não tem sido um processo fácil. Os benefícios econômicos e energéticos aliados aos impactos socioambientais gerados por esse tipo de empreendimento geram diversas polêmicas sobre a implantação dessas usinas. Com isso, o aumento de capacidade de regularização de reservatórios já existentes, seja por meio do desenvolvimento de um mecanismo para o alteamento de um vertedouro lateral ou por meio de outros mecanismos, torna-se relevante, facilitando tanto a aceitação do alteamento perante aos órgãos ambientais, bem como, perante à população, uma vez que esta já está acostumada aos benefícios de um reservatório de acumulação.

Além das pressões socioambientais atualmente enfrentadas, há também o esgotamento de regiões técnico-ambientais favoráveis para a construção de grandes reservatórios de regularização plurianual no Brasil. Logo, reforça-se a necessidade da avaliação do aumento da capacidade dos reservatórios já existentes e, se possível, privilegiar nesta análise empreendimentos de usos múltiplos da água, os quais já impactam de forma positiva o desenvolvimento regional, minimizando-se ainda mais os possíveis impactos sociais e ambientais negativos destas obras.

Além do mais, reservatórios em cascata podem ser operados de tal modo que, uma obra de alteamento em um dos reservatórios a montante, possibilita uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, visto que há um incremento não só deste recurso, com a elevação de nível no reservatório, mas também, no âmbito energético, com o aumento da vazão regularizada em toda a cascata a jusante, a qual permite maior capacidade de geração de energia elétrica nas usinas.

A elevação de nível da cota máxima de um reservatório propicia atender demandas inesperadas e enfrentar variações climáticas, já que há um ganho de capacidade do reservatório, o qual reduz sua variabilidade sazonal. Conseqüentemente, contribui-se para a consolidação dos usos múltiplos do reservatório, tais como piscicultura, turismo, abastecimento público, navegação, controle de enchentes, dentre outros. Além do mais, esta alteração na cota permite uma amenização no pico do hidrograma afluente no que se diz à propagação de ondas de cheias no reservatório produzidas por chuvas intensas na bacia hidrográfica contribuinte, a qual se relaciona ao ganho na manutenção do volume de espera no reservatório. Em contrapartida aos eventos de cheias, o Brasil, apesar de ser um país privilegiado no que se refere a recursos hídricos, já enfrentou eventos de seca intensa, os quais impactaram importantes bacias hidrográficas. Conforme Hunt et al. (2016) foram registradas, recentemente no Brasil, duas crises energéticas decorrentes de déficit hídrico. A primeira, em Julho de 2001, causou uma redução considerável na demanda mensal, pois a energia armazenada não era suficiente para atendê-la. O impacto dessa crise atingiu tão fortemente a economia que o consumo de energia só voltou a se normalizar em Janeiro de 2005. A segunda crise ocorreu de forma similar em 2014, na qual os reservatórios na região Sudeste atingiram o mesmo nível crítico de 34%, verificado em 2001 (ONS, 2017).

Avaliando em âmbito mais abrangente, Godoi (2013) conclui que, em comparação com os anos setenta, a capacidade de armazenamento dos reservatórios para geração de energia que era de três a quatro anos, quando cheios, caiu para apenas quatro meses. Portanto, o país necessita que investimentos sejam realizados para aumentar a sua segurança energética,

visando principalmente o incremento na capacidade de armazenamento, para que assim sejam evitados novos retrocessos na economia. Desde a primeira crise, esforços e investimentos já se iniciaram. Em 2001, novas linhas de transmissão foram implantadas para que a energia gerada nas regiões Sul ou Norte pudesse ser transmitida ao Sudeste e Nordeste. A capacidade de geração também está sendo expandida, apresentando uma projeção de capacidade instalada de 18,2 GW em 2022 (EPE, 2017). Contudo, riscos de racionamento ainda existem, de modo a deixar claro que devem ser realizados esforços tanto para a expansão da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, quanto para o aumento da capacidade de armazenamento energético (HUNT et al., 2016).

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

O objetivo principal do trabalho é desenvolver um mecanismo visando o acréscimo de capacidade de armazenamento em reservatório de centrais hidrelétricas, auto-operado em função do nível do reservatório.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Utilizar para este estudo a Represa Lindolpho Pio da Silva Dias, também conhecida como Barragem Ribeirão do Cipó;
- Analisar, do ponto de vista hidroenergético, o aumento de capacidade de regularização do reservatório, bem como de sua capacidade de armazenamento;
- Avaliar o ganho energético nas centrais hidrelétricas a jusante;
- Realizar um estudo preliminar do investimento que viabilizaria a implantação do mecanismo desenvolvido a partir do ganho em capacidade de armazenamento e de regularização das centrais hidrelétricas a jusante;
- Avaliar a sua capacidade de auto-operação e a vazão vertida na operação do mecanismo, tanto para abertura total quanto parcial;
- Avaliar outras aplicações do mecanismo desenvolvido.

## **1.4 Estrutura do trabalho**

A fim de cumprir com os objetivos propostos, este trabalho foi dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma introdução, a partir do contexto do trabalho, da relevância do tema e suas justificativas, dos objetivos gerais e específicos a serem alcançados

bem como a explicação da estrutura do trabalho para proporcionar uma visão geral do que foi realizado ao longo da pesquisa.

A revisão de literatura é abordada no Capítulo 2, tratando da busca esquematizada pelo tema em diversas bases de dados, tais como: *ISI Web of Science (WOS)* da *Thomson Reuters*; *Scopus* e *Science Direct da Elsevier Science*, que possibilitou a realização de análises quantitativas e qualitativas das publicações do tema em estudo.

No Capítulo 3 é mostrada a condução dos materiais e métodos escolhidos para o trabalho. A mesma foi dividida em três partes, sendo elas: caracterização da área de estudo, planejamento hidroenergético e desenvolvimento do mecanismo para acréscimo de capacidade de armazenamento. A caracterização da área em estudo, apresentada ainda no início do capítulo, inicia-se com uma descrição de sua localização, bem como aspectos referentes à hidrologia da área. Informações referentes a aspectos de uso e a preservação do solo e dos recursos hídricos também serão evidenciadas nesse capítulo. Detalha-se ainda o arranjo do empreendimento hidrelétrico e as características de cada componente e das suas principais obras civis. No planejamento hidroenergético, procura-se determinar de quanto será o acréscimo de capacidade de volume no reservatório, advindo da alteração da cota de vertimento e o valor do incremento na vazão regularizada. Consegue-se ainda nesta abordagem, estipular o ganho energético nas hidrelétricas, em cascata, a jusante, e realizar uma análise econômica preliminar para determinar se o lucro sucedido deste ganho, em vazão turbinada, é suficiente para a concessionária viabilizar o investimento para a alteração da cota de vertimento. Neste âmbito, não é necessário conhecer ainda qual o mecanismo será utilizado para o acréscimo de capacidade de armazenamento no reservatório, mas já é possível estipular um investimento máximo viável. Na última parte dos materiais e métodos, têm-se o desenvolvimento do mecanismo em si, o qual incorpora a determinação do melhor perfil hidrodinâmico e balanço de momento físico, pivotado em eixo horizontal, para que se possível, o mesmo atue automaticamente. Têm-se subdivido neste item, etapas de simulação computacional e de experimentação laboratorial, que são ferramentas essenciais na comprovação e validação do mecanismo em desenvolvimento.

No Capítulo 4, os resultados tanto do planejamento hidroenergético quanto do desenvolvimento do mecanismo para acréscimo de capacidade de armazenamento são discutidos. Em seguida, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Como apêndices são apresentados os roteiros utilizados para os ensaios laboratoriais.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Revisão da literatura: mecanismos com função similar**

Neste processo, pode-se perceber que a maioria das alternativas que visam o aumento de capacidade de um reservatório é elaborada propondo o alteamento da barragem, seja com a construção de estruturas incorporadas sobre a barragem antiga, seja com a construção de um novo núcleo, utilizando-se a barragem antiga apenas como uma ensacadeira durante a nova fase de construção.

Isso exige que, no projeto de alteamento, as estruturas impermeáveis, os filtros e os elementos de drenagem sejam reavaliados, para que se assegure que os efeitos da majoração das cargas hidráulicas sejam devidamente incorporados na nova geometria da barragem. Do mesmo modo, análises da estabilidade dos taludes e do recalque da fundação devem ser executados visando preservar a integridade da estrutura existente e prever o comportamento da obra projetada. (CHUQUIMUNI, 2005)

Quando estas condições acima são satisfeitas e a necessidade de alteamento em relação à altura original da barragem é pequena, têm-se se mostrado empiricamente que, para barragens de terra com núcleo central de argila, pode-se incorporar naturalmente uma estrutura à nova configuração da barragem.

No entanto, obras estruturais que envolvam todo o corpo da barragem são relativamente caras, e, dependendo do alteamento, praticamente inviabilizam este processo, principalmente para pequenos reservatórios. Com isso, uma alternativa geralmente utilizada, quando a borda livre, ou seja, a diferença entre a cota da crista do vertedouro e a crista da barragem, em relação à altura da barragem original é grande, se trata da realização do alteamento por meio do vertedouro. Salienta-se que todas as estruturas devem ser reavaliadas e que as análises de estabilidade permitam essa alternativa.

Os vertedouros são estruturas projetadas para descarregar a vazão de projeto (cheia máxima de projeto – CMP), de forma a impedir o galgamento da crista na ocorrência de cheias extremas. De acordo com o princípio de funcionamento esperado, podem assumir diferentes formas, sendo as principais: superfície (soleira delgada linear, delgada estendida, ogival retilínea, curvilínea seguida de poço); de fundo (adufa, galeria) e misto. A escolha do tipo de vertedouro depende basicamente do tipo de arranjo adotado para o empreendimento hídrico, tendo como caso genérico, o posicionamento do vertedouro em uma das ombreiras da barragem. (ELETROBRÁS, 1995; MME, 2007) De acordo com as recentes diretivas brasileiras para construção e segurança de barragens (ANA, 2015), nas barragens de aterro e

enrocamento, o vertedouro deve ser implantado independente do corpo da barragem quando o mesmo for em canal ou em túnel, devendo garantir que a descarga e dissipação de energia seja efetuada suficientemente afastada do corpo da barragem.

Visto que a alternativa apresentada acarreta em uma diminuição da borda livre, bem como da parcela de altura de passagem da cheia de projeto (carga sobre a soleira quando é descarregada a vazão correspondente a CMP), têm-se como preocupação, principalmente para as bacias pequenas, as quais estão sujeitas as cheias rápidas (flash floods), o tempo de resposta operacional da estrutura que realizará o alteamento, o qual deve ser suficiente para a descarga da vazão. Além disso, atenta-se para a verificação de algum problema mecânico que a estrutura apresente, ou mesmo algum impedimento que limite o seu comando. Estes fatores podem comprometer, não só a estrutura que realiza o alteamento, como toda a barragem (ELETROBRÁS, 1995; MME, 2007).

As principais estruturas identificadas pela revisão de literatura, que exercem função similar ao objetivo principal deste trabalho, e condizem às situações acima expostas, são descritas a seguir:

Frantisek (1952), por meio do registro de patente US 2598389 A, apresenta dispositivos, articulados em um eixo horizontal, capazes de fazer cerca de um quarto de volta em torno deste eixo axial. Inicialmente, a pressão hidrostática do reservatório atua permanentemente a montante de todo o dispositivo. A parte inferior do dispositivo, isto é, abaixo do eixo horizontal, se estende para dentro de uma câmara de concreto de formato cilíndrico. Admite-se a entrada de água nesta câmara, a partir de um duto, que possui entrada acima de um nível predeterminado do reservatório, de forma a proporcionar a ação da pressão do reservatório em todos os lados da parte inferior do dispositivo, presente na câmara. Dessa forma, em conjunto com a pressão da água sobre a parte superior, tende-se a girar a comporta para a posição horizontal. Ao abaixar o nível, esvazia-se esta câmara, por um duto com saída a jusante, e a pressão da água atua apenas no lado a montante da parte inferior, o que faz com o dispositivo volte para a posição inicial. Para a sua implantação, é necessário interferir na obra civil, de forma a se criar uma cavidade que a permita bascular. O autor sugere sua instalação em vertedouros de barragens ou tomada d'água. Os dispositivos estão representados na Figura 1.

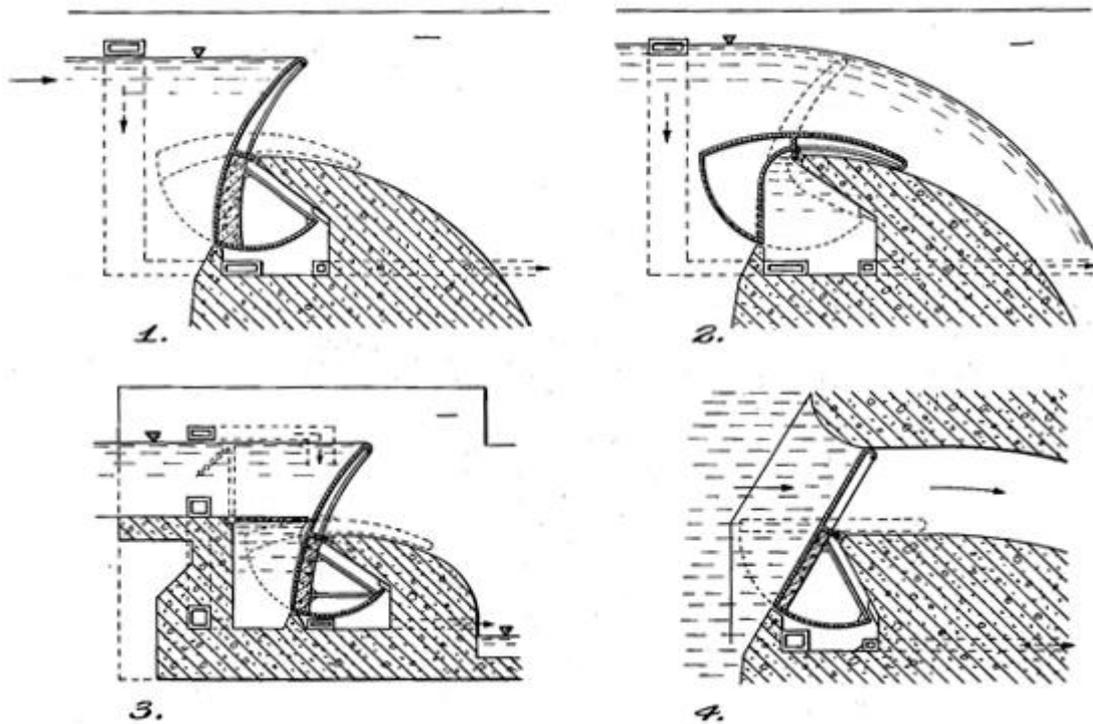


Figura 1 – Barragem hidrostática, barreira e similares.

Fonte: adaptado de Frantisek (1952)

De Brito Filho (1961), por meio do registro de patente nos Estados Unidos US2966777 A, relata a invenção de um tipo de “barragem” composta por painéis móveis ou rotativos que operam automaticamente em algumas descargas predeterminadas. Estes painéis são arranjados de forma linear, associados um a um por pilares intermediários. De maneira a minimizar os efeitos de vibração e reduzir a zona de influência das pressões negativas, o parâmetro móvel auto-operado é dotado de nervuras e de cavidades internas. Trata-se portanto de um perfil hidrodinâmico com maior complexidade. A invenção se encontra ilustrada na Figura 2.

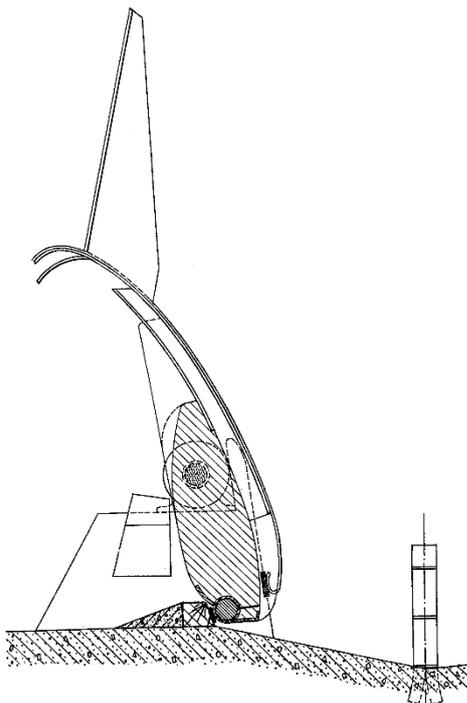


Figura 2 – “Barragem” composta por painéis móveis ou rotativos que operam automaticamente.

Fonte: De Brito Filho (1961)

Ota (1991) sugere a utilização de elemento inflável de borracha visando o alteamento, e consequente, ganho de armazenamento em reservatório (Figura 3). O mesmo é pré-fabricado e pode ser instalado tanto na crista da barragem quanto no vertedouro. Apesar de não muito conhecida na América do Sul, essa tecnologia já é utilizada há mais de 50 anos em vários países, como Japão, Estados Unidos da América, Austrália e França. O princípio de funcionamento do elemento se dá pela membrana de borracha, a qual é inflada por meio de ar ou água. Geralmente, o fluido mais empregado é o ar, devido à maior velocidade de operação do elemento e por praticamente não transmitir carga à fundação.

As principais vantagens dos elementos infláveis de borracha são: a excelente impermeabilidade de seu principal material (borracha), bem como sua resistência a diversos elementos químicos, possibilitando o seu contato com fluidos como o esgoto e a água salgada; o peso próprio reduzido; a possibilidade de controle de vazão, permitindo até mesmo a passagem de sedimentos quando vazio; a inexistência de partes móveis, evitando problemas relacionados a atrito e ao aparecimento de ferrugem e o baixo custo de manutenção. No entanto, esta alternativa apresenta certas desvantagens inerentes à sua própria constituição, *p.ex.*, maior vulnerabilidade a danos físicos ou deterioração do material e a necessidade de bombas de ar ou água, e de tubulações adequadas à sua operação (CHUQUIMUNI, 2005).

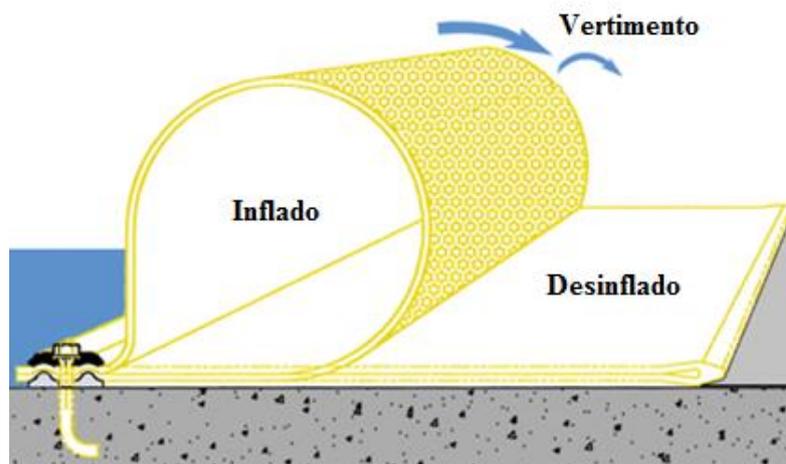


Figura 3 – Representação esquemática do elemento inflável de borracha.

Fonte: Ota (1991)

Jean Milovanovitch e Milovanovitch (1996), por meio do registro de patente WO 1996001925 A1, apresenta uma comporta automática, autônoma. Sugere-se sua utilização na elevação de novos vertedores; em vertedores construídos inicialmente sem comportas, com o objetivo de elevar o nível normal de exploração e aumentar o volume (capacidade) do reservatório, bem como em vertedores reconstruídos com o objetivo de aumentar a sua capacidade. Trata-se de uma comporta construída de forma que os anteparos são fixados em uma estrutura com treliças, articulada, cuja operação é completamente automática e autônoma de qualquer máquina, energia externa ou fator humano, levantando-se para permitir que a água passe. É composta por uma cavidade cilíndrica que atua como suporte principal, sendo o cilindro constituído por duas partes, com uma parte inserida em um suporte de articulação fixada à soleira do vertedouro, por meio de um suporte articulado fixado na direção horizontal, de montante para jusante. A estrutura tridimensional de treliça metálica que gira em torno do eixo veio de forma a interceptar ou permitir a passagem da água acionada por intermédio de contrapesos. Não foram encontrados registros de imagem desse tipo de comporta.

Ross (2000), por intermédio do registro de patente WO 2000026476 A1, também apresenta uma invenção para controle de fluxo (Figura 4). A invenção se refere à uma comporta para controle de fluxo na forma de uma barreira móvel conectada a um vertedouro por meio de dobradiças giratórias entre uma posição superior fechada, na qual se projeta acima da crista do vertedouro de modo a aumentar a sua altura, e uma posição inferior aberta. A comporta móvel é especificamente moldada para efetuar a abertura e fechamento automático e inclui uma superfície curva convexa a montante cuja curvatura é

aproximadamente equivalente à diferença de altura entre o ponto mais alto na comporta de controle de fluxo, em posição fechada, e o ponto mais alto na seção de controle, quando a comporta está aberta. O sistema utiliza de contrapeso ligado à comporta móvel e está disposto de maneira a fazer com que a comporta fique na posição fechada.

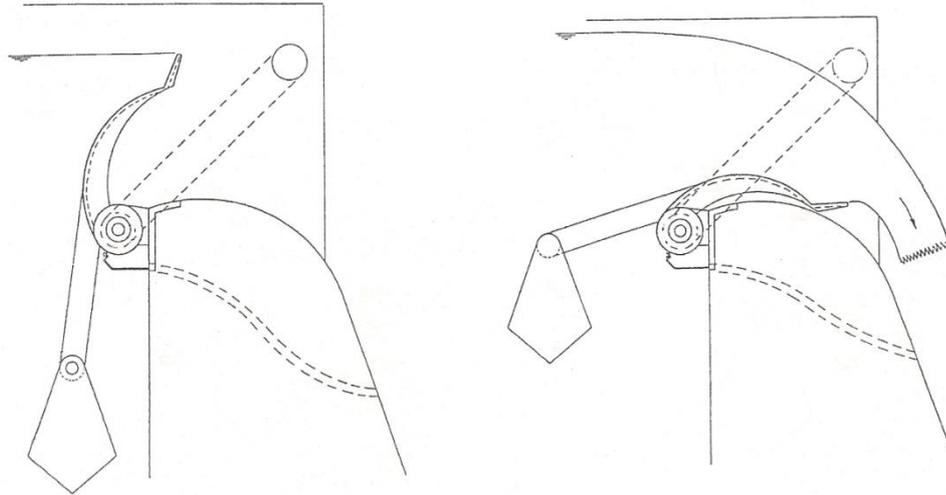


Figura 4 – Comporta para controle de fluxo

Fonte: adaptado de Ross (2000)

Bayssiguer (2001), por meio do registro de patente US 6196764 B1, relata um invento, o qual se refere a um “flashboard” automático para uma estrutura hidráulica tal como barragens de desvio, vertedouros ou taludes de proteção. O “flashboard” compreende uma parede impermeável, ou quase totalmente impermeável, de modo a ser capaz de passar de uma primeira posição, vertical, para retenção de uma massa de água, para uma segunda posição, abaixada, na qual a referida estrutura permite que a água passe sem obstrução. Há também, pelo menos um elemento de retenção, alongado, para manter a referida parede na sua primeira posição, contra a força hidrostática a montante. A partir de um nível pré-determinado, a água percorre um duto e ocupa uma câmara subterrânea, exercendo empuxo sobre o elemento de retenção, o qual faz com o que a parede passe para a segunda posição, abaixada, permitindo a passagem da água sem obstrução. A partir de então, a estrutura deve ser “armada” novamente para o próximo evento de cheia. O invento, bem como seu processo de operação, está representado na Figura 5.

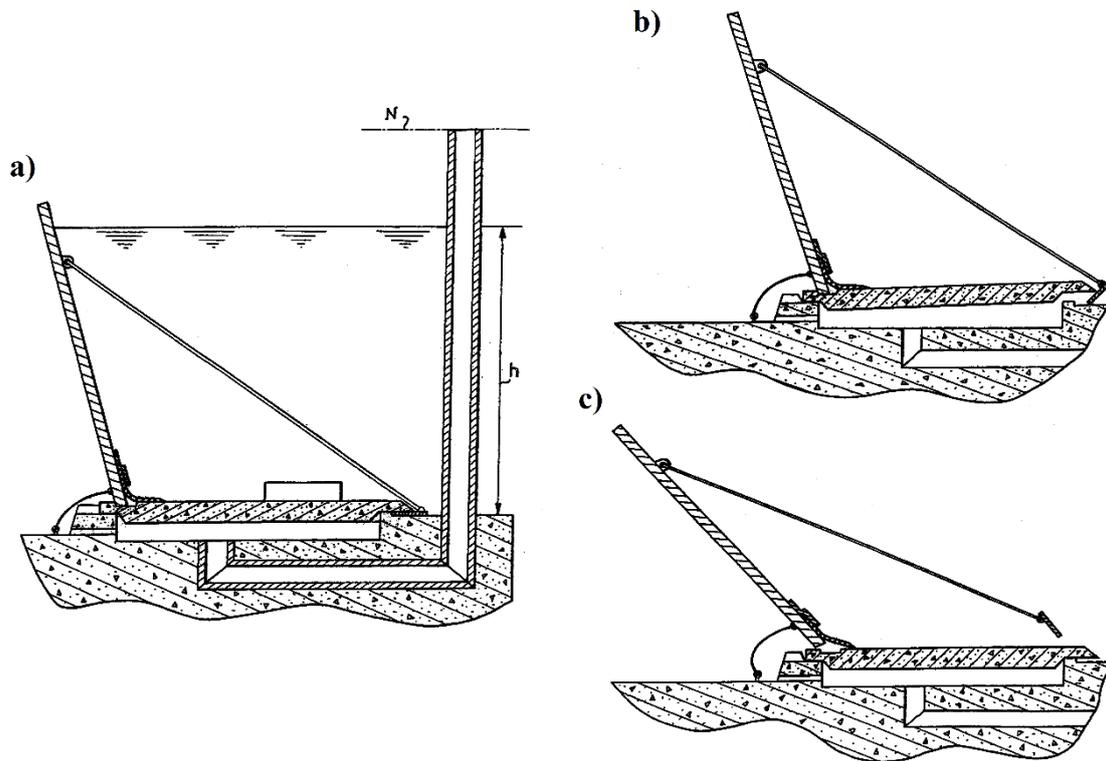


Figura 5 – “Flashboard” automático para estruturas hidráulicas.

Fonte: adaptado de Bayssiguer (2001)

Kezele et al. (2003), por meio do registro de patente US 20030024865, apresenta um sistema de controle de nível da água que escoar num canal aberto (Figura 6). O sistema de controle de nível de fluido compreende uma comporta que tem uma porção de aba interligada a uma de alavanca. A parte da aba é rotativa em torno de um primeiro ponto de articulação. O sistema compreende ainda um pórtico que é fixo em relação à aba. Uma haste interconecta a parte da aba e a parte de alavanca, e está ligada à estrutura num segundo ponto de articulação diferente do primeiro. Sob condições de escoamento variáveis no canal, o sistema funciona por: movimento absoluto da parte da alavanca e da parte da aba, e, movimento relativo entre o pórtico e a aba, de forma a controlar o nível da água no interior do canal.

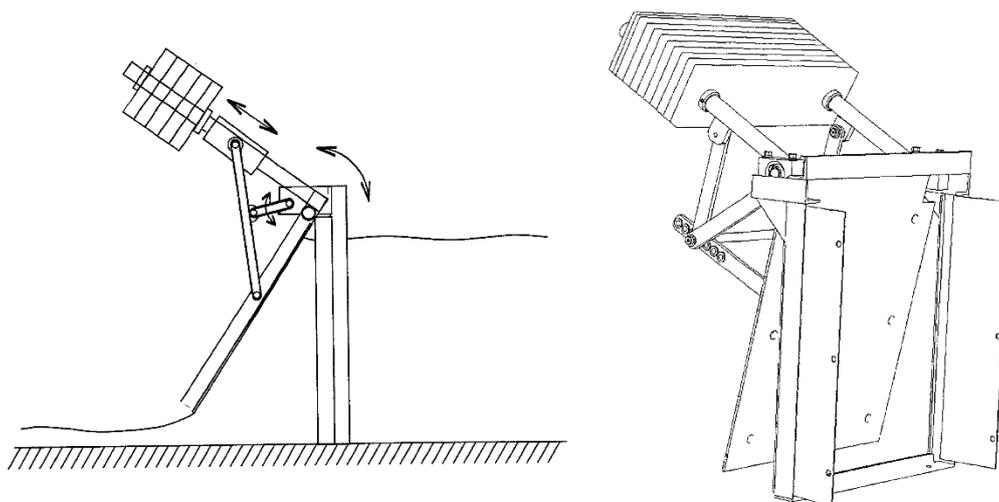


Figura 6 – Sistema de controle de nível de fluido

Fonte: adaptado de Kezele et. al. (2003)

Uma destas soluções que se encontram no mercado é a proposta pela HYDROPLUS© com registro de patente WO 2014086403 A1, criada por Chevalier (2004), a qual se trata de uma comporta tipo “fusível”, no formato trapezoidal. Ao ser instalada comportas semelhantes, lado a lado, adjacentes, sobre a soleira do vertedouro, aumenta o seu comprimento e, em caso de cheias extremas, quando o nível do reservatório atinge níveis pré-estabelecidos, a água escoar por um duto à base da comporta, exercendo uma contrapressão oriunda da coluna d’água resultante do desnível entre as cotas do nível d’água e o da soleira do vertedouro. A força resultante dessa contrapressão, somada às forças resistentes devido ao peso da comporta e do peso da água contido na mesma, faz com que a comporta “tombe”, criando uma “abertura” sobre a soleira do vertedouro, aumentando sua capacidade de vazão, resultando em um “alívio” à vazão. Atualmente, têm-se conhecimento do desenvolvimento de dois modelos diferentes pela HYDROPLUS©, intituladas *Classic Fusegate* (Figura 7) e *Fusegate Folding* (Figura 8), os quais operam a partir deste princípio de funcionamento explicitado.

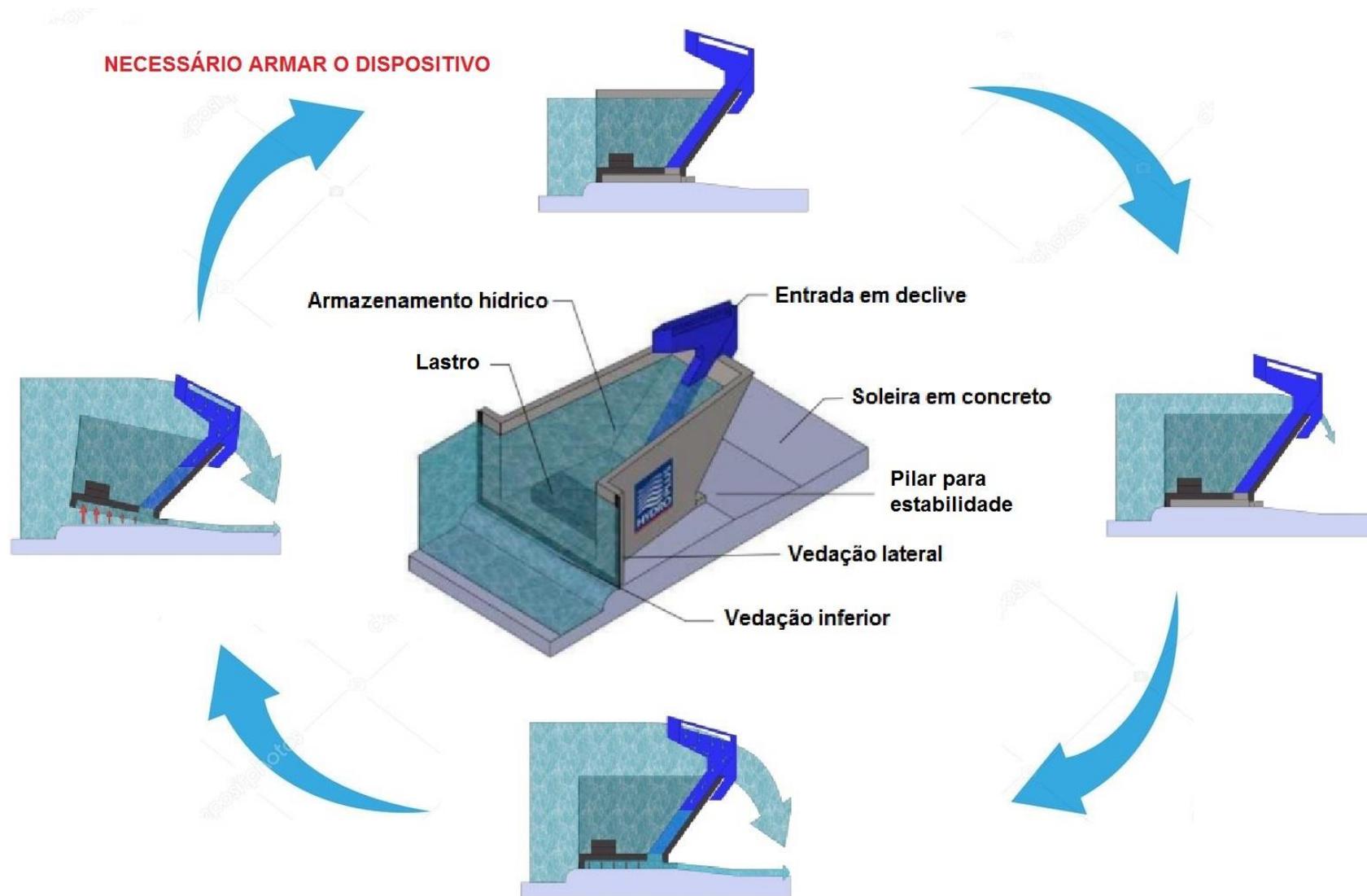


Figura 7 – Princípio de funcionamento da *Classic Fusegate*.

Fonte: adaptado de “HYDROPLUS” (2017)

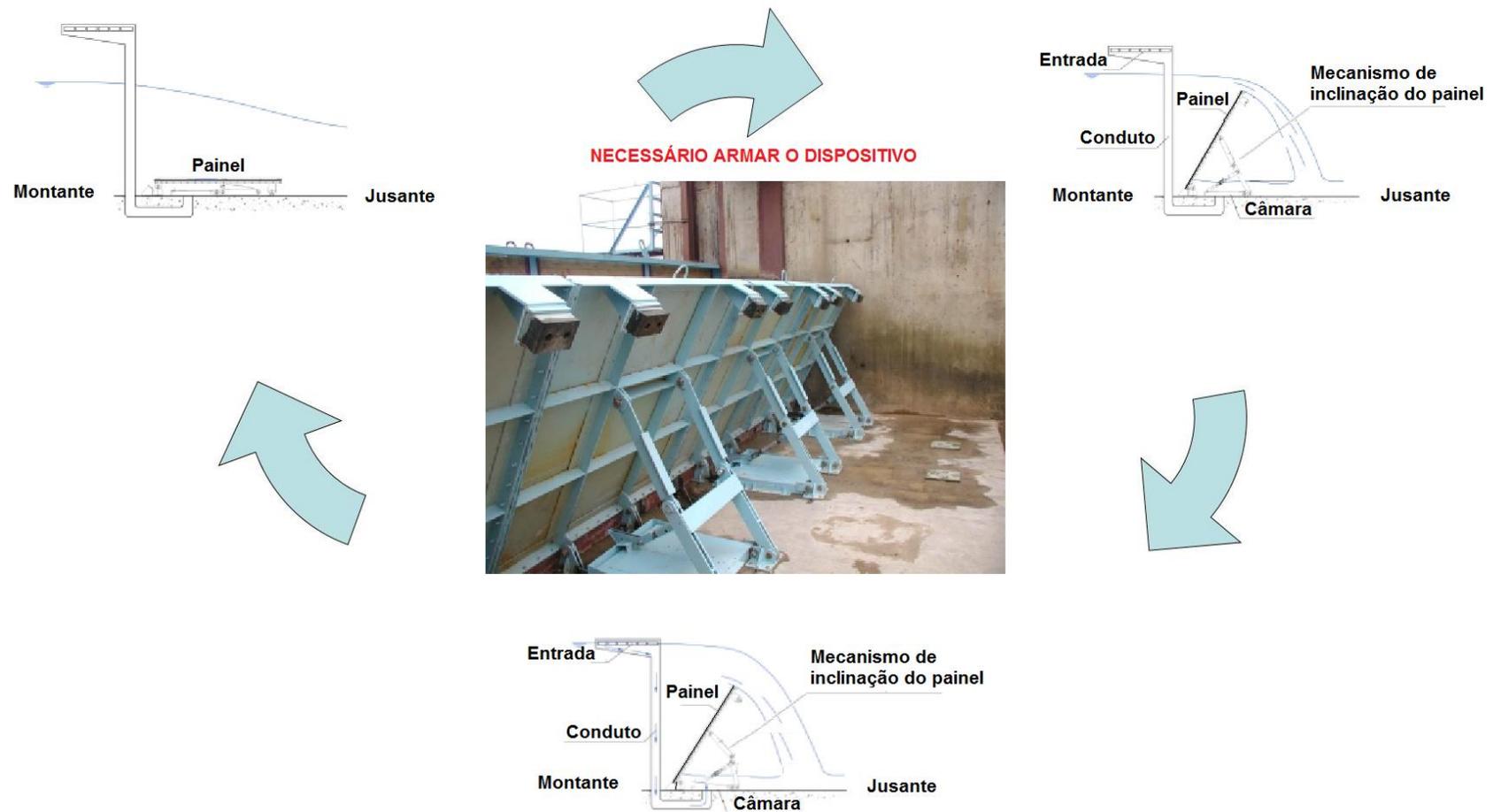


Figura 8 – Princípio de funcionamento da *Fusegate Folding*

Fonte: adaptado de “HYDROPLUS” (2017)

Outra proposta desenvolvida pela HYDROPLUS®, a qual se trata também de um modelo de comporta tipo “fusível”, é o *Smart Fusegate* (Figura 9). Este dispositivo é composto por um painel articulado, pivotado em um eixo horizontal, e possui um compartimento que acomoda um contrapeso na parte inferior, o que proporciona grande estabilidade ao dispositivo quando está na posição fechada. A água do reservatório é armazenada até a crista do dispositivo e, em situações de enchentes moderadas, há galgamento, isto é, vertimento sobre a crista.

Durante situações de enchentes extremas, o nível do reservatório atinge os níveis pré-estabelecidos, ou seja, o ponto de inclinação do *Smart Fusegate*. A água então corre para o ducto basculante que permite a passagem da água para um compartimento. Este, localizado na parte superior do painel, é preenchido e atua como um excesso de peso desestabilizador. A ação combinada da força hidrostática e o excesso de peso adicional fazem com que o dispositivo se incline, e “alivie” a vazão. Quando a inundação começa a diminuir, o nível do reservatório cai abaixo do ponto de abastecimento do duto. O fornecimento de vazão cessa e os drenos o purificam gradualmente. O contrapeso traz o *Smart Fusegate* de volta à posição fechada antes do final do evento de inundação. Desta forma, consegue-se ainda capturar “algumas das inundações” e armazená-la no reservatório. Os níveis de água a montante para a inclinação e a implantação no local são configuráveis no momento do projeto e podem ser ajustados posteriormente. No entanto, como o funcionamento deste dispositivo se deve à ação de contrapesos, sua operação fica limitada a uma faixa de vazões média de vertimento no campo de ação do contrapeso. Com isso, em situações de enchentes extremas, o tempo de resposta do enchimento do comportamento superior pode ser comprometido e influenciar no comportamento do dispositivo.

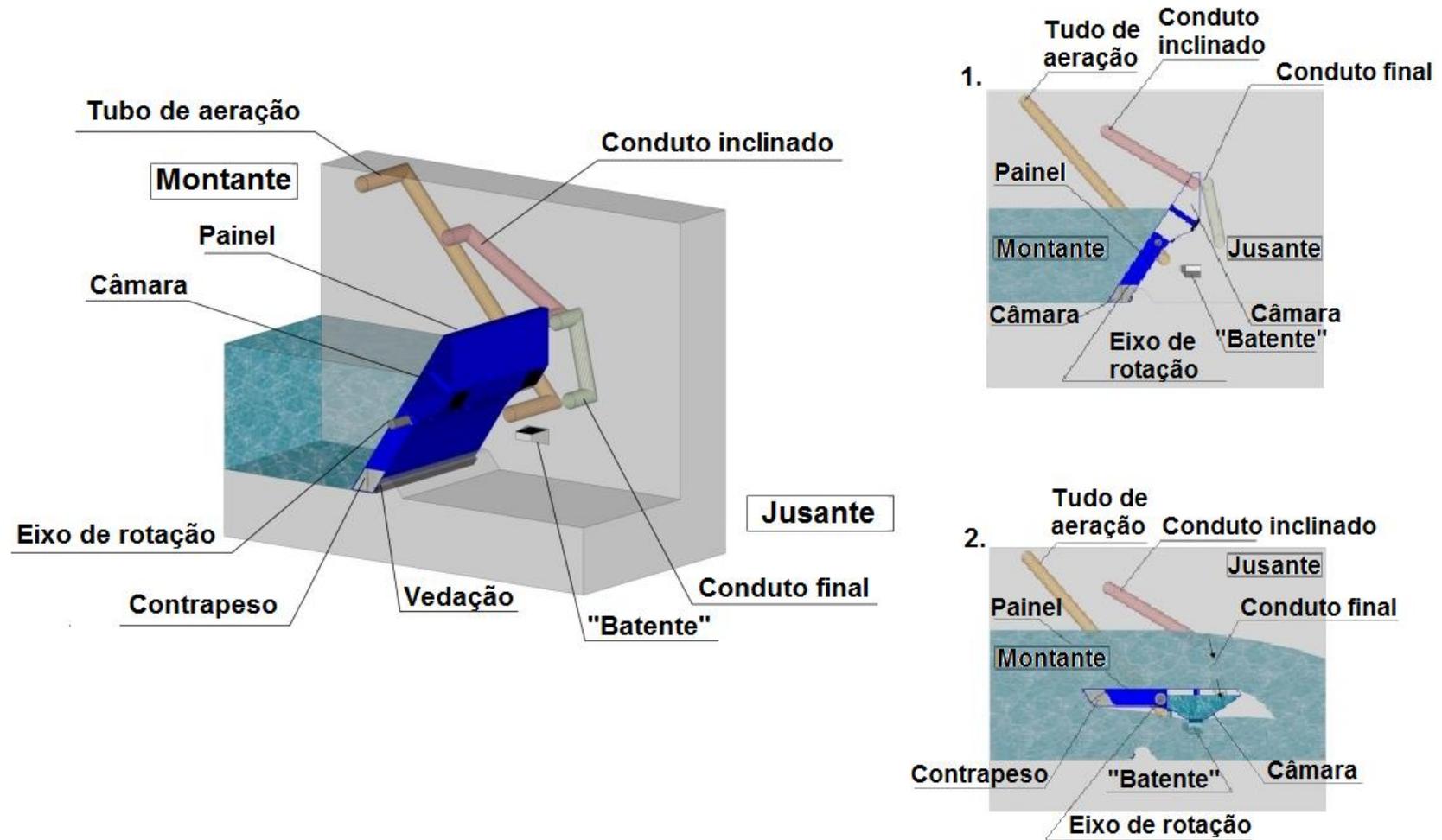


Figura 9 – Princípio de funcionamento da Smart Fusegate

Fonte: adaptado de "HYDROPLUS" (2017)

Yan, Minfei e Jianhua (2005), por meio do registro de patente CN 2719912, se refere a uma barragem formada por comportas planas articuladas em torno de um eixo que permite a rotação (Figura 10). Os paramentos superior e inferior são instalados desalinhados entre si, de forma que o centro de gravidade do conjunto garanta o equilíbrio entre as partes. Esse dispositivo utiliza a diferença dos momentos de força das placas superior e inferior do paramento em relação ao eixo rotativo, que quando desequilibrada pela ação das forças hidrostáticas se abrem e drenam a água armazenada para os canais de drenagem. Sua aplicação é sugerida na manutenção do nível d'água a montante de canais, de forma a garantir a proteção de cidades em eventos de cheias. No entanto, pode-se avaliar sua implantação e aplicação em vertedouros, objetivando um ganho de armazenamento, contanto que avalie tanto o comportamento hidrodinâmico de seu perfil quanto do escoamento referente à lâmina vertical.

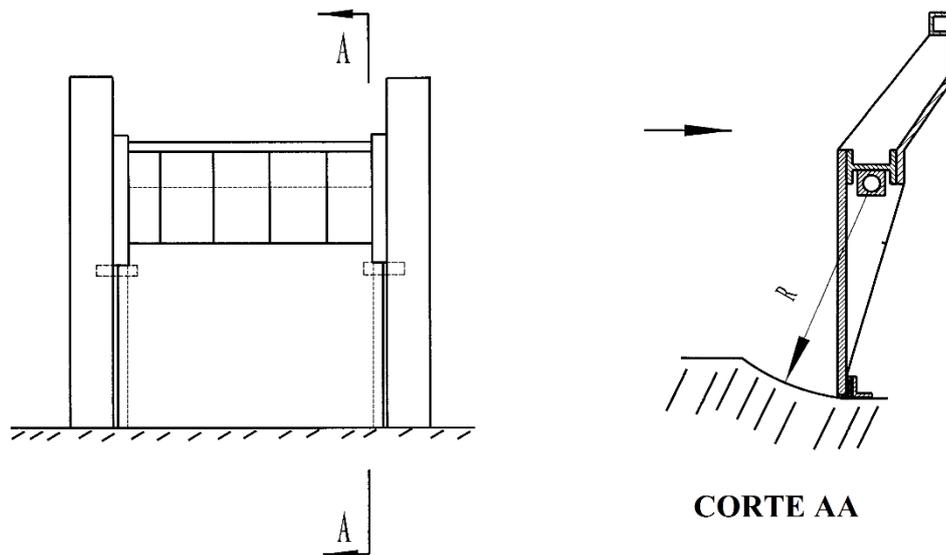


Figura 10 – Barragem formada por comportas planas articuladas em torno de um eixo de rotação.

Fonte: adaptado de Yan, Minfei, Jianhua (2005)

Tokmajyan (2005) desenvolveu uma série de estudos referentes a um modelo de dispositivo, desempenhando o papel de uma comporta automática, para ganho de armazenamento em reservatórios. O modelo de dispositivo está ilustrado na Figura 11. O princípio de funcionamento do mesmo se dá por meio do equilíbrio entre forças hidrostáticas e peso, pivotadas em um eixo horizontal. O modelo possui uma câmara oca, a qual é preenchida pelo escoamento do fluido, propiciando um volume que cria um momento rotativo no dispositivo. Segundo o autor, a determinação de um modelo matemático que descreva o

processo de abertura do dispositivo é extremamente complexa, visto que é difícil determinar as forças atuantes. No entanto, com base nas características estruturais do dispositivo, é possível alterar o comportamento das forças hidrostáticas a montante de acordo com o grau de abertura. O mesmo é retangular, de perfil curvilíneo, e está equipado com amortecedores hidráulicos, que permitem a regulação de velocidade de abertura e fechamento na operação. Para as condições estabelecidas laboratorialmente, os valores de grau de abertura ideais foram de  $65^\circ$  e  $75^\circ$ .



Figura 11 – Válvula automática em posições fechada e aberta, respectivamente.

Fonte: Tokmajyan (2005)

Tiago Filho, Stano Júnio e Nogueira (2008), por meio do registro de patente PI 0606082-0 desenvolveu um arranjo de perfil hidrodinâmico caracterizado por um módulo de vertedores e comportas móveis basculantes auto-operadas que permite o barramento de cursos d'água em trechos de baixas declividades, de forma a permitir o uso da água para fins de geração de energia elétrica ou para a regularização do nível da água para fins de navegação, mantendo o nível do reservatório contido na calha natural do rio, mesmo sob vazões extremas. O arranjo do perfil, intitulado Barragem móvel e auto-operada, está representado na Figura 12.

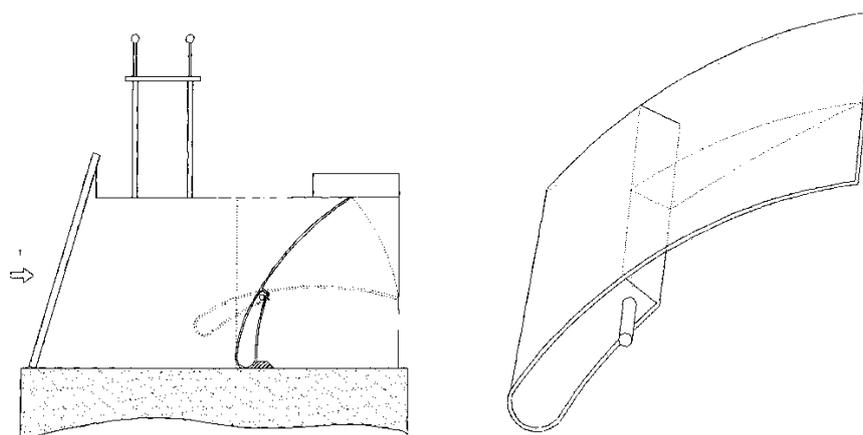


Figura 12 – Barragem móvel e auto-operada.

Fonte: adaptado de Tiago Filho, Stano Júnio e Nogueira (2008)

Lacroix, Chevalier e LeBlanc (2013), por meio do registro de patente US8591149 B2, refere-se a um invento que compreende uma espécie de “obturador” fusível. (Figura 13 e Figura 14). A estrutura pode ser instalada em estruturas hidráulicas tais como a soleira do rio, um vertedouro sobre uma barragem ou um dique de proteção. Ela inclui um elemento sólido, disposto no topo, e mantido em cima por gravidade, formando uma estanqueta, sendo capaz de retrair de modo a permitir que a água passe sem obstrução quando o nível do reservatório ou curso d’água atinge um nível predefinido. Essa operação é dada em função de uma câmara na base do elemento sólido entre o último e a superfície que o suporta, e por meios de pressurização, permitindo que a câmara seja preenchida com água para criar sob o elemento sólido um impulso direcionado para cima quando a água no reservatório ou curso de água atinge o nível predefinido. O referido elemento é dimensionado em termos de peso e tamanho de modo a ser afastada pela água quando se atinge o nível predefinido.

A sugestão do autor é que normalmente a estrutura seja instalada ao longo da soleira do vertedouro, podendo inclusive ser replicada e disposta lado a lado, com vista a aumentar o nível de água no reservatório a montante da referida soleira. Desse modo, permite-se aumentar o nível de retenção da barragem e/ou melhorar a segurança da referida barragem em face de inundações. Outra sugestão é que possa ser instalada na soleira do vertedouro de um dique, o qual se destina a proteger as regiões adjacentes contra inundações, sendo que a estrutura instalada no vertedouro do dique tenha um local adequado escolhido para que, em caso de inundações, a água penetre num reservatório de armazenamento temporário ou em terra escolhida sem perigo para outras regiões adjacentes ao rio.

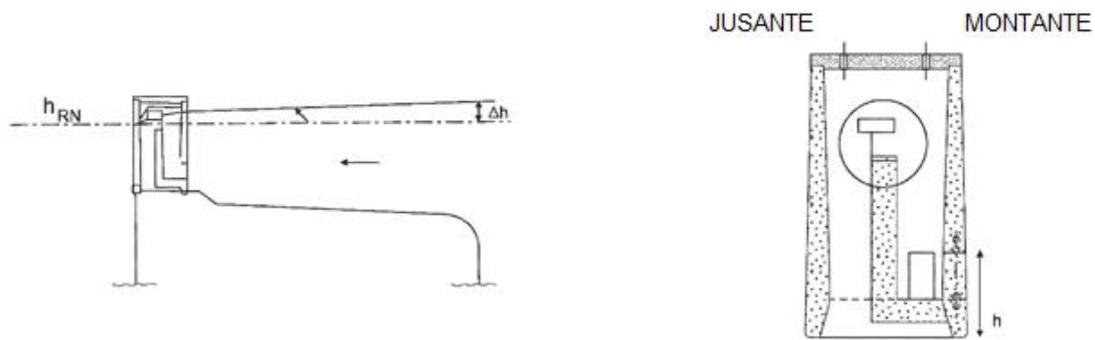


Figura 13 - Obturador fusível. Vista lateral.

Fonte: Lacroix, Chavalier e LeBlanc (2013)

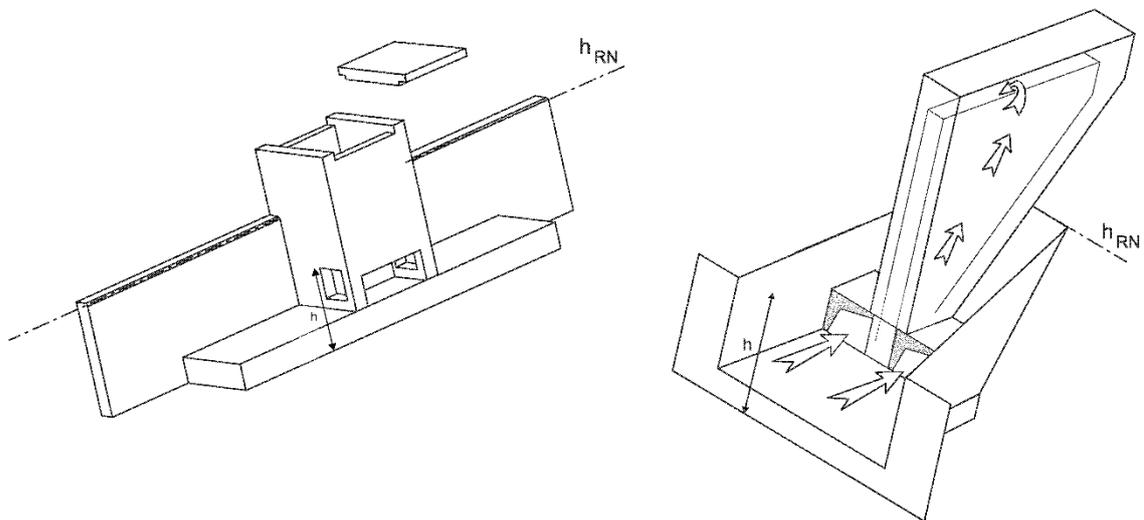


Figura 14 – Obturador fusível. Vista frontal.

Fonte: Lacroix, Chavalier e LeBlanc (2013)

Aughton, Mareels e Erik Weyer (2016), por meio do registro de patente PI BR 0113419-1 B1, se referem a um sistema para ser aplicado para o controle do nível da água em canais, especialmente para irrigação e tem como objeto proporcionar uma porta de controle, ou comporta, com reduzido requerimento de torque no motor para o seu levantamento, além de possibilitar um meio de medir a vazão de água. Portanto, sua principal aplicação, segundo os inventores, se dá para controle de níveis em canais, e não se trata de um dispositivo auto-operado, contudo, pode-se estudar a sua implantação em vertedores, a partir de sistemas de comando para acionamento do motor. Este sistema está representado na Figura 15.

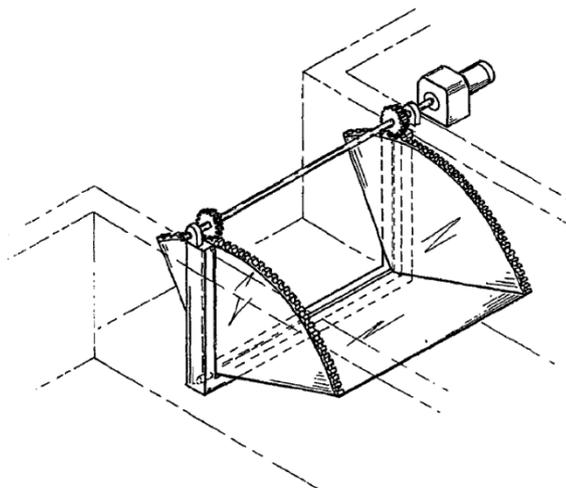


Figura 15 – Porta de controle de níveis em canais.

Fonte: adaptado de Aughton, Mareels e Erik Weyer (2016)

Rodriguez (2014) realizou em seu trabalho o estudo e dimensionamento de um mecanismo, semelhante a uma comporta, instalada na crista de um vertedouro, com a finalidade de ganho de capacidade de armazenamento em reservatório (Figura 16). No entanto, há poucos detalhes referentes ao memorial de cálculo deste trabalho, bem como, pouca precisão por parte do autor na determinação da intensidade e ponto de aplicação das forças atuantes na estrutura. As simulações numéricas realizadas no referido trabalho por meio do software *ANSYS Fluent* não representam a operação do mecanismo, nem estabelecem as condições que o mesmo encontraria em campo. Foram adotadas considerações como escoamento monofásico e fechado e simulações para apenas um ângulo de abertura. Estes fatores são preponderantes nos resultados, os quais não possuem reprodutibilidade. Além disto, o mecanismo supracitado não teve um modelo reduzido desenvolvido. Portanto, desconhece-se sua real operação e comportamento.

O perfil hidrodinâmico transversal sugerido por Rodriguez (2014) constitui uma das principais referências deste trabalho, e será utilizado à princípio no desenvolvimento do mecanismo para acréscimo de capacidade de armazenamento, comprovando a sua funcionalidade. Para isso, realizou-se todos os cálculos estruturais e modificações necessárias, bem como a confecção de um modelo reduzido e simulações computacionais com escoamento bifásico.

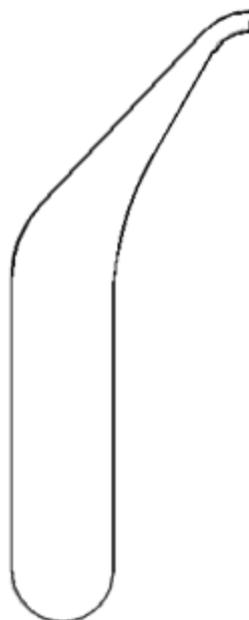


Figura 16 – Perfil hidrodinâmico transversal de um mecanismo semelhante a uma comporta fusível.

Fonte: Rodriguez (2014)

Sabe-se que a maioria dos mecanismos convencionais, disponíveis na literatura, conforme foi exposto, apresentam vários inconvenientes, entre os quais se destaca: problemas com transporte sólido fluvial; mecanismos de comando complicados e de difícil conservação; e estruturas pouco robustas. A utilização desses mecanismos implica também em diversas imposições operativas, como a necessidade de que a estrutura seja permanentemente assistida, com operadores sempre disponíveis, além de rotinas de testes e manutenções preventivas frequentes. Tais aspectos devem sempre ser ponderados no desenvolvimento deste mecanismo, visando contornar estes entraves, bem como apresentar viabilidade econômica para sua implantação.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Descrição geral**

A fim de atingir os objetivos propostos, dividiram-se os materiais e métodos em três partes, sendo elas: caracterização da área de estudo, planejamento hidroenergético e desenvolvimento do mecanismo para acréscimo de armazenamento em reservatório.

A caracterização da área de estudo, embora em muitos trabalhos na literatura seja tratada apenas como uma etapa descritiva, desempenha um papel essencial neste trabalho, visto que todo o desenvolvimento do mecanismo é voltado para as características do seu local de implantação. Portanto, são de grande relevância fatores como: localização do reservatório e posição do empreendimento na partição de queda; determinação das áreas que o influencia; localização no corpo hídrico; arranjo do empreendimento, tipo de extravasor para vazões extremas; e análises de qualquer possível restrição na provável implantação do mecanismo.

No planejamento hidroenergético, procura-se determinar de quanto será o acréscimo de capacidade de volume no reservatório, advindo da alteração da cota de vertimento e o valor do incremento na vazão regularizada. Para isso, serão realizadas análises hidráulicas-hidrológicas no reservatório, englobando o cálculo do ganho de capacidade de armazenamento, por meio da análise da regularização e do diagrama de Conti-Varlet. A ideia central, nestas análises, se baseia na correlação entre os reservatórios em cascata, uma vez que o princípio de armazenamento de reservatórios considera a entrada de água (afluência) e a vazão regularizada (ou turbinada). Consegue-se ainda nesta abordagem, estipular o ganho energético nas hidrelétricas, em cascata, a jusante, e realizar uma análise econômica preliminar para determinar se o lucro sucedido deste ganho, em vazão turbinada, é suficiente para a concessionária viabilizar o investimento da alteração da cota de vertimento. Neste âmbito, não é necessário conhecer ainda qual o mecanismo será utilizado para o acréscimo de capacidade de armazenamento no reservatório, mas já é possível estipular um investimento máximo viável.

Na terceira parte, têm-se o desenvolvimento do mecanismo em si, o qual incorpora a determinação do melhor perfil hidrodinâmico e balanço de momento físico, pivotado em eixo horizontal, para que se possível, o mesmo atue automaticamente. Têm-se subdivido neste item, etapas de simulação computacional e de experimentação laboratorial, que se trata de ferramentas essenciais na comprovação e validação do mecanismo em desenvolvimento. A partir daqui, o mecanismo será intitulado “comporta”, visto que o mesmo apresenta função e características semelhantes.

### 3.2 Caracterização da área de estudo

Tem-se por objeto de estudo a Represa Lindolpho Pio da Silva Dias, também denominada Barragem Ribeirão do Cipó, a qual se localiza na Rodovia do Contorno, no km 17, na zona rural do município de Poços de Caldas/MG, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 21°51'13"S e longitude 46°36'29"O. Hidrologicamente, o objeto se encontra pertencente à bacia do ribeirão das Antas, a qual está localizada na porção sul do estado de Minas Gerais, com área de drenagem em torno de 512 km<sup>2</sup>, ocupando áreas parciais dos municípios de Poços de Caldas, Caldas e Andradas, conforme pode ser observado na Figura 17. O divisor de águas da porção oeste da bacia supramencionada pode ser representado pela divisão estadual entre Minas Gerais e São Paulo. (ERHA; DME/PC, 2012)

Embora pertencente à bacia do ribeirão das Antas, o objeto em estudo está localizado mais especificamente na sub-bacia do Ribeirão do Cipó, um de seus principais afluentes, locado, de montante para jusante, na sua margem esquerda. (Figura 18). Além do ribeirão do Cipó, os principais afluentes do ribeirão das Antas, de montante para jusante, pela margem esquerda, antes da confluência com o próprio, são o córrego da Ventania, ribeirão dos Tamanduás, córrego do Coqueirinho; e depois de sua confluência, os córregos das Amoras, Aguiar e da Laranjeira. Pela margem direita, de montante para jusante, os principais afluentes são os córregos do Mata Vaca e do Retiro dos Moinhos, ribeirão das Vargens, córregos das Pitangueiras, ribeirão dos Poços e os córregos das Danças e da Palha.

Conforme definido pelo Plano Diretor do Município de Poços de Caldas, por meio das Leis Complementares nº 74/2006 e nº 84/2007, a Barragem do Cipó se encontra inserida em Zona Rural de Proteção Ambiental, não sendo, portanto, admitida a implantação de usos e ocupações com destinação urbana. A mesma é também protegida quanto à utilização para fins urbanos e das atividades extrativas minerais, por meio do Decreto Municipal nº 5.075, de 05 de julho de 1994.

No entanto, o entorno do reservatório antes da criação destas leis, já pertencia a poucos proprietários rurais com grandes áreas de terras. A garantia da sua não ocupação, bem como do não parcelamento do restante da área de entorno, com ressalva da ocupação antrópica consolidada mencionada, só foi garantido por intermédio da Lei Municipal nº 6.551, de 21 de novembro de 1997, a qual estabeleceu também a obrigatoriedade de implantação de via perimetral à represa. Logo, para um aumento de nível máximo do reservatório se faz necessário um processo de desapropriação das áreas afetadas.

Há também diretrizes para o uso e a preservação do solo na sub-bacia do Cipó, na qual a represa se insere, bem como para a utilização da mesma, estabelecidas por meio do Decreto Municipal nº 6.240, de 07 de abril de 1999. Há informações de que a Área de Preservação Permanente (APP), pertencente ao DME/PC, está atualmente em processo de recuperação.

Em relação aos recursos hídricos, o volume da Represa Lindolpho Pio da Silva Dias é utilizado para abastecimento de água potável, regularização da vazão das sub-bacias, a jusante, para a geração de energia, uso industrial, agroindustrial, além da manutenção dos níveis dos reservatórios e vazão dos rios a jusante, propiciando volume de água nas cachoeiras, as quais são atrativos turísticos do município. Assim, as atividades admitidas e/ou praticadas no reservatório estão abaixo descritas:

- Psicultura;
- Navegação comercial, recreativa e esportiva;
- Pesca comercial, e esportiva, geralmente praticada pela população do município de Poços de Caldas, propiciada pela boa qualidade da água, bem como pela quantidade de peixes encontrada no reservatório;
- Turismo praticado pela população de Poços de Caldas e de outras cidades, que têm no reservatório uma opção de lazer, uma vez que a mesma é aberta à visitação das 7h00min às 17h00min, todos os dias da semana.

Salienta-se que, apesar da pesca comercial e esportiva ser uma das atividades realizadas no reservatório, não há mecanismo de transposição de peixes. A justificativa técnica apresentada para a não implantação é de que, por meio de campanhas e pesquisas ictiológicas na bacia do ribeirão das Antas, não foram identificadas espécies migradoras. Além disso, a presença de várias quedas d'água e barramentos a jusante também atuam como barreira natural à dispersão das espécies de peixes.

Como já observado, a barragem do Cipó compõe a cascata de reservatórios instalados no ribeirão das Antas, cuja finalidade principal é de regularização. Neste corpo hídrico são operadas 05 pequenas centrais hidrelétricas em cascata a jusante, as quais possuem regularização diária (ou no máximo, mensal). Portanto, o reservatório se localiza em um dos afluentes do ribeirão das Antas, conhecido por ribeirão do Cipó, e com isso, regulariza a vazão das demais bacias e reservatórios a jusante localizadas no ribeirão das Antas. (Figura 18).

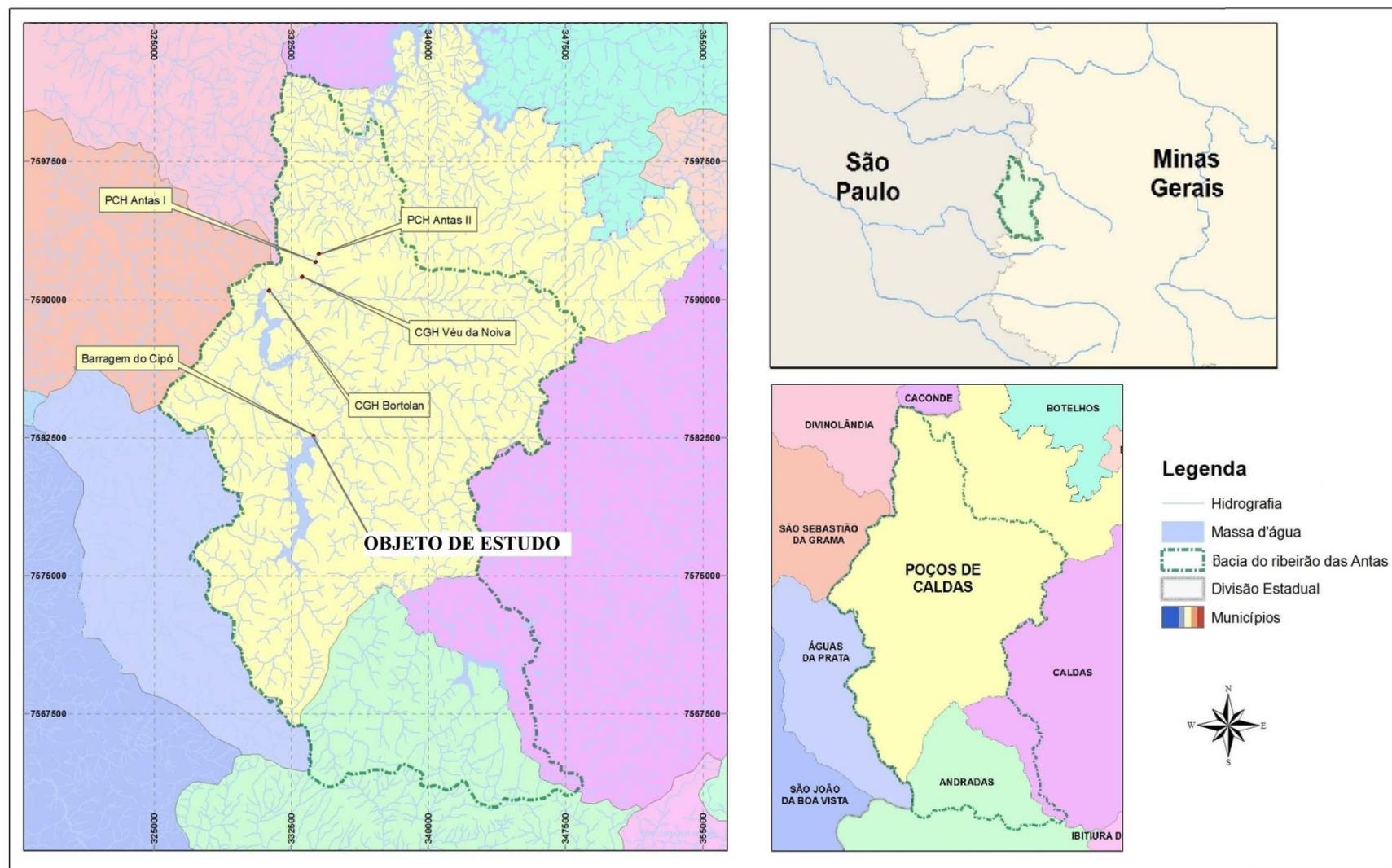


Figura 17 – Localização geral da bacia do ribeirão das Antas, bem como da área de estudo e sua partição de quedas, a jusante.

Fonte: adaptado de ERHA e DME/PC (2012)



Figura 18 – Localização do ribeirão das Antas e do ribeirão do Cipó.

Fonte: Hidroweb (2017)

Conforme exposto, há 5 (cinco) outros reservatórios implantados neste ribeirão além do objeto em estudo, sendo que a DME Poços de Caldas Participações, grupo que controla as empresas DME Distribuição e DME Energética, detém os contratos de concessão e os registros de todos os referidos aproveitamentos e reservatórios. São estes: CGH Bortolan ou MCH José Togni (0,72 [MW]); CGH Véu das Noivas ou PCH Engenheiro Ubirajara Machado de Moraes (0,90 [MW]); PCH Antas I ou UHE Engenheiro Pedro Affonso Junqueira (8,78 [MW]); PCH Antas II (16,5 [MW]) e PCH Padre Carlos ou PCH Rolador com (7,80 [MW]). A partição de queda, ilustrada na Figura 19 e apresentada na Tabela 1 com algumas informações adicionais, prevalece para o curso de água, sendo que estes aproveitamentos estão todos em operação. Acrescenta-se aos reservatórios mencionados, alguns outros reservatórios na bacia do ribeirão das Antas, inclusive com alguma regularização, entretanto de pequeno volume armazenado, quase todos com a finalidade de captação de água para irrigação ou para uso industrial.

Tabela 1 – Aproveitamentos hidrelétricos na bacia do ribeirão das Antas.

Fonte: ERHA e DME-PC (2012)

Aproveitamento	Curso de Água	Área de Drenagem [km <sup>2</sup> ]	Níveis Operacionais [m]		Potência Instalada [MW]	Status
			Montante	Jusante		
CGH Bortolan	Ribeirão das Antas	340,0	1244,20	1231,23	0,72	Operando
CGH Véu das Noivas		366,0	1211,95	1183,80	0,90	
PCH Antas I		455,7	1170,44	1080,85	8,78	
PCH Antas II		457,4	1080,85	919,30	16,5	
PCH Rolador		512,0	897,20	848,20	7,80	

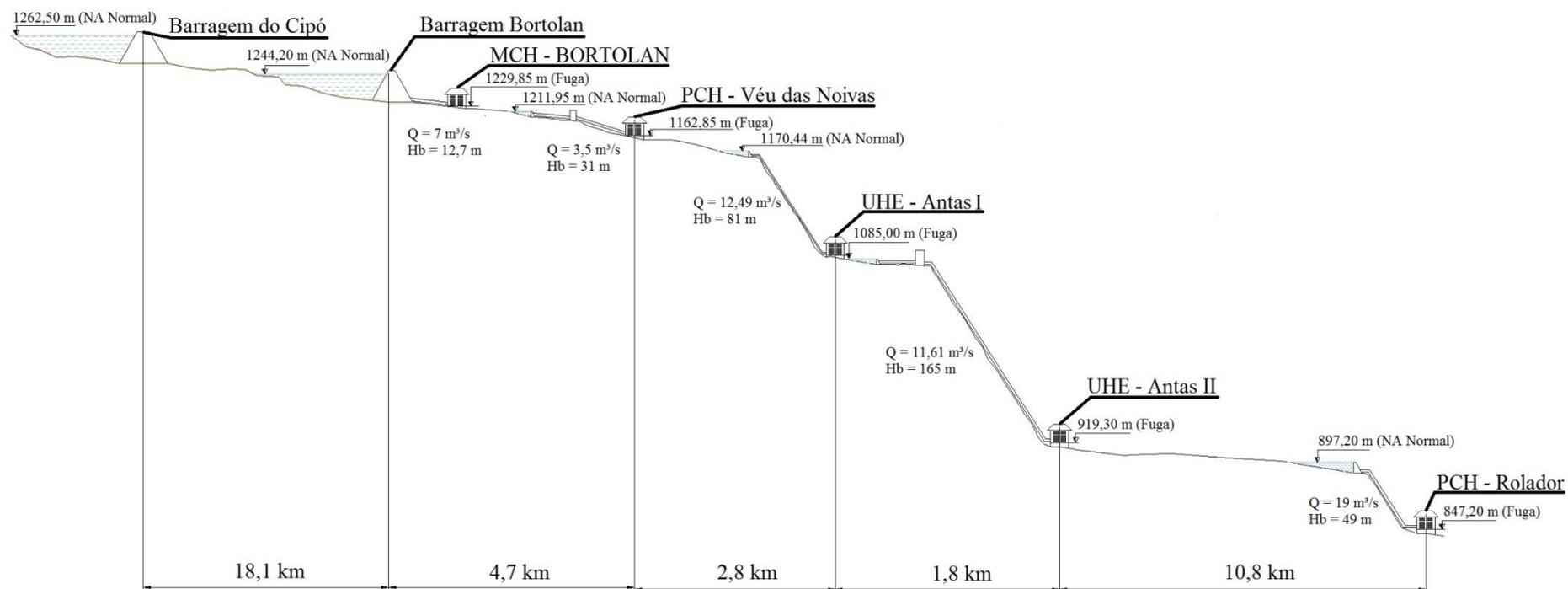


Figura 19 – Aproveitamentos hidrelétricos na bacia do ribeirão das Antas.

Fonte: ERHA e DME-PC (2012)

A barragem do Cipó foi instalada em 23 de maio de 1999, em aterro compactado, com altura máxima de 27 [m], crista na elevação 1.267,00 [m], e possui 500 [m] de comprimento (Figura 20). O reservatório de acumulação ocupa uma área alagada de aproximadamente 4,60 [km<sup>2</sup>], e apresenta um volume total de aproximadamente 30 milhões de [m<sup>3</sup>], com volume útil de 29 milhões de [m<sup>3</sup>] e vida útil de 2.000 anos.



Figura 20 – Barragem, em aterro compactado, da Barragem do Cipó.

Fonte: elaborada pelo autor. Data: 04/08/2016.

O vertedouro do tipo soleira livre, com perfil Creager, foi construído em concreto, e está locado na ombreira esquerda, desincorporado da barragem, conforme pode observado na Figura 21. Trata-se de uma estrutura para o controle do nível máximo no período de chuvas, e não possui dispositivos para controle de vazão. As principais características do vertedouro estão dispostas na Tabela 2 e suas estruturas podem ser visualizadas na Figura 22, vista a montante, e Figura 23, a jusante. No mais, a estrutura hidráulica em questão tem sua bacia de dissipação provida de degraus, conforme Figura 24. Ainda que não seja possível ser visualizado na Figura 22, visto que, o nível do reservatório se encontrava bem próximo à crista, destaca-se que, por questões construtivas ou de estabilidade, utilizou-se o paramento de montante inclinado, conforme Figura 26.

Tabela 2 – Principais características estruturais do vertedouro da Barragem do Cipó.

Fonte: SUPRAM (2012)

Estrutura	Características
Vertedouro	Tipo: Creager
	Comprimento: 8 [m]
	Vazão (TR = 10.000 anos): 10,31 [m <sup>3</sup> /s]
	Dissipador de Energia: Degraus de amortização hidráulica e bacia de dissipação



Figura 21 – Ombreira esquerda, onde se encontra o vertedouro, desincorporado da barragem.

Fonte: elaborada pelo autor. Data: 04/08/2016.



Figura 22 – Vertedouro da Barragem do Cipó, visão de montante para jusante.

Fonte: elaborada pelo autor. Data: 04/08/2016.



Figura 23 – Vertedouro da Barragem do Cipó, visão de jusante para montante.

Fonte: elaborada pelo autor. Data: 04/08/2016.



Figura 24 – Vertedouro provido de degraus.

Fonte: elaborada pelo autor. Data: 04/08/2016.

A tomada d'água, em concreto armado, também foi locada próxima à ombreira esquerda e se constitui em uma estrutura tipo torre. As principais características apresentadas por essa estrutura podem ser visualizadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais características estruturais da tomada d'água da Barragem do Cipó.

Fonte: SUPRAM (2012)

Estrutura	Características
Tomada d'água	Tipo: torre
	Número de vãos: 1
	Comprimento: 7,90 [m]
	Altura máxima: 19,30 [m]
	Largura: 6,00 [m]
	Cota da soleira: 1249,40 [m]

Na Figura 25 pode ser visualizada a tomada d'água em duas perspectivas diferentes.



Figura 25 – Tomada d'água da Barragem do Cipó.

Fonte: elaborada pelo auto. Data: 04/08/2016.

A operação da barragem fica sob a responsabilidade do DME/PC, sem funcionários localizados diretamente na área, monitorada por meio de câmeras. A válvula dispersora e equipamentos não são automatizados, no entanto, o DME/PC apresenta intenções de que isto seja realizado futuramente. A operação do reservatório é realizada em função, tanto da manutenção do nível do reservatório Bortolan, para que a geração de energia das PCH's Antas I e Antas II sejam privilegiadas no horário de ponta (rendimento máximo), quanto da liberação de água para abastecimento público. A vazão máxima prevista para a captação de água para o abastecimento é de 0,42 [m<sup>3</sup>/s]. Para regulação da vazão, a barragem possui uma válvula de fundo, que durante os meses de seca, mantém uma vazão a jusante de 2,27 [m<sup>3</sup>/s], e no restante do período, garante a manutenção da vazão mínima de jusante de 0,50 [m<sup>3</sup>/s], reservando o restante até o seu vertimento. O controle das vazões defluentes é feito por meio de válvula dispersora. De acordo com os responsáveis por sua operação, não foram detectados significativos pontos de assoreamento no reservatório. Estima-se, portanto, que a vida útil do reservatório permanece sendo superior a 2.000 anos, conforme estudo do projetista da barragem. O reservatório atinge as cotas 1262,50 [m] (máximo normal) e 1252,37 [m] (menor nível já registrado). Os níveis operativos do reservatório a partir do máximo normal são dados por meio do vertedouro e podem ser observados na Figura 26.

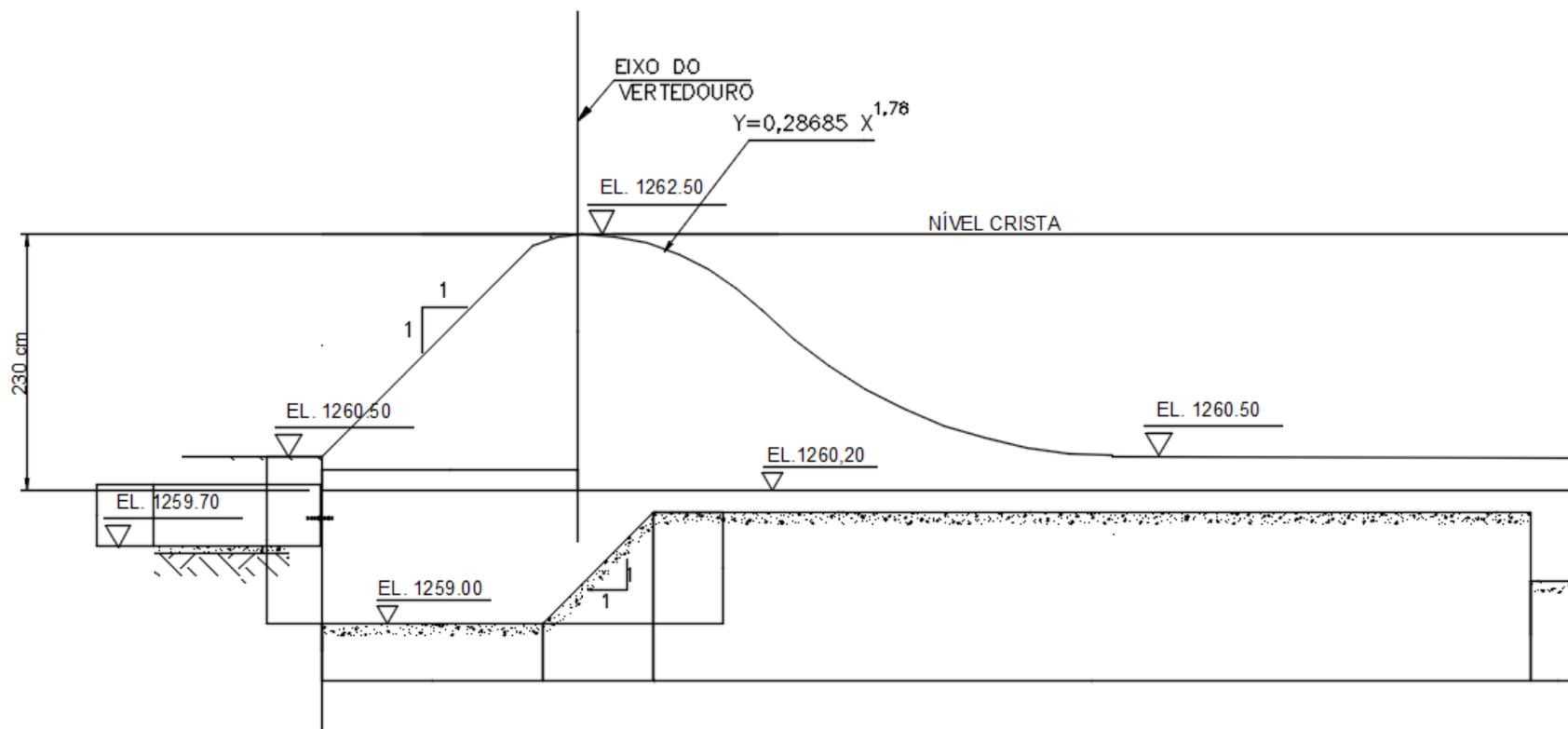


Figura 26 – Níveis de operação do reservatório em relação ao vertedouro.

Fonte: ERHA e DME/PC (2012)

### 3.3 Planejamento hidroenergético

Conforme explicitado, nesta análise se considera o cálculo do volume do reservatório por meio da análise de regularização, utilizando-se de métodos para determinação desse volume, e do diagrama de Conti-Varlet, procurando estabelecer o máximo valor de incremento na vazão regularizada. Nos item posteriores serão apresentados os materiais e métodos utilizados nessa análise. Consegue-se ainda nesta abordagem, estipular o ganho energético nas hidrelétricas, em cascata, a jusante, e realizar uma análise econômica preliminar para determinar se o lucro sucedido deste ganho, em vazão turbinada, é suficiente para a concessionária viabilizar o investimento da alteração da cota de vertimento.

#### 3.3.1 Métodos de determinação de volumes de armazenamento de reservatórios para regularização anual

##### 3.3.1.1 Cálculo do volume do reservatório para atender uma lei de regularização

De acordo com Villela e Mattos (1975), uma vez conhecidas as vazões naturais ou de entrada no reservatório, deve-se calcular o volume deste para atender a uma dada lei para as vazões regularizadas ou de saída do reservatório.

A lei de regularização é dada pela função da equação (1), segundo os mesmos autores.

$$y(t) = \frac{Q_r(t)}{\bar{Q}} \quad (1)$$

Sendo:

$Q_r(t)$  – vazão regularizada em função do tempo (t);

$\bar{Q}$  – vazão média no período considerado.

Dada a sequência no tempo das vazões naturais  $[Q(t)]$ , e conhecida a lei de regularização  $y(t)$ , é possível, segundo os autores, determinar a capacidade mínima do reservatório para atender a esta lei. Neste caso, a vazão regularizada  $[Q_r(t)]$  é a soma de todas as vazões que saem do reservatório no tempo t. Os autores não fazem menção à evaporação, a despeito de preconizarem que esta poderá ser computada como função da área líquida exposta e de dados climatológicos, ou ainda, poderá ser subtraída das vazões naturais que entram no reservatório.

Portanto, a capacidade mínima de um reservatório para atender a dada lei de regularização é dada pela diferença entre o volume acumulado que seria necessário para atender àquela lei no período mais crítico de estiagem e o volume que aflui ao reservatório no mesmo período. Por meio da consideração de diversos períodos de estiagem, o mais crítico é aquele que resultar na maior capacidade do reservatório. Deste modo, torna-se possível calcular a capacidade do reservatório para vários períodos de estiagem e adotar a maior capacidade encontrada (VILLELA; MATTOS, 1975).

Os autores sugerem a suposição da seguinte lei de regularização:

$$y(t) = 1 \quad (2)$$

Isto significa que se deseja uma vazão regularizada constante e igual à média ( $\bar{Q}$ ). Os mesmos ainda avaliam que, no Brasil, o período crítico é definido pelos meses de maio a outubro e que nos rios perenes do sul do país não é necessário que todo o período crítico esteja dentro de um ano civil.

Assim, o volume necessário para manter a vazão média mensal ( $\bar{Q}$ ) durante esses meses é dado pela equação (3).

$$V_n = \bar{Q}(\Delta t_{\text{MAI}} + \Delta t_{\text{JUN}} + \Delta t_{\text{JUL}} + \Delta t_{\text{AGO}} + \Delta t_{\text{SET}} + \Delta t_{\text{OUT}}) \quad (3)$$

Sendo:

$V_n$  – volume necessário para manter a vazão média [ $\text{m}^3$ ];

$\Delta t_{\text{MAI}}$  – número de segundos do mês de maio;

$\Delta t_{\text{JUN}}$  é o número de segundos do mês de junho; e assim por diante;

$\bar{Q}$  – vazão média mensal da série histórica [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

O volume que chega ( $V_a$ ) ao reservatório neste período é dado, segundo Villela e Mattos (VILLELA; MATTOS, 1975), pela equação (4).

$$V_a = (Q_{\text{MAI}}\Delta t_{\text{MAI}} + Q_{\text{JUN}}\Delta t_{\text{JUN}} + \dots + Q_{\text{SET}}\Delta t_{\text{SET}} + Q_{\text{OUT}}\Delta t_{\text{OUT}}) \quad (4)$$

Sendo:

$Q_{\text{MAI}}$  – a vazão média mensal do mês de maio [ $\text{m}^3$ ];

$\Delta t_{\text{MAI}}$  – número de segundos do mês de maio;

$Q_{\text{JUN}}$  – a vazão média mensal do mês de junho [ $\text{m}^3$ ];

$\Delta t_{\text{JUN}}$  – número de segundos do mês de junho; e assim por diante.

Assim, a capacidade ( $C_r$ ) mínima do reservatório para manter aquela lei de regularização será dado pela equação (5).

$$C_r = V_n - V_a \quad (5)$$

Sendo:

$C_r$  – capacidade mínima do reservatório [ $m^3$ ];

$V_n$  – volume necessário para manter a regularização [ $m^3$ ].

$V_a$  – volume afluente ao reservatório [ $m^3$ ].

### 3.3.1.2 Diagrama de Rippl (Diagrama de Massas)

Conforme Villela e Mattos (1975), o diagrama de massas, também conhecido como diagrama de Rippl, é definido como a integral da hidrógrafa, e trata-se de um diagrama de volumes acumulados que afluem ao reservatório. (Figura 27). Portanto, as tangentes a essa curva são as vazões em cada tempo considerado, uma vez que é a integral da hidrógrafa.

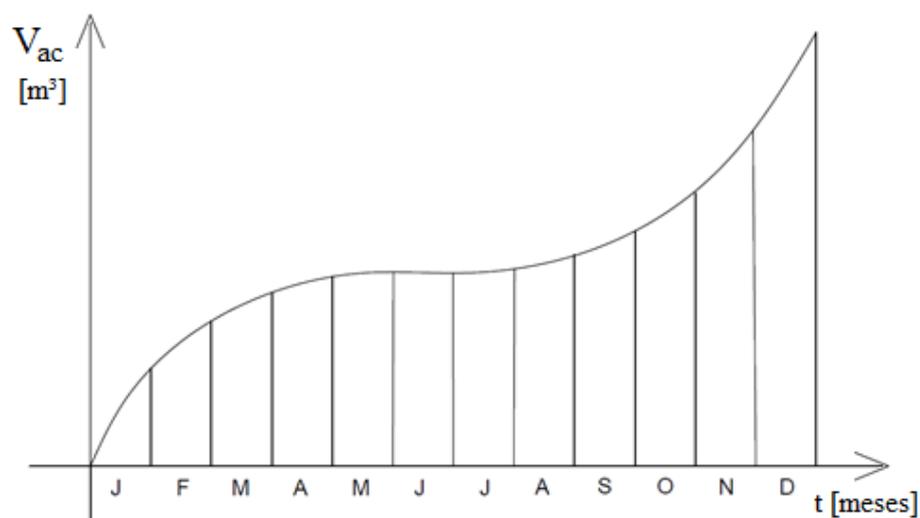


Figura 27 – Diagrama de Massas.

Segundo Paiva e Paiva (2001), esta técnica parece ser o primeiro método racional conhecido para se estimar o volume de armazenamento necessário para regularizar uma certa vazão, e é bastante notória, sendo descrita em quase todos os livros de hidrologia básica. O método apresenta como principais vantagens a simplicidade de seu procedimento e a sua fácil compreensão. Além disso, como o método utiliza série histórica, leva em consideração a sazonalidade, a correlação serial e outros parâmetros das vazões, que estão embutidos dentro da série usada na análise.

As vazões a serem regularizadas em geral são constantes. Demandas sazonais podem ser utilizadas, mas mudanças nas vazões regularizadas como função do volume contido no reservatório não podem ser considerados. O volume de armazenamento estimado cresce com o aumento do tamanho da série histórica. Portanto, é difícil relacionar o valor do volume de armazenamento a vida útil do reservatório. Não é possível calcular o volume do reservatório para uma certa probabilidade de falha. Por outro lado, o volume de armazenamento para o maior período de estiagem de um registro histórico de N anos tem uma probabilidade de falha dada pela equação (6). O único volume de armazenamento calculado é o maior deles, ou seja, o que corresponde ao pior período de estiagem. (PAIVA; PAIVA, 2001)

$$P_f = \frac{1}{(N_p + 1)} \quad (6)$$

Em que:  $N_p$  – número de anos da série histórica utilizada.

A sequência do método, segundo os mesmos autores, é a seguinte:

- a) corrige-se a vazão devido ao efeito da evaporação e da precipitação direta sobre o lago (reservatório);
- b) calculam-se, com as vazões corrigidas, os volumes afluentes para cada período e depois se acumula estes volumes para cada período, partindo do princípio que o reservatório está cheio no início;
- c) constrói-se a curva de massa das vazões, ou seja, um gráfico no qual são colocados os volumes afluentes acumulados em função do tempo (conforme apresentado na Figura 28);
- d) coloca-se no mesmo gráfico da curva de massa das vazões uma reta que representa a demanda, calculando-se o volume da demanda para cada período e acumulando estes volumes, sendo a reta traçada com os volumes acumulados em função do tempo (é conveniente salientar que para cada demanda diferente se obterá uma nova reta);
- e) tangenciando o primeiro pico da curva de massa das vazões traça-se uma reta paralela à reta da demanda, e mede-se a maior diferença entre a curva de massa das vazões afluentes e a reta da demanda, obtendo-se um primeiro volume para o reservatório, que seria suficiente para suprir aquele período crítico analisado;
- f) se a reta da demanda cortar a curva de massa após o primeiro pico, após este ponto volta-se a traçar novamente uma reta tangenciando o próximo pico da curva de massa e repete-se o item e;
- g) este procedimento é repetido até que se analise toda a curva de massa;

h) o volume útil do reservatório será o maior valor dos volumes do reservatório calculados para todos os períodos críticos da série de vazões analisadas.

Na Figura 28 é apresentado um exemplo do método da curva de massa das vazões.

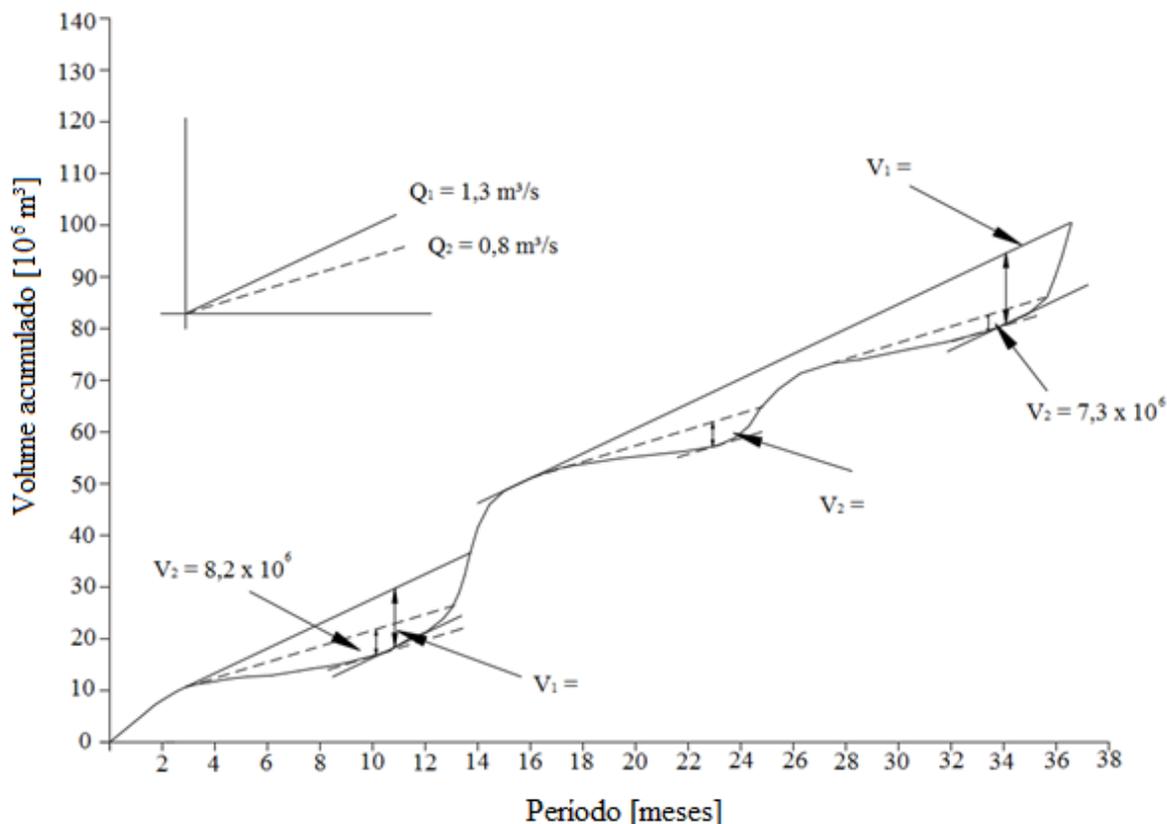


Figura 28 – Curva de massa das vazões (Curva de Rippl)

Fonte: Paiva e Paiva (2001)

### 3.3.1.3 Diagrama de Rippl residual ou das diferenças totalizadas

Este método é uma versão mais sofisticada do Diagrama de Rippl (Curva de massa), sendo também muito conhecido e facilmente encontrado na literatura. O método é muito similar ao da curva de massa das vazões, apresentando um inconveniente adicional que é a menor facilidade de compreensão. Ao permitir o uso da escala das vazões acumuladas muito maior do que no método da curva de massa dos mesmos dados o método se torna mais preciso que o da curva de massa (PAIVA; PAIVA, 2001).

Basicamente o procedimento é o mesmo que o do método da curva de massa das vazões. O reservatório é suposto cheio no início, sendo que as diferenças são:

a) ao invés de se acumular os volumes das vazões afluentes corrigidas para cada intervalo de tempo, acumula-se o volume resultante da diferença entre a vazão afluente corrigida e a vazão média, para cada intervalo;

b) da mesma maneira, a reta dos volumes das demandas acumuladas passa a ser a reta dos volumes resultantes da diferença entre a demanda e a vazão média acumulados.

Na Figura 29 se tem um exemplo de método da curva de massa residual das vazões.

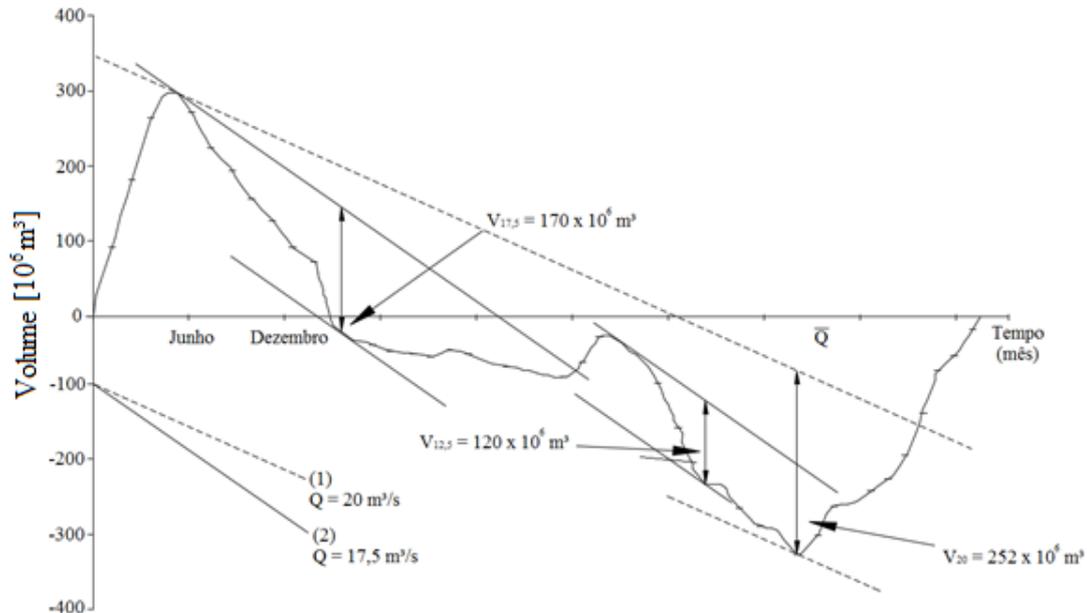


Figura 29 – Curva de massa residual das vazões

Fonte: Paiva e Paiva (2001)

### 3.3.1.4 Método da simulação da operação

Neste método, as mudanças no volume contido num reservatório finito são calculadas fazendo um balanço hídrico do reservatório, e segundo Paiva e Paiva (2001) pode ser realizado por meio da equação (7).

$$V_{t+1} = V_t + Q_t - D_t - \Delta Ev_t - O_t, \text{ tal que } 0 < V_{t+1} < C \quad (7)$$

Em que:

$V_{t+1}$  – volume contido no reservatório no fim do período de tempo  $t$  (início do período de tempo  $t+1$ );

$V_t$  – volume contido no reservatório no início do período de tempo  $t$ ;

$Q_t$  – volume afluente (correspondente à demanda vazão afluente corrigida);

$D_t$  – volume correspondente à demanda ou vazão regularizada;

$\Delta Ev_t$  – perdas por evaporação do reservatório durante o período de tempo  $t$ ;

$O_t$  – outras perdas;

$C$  – volume de armazenamento máximo do reservatório (volume útil).

O método, assim como os demais, é bastante simples e também assume que o reservatório está cheio no início, permitindo inclusive obter a possibilidade de falha para um determinado volume de armazenamento. É possível obter um valor para o volume do reservatório tal que só esvazie uma vez para a série de dados. Este volume é o mesmo que se acharia usando os métodos da curva de massas ou das diferenças totalizadas.

As principais vantagens do método em relação ao da curva de massa e ao da curva de massa residual são:

Permite calcular a probabilidade de falha, considerar demandas constantes ou sazonais e restrições no fornecimento (regra de operação). Um inconveniente do método, em relação aos dois anteriores, está no processo de tentativa e erro, ao se ter que escolher o volume do reservatório.

O procedimento para se aplicar o método é o seguinte:

- a) escolhe-se um volume útil (C) para o reservatório, assume-se que o reservatório está inicialmente cheio e que as vazões históricas são representativas das vazões futuras do rio;
- b) calcula-se a equação (7) para cada vazão da série em análise;
- c) conta-se, por meio de um programa computacional ou fazendo um gráfico de volume ( $V_t$ ) em função do tempo (t), quantas vezes o reservatório falhou (que esvaziou e ou então que ficou sujeito as regras de operação) e calcula-se a probabilidade de falha utilizando a equação (8).

$$P_f = \frac{p}{Np} \quad (8)$$

Em que:

$P_f$  é a probabilidade de falha;

$p$  é o número de intervalos de tempo durante o qual o reservatório está vazio;

$Np$  é o número de intervalos total de tempo da série histórica utilizada.

A confiabilidade da série utilizada, isto é, a probabilidade de sucesso é dada pela equação (9).

$$R_f = 1 - P_f \quad (9)$$

Em que:

$R_f$  – confiabilidade da série utilizada;

$P_f$  – probabilidade de falha, calculada pela equação (8)

d) se a probabilidade de falha é inaceitável, escolhe-se um novo valor de capacidade (C) e se repete o procedimento, até que se obtenha para a probabilidade de falha desejada o volume útil do reservatório.

A Figura 30 apresenta um exemplo de curvas de regularização para diferentes probabilidades de falha, a partir de uma série histórica de 50 anos de vazões utilizadas por Paiva e Paiva (2001).

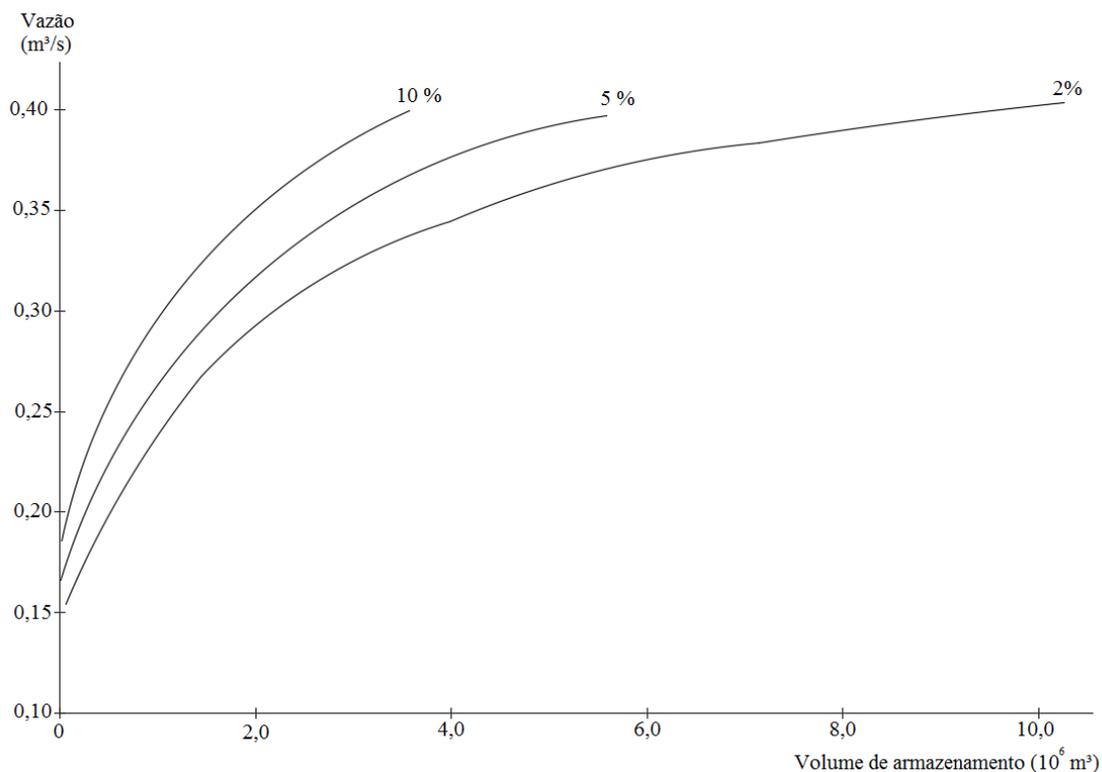


Figura 30 – Curva de regularização para diferentes probabilidades de falhas.

Fonte: Paiva e Paiva (2001)

### 3.3.2 Diagrama de Conti-Varlet (Regularização Máxima)

Conforme Villela e Mattos (1975), este método pressupõe que, dado um reservatório de capacidade ( $C_r$ ), se deseje saber qual a lei  $y(t)$  que mais se aproxima da regularização total, isto é,  $y(t) = 1$ . Inicialmente, constrói-se, com dados de vazões naturais, o diagrama de massas, dado pela curva ABCD, na Figura 31.

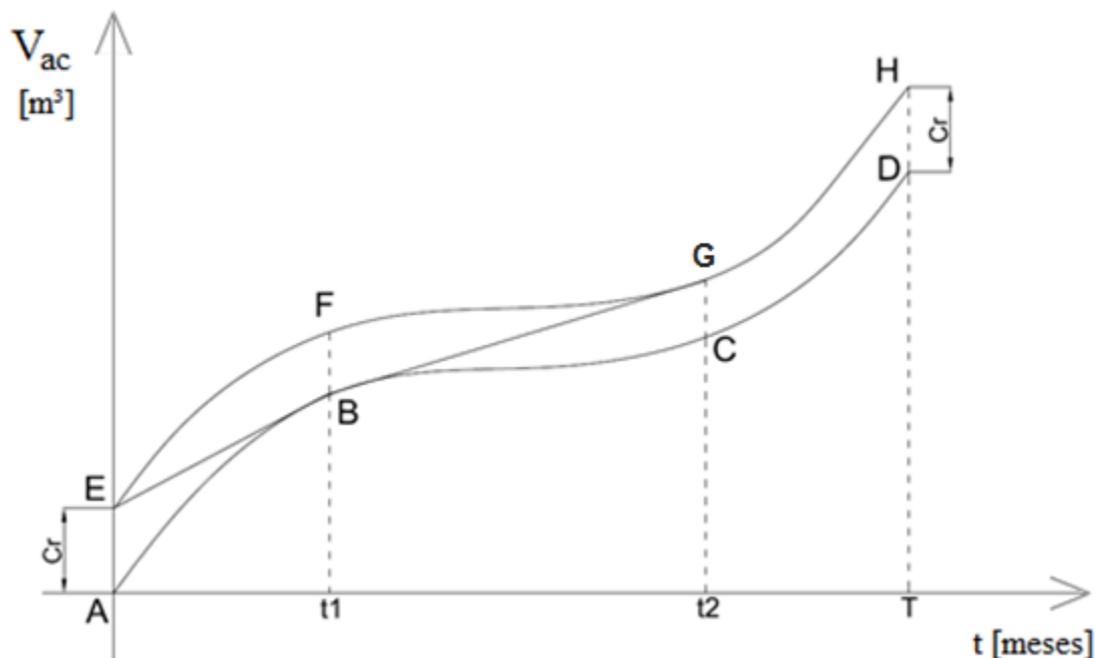


Figura 31 – Determinação da lei de regularização, dada à capacidade do reservatório.

Redesenhando o diagrama de massas deslocados da capacidade do reservatório ( $C_r$ ), na curva EFGH, da Figura 31, Villela e Mattos (1975) observam o seguinte:

a) Se na origem da contagem dos tempos o reservatório estiver vazio, a reta CE é a melhor regularização, pois até o tempo “ $t_1$ ” as vazões naturais são muito grandes e a regularização será tanto maior quanto mais se diminuïrem as vazões que saem do reservatório.

b) No tempo “ $t_1$ ” o reservatório estará completamente cheio, bem como no tempo “ $t_2$ ” o reservatório estará completamente vazio.

c) A reta BG será a melhor regularização, pois será a máxima vazão que sair do reservatório no período de estiagem ( $t_1, t_2$ ).

d) Para que o reservatório continue completamente vazio e para que feche o ciclo, ficando ao final vazio como no início, deve-se no intervalo de tempo ( $t_2, T$ ) derivar as vazões naturais, isto é, curva GH.

Assim, a regularização máxima possível, partindo de um reservatório vazio, será a curva EBGH da Figura 31. Villela e Mattos (1975) concluem também que a máxima regularização é aquela dada pela curva descrita por um fio inextensível tendido entre as curvas ABCD (Diagrama de Massas) e EFGH (Diagrama de Massas deslocado do volume do reservatório).

### 3.3.3 Estudo preliminar de viabilidade econômica

Os parâmetros utilizados na viabilidade econômica serão: Valor presente líquido (VPL) e Custo nivelado da energia (LCOE), definidos nas equações (10) e (11). Quando o VPL é positivo o empreendimento é rentável e viável economicamente. Caso contrário, o empreendimento não é atrativo economicamente. Já o custo nivelado de energia se refere à razão entre a somatória de custos transferidos ao ano inicial e a energia também descontada no tempo. Se o LCOE for inferior à tarifa de venda de energia, o empreendimento é viável. Logo, este pode ser definido como uma tarifa mínima de venda de energia para obtenção de viabilidade econômica (BRANKER; PATHAK; PEARCE, 2011; RANGEL, 2016).

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{E \cdot T - C_{om}}{(1+i)^t} - I \quad (10)$$

$$LCOE = \sum_{t=0}^m \frac{\left[ \frac{C_n}{(1+i)^t} \right]}{\left[ \frac{E}{(1+i)^t} \right]} \quad (11)$$

Sendo:

VPL – valor presente líquido [R\$];

LCOE – custo nivelado de energia [R\$/MWh];

T – tarifa de venda de energia [R\$/MWh];

E – energia produzida anualmente [MWh/ano];

i – taxa de desconto [decimal];

m – vida útil do empreendimento [anos];

Com – custo de operação e manutenção da usina [R\$/ano];

I – investimento inicial [R\$];

Cn – Custo do empreendimento a cada ano em [R\$/ano];

t – tempo [anos].

Uma estimativa de energia elétrica produzida por planta hidrelétrica, para o estudo de viabilidade econômica, pode ser calculada por meio das equações (12) e (13) que permitem o cálculo de potência e energia elétrica produzida, respectivamente.

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-6} \quad (12)$$

$$E_p = P \cdot \Delta t \cdot F_c \quad (13)$$

Sendo:

P – potência elétrica disponível [MW];

$\rho$  – massa específica da água = 1000 [kg/m<sup>3</sup>];

g – gravidade = 9,806 [m/s<sup>2</sup>];

Q – vazão, neste caso, o incremento na vazão regularizada [m<sup>3</sup>/s];

H – altura de queda [m];

E – energia produzida anualmente [MWh/ano];

$\Delta t$  – número de horas anuais = 8760 [h/ano];

$F_c$  – fator de capacidade (para PCH e CGH  $\approx 0,57$ ).

## 3.4 Desenvolvimento do mecanismo

### 3.4.1 Determinação do perfil hidrodinâmico do mecanismo

A determinação do perfil transversal hidrodinâmico do mecanismo para ganho de capacidade em reservatório, a ser instalado no vertedouro, é a principal etapa em seu desenvolvimento. Ela deve aliar simplicidade na construção e funcionalidade e eficiência na operação, permitindo que se armazene todo o nível desejado, e que, caso se extrapole esta cota, a vazão máxima vertente não seja limitada.

A concepção do perfil hidrodinâmico para este desenvolvimento se trata de uma inovação, a qual partiu do funcionamento da pá do rotor de uma turbina não convencional de fluxo-cruzado, conhecida também como Michell-Banki. Este tipo de turbina foi inicialmente patenteado na Inglaterra, em 1903, pelo engenheiro australiano Anthony G. M. Michell. Com o decorrer dos anos, outros engenheiros apareceram ligados ao seu desenvolvimento, como o professor e engenheiro mecânico Donát Bánki, e posteriormente, ao tomar conhecimento dos trabalhos deste, o engenheiro civil Fritz Ossberger.

A turbina Michell-Banki apresenta como principais características a simplicidade de construção, fácil instalação, manutenção simples e custo baixo. A turbina apresenta uma entrada com uma pá no distribuidor para o controle da vazão e o rotor fabricado com pás de simples curvatura, as quais serviram para a determinação do perfil transversal do mecanismo. (Figura 32).

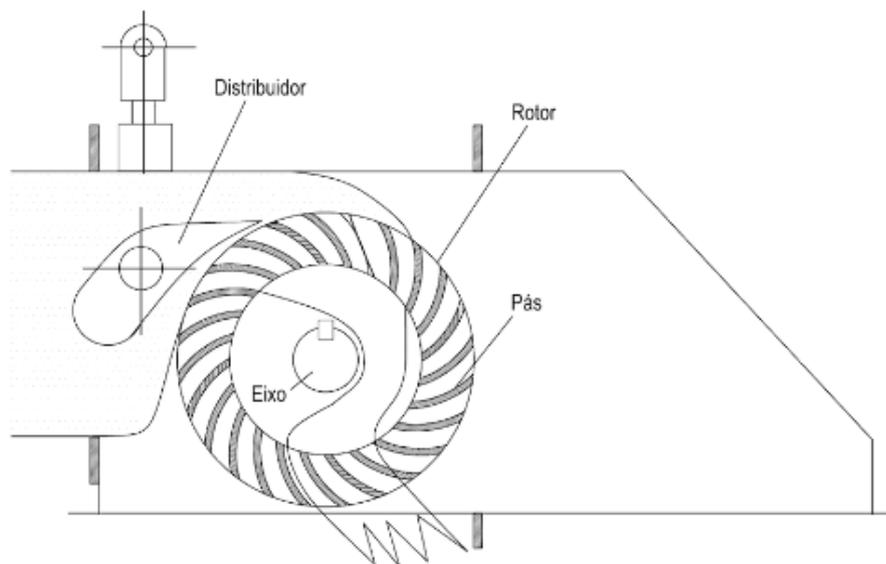


Figura 32 – Turbina Michell-Banki e seus principais componentes.

Fonte: Tiago Filho (1987)

O modelo brasileiro da turbina Michell-Banki foi desenvolvido por Tiago Filho (1987) no Laboratório de Pequenas Centrais Hidrelétricas (LHPCH) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), onde foi projetado, construído e testado um protótipo genuinamente nacional. A partir daí, em um trabalho subsequente realizado por Tiago Filho (1991), melhorias foram realizadas com a turbina Michell-Banki, atingindo rendimentos na ordem de 73%. Desde então, Michell-Banki tem sido objeto de diversas pesquisas no Laboratório de Pequenas Centrais Hidrelétricas.

No âmbito destas pesquisas, Tiago Filho, Stano Júnior e Nogueira (2008) desenvolveram um arranjo de perfil hidrodinâmico, tendo por base a pá do distribuidor de uma turbina Michell-Banki. O perfil é caracterizado por um módulo de vertedores e comportas móveis basculantes auto-operadas que permite o barramento de cursos d'água em trechos de baixas declividades. Dessa forma, a partir da sua implantação, propicia-se o uso da água para fins de geração de energia elétrica ou para a regularização do nível da água para fins de navegação, mantendo o nível do reservatório contido na calha natural do rio, mesmo sob vazões extremas. O arranjo do perfil, intitulado Barragem móvel e auto-operada, está patenteado por meio do registro PI 0606082-0, e representado na Figura 33.

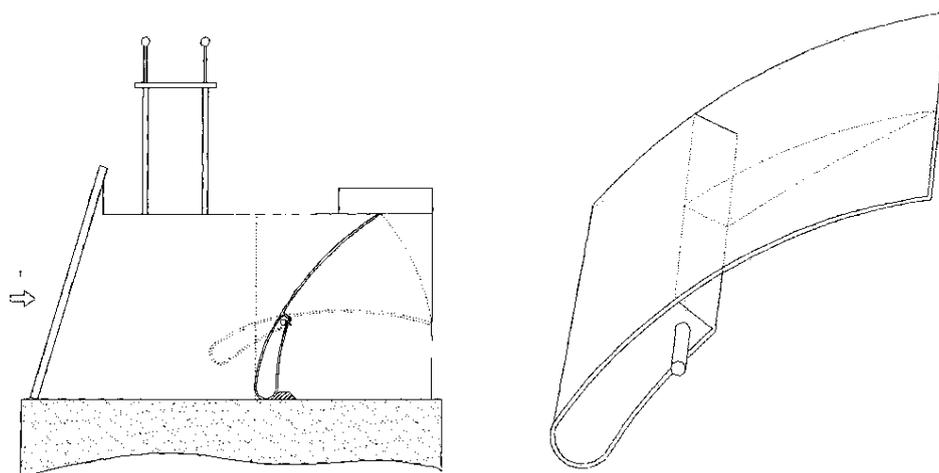


Figura 33 – Barragem móvel e auto-operada.

Fonte: adaptado de Tiago Filho, Stano Júnio e Nogueira (2008)

Posteriormente, Rodriguez (2014) realizou em seu trabalho o estudo e dimensionamento deste tipo de perfil hidrodinâmico procurando aprimorá-lo. No entanto, não há relatos da confecção de um modelo deste perfil para análise de seu comportamento, ou simulações numéricas ou computacionais, visando estabelecer a relação entre os conceitos teóricos e práticos estabelecidos. Há também a necessidade de alguns aprimoramentos nos cálculos, bem como, o desenvolvimento de análises estruturais, mecânicas e hidráulicas. O perfil mencionado pode ser visualizado na Figura 34.

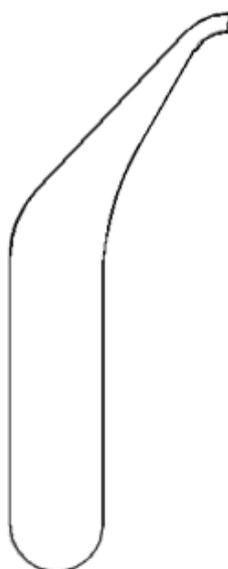


Figura 34 – Perfil desenvolvimento para o mecanismo de ganho de capacidade.

Fonte: Rodriguez (2014)

A angulação do perfil do mecanismo, ou seja, o ângulo formado entre a superfície inclinada do mecanismo e a superfície da água (Figura 35) é devido a diversos fatores, tais como a carga hidráulica, centro de massa e de gravidade da estrutura e posicionamento do eixo do mecanismo. Assim, para análise do melhor comportamento, tanto hidráulico quanto mecânico, da estrutura, há necessidade de se avaliar o ângulo de inclinação mais adequado.

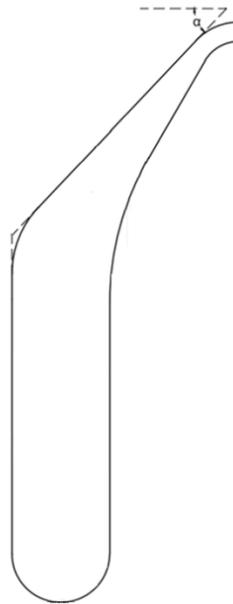


Figura 35 – Angulação do perfil desenvolvido.

Fonte: Rodriguez (2014)

### 3.4.2 Equilíbrio de Momento Físico aplicado no eixo pivotado

O somatório do momento de todas as forças aplicadas, em relação ao eixo, implica sua tendência de abertura (rotação em sentido horário) ou fechamento (rotação em sentido anti-horário). Caso o somatório seja nulo, não há tendência de rotação.

Portanto, tem-se que o somatório é dado por:

$$M = \sum_{i=1}^n F_i \cdot d_i \quad (14)$$

Sendo:

$M$  – Momento em relação ao eixo [N.m];

$F_i$  – Forças atuantes no mecanismo [N];

$d_i$  – Distância da linha de ação das forças até o eixo.

O método para a determinação do momento físico é similar à apresentada por Rodriguez (2014), diferenciando-se em relação à consideração das forças atuantes, e com algumas correções nos cálculos do referido autor.

### 3.4.2.1 Forças Atuantes

As forças atuantes sobre o mecanismo são: forças hidrostáticas, exercidas pelo contato do líquido; forças peso, exercida pela Terra tanto sobre o mecanismo quanto sobre o volume de água presente acima do mecanismo; e a força empuxo exercida em toda a superfície do mecanismo pelo líquido que o envolve.

Uma representação esquemática da distribuição dessas forças no perfil transversal do mecanismo, considerando o nível de água no topo da estrutura, pode ser visualizada na Figura 36. Um detalhamento em relação às forças atuantes sobre o mecanismo é no próximo item.

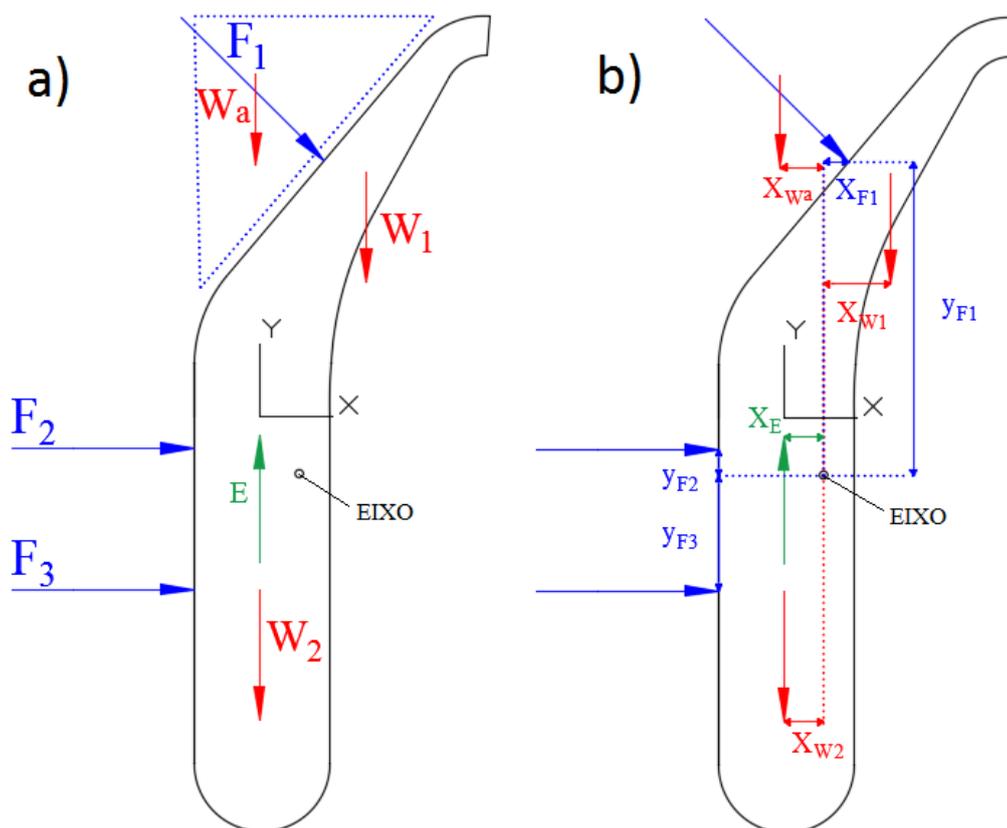


Figura 36 – Representação esquemática das forças atuantes no mecanismo (a) e seus respectivos braços de alavanca (b)

### 3.4.2.1.1 Forças Hidrostáticas

A análise das forças hidrostáticas no mecanismo, a fim de especificar: a magnitude ou módulo das forças, o sentido e a linha de ação, é dividida em: atuantes sobre uma superfície plana inclinada e uma superfície plana vertical.

#### Forças hidrostáticas sobre superfícies planas inclinadas

Segundo WHITE (2002), a força hidrostática sobre um dos lados de qualquer superfície plana submersa em um fluido uniforme é igual ao produto da pressão no centro geométrico (CG) da placa pela área da placa, independentemente do formato da placa ou do seu ângulo de inclinação.

Assim, como a pressão no CG da placa é produto entre o peso específico do fluido e a profundidade do CG em relação à superfície livre, temos que a força hidrostática é dada por:

$$F = \gamma h_{CG} A \quad (15)$$

Sendo:

$F$  – Força hidrostática sobre superfícies planas inclinadas [N];

$\gamma$  – Peso específico do fluido [N/m<sup>3</sup>];

$h_{CG}$  – Profundidade do centro geométrico em relação à superfície livre [m];

$A$  – Área da placa [m<sup>2</sup>].

A força hidrostática pode ser decomposta, da seguinte forma:

$$F_H = F \cdot \cos\theta \quad (16)$$

$$F_V = F \cdot \sin\theta \quad (17)$$

Sendo:

$F$  – Força hidrostática sobre superfícies planas inclinadas [N];

$F_H$  – Componente horizontal da força hidrostática F [N];

$F_V$  – Componente vertical da força hidrostática F [N];

$\theta$  – ângulo formado entre a superfície inclinada e a superfície da água [°]

No entanto, segundo o mesmo autor, a força hidrostática resultante não atua pelo centro geométrico (ou centroide), mas sim, abaixo dele, na parte de maiores pressões, com sua linha de ação passando pelo centro de pressão (CP) da placa, como representado na Figura 37.

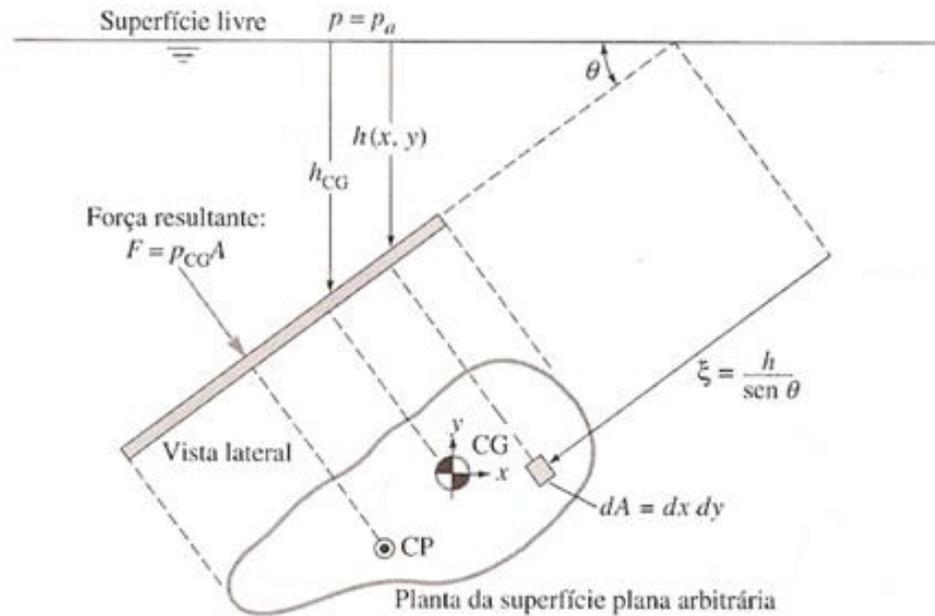


Figura 37 – Força hidrostática e centro de pressão para uma superfície plana arbitrária inclinada.

Fonte: adaptado de WHITE (2002)

As coordenadas  $(x_{cp}, y_{cp})$  do centro de pressão, em relação à origem localizada no centro geométrico, são dadas por:

$$x_{CP} = - \frac{I_{xy}}{h_{CG} A} \quad (18)$$

$$y_{CP} = - \frac{I_{xx}}{h_{CG} A} \quad (19)$$

Sendo:

$x_{CP}$  – coordenada do eixo das abscissas do CP [m];

$y_{CP}$  – coordenada do eixo das ordenadas do CP [m];

$I_{xx}$  – momento de inércia da área da placa em relação ao seu eixo x do CG [m<sup>4</sup>];

$I_{xy}$  – produto de inércia em relação ao sistema de coordenadas do CG [m<sup>4</sup>];

$h_{CG}$  – Profundidade do CG da placa em relação à superfície livre [m];

$A$  – Área da placa [m<sup>2</sup>].

Dessa maneira, tem-se que a intensidade da força hidrostática exercida na superfície inclinada do mecanismo ( $F_1$ ) é dada pela equação (20).

$$F_1 = \gamma h_{CG} A \quad (20)$$

Sendo:

$F_1$  – Força hidrostática sobre a superfície plana inclinada do mecanismo [N];

$\gamma$  – Peso específico do fluido [N/m<sup>3</sup>];

$h_{CG}$  – Profundidade do centro geométrico referente à superfície inclinada do mecanismo em relação à superfície livre [m];

$A$  – Área projetada da superfície plana inclinada [m<sup>2</sup>].

A força hidrostática em questão pode ser decomposta da seguinte forma:

$$F_{1H} = F_1 \cdot \cos\theta \quad (21)$$

$$F_{1V} = F_1 \cdot \sen\theta \quad (22)$$

Sendo:

$F_1$  – Força hidrostática sobre a superfície plana inclinada do mecanismo [N];

$F_{1H}$  – Componente horizontal da força hidrostática  $F_1$  [N];

$F_{1V}$  – Componente vertical da força hidrostática  $F_1$  [N];

$\theta$  – ângulo formado entre a superfície inclinada e a superfície da água [°]

As coordenadas ( $x_{F_1}$ ,  $y_{F_1}$ ) do centro de aplicação de  $F_1$ , ou seja, do centro de pressão, em relação à origem do sistema de coordenadas do mecanismo, são dadas por:

$$x_{F_1} = x_{CG} - \frac{I_{xy}}{h_{CG} A} \quad (23)$$

$$y_{F_1} = y_{CG} - \frac{I_{xx}}{h_{CG} A} \quad (24)$$

Sendo:

$x_{F_1}$  – coordenada do eixo das abscissas para o centro de aplicação de  $F_1$  [m];

$y_{F_1}$  – coordenada do eixo das ordenadas para o centro de aplicação de  $F_1$  [m];

$x_{CG}$  – coordenada do eixo das abscissas do CG da superfície inclinada [m];

$y_{CG}$  – coordenada do eixo das ordenadas do CG da superfície inclinada [m];

$I_{xx}$  – momento de inércia da área projetada em relação ao seu eixo x do CG [ $m^4$ ];

$I_{xy}$  – produto de inércia em relação ao sistema de coordenadas do CG [ $m^4$ ];

$h_{CG}$  – Profundidade do CG da superfície inclinada em relação à superfície livre [m];

$A$  – Área projetada [ $m^2$ ].

Uma representação esquemática da força hidrostática sobre a superfície plana inclinada do mecanismo, bem como dos parâmetros para a determinação de sua intensidade e ponto de aplicação está disposta na Figura 38 .

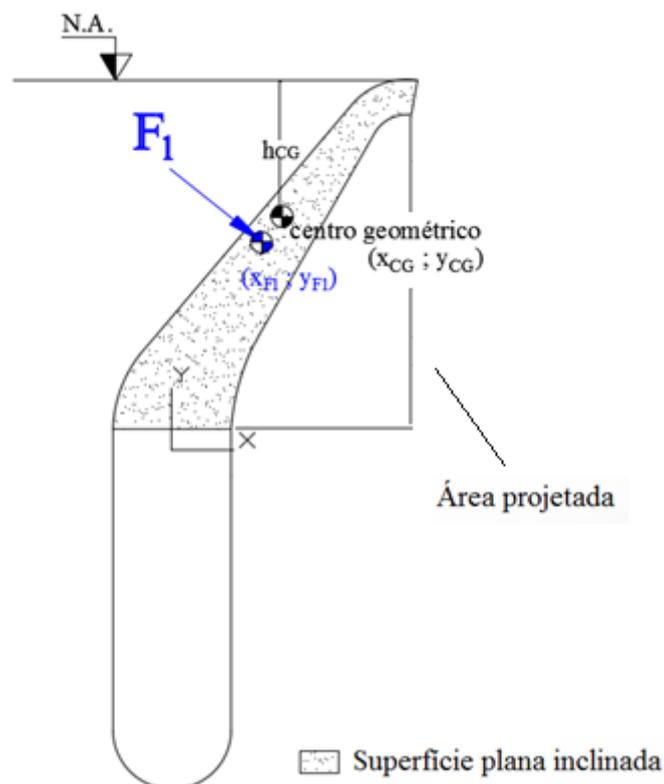


Figura 38 – Representação esquemática para determinação das forças hidrostáticas sobre superfícies planas inclinadas do mecanismo

### Forças hidrostáticas sobre superfícies planas verticais

Baseando-se em comportas de fundo, as quais, para efeito de carga hidrostática, podem ser consideradas superfícies planas verticais submersas, ERBISTI (1987) determina que a força hidrostática aplicada, considerando-se a pressão atuando em apenas um lado, é dada por:

$$F = \gamma B h \left( H - \frac{h}{2} \right) \quad (25)$$

Sendo:

$F$  – Força hidrostática sobre superfícies planas verticais [N];

$\gamma$  – Peso específico do fluido [ $\text{N}/\text{m}^3$ ];

$B$  – Largura da placa [m];

$h$  – Altura da placa [m];

$H$  – Nível até a superfície livre [m].

A posição de aplicação da resultante, ou seja, a linha de ação da força hidrostática, está relacionada ao diagrama de pressão, o qual tem formato trapezoidal, conforme pode ser observado na Figura 39.

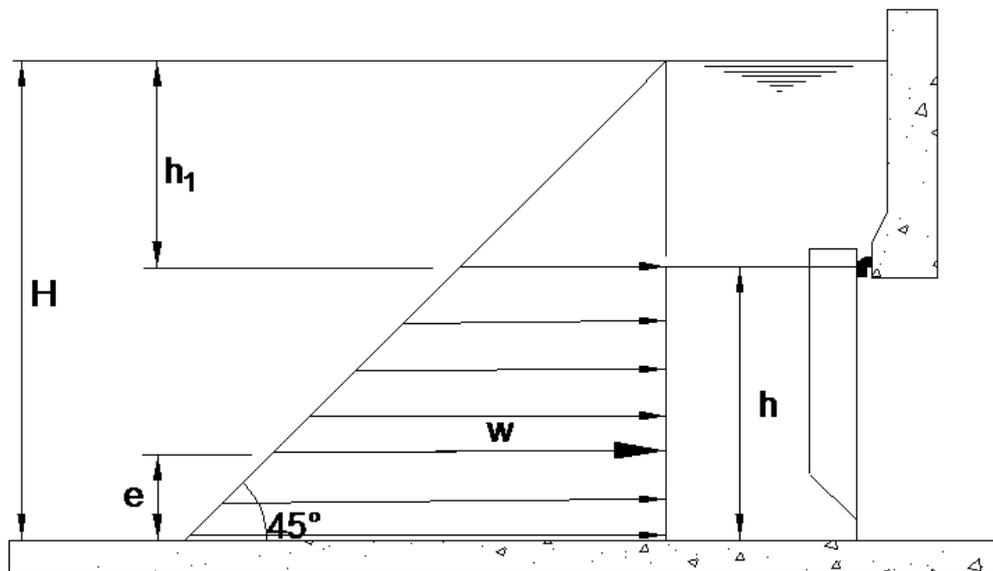


Figura 39 - Força hidrostática e centro de pressão sobre uma superfície plana arbitrária, vertical e submersa.

Assim, a posição da linha de ação da força hidrostática resultante, em relação ao fundo, é dada por:

$$y_{CP} = \frac{h}{3} \left( 1 + \frac{H - h}{2H - h} \right) \quad (26)$$

Sendo:

$y_{cp}$  – posição do CP em relação ao fundo [m];

$h$  – Altura da placa [m];

$H$  – Nível até a superfície livre [m].

Dessa maneira, têm-se que a força hidrostática exercida sobre a superfície plana vertical do mecanismo, para efeito de análise, pode ser dividida em duas componentes, sendo elas: exercidas pela carga hidrostática do fundo até o ponto de aplicação do eixo ( $F_3$ ); e pela carga hidrostática do ponto de aplicação do eixo até o término da superfície plana vertical do mecanismo ( $F_2$ ) (Figura 40).

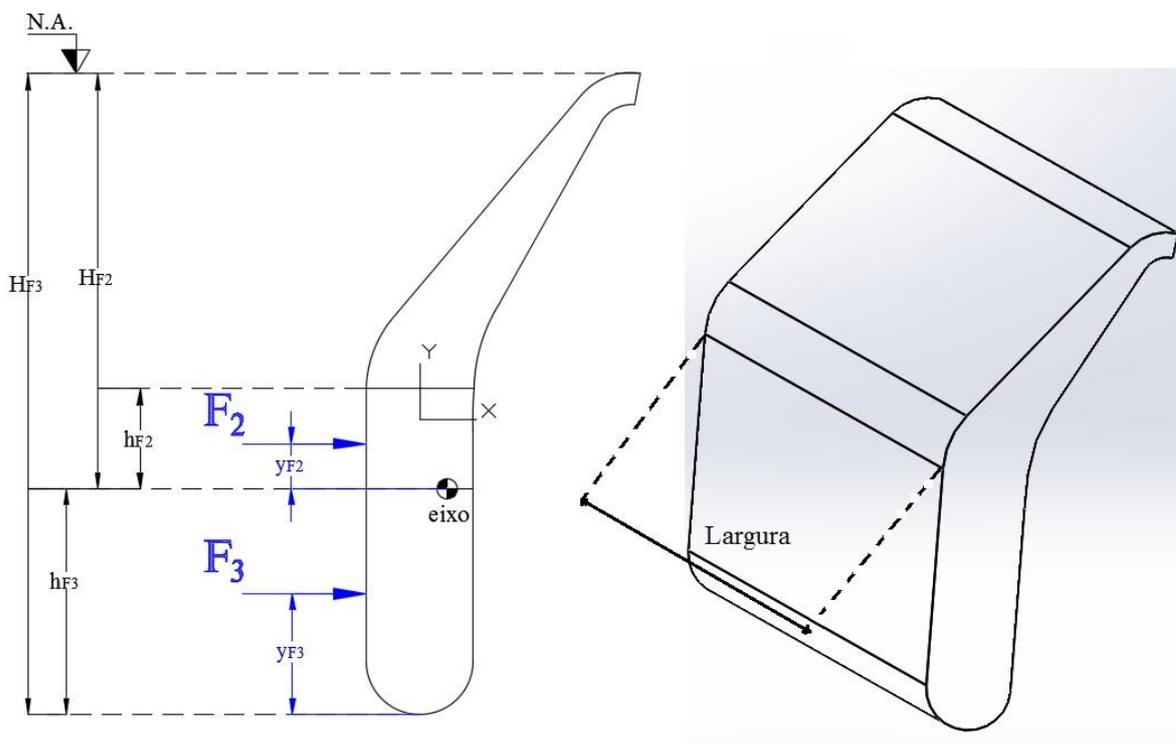


Figura 40 – Representação esquemática determinação das forças hidrostáticas sobre superfícies planas verticais do mecanismo

### 3.4.2.1.2 Forças Peso

Visto que o mecanismo se assemelha a uma comporta, para o cálculo do peso foi considerado, conforme ERBISTI (1987), a soma das seguintes parcelas:

- peso das partes estruturais, com os seguintes valores de massa específica do material –  $\rho_m$  [kg/m<sup>3</sup>] – aço 7850; bronze 8800; alumínio 2700; borracha natural 1230; borracha sintética 1020 e madeira 1020;
- peso da proteção anticorrosiva;
- peso de corpos estranhos eventualmente retidos na estrutura da comporta;
- peso da água eventualmente retida na parte não submersa do tabuleiro, no caso de comportas de superfície;
- peso do lastramento, quando houver.

Segundo o mesmo autor, as parcelas b, c e d só são consideradas quando atuam desfavoravelmente. E para a consideração do peso da proteção anticorrosiva e de corpos estranhos, o peso estrutural pode ser multiplicado por 1,05. Assim, temos que o peso é dado por:

$$W = \rho_m V g 1,05 \quad (27)$$

Sendo:

$W$  – peso da estrutura [N];

$\rho_m$  – massa específica do material [kg/m<sup>3</sup>];

$V$  – Volume da estrutura [m<sup>3</sup>];

$g$  – gravidade [m/s<sup>2</sup>].

O centro de gravidade representa o ponto onde o peso do corpo atua. Logo, admite-se que a linha de ação do peso está localizada no centroide da peça. Para efeito de cálculo do momento físico, a peça foi dividida em duas partes (correspondentes à superfície inclinada e superfície vertical) calculando-se um peso para cada uma delas localizado em seus respectivos centroides, conforme pode ser visualizado esquematicamente na Figura 41.

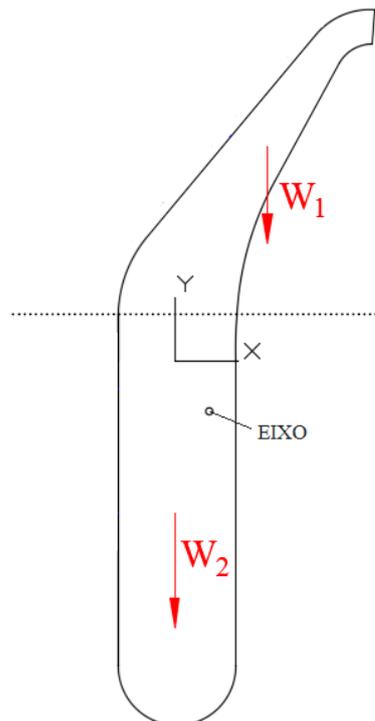


Figura 41 – Representação esquemática do peso estrutural da peça.

Além do peso estrutural, considerou-se para efeito de momento físico, o peso da massa de água retida na parte inclinada da estrutura (Figura 42).

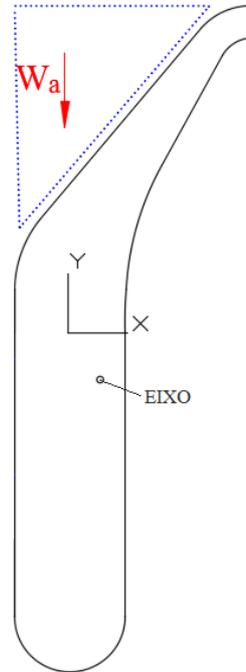


Figura 42 – Representação esquemática do peso referente à massa de água retida na parte inclinada

O peso, referente à esta massa de água retida, é dado por:

$$W = \rho_{\text{água}} g V \quad (28)$$

Sendo:

$W$  – peso da massa de água retida [N];

$\rho_{\text{água}}$  – massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>];

$V$  – Volume de água retido [m<sup>3</sup>];

$g$  – gravidade [m/s<sup>2</sup>].

A posição de aplicação do peso referente à massa de água retida, ou seja, a linha de ação deste peso, está relacionada ao centro de gravidade do corpo hídrico, o qual foi aproximado do centroide de um triângulo retângulo. Logo, está localizado a um terço 1/3 da base, tanto em relação ao eixo das abscissas quanto das ordenadas, admitindo como origem o ângulo reto do triângulo.

### 3.4.2.1.3 Forças de Empuxo

O empuxo (ou empuxo de Arquimedes) é a força atuante em corpos imersos ou flutuantes em um líquido. Trata-se de uma força vertical igual ao peso do fluido que ele desloca, a qual um corpo imerso está sujeito. (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2001).

O empuxo é dado por:

$$E = \gamma_{\text{água}} V \quad (29)$$

Sendo:

E – empuxo [N];

$\gamma_{\text{água}}$  – peso específico da água [N/m<sup>3</sup>];

V – Volume de água deslocado [m<sup>3</sup>].

A linha de ação do empuxo está relacionada ao centro de gravidade do corpo em relação ao volume deslocado, onde a mesma é aplicada.

### 3.4.3 Simulação computacional

A simulação computacional é um processo de modelagem na qual se aplicam modelos matemáticos e métodos numéricos baseados na capacidade de processamento computacional, buscando compreender o comportamento de sistemas e/ou avaliar estratégias para operação em diversos campos, principalmente engenharia e física, podendo ser aplicada em escoamento de fluidos, trocas térmicas, dentre outras situações. (PEGDEN; SHANNON; SADOWSKI, 1995)

A análise computacional tem sido vastamente empregada, principalmente por simular o comportamento das máquinas e componentes hidrodinâmicos de forma eficiente e com menor custo. Mesmo que ainda não isenta da experimentação laboratorial, é amplamente utilizada como ferramenta de validação de resultados e correção de parâmetros para construção de modelos. Desta maneira, pode-se entender a simulação como um processo amplo que engloba não apenas a construção do modelo, mas todo o método experimental.

O desenvolvimento de um modelo computacional é dividido em cinco etapas:

- Elaboração da geometria, a qual se resume na criação bidimensional ou tridimensional do objeto a ser analisado, podendo ser feita por softwares CAD e depois convertida para a extensão necessária;
- Geração das malhas, que são criadas parametricamente, podendo ser desenvolvida

- em vários formatos como: multibloco estruturado, hexaédrico e tetraédrico estruturados e não-estruturados, malhas híbridas (hexaédrico, tetraédrico e/ou elementos prismáticos), ou ainda, malhas de superfície quadrilateral e triangular;
- Equacionamento do problema, realizado em função das condições de contorno existentes, sendo essencial a definição do modelo de estudo a ser aplicado.
  - *Solver*, com o cálculo do equacionamento para o problema apresentado em forma de algoritmo. Tendo definidas as condições de contorno, o problema é calculado em iterações até que haja convergência de dados.
  - Resultados, nos quais são apresentados em modo gráfico (contornos, linhas de corrente, vetores) e em valores, de acordo com o programa comercial utilizado ou com o objetivo do operador.

Para o projeto em questão, a análise computacional busca compreender o comportamento do escoamento sobre o mecanismo, utilizando-se de modelagem por Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD). Dessa maneira, para o estudo da interação do escoamento com a estrutura hidráulica, utilizou-se a plataforma Workbench® versão 7.2 do software Ansys®, sendo Fluent® o *solver* empregado (ANSYS, 1998).

O desenvolvimento do modelo computacional buscou representar, de maneira integrada e conjunta, as condições do modelo físico reduzido, que conseqüentemente, constitui uma ferramenta essencial nos estudos de escoamentos em estruturas hidráulicas.

O modelo físico reduzido, para os estudos em questão, é constituído por um canal, no qual se tem a estrutura hidráulica (vertedouro e mecanismo de ganho em capacidade), permitindo-se o fluxo de montante para jusante. Inicialmente, a vazão a montante (vazão afluente), fica retida até que o nível d'água atinja a cota máxima do vertedouro, formando um reservatório. A partir desta cota, com o aumento de nível, têm-se a atuação do mecanismo, e conseqüentemente, o ganho de capacidade de armazenamento. Espera-se que o nível d'água atinja a cota de altura máxima do mecanismo, e, a partir de então, permita a vazão de vertimento. Após o vertimento da vazão necessária, o nível d'água diminui, e o mecanismo volta a garantir o incremento da capacidade de armazenamento.

Para o caso do modelo computacional, a geometria elaborada condiz com modelo físico e foi desenvolvida bidimensionalmente utilizando o software Solidworks®. (SOLIDWORKS, 2002) A mesma foi exportada para a plataforma do Workbench®, a partir do DesignModeler®, na qual foram trabalhados os vértices, e posteriormente, definidas regiões, nas quais serão aplicadas as condições de contorno em função de suas características.

Para o modelo de estudo, foram classificadas quatro regiões, sendo estas:

- *Inlet*: como forma de representação das condições a montante do vertedouro (reservatório). As condições de contorno aplicadas nesta região equivalem às vazões afluentes ao reservatório;
- *Comporta*: representação do sistema hidrodinâmico em estudo; compreendendo o vertedouro, em perfil Creager, e o mecanismo para ganho de capacidade de armazenamento acoplado.;
- *Free Surface*: representação da pressão atmosférica, na qual a fase “ar” prevalece, condicionando ao escoamento livre, e;
- *Outlet*: região que retrata as condições a jusante do vertedouro, relativas à saída da fase líquida “água”, de forma a representar as vazões de vertimento.

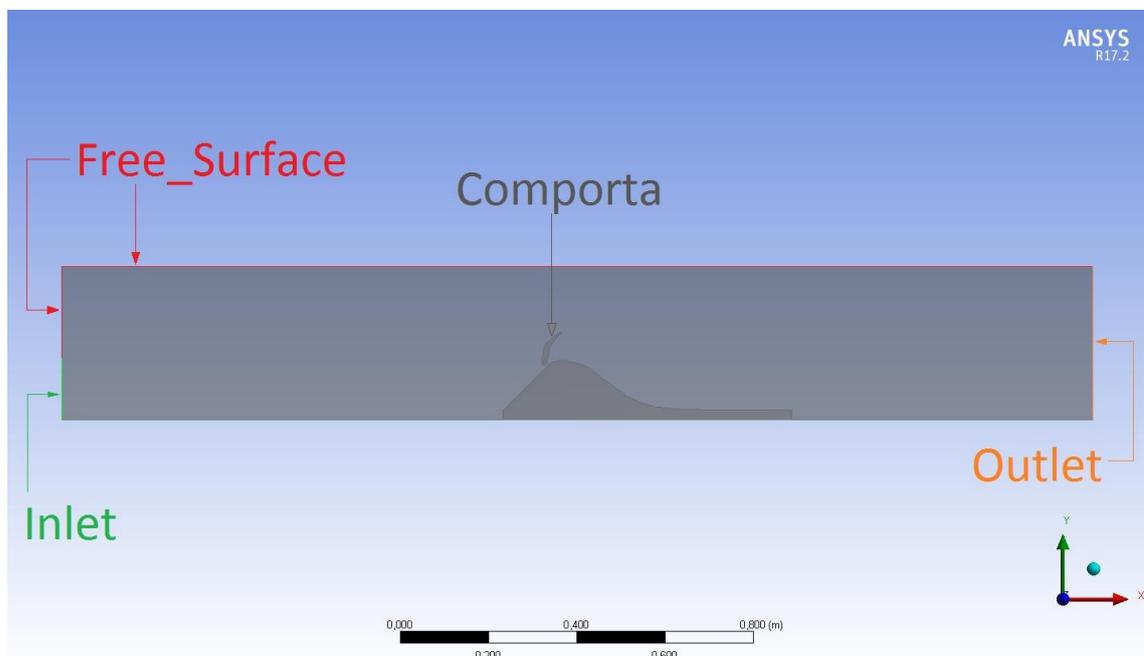


Figura 43 – Zonas de condição de contorno da geometria desenvolvida para o modelo computacional

Geraram-se malhas estruturadas hexaédricas, as quais foram editadas por meio da ferramenta Meshing® da plataforma, conforme pode ser observado na Figura 44.

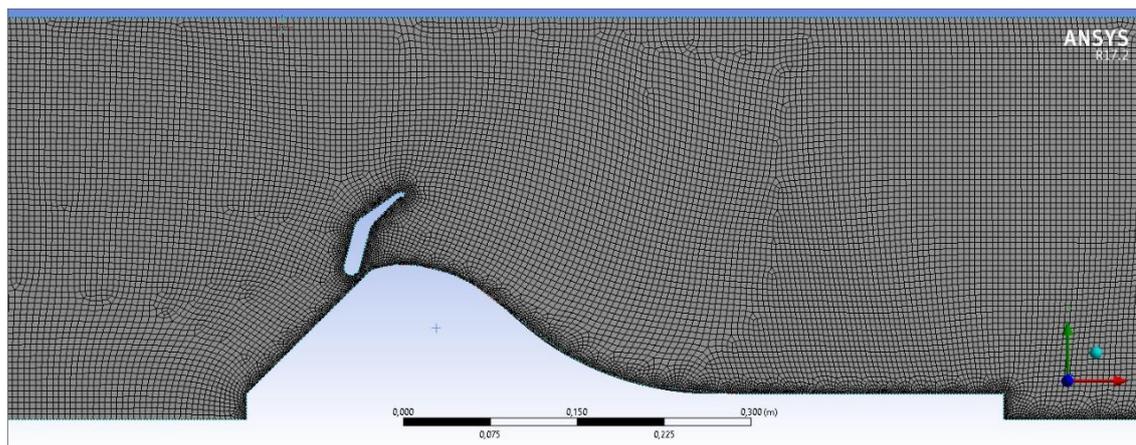


Figura 44 – Malha estruturada hexaédrica do modelo computacional

Para o equacionamento do problema, foram determinadas as fases, o modelo de turbulência baseado nas equações de Navier-Stokes, e as condições de contorno.

Embora os problemas que apresentem mais de uma fase sejam geralmente definidos como multifásico, no corrente caso, pode-se definir o mesmo como bifásico, por se tratar da modelagem de um componente hidrodinâmico, sendo apresentada as fases: “ar” e “água”. Classificadas as fases, é imposta a tensão de superfície entre as duas fases, sendo este coeficiente a constante de 0,072 [N/m]. Este valor é equivalente a tensão superficial da água. (LIBARDI, 2005). Para o sistema bifásico (ou multifásico), foi utilizado o modelo de Volume do Fluido e Parâmetros de Fração de Volume, com formulação implícita, em duas fases Eulerianas, no intuito de representar as condições de operação do modelo.

O modelo de turbulência utilizado é o k-epsilon ( $k-\epsilon$ ), o qual se trata de um modelo semi-empírico baseado nas equações do modelo de transporte para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e sua taxa de dissipação ( $\epsilon$ ). É um modelo de turbulência tipo Navier-Stokes em Médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Averaged Navier Stokes*) muito utilizado na resolução de problemas de engenharia, sendo muitas vezes referido como modelo  $k-\epsilon$  padrão. Sua escolha se deu por ser um modelo robusto, econômico e de razoável produção de resultados para uma grande variedade de escoamentos turbulentos.

Em relação às condições de contorno, sua aplicação foi estabelecida para as seguintes regiões da geometria: *Inlet*, *Free*, *Surface* e *Outlet*. A região intitulada Comporta não necessitou de condições de contorno por ser classificada simplesmente como “parede” (*Wall*).

Em *Inlet*, a fase é totalmente classificada como “água”, não possuindo porcentagem alguma da fase “ar”, e a condição de contorno aplicada é a velocidade do escoamento. Esta condição representa a vazão afluyente ao reservatório. O valor da velocidade do escoamento é adotado em função da manutenção do nível d’água na extremidade superior do mecanismo,

para angulações fixas, de modo que se permita a passagem apenas na abertura entre a parte inferior da comporta e a superfície do vertedouro.

Em *Free\_Surface* é considerada a fase “ar” em 100%, visto que representa o escoamento livre, isto é, sob a influência direta da pressão atmosférica.

Em *Outlet*, considera-se a relação ar-água correspondente ao volume de água em *Inlet* e a passagem entre a comporta e o vertedouro, tendo-se como condição de contorno a pressão manométrica.

A Tabela 4 apresenta uma visão geral sobre as condições de contorno do modelo.

Tabela 4 – Condições de contorno do modelo computacional

Regiões	Fase	Condição de contorno
<i>Inlet</i>	Água	<i>Velocity-inlet</i>
<i>Free Surface</i>	Ar	<i>Pressure-outlet</i>
Comporta	-	<i>Wall</i>
<i>Outlet</i>	Mistura Ar/Água	<i>Pressure-outlet</i>

Tendo definido o modelo de estudo e as condições de contorno, utiliza-se um *solver* para cálculo do equacionamento da situação apresentada em forma de algoritmo, por meio do processo de iterações até que haja convergência de resultados. O *solver* utilizado se trata do Fluent®.

Salienta-se que o processo de análise adotado, assim como os cálculos para equilíbrio de momento físico, apresenta uma condição estática do comportamento. Isto é, determinam-se “n” posições de abertura do mecanismo sobre o vertedouro, de modo a se determinar a vazão para manutenção do nível d’água correspondente ao incremento de capacidade de armazenamento desejado. Os ângulos de abertura, ou ângulo de posição ( $\alpha_n$ ) são representados na Figura 45. É importante salientar que a posição do mecanismo no vertedouro é de acordo com o ganho de capacidade de armazenamento desejado.



A jusante, no fundo da extremidade do canal, permite-se à passagem do escoamento para o reservatório, inferior à bancada, o qual retorna o fluxo para a bomba, fechando o circuito. Salienta-se que o reservatório inferior à bancada também se trata de um circuito fechado pertencente à estrutura do Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas (LHPCH), apresentando um vertedouro retangular para leitura de vazões, permitindo, desse modo, aferir as vazões de ensaio da bancada.

A bancada para ensaios laboratoriais está disposta na Figura 46, na qual se pode ter uma ideia geral do seu princípio de funcionamento.



Figura 46 – Bancada de ensaios laboratoriais

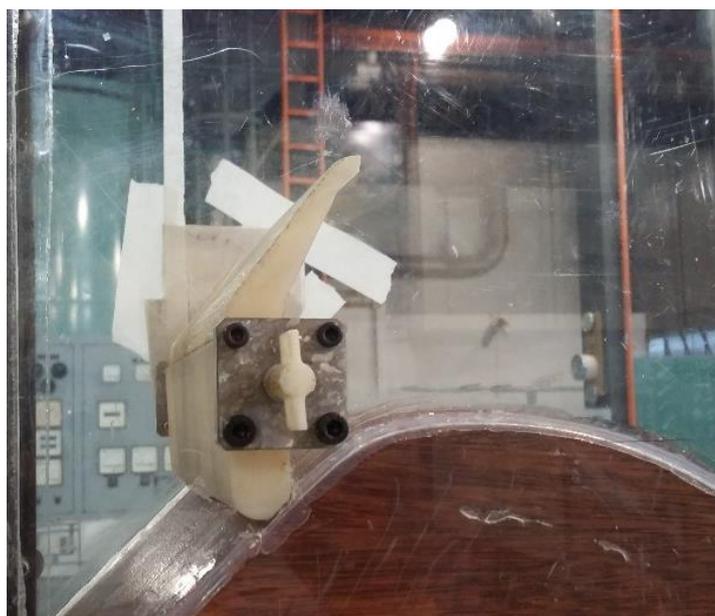


Figura 47 – Representação do processo de montagem do modelo reduzido do mecanismo

Os ensaios laboratoriais em bancada tinham por objetivo o estudo e a compreensão do comportamento fluido-estrutura, bem como uma análise do funcionamento do perfil hidrodinâmico do mecanismo.

Foram realizados três tipos de ensaios, sendo estes, para:

- Determinação do ângulo máximo de abertura do mecanismo, de forma que o mesmo ainda atue automaticamente, e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura;
- Determinação do nível a montante no instante da abertura do mecanismo; e
- Análise do comportamento do nível a montante em função do ângulo de abertura do mecanismo e da vazão de vertimento.

Os roteiros para os referidos ensaios estão dispostos, respectivamente, no Apêndice A, Apêndice B e Apêndice C. Durante a realização dos ensaios, verificou-se também o aspecto visual do escoamento e da estabilidade do mecanismo, bem como do seu comportamento, procurando identificar possíveis falhas do mecanismo. Portanto, foram realizadas análises qualitativas do comportamento das estruturas hidrodinâmicas em estudo, tais como:

- a interação fluido-estrutura após abertura inicial do mecanismo;
- a reação da estrutura do mecanismo enquanto permite a passagem da vazão de vertimento, bem como após a passagem do fluxo; e o fechamento do mecanismo após o vertimento;
- a dissipação da energia a jusante do vertedouro, dentre outras observações consideradas pertinentes;

Em relação à operação da bancada, inicialmente, visando garantir a segurança e eficácia do ensaio, estabeleceu-se os seguintes procedimentos:

- Verificar todas as conexões do circuito, as quais devem estar devidamente encaixadas e vedadas, sem apresentar vazamentos;
- Averiguar toda a vedação lateral do canal em acrílico, pertencente ao circuito;
- Verificar se o vertedouro Creager está devidamente preso no canal, não permitindo fluxo de água em quaisquer direções que não seja por cima de sua estrutura, bem como se o mecanismo em estudo está bem acoplado em sua estrutura, e em posição naturalmente “fechada”;
- Garantir que a extremidade do canal, a jusante, permite a passagem do fluxo, para o reservatório inferior.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Planejamento hidroenergético

#### 4.1.1 Métodos de determinação de volumes de armazenamento de reservatórios para regularização anual

##### 4.1.1.1 Cálculo do volume do reservatório de forma a atender a uma lei de regularização

Primeiramente, determinaram-se as vazões naturais afluentes, ou seja, de entrada no reservatório da barragem do Cipó. Não se dispo de dados fluviométricos no local, a série histórica de vazões foi obtida com base nos dados de postos fluviométricos presentes na bacia. A relação dos postos utilizados está disposta na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação dos postos fluviométricos utilizados

Estação	Código	Período	Curso d'água	Área de Drenagem
Abaixo cascata das Antas – ACT	61807002	04/68 a atual OPERANDO	Ribeirão das Antas	470 km <sup>2</sup>
Beira de Santa Rita	61800500	Out/37 a Out/76	Rio Pardo	356 km <sup>2</sup>

A correlação entre estes postos e a extensão da série, assim como a transposição da série para o local da barragem do Cipó, por áreas de drenagem, foram feitas com auxílio dos resultados da campanha de medições de descarga líquida, disponibilizadas pela concessionária do aproveitamento, DME Poços de Caldas Participações, e realizada pela HIDRODATA no período de 03/07/95 a 06/07/95. A série histórica transposta para o local do empreendimento resulta num período de dados de maio/38 a abril/92, com uma vazão média ( $\bar{Q}$ ) de 2,02 [m<sup>3</sup>/s].

É importante ressaltar que apesar da série histórica, em questão, apresentar uma vazão média de 2,02 [m<sup>3</sup>/s], a mesma não se encontra presente na maior parte dela. Para melhor representar esta situação, plotou-se a curva de permanência de vazões desta série histórica (Figura 48). Entende-se por permanência de vazão, a porcentagem de se igualar ou superar aquele valor de vazão.

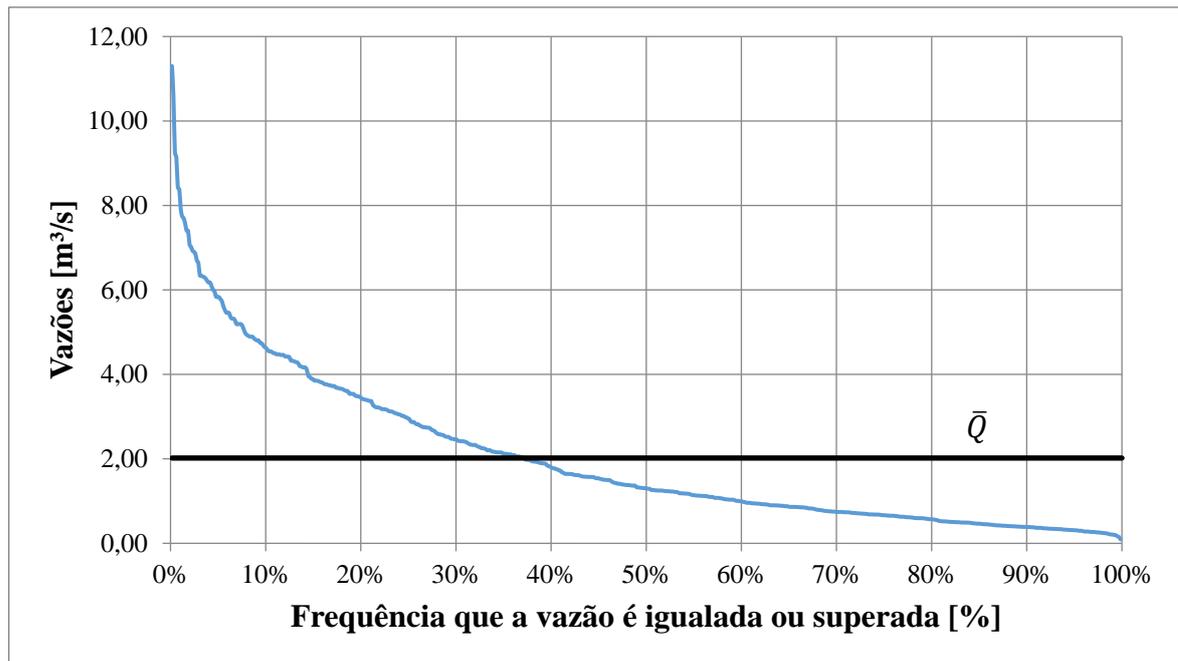


Figura 48 – Curva de permanência de vazões mensais afluentes à Barragem do Cipó

Nota-se que para o valor de vazão média da série histórica, ( $\bar{Q}$ ) de 2,02 [m<sup>3</sup>/s], a porcentagem de permanência é de aproximadamente 37%. Isso pode se refletir na garantia de regularização das vazões, acarretando em alguns meses com déficit, nos quais não se atinge a vazão regularizada, ou permitindo que se supere um pouco a vazão de regularização, em relação à vazão média, sem déficit.

Logo, conhecidas as vazões naturais afluentes, calculou-se o provável volume deste reservatório para atender inicialmente a lei de regularização  $y(t) = 1$ , conforme sugerido por Villela e Mattos (1975), ou seja, manter uma vazão regularizada constante e igual à média ( $\bar{Q}$ ) nos períodos de estiagem. Visto que este reservatório apresentou uma vazão média ( $\bar{Q}$ ) de aproximadamente 2,02 [m<sup>3</sup>/s], e que os meses considerados como período de estiagem são de maio à outubro, tem-se que o volume mínimo do reservatório para atender essa lei é de aproximadamente 28 milhões de metros cúbicos.

Portanto, a capacidade mínima que este reservatório deve apresentar para atender a lei de regularização com vazão média no período mais crítico de estiagem, da série de vazões utilizada, é de 28 milhões de metros cúbicos. Salienta-se ainda que se computou, para este cálculo, a precipitação sobre o reservatório, bem como a sua evaporação, as quais foram admitidas em função da área líquida exposta e de dados climatológicos, sendo relacionadas às vazões naturais que entram no reservatório. O reservatório atualmente conta com 30 milhões de metros cúbicos de volume útil. Logo, o mesmo é capaz de manter essa lei de regularização.

A partir da curva Cota versus Volume do reservatório do Cipó, disponibilizada pela concessionária, foi possível estabelecer a cota de vertimento para os volumes úteis calculados. A mesma está disposta na Figura 49.

O volume, a partir desta curva, pode ser descrito a partir da equação (30). Observa-se que, para o volume útil máximo de 30 milhões de metros cúbicos, a cota de vertimento é de 1262,50m.

$$V = a(h + b)^m \quad (30)$$

Sendo:

$V$  – volume do reservatório [ $m^3$ ];

$h$  – cota (nível) do reservatório [m];

$a$  – 270 809 (p/ volume  $> 6,93 \cdot 10^6 m^3$ ) e 1 123 457 (p/ volume  $< 6,93 \cdot 10^6 m^3$ );

$b$  – -1249;

$m$  – 1,81 (p/ volume  $> 6,93 \cdot 10^6 m^3$ ) e 1,02 (p/ volume  $< 6,93 \cdot 10^6 m^3$ ).

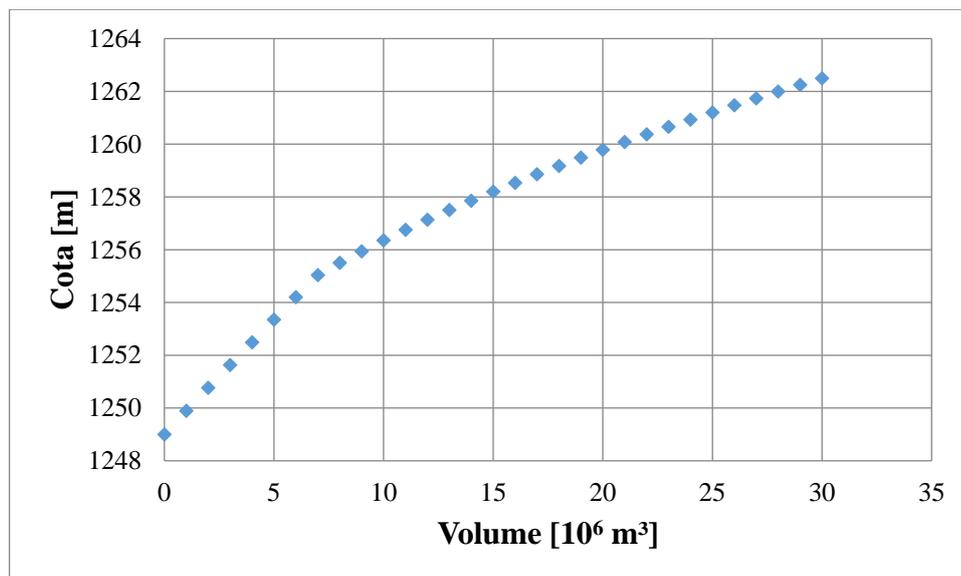


Figura 49 – Curva Cota *versus* Volume para o reservatório do Cipó

Os estudos de regularização, para aumento da capacidade de armazenamento a partir da alteração da cota de vertimento, foram estabelecidos, em função das condições de operação do reservatório, de acordo com o DME/PC, sendo considerado um fluxo residual permanente ao longo dos anos, e uma vazão regularizada, liberada apenas 6 meses por ano, no período de maio a outubro.

Portanto, para estas condições estabelecidas inicialmente, ou seja, para regularização da vazão média da série histórica, de 2,02 [m<sup>3</sup>/s], a operação seria dada por uma vazão regularizada de 1,52 [m<sup>3</sup>/s] somada ao fluxo residual de 0,50 [m<sup>3</sup>/s] durante os meses de estiagem (maio a outubro), e mantendo apenas o fluxo residual de 0,50 [m<sup>3</sup>/s] no restante do período (novembro a abril). Salienta-se que, caso seja realizada a operação do reservatório de acordo com esta simulação, a mesma não apresentou nenhum mês em déficit, para a série histórica analisada, a qual varia de maio/1938 a abril/1992. E a capacidade mínima estipulada para essa operação é de 28,2 milhões de metros cúbicos, sendo o volume útil atual suficiente.

No entanto, de acordo com os dados disponibilizados pela concessionária, e perante aos dados apresentados no licenciamento ambiental para construção do barramento (SUPRAM, 2012), a operação exercida atualmente dispõem de valores na ordem de 2,27 [m<sup>3</sup>/s] durante os meses de seca, e de 0,50 [m<sup>3</sup>/s] no restante do período. Ou seja, estabeleceu-se uma vazão de regularização de 1,635 [m<sup>3</sup>/s] e um fluxo residual permanente de 0,50 [m<sup>3</sup>/s].

Para essas condições anteriormente descritas, o volume útil mínimo estimado é de 32 milhões de metros cúbicos. Realizando uma extrapolação da curva cota *versus* volume, têm-se uma análise preliminar em relação à alteração da cota de vertimento, atingindo aproximadamente o valor de 1263 [m], ou seja, 0,50 [m] acima do valor atual.

#### **4.1.1.2 Diagrama de Massas**

O diagrama de massas, ou diagrama de Rippl, foi definido primeiramente a partir dos volumes acumulados que afluem ao reservatório, ou seja, independe da implantação do mecanismo de ganho de capacidade em armazenamento. Este diagrama pode ser visualizado na Figura 50.

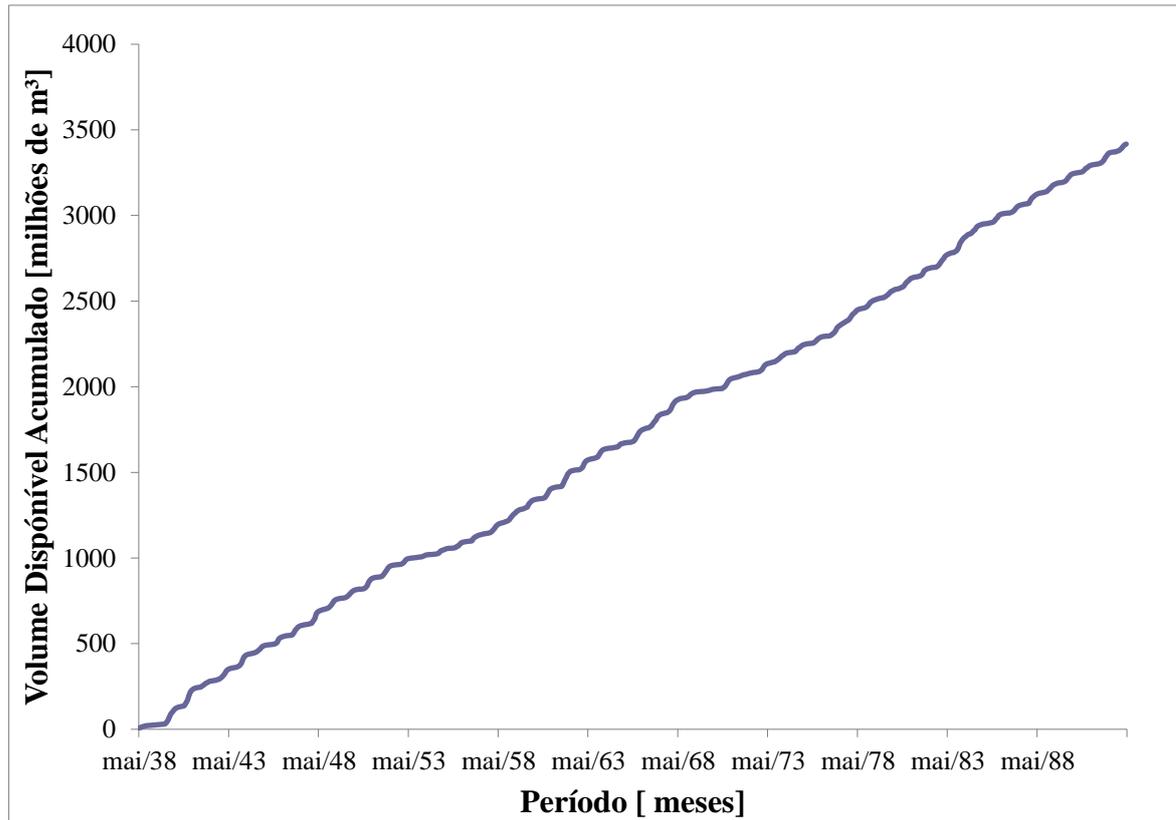


Figura 50 – Diagrama de massas para o reservatório da barragem do Cipó

Inicialmente, com a mesma suposição sugerida por Villela e Mattos (1975), considerou-se, inicialmente, a regularização a partir da vazão média da série histórica ( $\bar{Q} = 2,02$  [m<sup>3</sup>/s]), de maneira a analisar o comportamento da série, identificando os seus períodos críticos. (Figura 51). Nota-se que, por se tratar de uma série de vazões longa, há vários períodos críticos, sendo o maior deles, ou seja, o máximo déficit existente na série histórica natural, o de set/67 a set/71.

A fim de comprovar a capacidade mínima do reservatório de aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos para atendimento desta lei de regularização no período de maio a outubro, utilizou-se o diagrama de massas, para determinar graficamente o volume útil do reservatório, o qual é estabelecido por meio do período mais crítico da série de acordo com a demanda.

Para isso, levantou-se a curva de vazões acumuladas de regularização, a qual pode ser compreendida também como uma curva de demanda para o Diagrama de Rippl. A mesma foi levantada, inicialmente, para duas situações principais: regularização da vazão média da série histórica ( $\bar{Q} = 2,02$  [m<sup>3</sup>/s]) em todos os meses do ano, ou seja, para regularização do reservatório para esta vazão durante todo o período da série; e regularização da vazão média ( $\bar{Q} = 2,02$  [m<sup>3</sup>/s]) nos meses de maio a outubro, e de  $Q = 0,50$  [m<sup>3</sup>/s] no restante dos meses, o

que seria equivalente a uma vazão média de  $Q = 1,26 \text{ [m}^3/\text{s]}$  durante todo o período da série. Nestas duas situações, pode-se estabelecer a capacidade máxima que o reservatório poderia ser dimensionado, e comprovar a capacidade mínima para atender essa lei de regularização nos meses de maio a outubro. O diagrama de massas e as respectivas curvas de vazões acumuladas de regularização estão dispostos na Figura 51.

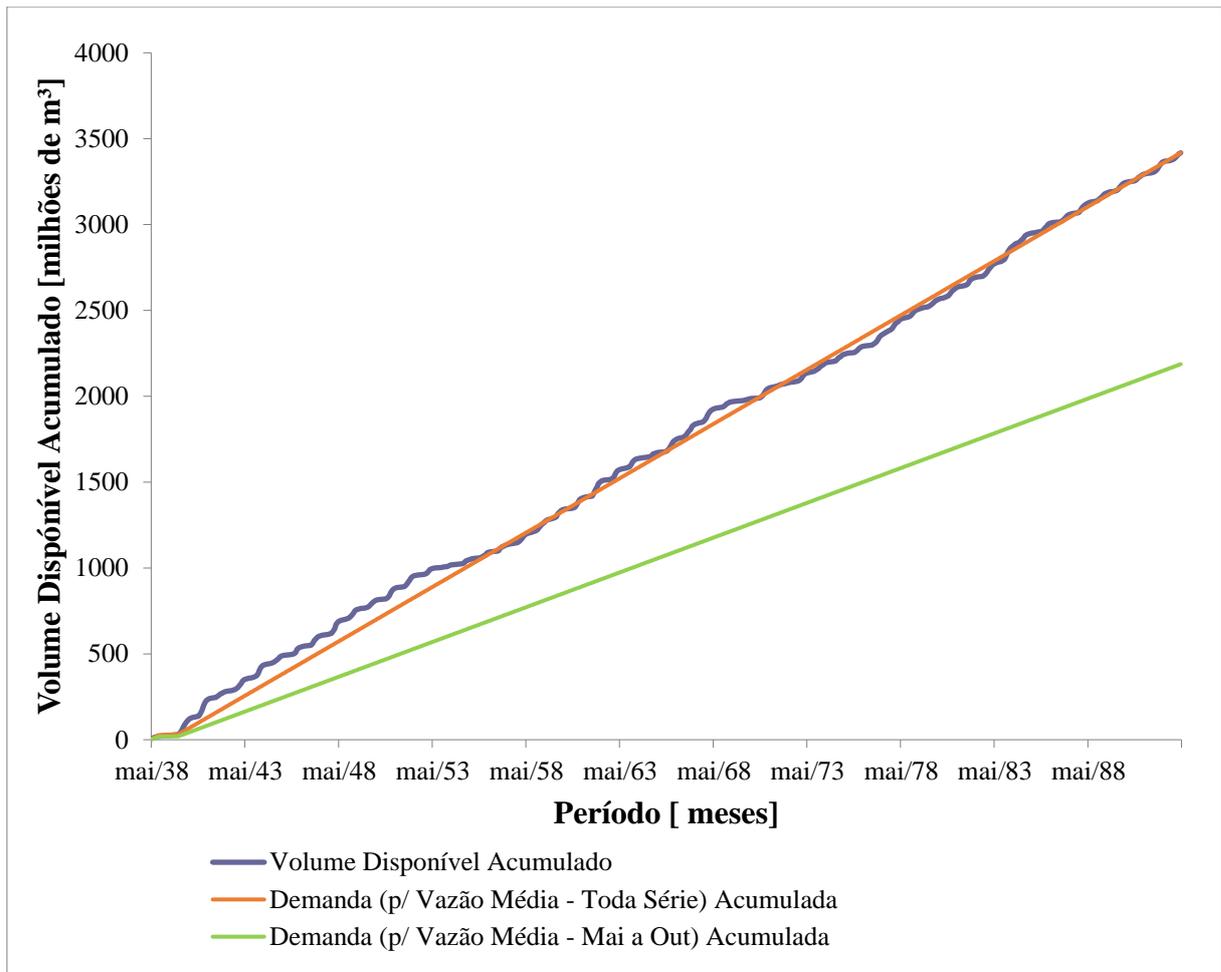


Figura 51 – Diagrama de massas e curvas de demanda para o reservatório do Cipó

Para determinação gráfica do volume útil do reservatório suficiente para a regularização da vazão média da série histórica ( $\bar{Q} = 2,02 \text{ [m}^3/\text{s]}$ ) durante todos os meses do ano, isto é, durante todo o período da série, traçou-se uma reta paralela à curva de vazão acumulada da referida demanda (ou regularização) tangenciando os picos da curva de massas (curva de volume disponível acumulado), de maneira a identificar os períodos mais críticos da série para essa demanda. Este procedimento pode ser observado na Figura 52.

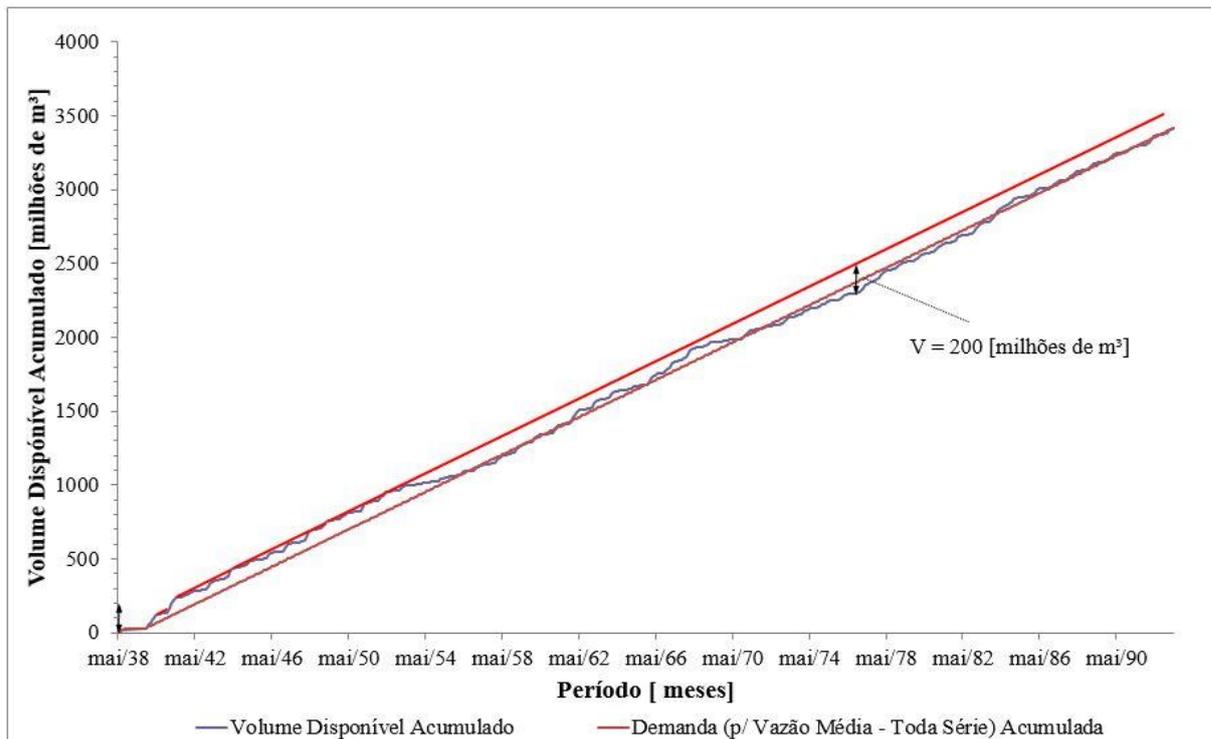


Figura 52 – Diagrama de massas para determinação de volume útil com regularização da vazão média em todos os meses do ano

O volume útil do reservatório é o maior valor dos volumes do reservatório calculados para todos os períodos críticos da série de vazões analisada. A partir da análise da Figura 52, identificou-se como o período mais crítico da série o intervalo de out/75 a out/76, resultando num volume útil de 200 milhões de metros cúbicos. Como pode ser observado, trata-se de um reservatório de grandes dimensões, podendo haver diversas restrições para sua implantação, tais como: físicas, financeiras, econômicas, sociais, legais, políticas, ambientais, dentre outras. Trata-se, portanto, de uma capacidade mínima de reservatório apenas utópica, visto que não se desejará regularizar a vazão em todos os meses do ano, até mesmo pela sazonalidade existente.

Na segunda situação, foi realizado o mesmo procedimento, no entanto, utilizando a curva de vazão acumulada de demanda (ou regularização) correspondente pela regularização da vazão média ( $\bar{Q} = 2,02 \text{ [m}^3/\text{s]}$ ) nos meses de maio a outubro, e de  $Q = 0,50 \text{ [m}^3/\text{s]}$  no restante dos meses, o que seria equivalente a uma vazão média de  $Q = 1,26 \text{ [m}^3/\text{s]}$  durante todo o período da série. O procedimento pode ser observado na Figura 53.

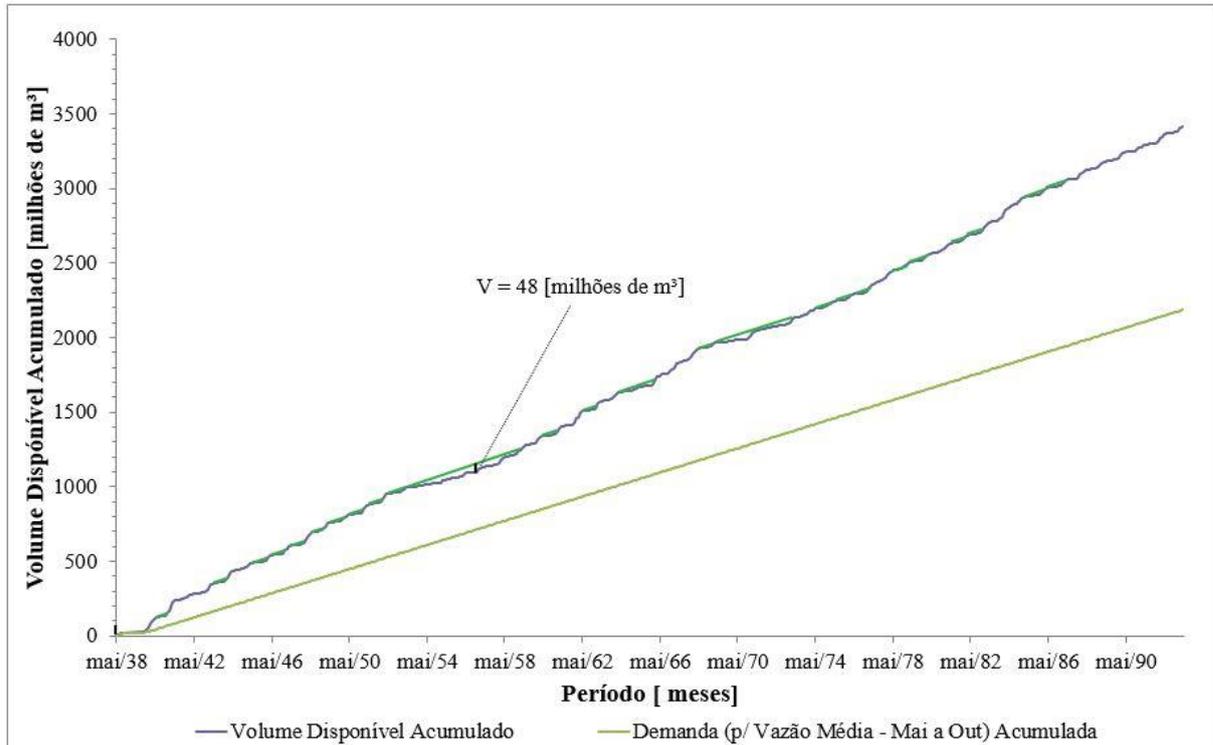


Figura 53 – Diagrama de massas para determinação de volume útil com regularização da vazão média em seis meses

Realizando a mesma análise para a Figura 53, identificou-se como o período mais crítico da série o intervalo de out/52 a out/59, resultando num volume útil de aproximadamente 48 milhões de metros cúbicos. Com isto, infere-se que este método superestima a capacidade mínima do reservatório, a qual atualmente é de aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos para atendimento da regularização da vazão média da série ( $\bar{Q} = 2,02 \text{ [m}^3/\text{s]})$  nos meses de maio a outubro, e de  $Q = 0,50 \text{ [m}^3/\text{s]}$  no restante dos meses.

É possível observar também, a partir da Figura 52 e da Figura 53 que os métodos baseados no diagrama de massas apresentam simplicidade e facilidade de compreensão, tanto para o cálculo quanto para o conceito teórico aplicado. Além do mais, considera-se a sazonalidade implícita da série histórica. Entretanto, o mesmo admite a série histórica como uma repetição cíclica, não admitindo séries mais ou menos críticas, podendo superestimar valores de volume de reservatório, como aconteceu. O método também não permite variar a vazão regularizada em função do volume armazenado, e admite o reservatório cheio no início de sua operação.

#### 4.1.1.3 Diagrama de Rippl residual ou das diferenças totalizadas

De forma a se determinar um método um pouco mais preciso que o Diagrama de Rippl (Curva de Massas), determinou-se o diagrama de Rippl residual, visto que ao se permitir neste método o uso da escala das vazões acumuladas muito maior do que no método da curva de massa dos mesmos dados, têm-se uma maior precisão.

O Diagrama de Rippl residual para a série histórica analisada para o reservatório do Cipó pode ser visualizado na Figura 54. As curvas de vazões acumuladas de regularização, que podem ser compreendidas também como curvas de demanda foram levantadas da mesma maneira que no método do Diagrama de Rippl, ou seja, para duas situações principais: regularização da vazão média da série histórica ( $\bar{Q} = 2,02$  [m<sup>3</sup>/s]) em todos os meses do ano, isto é, para regularização do reservatório para esta vazão durante todo o período da série; e regularização da vazão média ( $\bar{Q} = 2,02$  [m<sup>3</sup>/s]) nos meses de maio a outubro, e de  $Q = 0,50$  [m<sup>3</sup>/s] no restante dos meses, o que seria equivalente a uma vazão média de  $Q = 1,26$  [m<sup>3</sup>/s] durante todo o período da série. As curvas de vazões acumuladas de regularização (curvas de demanda) também podem ser visualizadas na Figura 54.

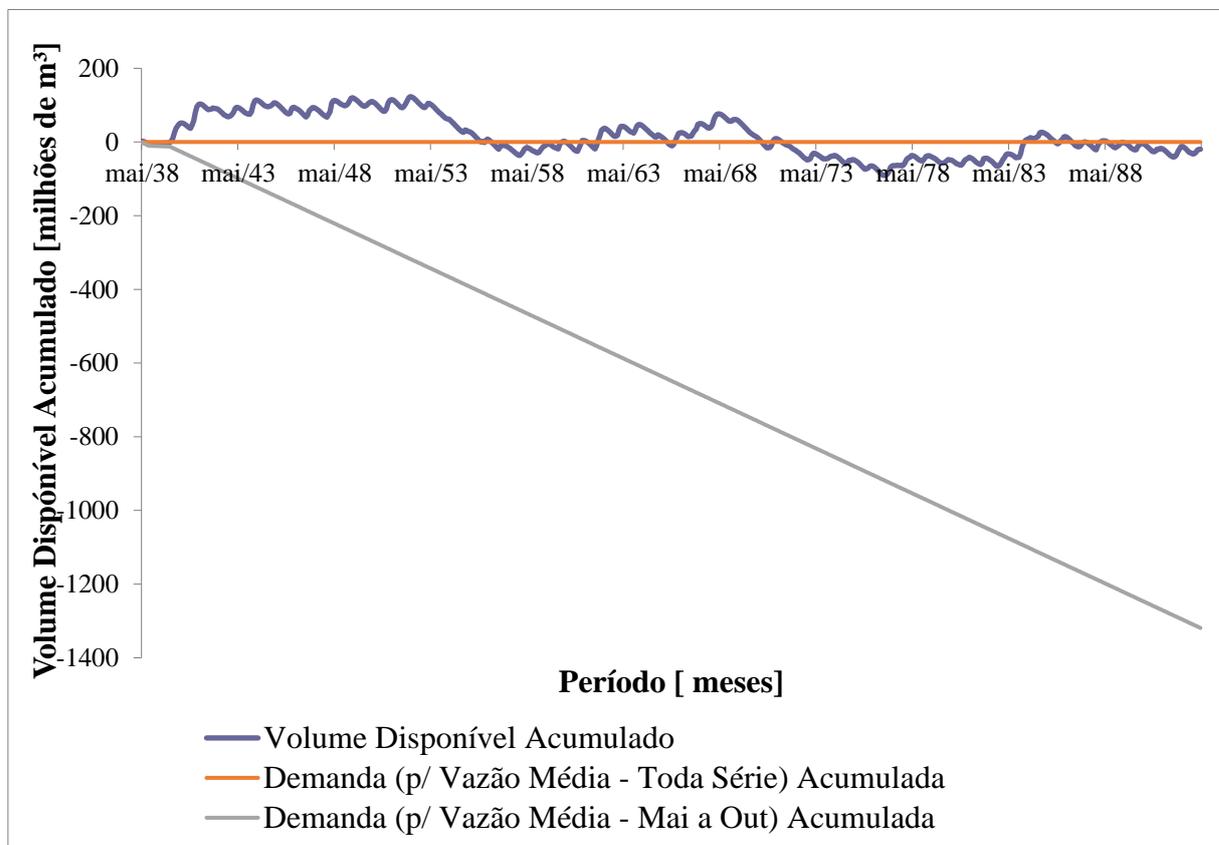


Figura 54 – Diagrama de Rippl residual e curvas de demanda para o reservatório do Cipó

A determinação gráfica do volume útil do reservatório para as duas situações estabelecidas também é análoga à realizada para o método do Diagrama de Rippl. Dessa forma, traçaram-se retas paralelas às curvas de vazão acumulada das respectivas demandas (ou regularização) tangenciando os picos da curva de massas (curva de volume disponível acumulado), de maneira a identificar os períodos mais críticos da série para cada demanda.

Este procedimento, realizado para a regularização da vazão média da série histórica ( $\bar{Q} = 2,02 \text{ [m}^3/\text{s]}$ ) em todos os meses do ano, pode ser observado na Figura 55.

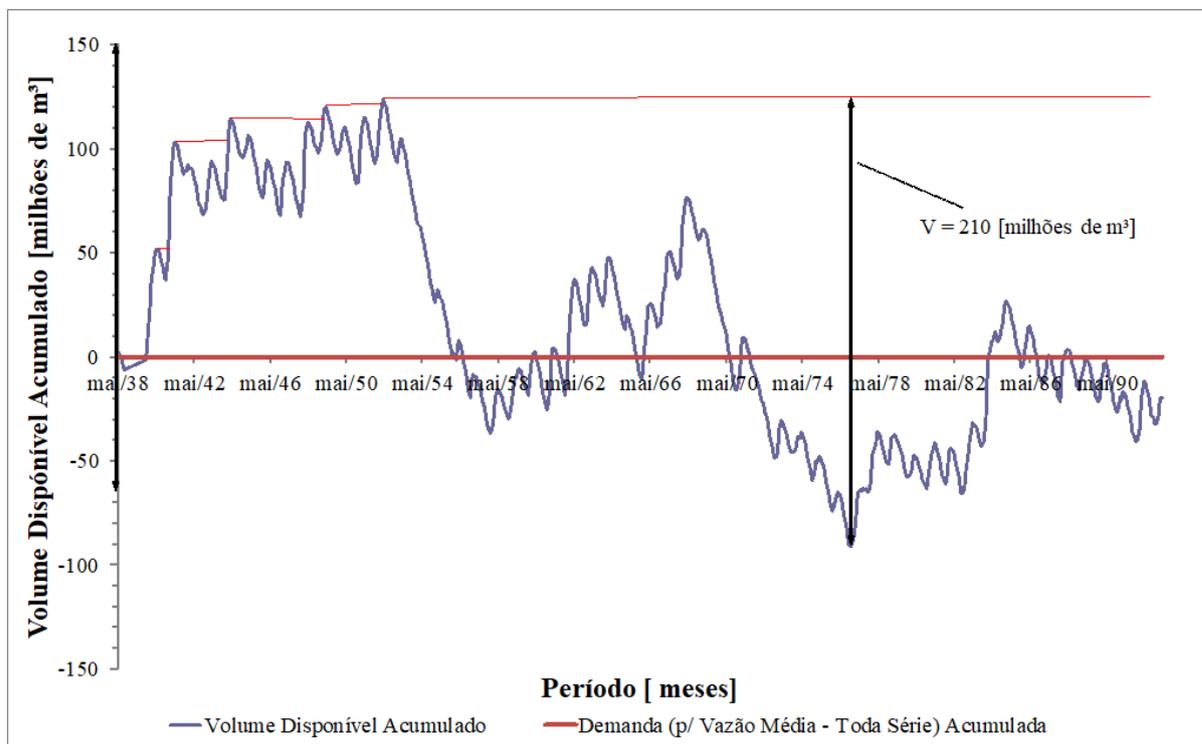


Figura 55 – Diagrama de massas residual para determinação de volume útil com regularização da vazão média em todos os meses do ano

Nota-se por meio da análise da Figura 55, que o período crítico para a determinação gráfica do volume útil do reservatório (out/75 a out/76) é o mesmo do método do diagrama de Rippl. O valor determinado para a capacidade mínima de reservatório ainda se apresenta utópico, cerca de 210 milhões de metros cúbicos, apresentando coerência com a análise realizada para o método do Diagrama de Rippl (Figura 52). Dessa forma, este valor pode ser tratado apenas como representativo de uma hipotética situação de regularização da vazão média em todos os meses do ano.

O procedimento para a determinação gráfica do volume útil para a regularização da vazão média ( $\bar{Q} = 2,02 \text{ [m}^3/\text{s]}$ ) nos meses de maio a outubro, e de  $Q = 0,50 \text{ [m}^3/\text{s]}$  no restante dos meses está representado na Figura 56.

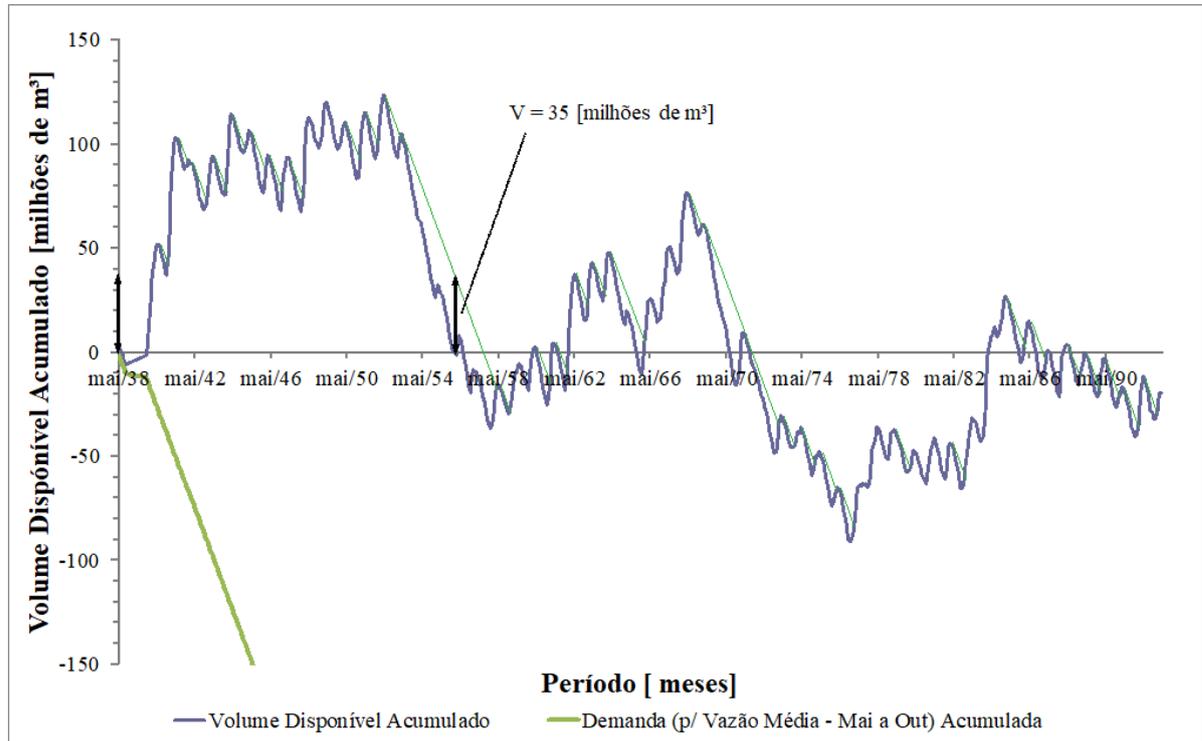


Figura 56 – Diagrama de massas residual para determinação de volume útil com regularização da vazão média em seis meses

Pela análise da Figura 56, identifica-se como o período mais crítico da série, para esta demanda, o intervalo de out/52 a out/59, idem ao constatado pelo método do Diagrama de Rippl (Figura 53). Este período resulta num volume útil de aproximadamente 35 milhões de metros cúbicos. Nota-se que este método, ao permitir o uso da escala das vazões acumuladas muito maior do que no método do Diagrama de Rippl, apresentou uma maior precisão para a determinação do volume útil necessário para a regularização, visto que na Figura 53 o valor da capacidade mínima necessária era de 48 milhões de metros cúbicos, enquanto que utilizando o método do Diagrama de Rippl residual este valor é de 35 milhões de metros cúbicos, bem próximo da capacidade máxima atual do reservatório do Cipó (30 milhões de metros cúbicos).

#### 4.1.1.4 Método da simulação da operação

De acordo com os dados disponibilizados pela concessionária, e perante aos dados apresentados no licenciamento ambiental para construção do barramento (SUPRAM, 2012), a operação exercida atualmente dispõem de valores na ordem de 2,27 [m<sup>3</sup>/s] durante os meses de seca (maio a outubro), e de 0,50 [m<sup>3</sup>/s] no restante dos meses. Isto se equivale à manutenção de uma vazão de 1,385 [m<sup>3</sup>/s] em todos os meses.

Para determinação do volume útil necessário nesta forma de operação, e para as demais possibilidades, levantaram-se curvas de probabilidades de regularização, relacionando vazão regularizada e volume útil necessário para mantê-la. Para este levantamento, considerou-se uma manutenção de vazão residual de 0,50 [m³/s] em todos os meses, sendo variada a vazão de regularização nos meses de seca (maio a outubro). Dessa maneira, têm-se, uma vazão regularizada, já incluindo a vazão residual, nos meses de maio a outubro, e no restante dos meses, apenas a vazão residual. Foram considerados níveis de garantias de regularização na ordem de 100%, 95% e 90%. As curvas de possibilidades de regularização estão dispostas na Figura 57.

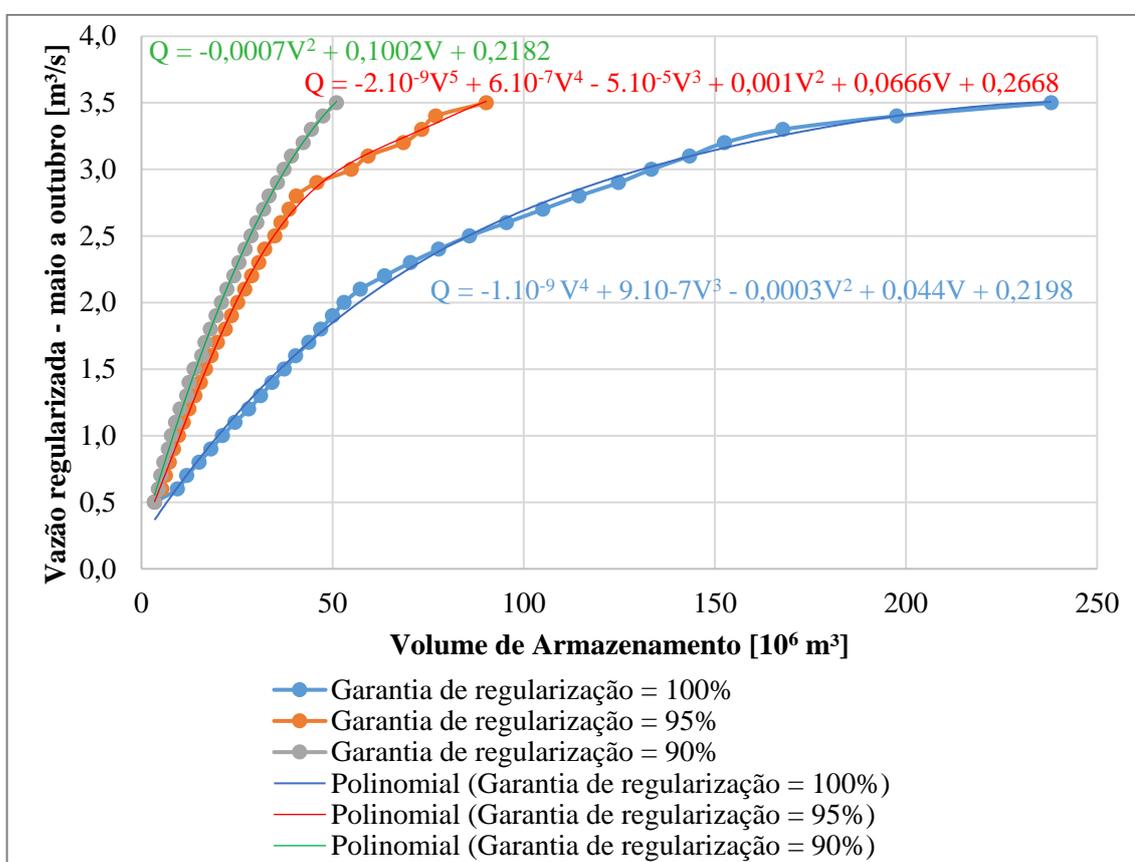


Figura 57 – Curva de possibilidades de regularização, para o reservatório do Cipó, relacionando vazão regularizada e volume de armazenamento

Por meio da análise da Figura 57, têm-se que, para o atual volume, isto é, aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos, as alternativas de regularização são de 1,29 [m³/s], com 100% de garantia, 2,25 [m³/s] com 95% de garantia e 2,59 [%] para 90% de garantia. Estes dados também estão disponibilizados na Tabela 6. Infere-se, portanto, que diante os dados de operação disponibilizados pela concessionária, e apresentados no

licenciamento ambiental para construção do barramento (SUPRAM, 2012), o reservatório opera com garantia de regularização de 95%.

Tabela 6 – Possibilidades de regularização para a atual capacidade de armazenamento

Capacidade do reservatório: 30 milhões [m <sup>3</sup> ]	Garantia de regularização		
	100%	95%	90%
Vazão regularizada [m <sup>3</sup> /s]	1,29	2,25	2,59

Para determinação do incremento na vazão regularizada em função do ganho de volume de armazenamento advindo da alteração da cota de vertimento, relacionou-se a curva de regularização (Figura 57) com a curva cota x volume (Figura 49). Dessa maneira, levantou-se a uma curva relacionando a cota de vertimento e vazão regularizada, a qual está representada na Figura 58.

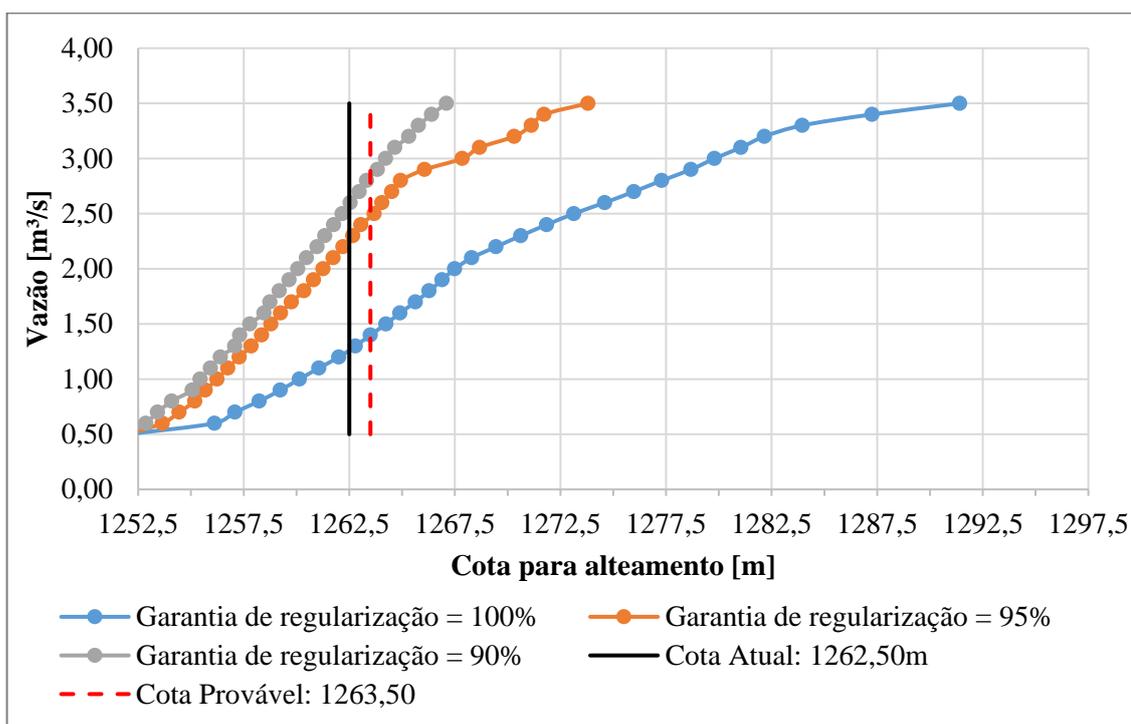


Figura 58 – Curva de possibilidades de regularização para o reservatório do Cipó, relacionando vazão regularizada e cota de alteamento.

Por meio da análise da Figura 58, comprovam-se a ordem dos valores determinados na Tabela 6, isto é, para a cota de vertimento atual (1262,50m), têm-se uma vazão de regularização de 1,26 [m<sup>3</sup>/s], com 100% de garantia, 2,26 [m<sup>3</sup>/s] com 95% de garantia e 2,59 [%] para 90% de garantia. Além do mais, é possível observar que, para uma alteração da cota de vertimento em 1 metro, valor sugerido pela concessionária do reservatório do Cipó, o

Departamento Municipal de Eletricidade – Poços de Caldas (DME/PC), têm-se uma vazão de regularização de 1,40 [m<sup>3</sup>/s], com 100% de garantia, 2,47 [m<sup>3</sup>/s] com 95% de garantia e 2,83 [%] para 90% de garantia. Os principais valores estimados a partir da Figura 58 estão dispostos na Tabela 7. Salienta-se que para os valores de vazão regularizada, já se encontra incluso o valor de fluxo permanente de 0,50 [m<sup>3</sup>/].

Tabela 7 – Relação entre vazão regularizada, volume útil necessário, e alteração da cota de vertimento, para diversos níveis de garantia.

Cota de vertimento	Nível de garantia	Vazão regularizada	Volume útil necessário
[m]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]
1262,50	100	1,26	29,0
	95	2,26	30,2
	90	2,59	29,9
1263,50	100	1,40	34,0
	95	2,47	35,0
	90	2,83	34,2

Para a operação atual, no valor de 2,26 [m<sup>3</sup>/s], estimou-se um valor de volume útil necessário de 30 milhões de metros cúbicos, ou seja, condizente com os valores de capacidade de volume útil do reservatório do Cipó atualmente, sendo identificado 95% de nível de garantia. Para manutenção do mesmo nível de garantia, a alteração da cota de vertimento em 1 metro, têm-se um incremento na vazão de aproximadamente 0,21 [m<sup>3</sup>/s], apresentando um ganho de armazenamento de aproximadamente 5 milhões de metros cúbicos.

#### 4.1.2 Diagrama de Conti-Varlet (Regularização Máxima)

Para determinação da regularização máxima, utilizou-se o diagrama de Conti-Varlet. Por se tratar de um método gráfico e os dados provirem de uma série histórica com aproximadamente 54 anos (maio/38 a abril/92), optou-se por identificar os períodos críticos da série (úmido e seco), os quais serão utilizados como referência. O hidrograma das vazões afluentes da série histórica utilizada para esta análise e identificação está disponível na Figura 59.

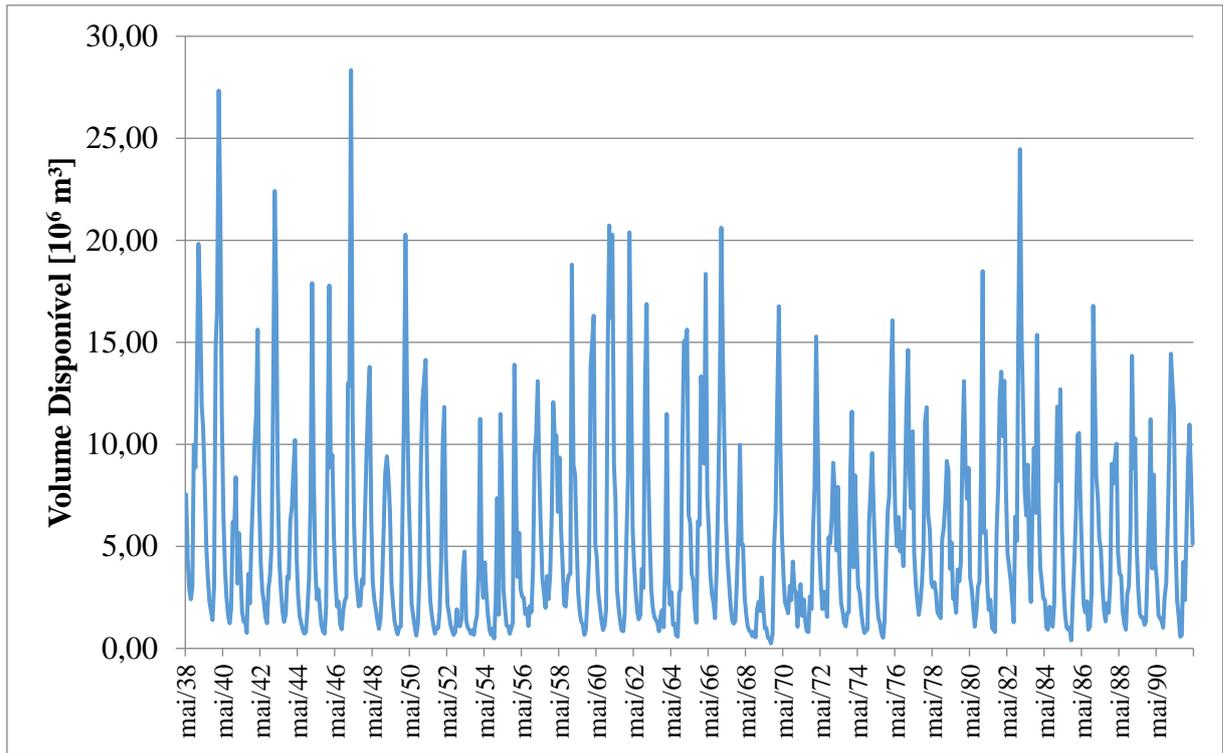


Figura 59 – Hidrograma da série histórica utilizada para o reservatório do Cipó

Analisando o hidrograma disponibilizado na Figura 59, identificou-se como períodos críticos: outubro/1959 a outubro/1963 (período de anos úmido) e outubro/1968 a outubro/1971 (período de anos seco). Este procedimento pode ser visualizado na Figura 60.

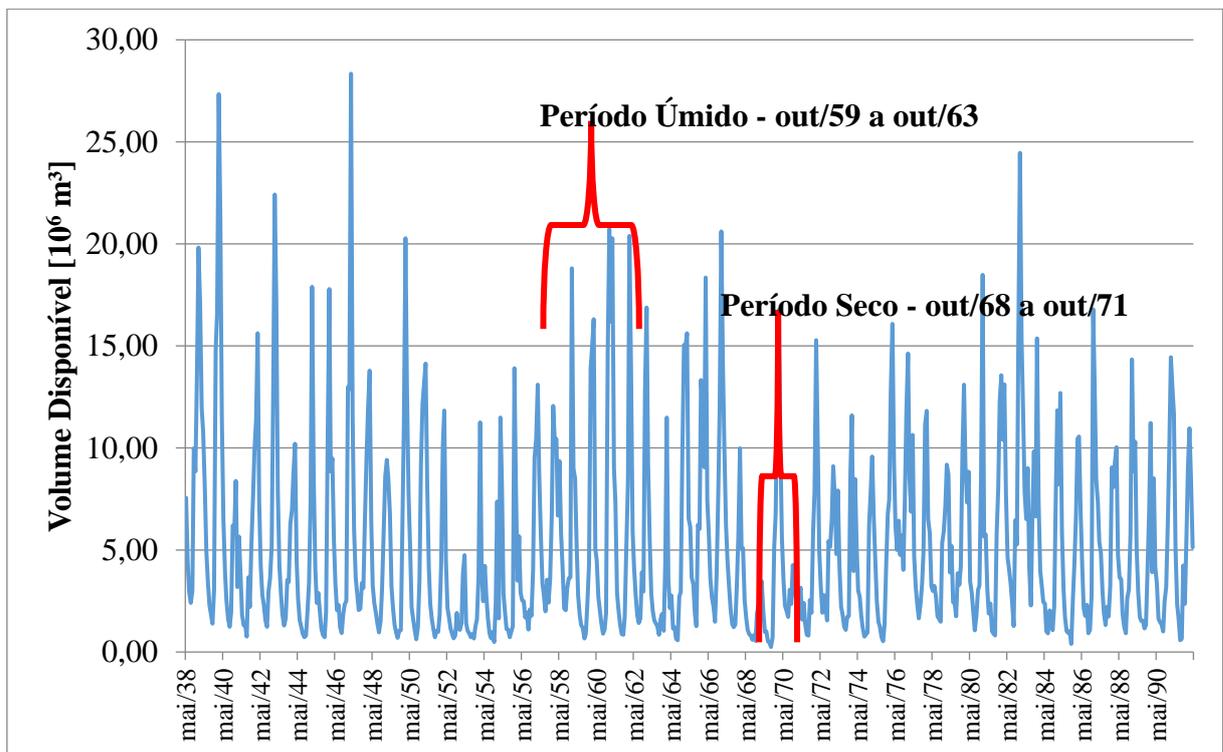


Figura 60 – Identificação dos períodos úmidos e secos no hidrograma

Para ambos os períodos, utilizou-se o diagrama de Conti-Varlet, sendo realizadas análises tanto para a capacidade atual do reservatório (30 milhões de metros cúbicos), quanto para a capacidade do reservatório considerando a alteração da cota de vertimento em 1 metro (35 milhões de metros cúbicos). Para tal, redesenhou-se o diagrama de massas, para os respectivos períodos, deslocado das capacidades do reservatório supracitadas.

Este procedimento pode ser observado, para o período de anos úmido, isto é, de outubro/1959 a outubro/1963, na Figura 61, para a capacidade atual do reservatório, e na Figura 62 para a capacidade alteada do reservatório.

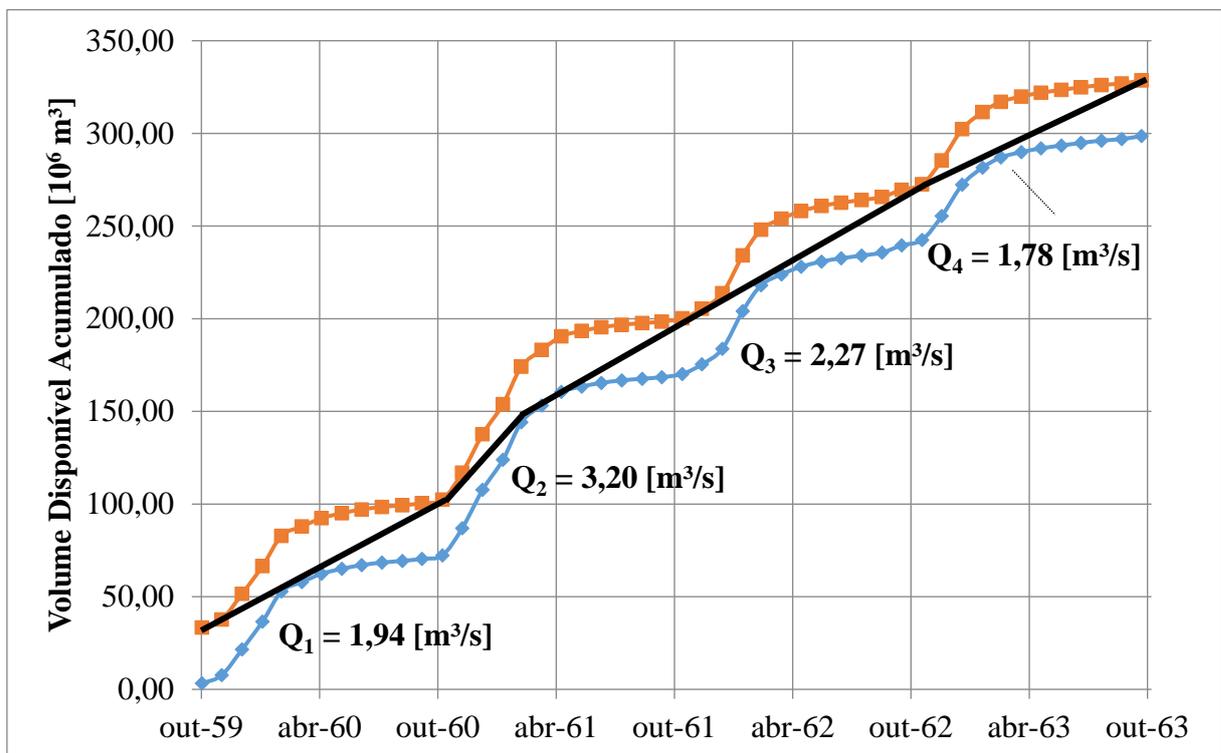


Figura 61 – Diagrama de Conti-Varlet para o período de anos úmido e capacidade atual do reservatório

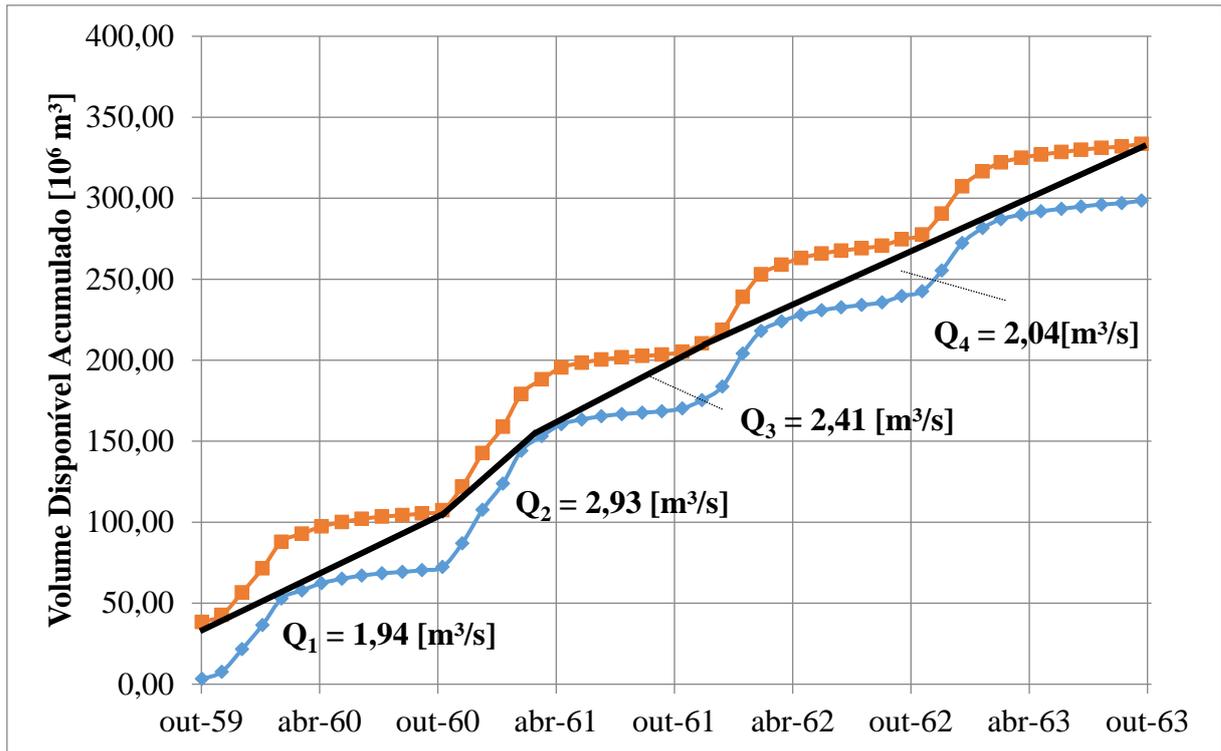


Figura 62 – Diagrama de Conti-Varlet para o período de anos úmido e capacidade do reservatório alteado

Para o período analisado no diagrama de Conti-Varlet, por meio da Figura 61 para a capacidade atual de 30 milhões de metros cúbicos e da Figura 62 para a capacidade de 35 milhões de metros cúbicos – alteamento de 1 metro com garantia de regularização de 95%, têm-se que a determinação da regularização máxima é de 2,27 [m<sup>3</sup>/s] para a capacidade de 30 milhões de metros cúbicos e de 2,41 [m<sup>3</sup>/s] para a de 35 milhões de metros cúbicos. Salienta-se que as vazões regularizadas resultantes das extremidades das curvas foram desconsideradas, visto que não apresentam período de análise completo, sendo, portanto, consideradas apenas as vazões regularizadas parciais, do período de outubro/1960 a outubro/1962, para a capacidade de 30 milhões de metros cúbicos, isto é, 3,30 [m<sup>3</sup>/s] e 2,27 [m<sup>3</sup>/s]; e do período de outubro/1960 a outubro/1962, para a capacidade de 35 metros cúbicos, isto é, 2,93 [m<sup>3</sup>/s] e 2,41[m<sup>3</sup>/s], sendo a vazão máxima regularizada o menor de seus valores para as respectivas capacidades. Os valores de máxima vazão regularizada, 2,27 [m<sup>3</sup>/s] (30 milhões de metros cúbicos) e 2,41 [m<sup>3</sup>/s] (35 milhões de metros cúbicos); estão condizentes com os apresentados na análise da curva de regularização, para 95% de garantia de regularização e dispostos na Tabela 7.

Para o período de anos seco, isto é, outubro/1968 a outubro/1971, realizou-se a mesma metodologia. Na Figura 63 se tem a representação do procedimento para a capacidade atual do reservatório, e, na Figura 64 para a capacidade alteada do reservatório.

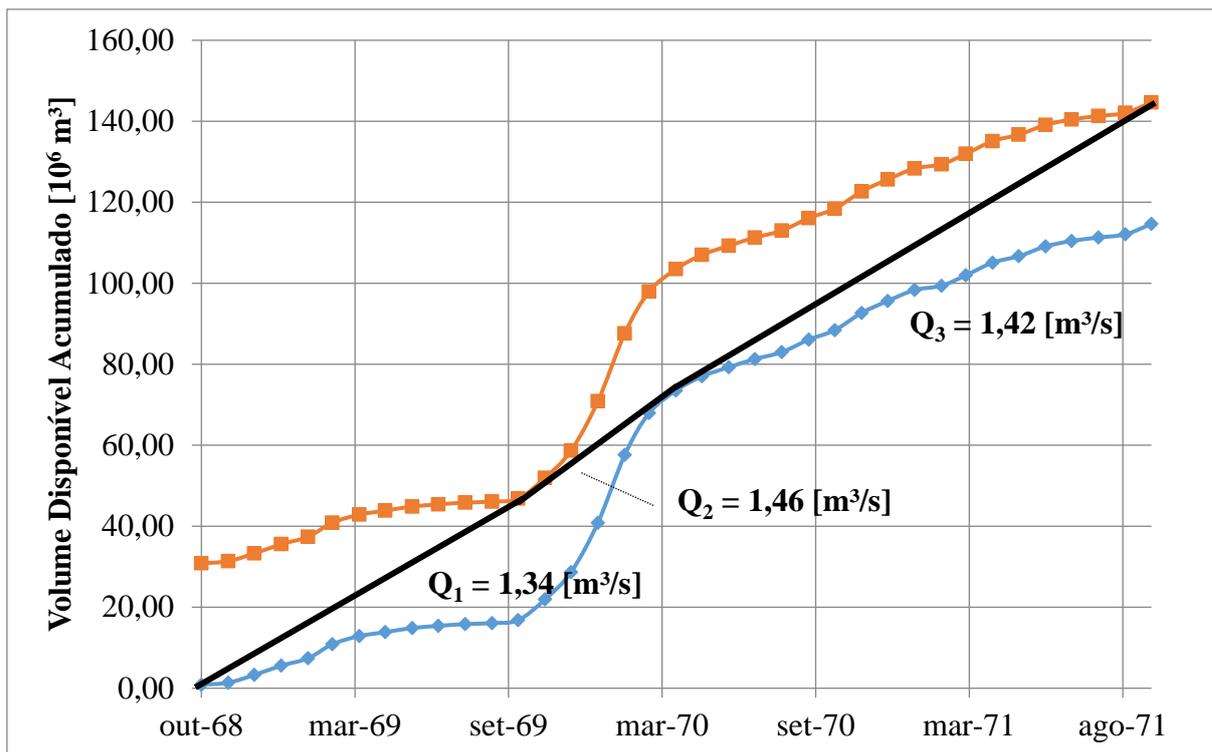


Figura 63 – Diagrama de Conti-Varlet para o período de anos seco e capacidade atual do reservatório

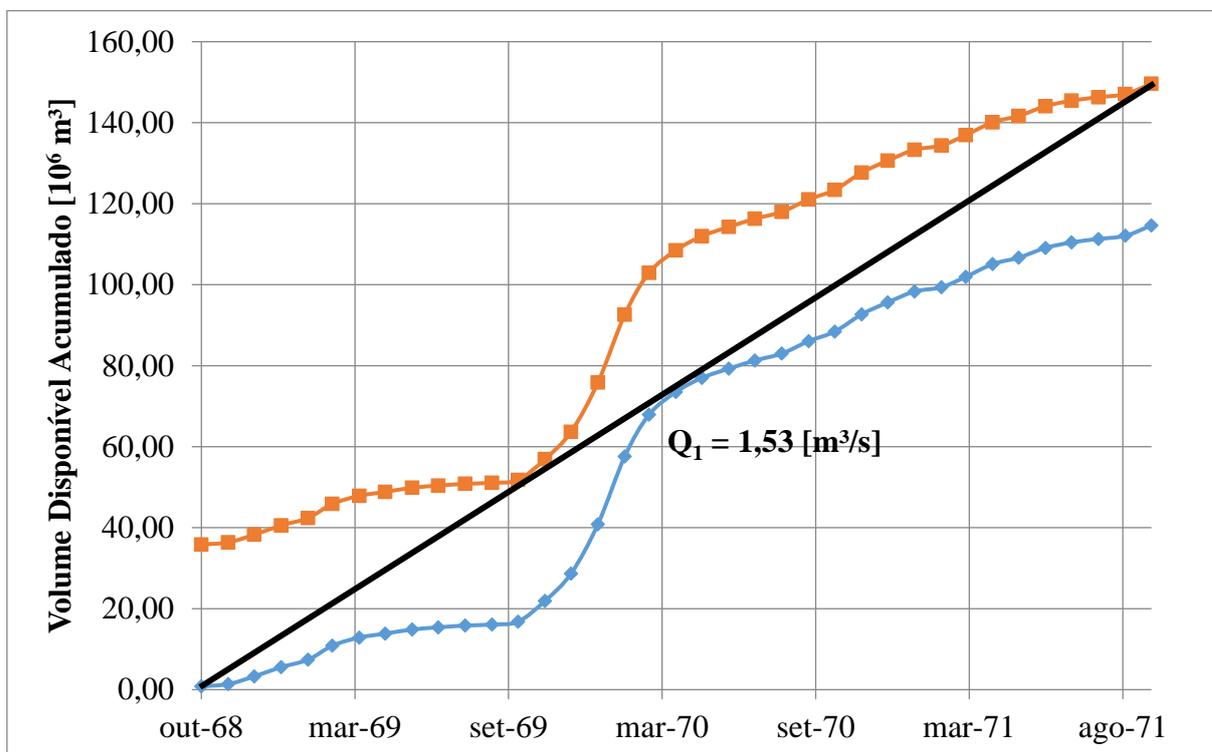


Figura 64 – Diagrama de Conti-Varlet para o período de anos seco e capacidade do reservatório alteado

Para o período analisado no diagrama de Conti-Varlet, na Figura 63 e na Figura 64, têm-se o mesmo procedimento de análise em relação a determinação da regularização máxima. Desse modo, têm-se que, para a capacidade de 30 milhões de metros cúbicos, a

regularização máxima é de 1,46 [m<sup>3</sup>/s], e para a de 35 milhões de metros cúbicos é de 1,53 [m<sup>3</sup>/s]. Estes valores, determinados para o período de anos seco, são condizentes com os apresentados na análise da curva de regularização, para 100% de garantia de regularização e dispostos na Tabela 7. No entanto, como já mencionado, a operação do reservatório está sendo dada com o nível de garantia em 95%.

Considerando o interesse do DME, grupo que detém o contrato de concessão do reservatório do Cipó, de aumentar a capacidade de armazenamento, pode-se concluir então que, com o aumento da capacidade de armazenamento do reservatório em 5 milhões de metros cúbicos, alterando a cota de vertimento em 1m, têm-se um ganho na vazão regularizada de aproximadamente 0,15 [m<sup>3</sup>/s] (2,27 [m<sup>3</sup>/s] para 2,41 [m<sup>3</sup>/s]), de acordo com a análise do Diagrama de Conti-Varlet. Quanto as análises da curva de regularização, enfatiza-se que para o mesmo ganho de armazenamento, o incremento na vazão regularizada é na ordem de 0,21 [m<sup>3</sup>/s] (2,26 [m<sup>3</sup>/s] para 2,47 [m<sup>3</sup>/s]), para um nível de garantia de regularização de 95%.

#### **4.1.3 Estudo preliminar de viabilidade econômica**

Os parâmetros utilizados para o estudo preliminar de viabilidade econômica foram: Valor presente líquido (VPL) e Custo nivelado de energia (LCOE), conforme definidos nos materiais e métodos.

Sabe-se que quando o VPL é positivo o empreendimento é rentável e viável economicamente. Caso contrário, o empreendimento não é atrativo economicamente. No entanto, como ainda não se tem uma estimativa do investimento inicial referente ao mecanismo de acréscimo de capacidade utilizado para alteração da cota de vertimento, utilizou-se o VPL para determinar o investimento máximo no qual o mesmo ainda se torna atrativo economicamente, considerando o ganho energético nas hidrelétricas em cascata a partir do incremento na vazão regularizada (e posteriormente, turbinada). Dessa maneira, foi considerado uma tarifa de venda de energia de 0,36 [R\$/KWh] (ANEEL, 2017) e uma taxa de desconto de 12% a.a., que é aproximadamente a taxa de juros aplicada no mercado financeiro, ou seja, essa seria a taxa mínima de atratividade, a qual pode ser entendida como o custo de oportunidade do capital a ser investido nesse projeto. A energia produzida anualmente, em [MWh], a partir do incremento na vazão regularizada, foi determinada em função das respectivas quedas das centrais hidrelétricas em cascata. (Tabela 8). Os custos de operação e manutenção foram desconsiderados, visto que o mecanismo a ser implantado deverá ser operado automaticamente com provável baixo custo de manutenção.

Tabela 8 – Determinação da energia produzida anualmente a partir do incremento na vazão regularizada

Aproveitamento	Níveis operacionais [m]		Q	H	P	Ep
	Montante	Jusante	[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[MW]	[MWh/ano]
CGH Bortolan	1244,20	1231,23	0,20	12,97	0,03	127,01
CGH Véu das Noivas	1211,95	1183,80	0,20	28,15	0,06	275,66
PCH Antas I	1170,44	1080,85	0,20	89,59	0,18	877,32
PCH Antas II	1080,85	919,30	0,20	161,55	0,32	1582,00
PCH Rolador	897,20	848,20	0,20	49,00	0,10	479,84
					Total:	3341,84

Estima-se, portanto, a partir da Tabela 8, um ganho energético de 3341,84 [MWh/ano] em toda as hidrelétricas em cascata. Dessa forma, os investimentos máximos para implantação do mecanismo, em função do tempo de retorno, estão dispostos na Tabela 9. Este método foi aplicada para até 25 anos, tempo de concessão da maioria dos empreendimentos hidrelétricos.

Tabela 9 – Investimento máximo para implantação do mecanismo em função do tempo de retorno a partir do VPL

Tempo de retorno [anos]	Investimento	Tempo de retorno [anos]	Investimento
1	R\$ 1.074.164,29	14	R\$ 7.974.110,62
2	R\$ 2.033.239,55	15	R\$ 8.193.905,92
3	R\$ 2.889.556,75	16	R\$ 8.390.151,72
4	R\$ 3.654.125,67	17	R\$ 8.565.371,18
5	R\$ 4.336.776,50	18	R\$ 8.721.817,13
6	R\$ 4.946.286,17	19	R\$ 8.861.501,02
7	R\$ 5.490.491,23	20	R\$ 8.986.218,77
8	R\$ 5.976.388,60	21	R\$ 9.097.573,91
9	R\$ 6.410.225,54	22	R\$ 9.196.998,14
10	R\$ 6.797.579,95	23	R\$ 9.285.769,77
11	R\$ 7.143.432,11	24	R\$ 9.365.030,16
12	R\$ 7.452.228,67	25	R\$ 9.435.798,36
13	R\$ 7.727.939,89	-	-

Nota-se que, mesmo a concessionária tendo interesse em retorno rápido, a implantação do mecanismo é atrativa economicamente, podendo-se aplicar valores de investimento na ordem de R\$ 1.000.000,00 para retorno em até 1 ano.

Para o segundo parâmetro de análise de viabilidade, o Custo Nivelado de Energia (LCOE), o procedimento de análise foi similar. Dessa maneira, tem-se que o LCOE se refere à razão entre a somatória de custos (investimento) transferidos ao ano inicial e a energia também descontada no tempo. Se o custo for inferior à tarifa de venda de energia, o empreendimento é viável. Logo, admitindo a taxa de juros de 12%, conforme determinado anteriormente, pode ser estipular um valor de investimento máximo para obtenção de viabilidade econômica. Portanto, para uma tarifa de venda de energia de 0,36 [R\$/KWh], os investimentos máximos para implantação do mecanismo em função do tempo de retorno estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Investimento máximo para implantação do mecanismo em função do tempo de retorno a partir do LCOE

Tempo de retorno [anos]	Investimento	Tempo de retorno [anos]	Investimento
0	R\$ 1.203.064,01	13	R\$ 8.655.292,68
1	R\$ 2.277.228,30	14	R\$ 8.931.003,90
2	R\$ 3.236.303,56	15	R\$ 9.177.174,63
3	R\$ 4.092.620,75	16	R\$ 9.396.969,93
4	R\$ 4.857.189,68	17	R\$ 9.593.215,73
5	R\$ 5.539.840,51	18	R\$ 9.768.435,19
6	R\$ 6.149.350,17	19	R\$ 9.924.881,14
7	R\$ 6.693.555,23	20	R\$ 10.064.565,02
8	R\$ 7.179.452,61	21	R\$ 10.189.282,78
9	R\$ 7.613.289,55	22	R\$ 10.300.637,92
10	R\$ 8.000.643,96	23	R\$ 10.400.062,15
11	R\$ 8.346.496,11	24	R\$ 10.488.833,78
12	R\$ 1.203.064,01	25	R\$ 10.568.094,17

Como pode ser observado, um investimento na ordem de R\$ 1.200.000,00 se torna atrativo economicamente, com tempo de retorno de até 1 ano. Caso seja possível a recuperação do capital num espaço de tempo maior, o investimento máximo estipulado pelo LCOE pode ser da ordem de R\$ 10.500.000,00 (para 25 anos).

Como forma de comparação entre os métodos utilizados, plotou uma curva relacionando o investimento máximo realizável com seu respectivo tempo de retorno. Este procedimento está representado na Figura 65.

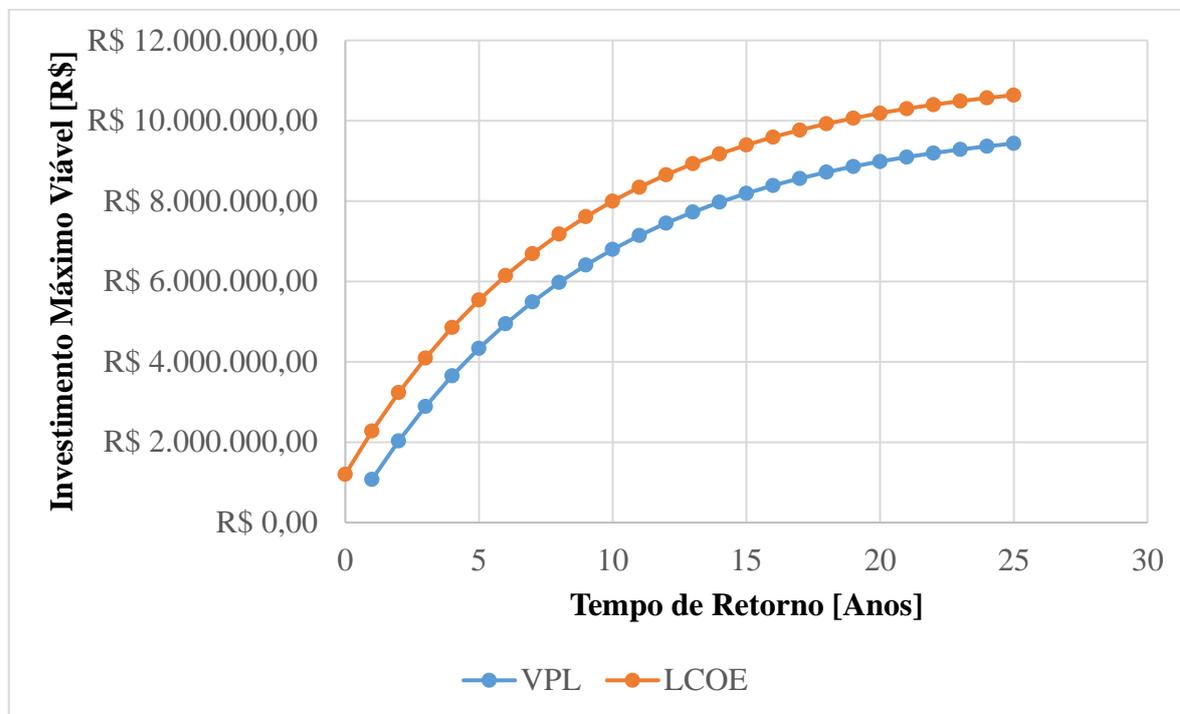


Figura 65 – Relação entre investimento máximo realizável e tempo de retorno por meio de VPL e LCOE

Por meio da análise da Figura 65, é possível observar que o método LCOE apresenta valores estimados para o máximo investimento inicial um pouco superior quando comparado aos estimados pelo método VPL. No entanto, é importante salientar que ambos os métodos, VPL e LCOE, apresentaram coerência entre si em relação aos valores estimados e tempo de retorno relativamente curto para grandes investimentos. Isso permite uma segurança no desenvolvimento do projeto e na implantação do mecanismo visto que não haverá fatores de limitação financeira que acarretem na inviabilidade do projeto. Para as concessionárias, esta possibilidade em questão se mostra uma ótima alternativa tanto para ganho de armazenamento, propiciando segurança hídrica em seus usos múltiplos; garantia energética, principalmente na potência gerada, permitindo flexibilidade para atendimento às demandas em períodos de ponta; e ganho financeiro, complementando o balanço econômico da concessionária.

## 4.2 Desenvolvimento do mecanismo

### 4.2.1 Equilíbrio de momento físico

#### 4.2.1.1 Condições em campo

Para o desenvolvimento do mecanismo, assume-se, a princípio, um perfil hidrodinâmico maciço, com o intuito de simplificação de análises. O material adotado se trata do aço ASTM A36, o qual, dentre os existentes atualmente, é o mais utilizado e conhecido. A respeito das condições preliminares admitidas em função do local de implantação, têm-se que a largura dada é de 8 metros (equivalente à largura do vertedouro) e altura de 1 metro (sugerida de acordo com os estudos de regularização, os quais, para a alteração na cota de vertimento em 1 metro, permitem um incremento de aproximadamente 0,21 [m<sup>3</sup>/s] na vazão regularizada, com uma garantia de 95% e um ganho de capacidade de armazenamento de 5 milhões de metros cúbicos). (Figura 66).

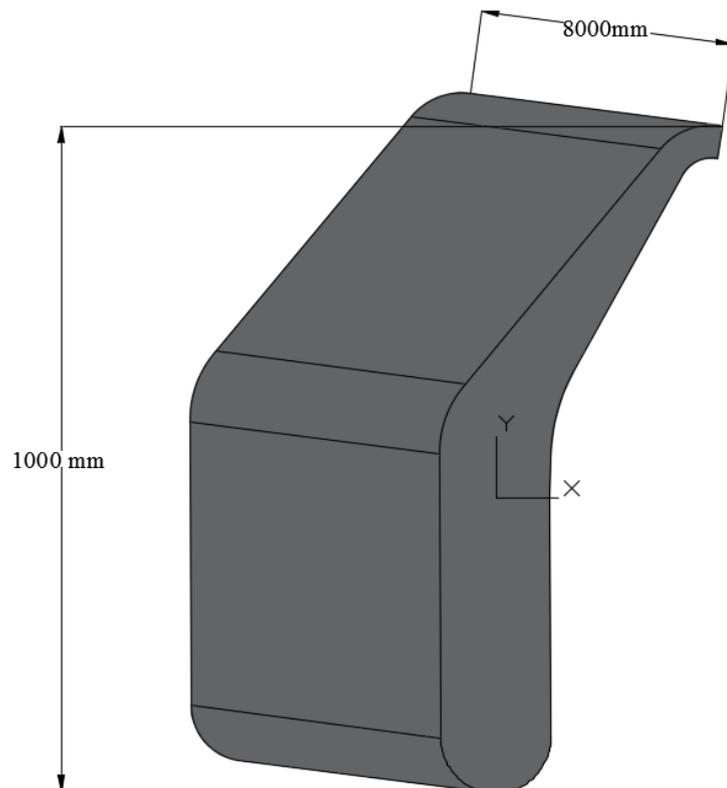


Figura 66 – Perfil hidrodinâmico maciço e condições iniciais admitidas em função do local de implantação

Para as condições estabelecidas a priori, realizou-se o somatório dos momentos físicos das forças atuantes no mecanismo, em relação à origem, de forma a estabelecer a posição do eixo para manutenção do nível máximo de água a montante na extremidade superior. Desta forma, adotou-se como origem o ponto localizado no centro da largura do mecanismo, medida no corte que estabelece a divisão entre as partes inclinada e vertical, e estimou-se uma posição inicial para o eixo, a qual foi sendo otimizada para que se obtivesse somatório de momento das forças atuantes, em relação ao eixo, nulo ou próximo de zero. Assim, assegura-se que a “abertura” do mecanismo, e o conseqüente vertimento, só se dará no instante em que o nível de água atingir a extremidade superior. Além disto, para garantir que, enquanto não esteja atuando, o mecanismo permaneça em posição “fechada”, de forma a permitir o aumento de nível, e conseqüentemente, o ganho de capacidade de armazenamento, realizou-se o somatório de momento para às forças peso (superior e inferior) da estrutura, em relação ao eixo, desconsiderando a atuação da água, mantendo o mecanismo naturalmente na posição vertical. Este somatório deve apresentar valor negativo, visto que, de acordo com a convenção de sinais adotada, negativo refere à rotação em sentido anti-horário (fechamento), e positivo, em sentido horário (abertura).

O eixo otimizado, em relação à origem adotada, possui coordenadas  $x = 0,0428945166765407$  [m] e  $y = -0,14497905106264$  [m]. Essa posição resulta em somatório de momentos nulo para as ambas considerações, ou seja, tanto para o nível de água na extremidade superior, quanto para o mecanismo sem ação da água. Sabe-se que qualquer mínima alteração nestes valores de coordenadas, inclusive por aproximação de casas decimais causa alteração na ordem de grandeza do resultado do somatório, devido à magnitude das forças envolvidas e as dimensões do mecanismo, e conseqüentemente, os braços de alavanca. No entanto, visto que é impossível uma precisão nesta ordem para parâmetros construtivos, adotaram-se as seguintes coordenadas para o eixo:  $x = 0,04290$  [m] e  $y = -0,145$  [m], ou seja,  $x = 42,90$  [mm] e  $y = -145,00$  [mm]. Esta posição resulta em um somatório de momento das forças resultantes, para o nível de água na extremidade superior, de  $0,168$  [N.m], isto é, espera-se que a abertura do mecanismo ocorra com o nível próximo da extremidade. Têm-se também que o resultado do somatório de momento, sem ação da água, é de  $-0,488$  [N.m], garantindo-se com isso a posição fechada do mecanismo, enquanto o mesmo não estiver operando.

As posições das forças atuantes no mecanismo, em relação ao eixo, definidas de acordo com os materiais e métodos descritos no capítulo referente, estão dispostas na Tabela 11.

Tabela 11 – Determinação da posição das forças atuantes no mecanismo, em relação ao eixo, para as condições em campo

Força atuante	Linha de ação	Intensidade [N]	Posição	
			x [m]	y [m]
Força Hidrostática – superfície inclinada ( $F_1$ )	Diagonal	14 690,54	0,0616	0,3482
Força Hidrostática – superfície vertical ( $F_2$ )	Horizontal	6 416,50	-	0,0694
Força Hidrostática – superfície vertical ( $F_3$ )	Horizontal	23 351,60	-	-0,1953
Força Peso – parte inclinada (superior) ( $W_1$ )	Vertical	36 580,44	0,0626	-
Força Peso – parte vertical (inferior) ( $W_2$ )	Vertical	52 441,85	-0,0437	-
Empuxo (E)	Vertical	10 800,40	0,0008	-
Peso da massa de água ( $W_a$ )	Vertical	8 194,03	0,0154	-

A distribuição das forças bem como suas intensidades e posições podem ser visualizadas na Figura 67.

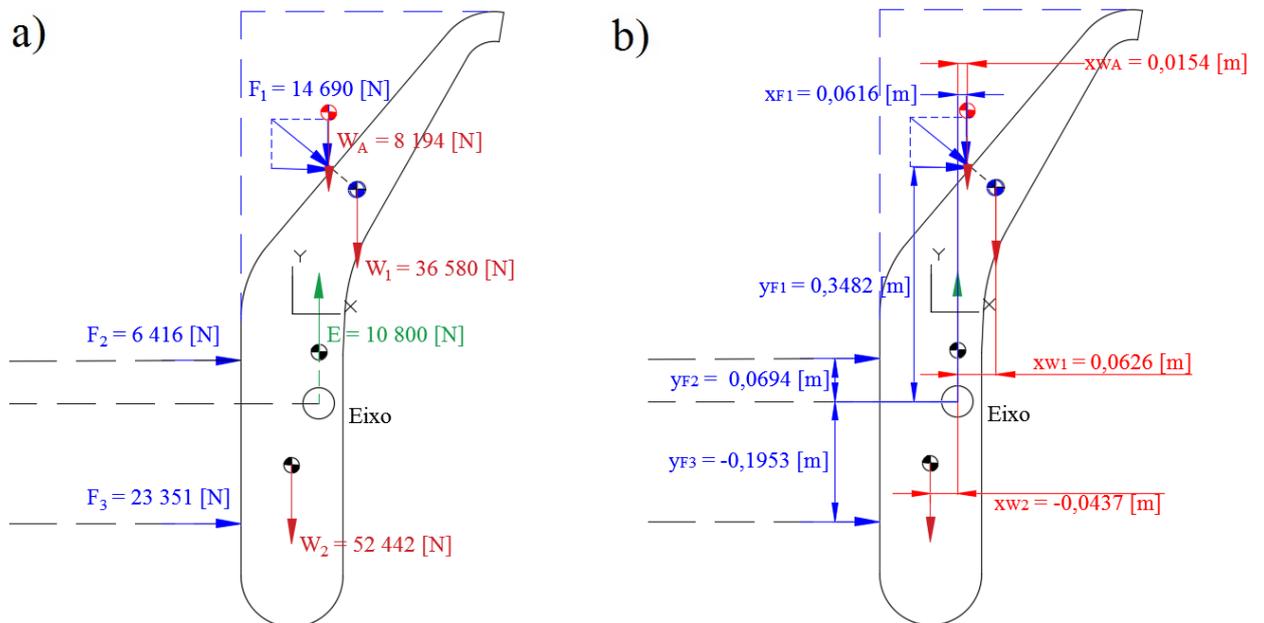


Figura 67 – Representação da distribuição das forças atuantes no mecanismo, bem como suas intensidades a) e posições b), para as condições em campo

#### 4.2.1.2 Condições para o método experimental

A respeito das condições admitidas, para o desenvolvimento do mecanismo para o método experimental, o qual engloba tanto a simulação computacional quanto a experimentação laboratorial, tem-se que a largura dada é de 150 milímetros, em função da largura do canal em acrílico, e a altura total é de aproximadamente 81,19 milímetros. Desta altura, 56,25 milímetros se dispõem acima da crista do vertedouro, o que condiz com a sugestão de alteração da cota de vertimento em 1 metro na escala de 1:17. Desta forma, têm-se uma margem de segurança para ambas fases do método, tanto computacional, quanto laboratorial.

Assume-se, à princípio, também um perfil hidrodinâmico maciço, com o intuito de simplificação de análises. O material adotado se trata do acrílico (ABS), o qual, atualmente, se trata um dos materiais mais utilizados por meio da técnica de prototipação rápida, também conhecida por impressão em 3D. (Figura 68).

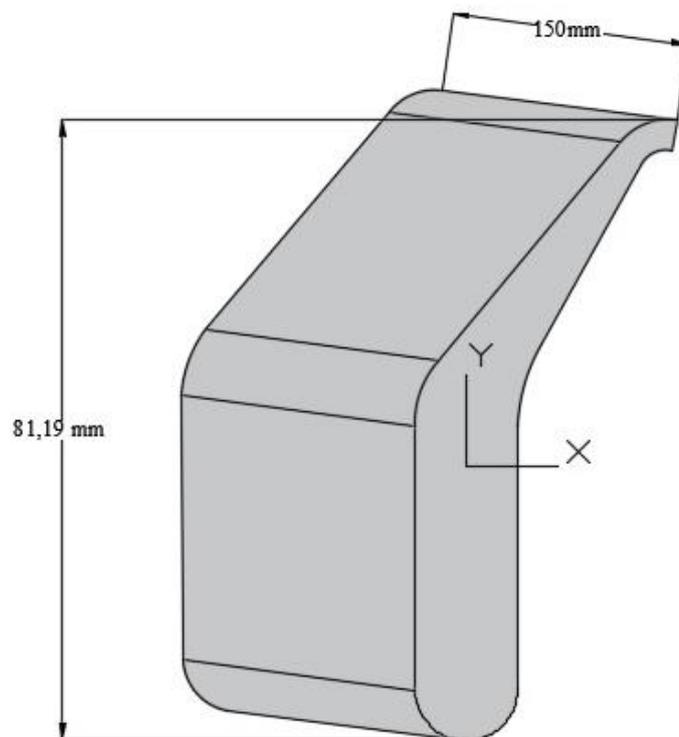


Figura 68 – Perfil hidrodinâmico maciço e condições admitidas em função do método experimental

De maneira análoga à realizada para as condições em campo, determinou-se a posição do eixo, a partir do somatório de momento físico das forças atuantes no mecanismo, em relação à origem.

O eixo, com posição otimizada em relação à origem adotada, possui coordenadas  $x = 0,00386$  [m] e  $y = -0,01168$  [m]. Essa posição resulta em somatório de momentos, em relação ao eixo, próximo de zero para as ambas as considerações, ou seja, tanto para o nível de água na extremidade superior ( $M = -0,003$  [N.m]), quanto para o mecanismo sem ação da água ( $M = -0,00044$  [N.m]).

Para o método experimental, as posições das forças atuantes no mecanismo, em relação ao eixo, estão dispostas na Tabela 12.

Tabela 12 – Determinação da posição das forças atuantes no mecanismo, em relação ao eixo, para o método experimental

Força atuante	Linha de ação	Intensidade [N]	Posição	
			x [m]	y [m]
Força Hidrostática – superfície inclinada ( $F_1$ )	Diagonal	1,850	0,00442	0,02817
Força Hidrostática – superfície vertical ( $F_2$ )	Horizontal	0,801	-	0,00559
Força Hidrostática – superfície vertical ( $F_3$ )	Horizontal	2,945	-	-0,01588
Força Peso – parte inclinada (superior) ( $W_1$ )	Vertical	0,587	0,00478	-
Força Peso – parte vertical (inferior) ( $W_2$ )	Vertical	0,840	-0,00387	-
Empuxo (E)	Vertical	1,359	-0,00051	-
Peso da massa de água ( $W_a$ )	Vertical	1,032	0,00094	-

A distribuição das forças bem como suas intensidades e posições podem ser visualizadas na Figura 69.

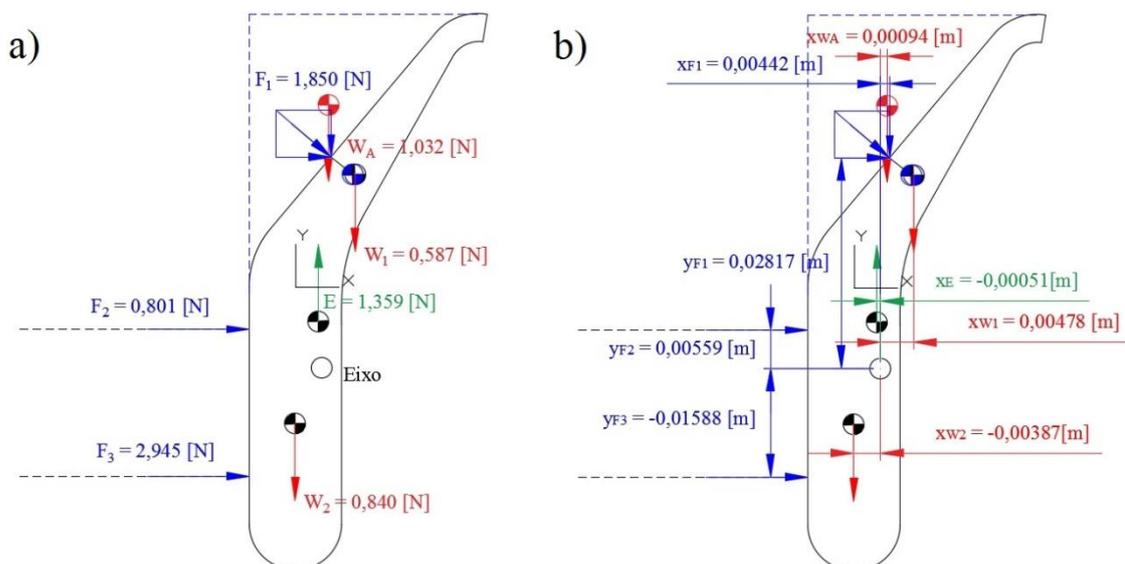


Figura 69 – Representação da distribuição das forças atuantes no mecanismo, bem como suas intensidades a) e posições b), para o método experimental

### 4.2.2 Simulação computacional

A simulação de dinâmica dos fluidos computacional para o modelo do mecanismo que visará o acréscimo de capacidade de armazenamento em reservatórios foi realizada de forma a avaliar o comportamento do escoamento em cada ângulo de abertura proposto. Assim, definido o perfil hidrodinâmico do mecanismo e as dimensões do modelo reduzido, adotaram-se posições estáticas de abertura a cada 5 graus, de modo que, ao se inserir, como condições de contorno, velocidades de escoamento a montante, mantêm-se o nível de coluna d'água correspondente à alteração da cota de vertimento desejada.

Dessa maneira, espera-se avaliar o comportamento do escoamento a partir da distinção de fases (ar e água) e das condições tanto de pressão estática quanto de velocidade de escoamento por linhas de corrente. Além disso, pode-se estipular uma curva para a determinação da vazão de vertimento em função do ângulo de abertura do mecanismo, até que o mesmo atinja seu ponto de equilíbrio, isto é, até que sua posição esteja estabilizada após o total afogamento – ou abertura máxima.

Estes resultados servem como ferramenta de validação de resultados, referentes à bancada de ensaios laboratoriais, e correção de parâmetros para definição do perfil transversal do mecanismo.

Portanto, para a avaliação do comportamento do escoamento, teve-se como condição de contorno inicial, conforme já mencionado, a velocidade de escoamento na região de entrada do modelo computacional. Este parâmetro foi alterado em função de cada posição estática de abertura, a qual foi sendo variada a cada 5 graus, de maneira a manter constante o nível a montante do mecanismo, isto é, equivalente a alteração da cota de vertimento em 1m, como sugerida. A manutenção constante do nível foi realizada a partir da observação do gráfico de contorno de fases, do programa Fluent® (*Solver* empregado). Salienta-se também, que de acordo com a lei da continuidade, a vazão se mantém constante em todo o circuito, ou seja, o valor numérico que se apresenta em um ponto de entrada permanecerá o mesmo no ponto de saída.

A Tabela 13 apresenta os valores de vazão mássica e volumétrica, referentes às velocidades inseridas como condição de contorno, para cada ângulo de abertura do mecanismo.

Tabela 13 – Vazão mássica e volumétrica em função do ângulo de abertura do mecanismo no modelo computacional

Ângulo de abertura [°]	Velocidade [m/s]	Vazão mássica [Kg/s]	Vazão volumétrica [m <sup>3</sup> /s]
5	0,0030	0,2077	0,0002077
10	0,0035	0,3774	0,0003774
15	0,0040	0,4204	0,0004204
20	0,0050	0,5130	0,0005130
25	0,0050	0,6710	0,0006710
30	0,0050	0,6009	0,0006009
35	0,0050	0,6553	0,0006553
40	0,0050	0,7080	0,0007080
45	0,0110	1,7935	0,0017935

Como forma de representação gráfica, plotou-se a Figura 70, na qual pode se observar mais claramente o comportamento da vazão em função do ângulo de abertura. Nota-se que para o ângulo de abertura de 45 graus do mecanismo, têm-se uma mudança de comportamento, provavelmente por se aproximar da posição de sua abertura máxima, com menor estrangulamento entre sua superfície e a superfície do vertedouro, exigindo um maior valor de vazão para manutenção do nível a montante.

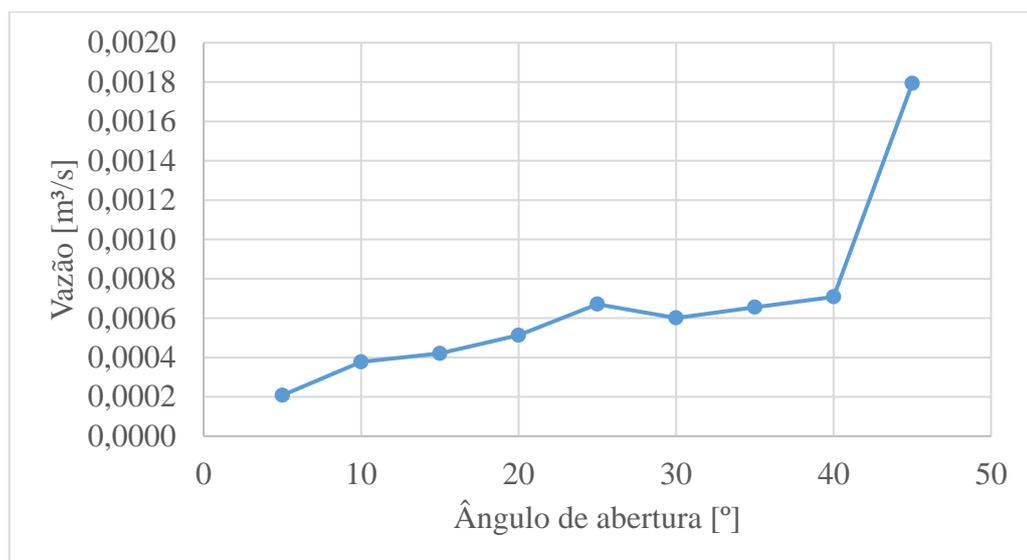
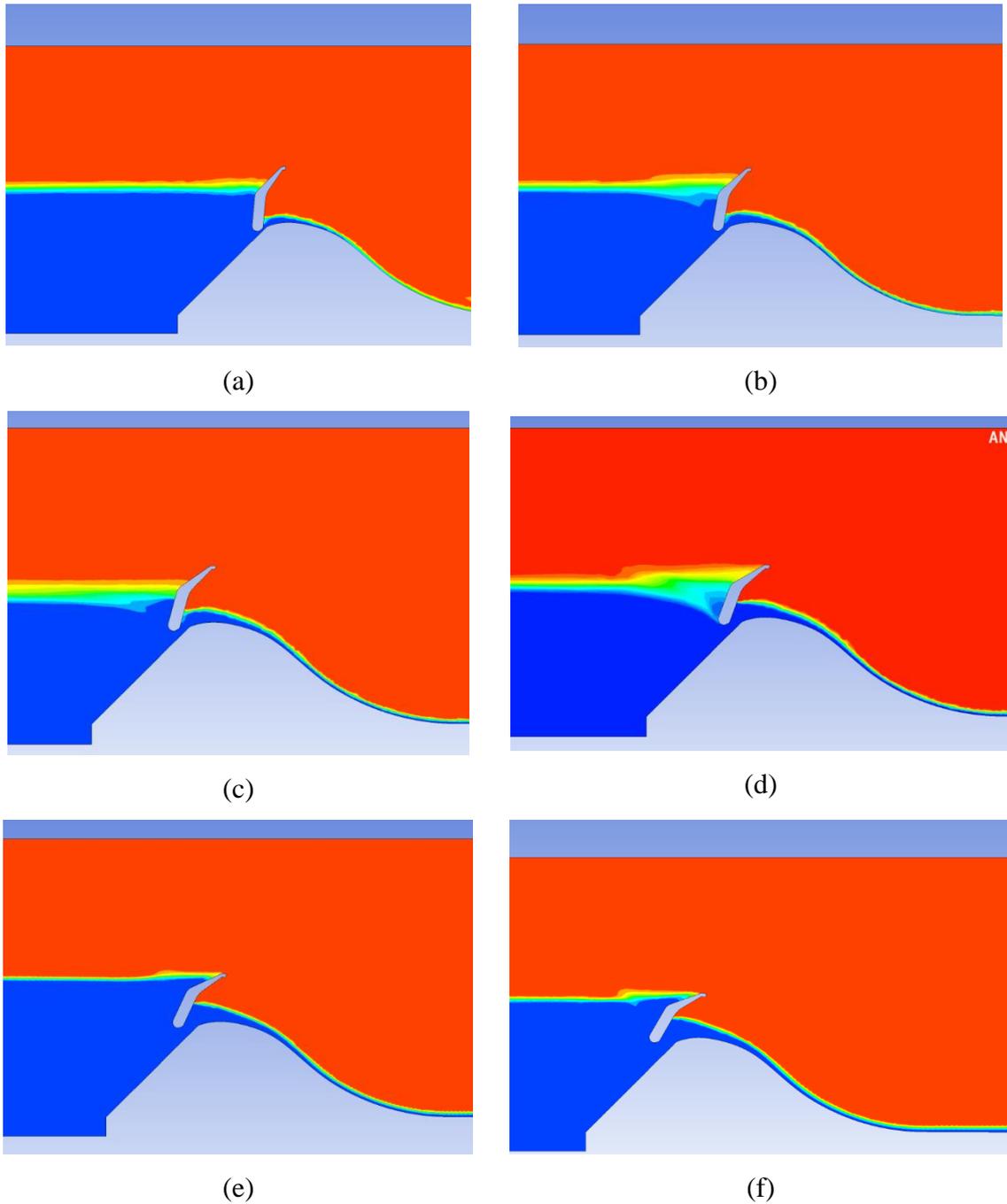


Figura 70 – Variação da vazão volumétrica em função do ângulo de abertura do mecanismo no modelo computacional

Portanto, espera-se uma estabilização tanto do mecanismo quanto do escoamento na posição de abertura referente ao ângulo de 45 graus.

Em relação ao comportamento do escoamento em função do ângulo de abertura do mecanismo, geraram-se os gráficos de distinção de fases, dispostos desde a Figura 71 (a) até a Figura 71 (i), os quais permitem essa análise a cada 5 graus de abertura, até o seu ponto de equilíbrio – 45 graus, no qual o mecanismo permanece totalmente aberto.



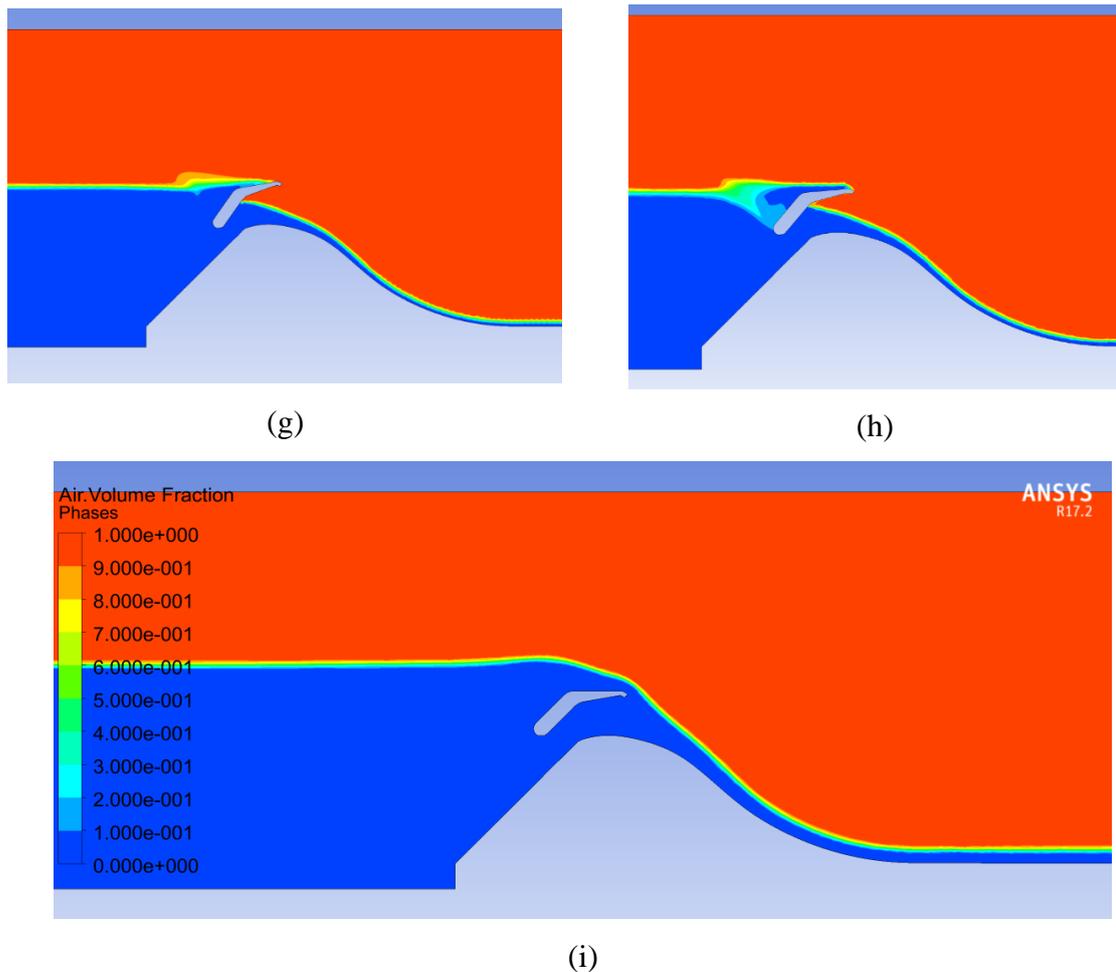
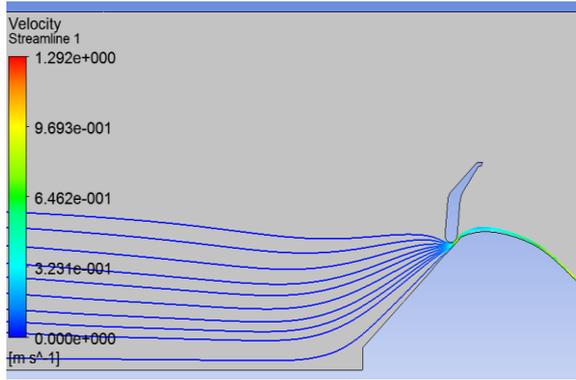


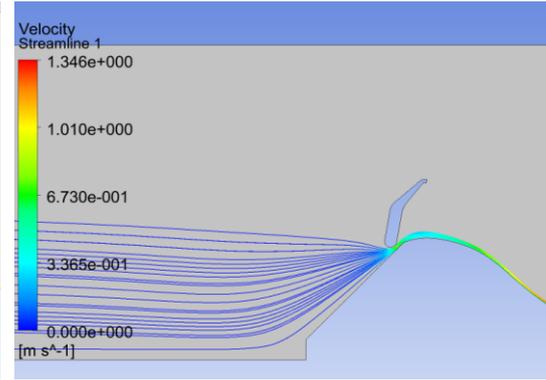
Figura 71 – Comportamento do escoamento (distinção de fases) em função do ângulo de abertura do mecanismo: (a) – 5°; (b) – 10°; (c) – 15°; (d) – 20°; (e) – 25°; (f) – 30°; (g) – 35°; (h) – 40° e (i) – 45°.

A partir da Figura 71 (a) até Figura 71 (i), é possível notar, desde o início da abertura do mecanismo (Figura 71 (a), com 5 graus), devido à sua presença no escoamento, o qual funciona como um aparato, e a fraca declividade, que há a sobrelevação de montante da linha d'água. Esta sobrelevação é também denominada no campo da hidráulica como remanso. Nota-se também que o remanso não se estende por um longo comprimento, não exigindo nenhuma avaliação mais precisa em relação as suas consequências. No mais, percebe-se pouca influência do mecanismo no comportamento do escoamento no vertedouro.

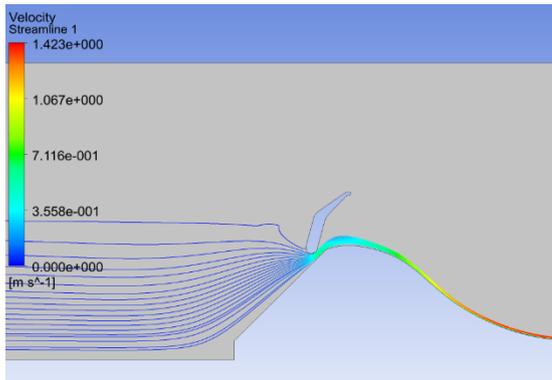
Já em relação às linhas de corrente de velocidade do escoamento, apresentadas a contar da Figura 72 (a) à Figura 72 (i), dispõe-se desde a montante do mecanismo até a região de saída.



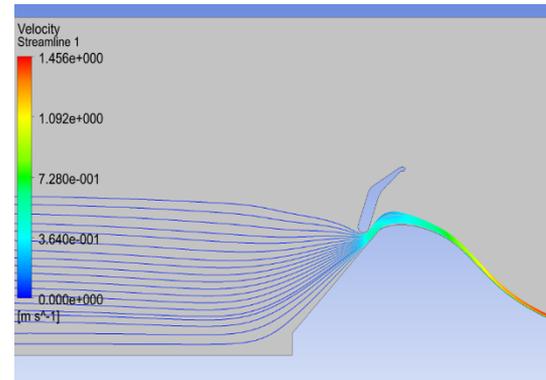
(a)



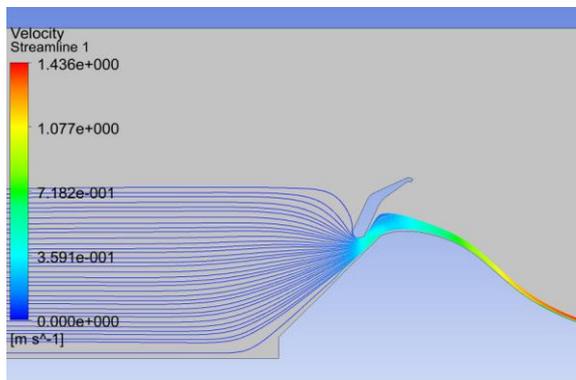
(b)



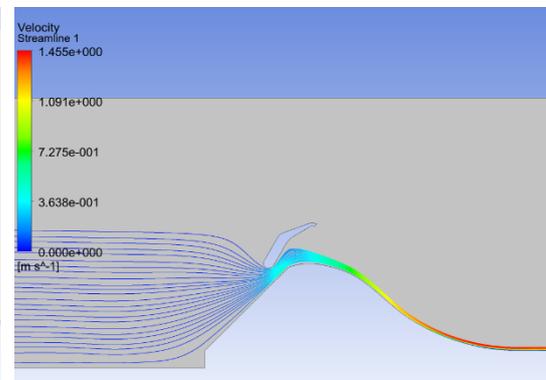
(c)



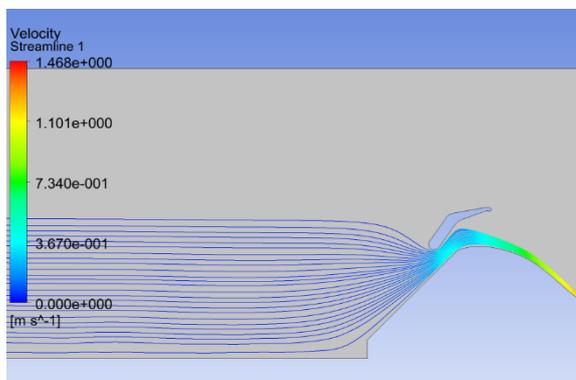
(d)



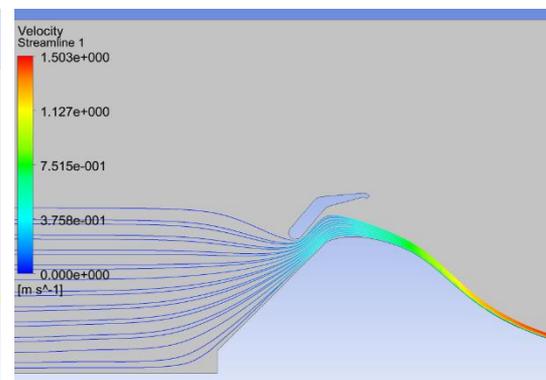
(e)



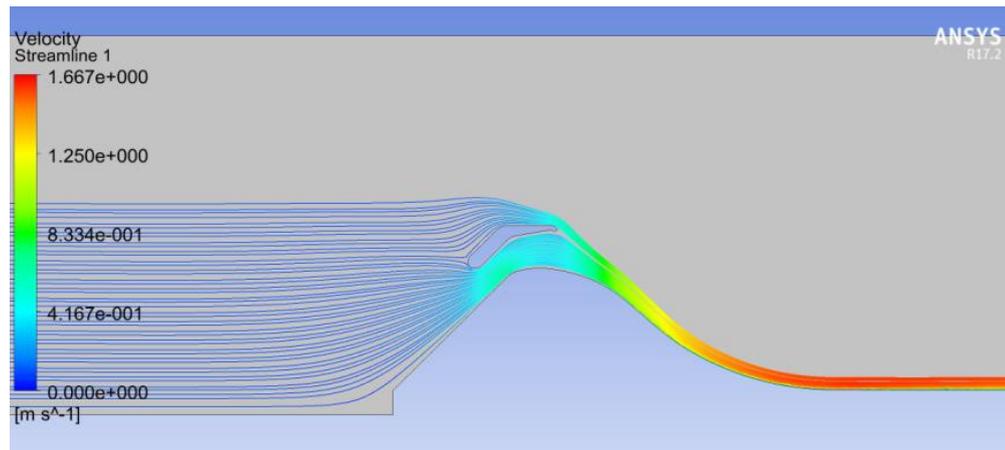
(f)



(g)



(h)



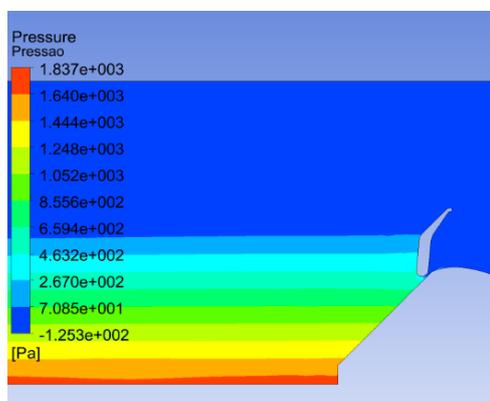
(i)

Figura 72 – Linhas de corrente de velocidade do escoamento em função do ângulo de abertura do mecanismo:

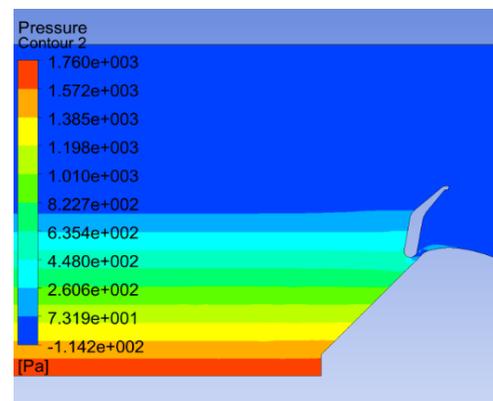
(a) – 5°; (b) – 10°; (c) – 15°; (d) – 20°; (e) – 25°; (f) – 30°; (g) – 35°; (h) – 40° e (i) – 45°.

É possível notar, na Figura 72 (a) à Figura 72 (i), por meio das linhas de corrente, que a montante da estrutura hidráulica em estudo (vertedouro e mecanismo), a velocidade permanece constante e inerte, condizente com a representação de um reservatório em condição estática. Conforme ocorre a abertura do mecanismo, permite-se o fluxo entre a sua superfície inferior de contato e o vertedouro, e conseqüentemente a velocidade se eleva nessa região de estrangulamento. Visto que a vazão permanece constante em todo o modelo computacional para cada posição de abertura e se trata de um produto da velocidade e a área de seção do escoamento, a velocidade nessa região de estrangulamento diminui conforme se aumenta o ângulo de abertura do mecanismo, e pode-se observar por meio da Figura 72 (a) à Figura 72 (i).

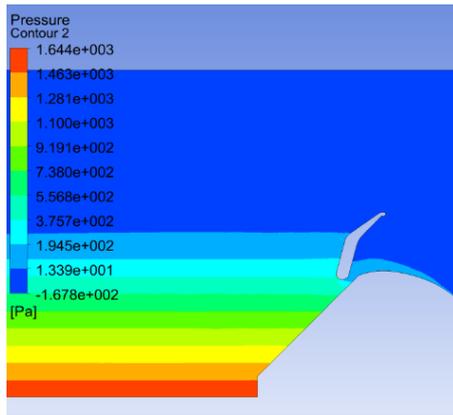
No tocante a variação da pressão estática, tem-se sua representação em função do ângulo de abertura do mecanismo desde a Figura 73 (a) até a Figura 73 (i).



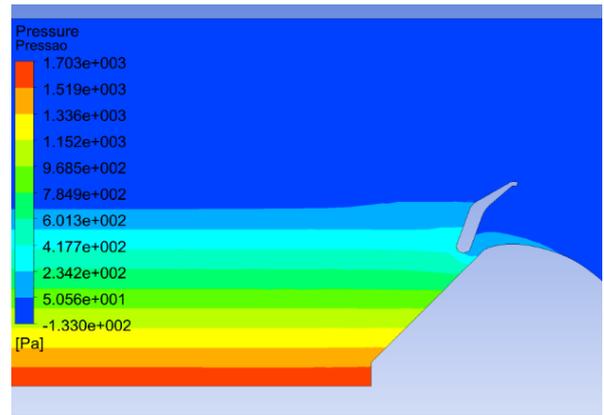
(a)



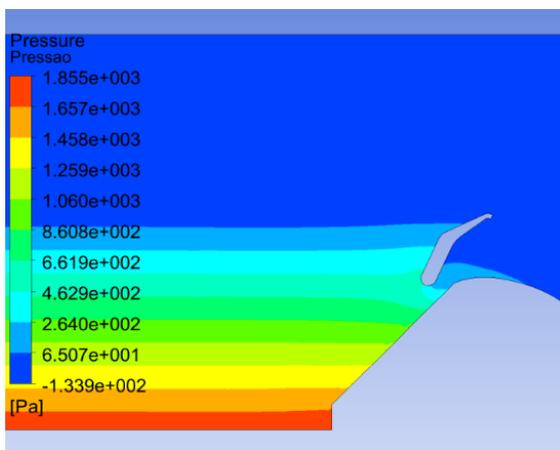
(b)



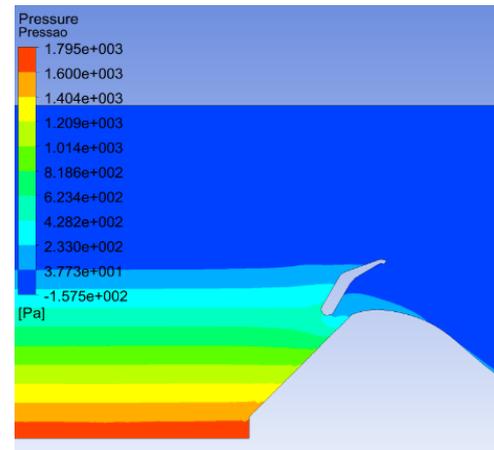
(c)



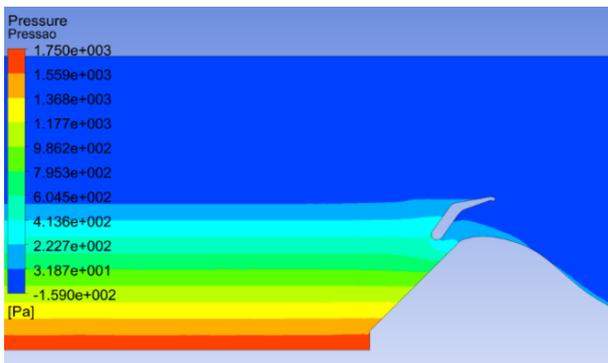
(d)



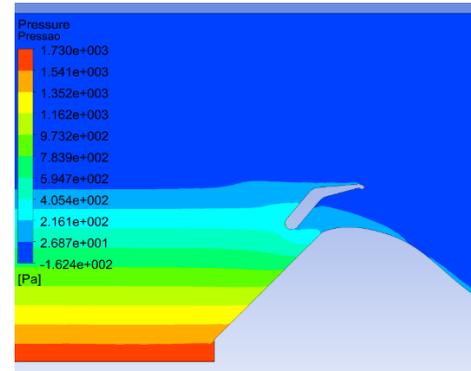
(e)



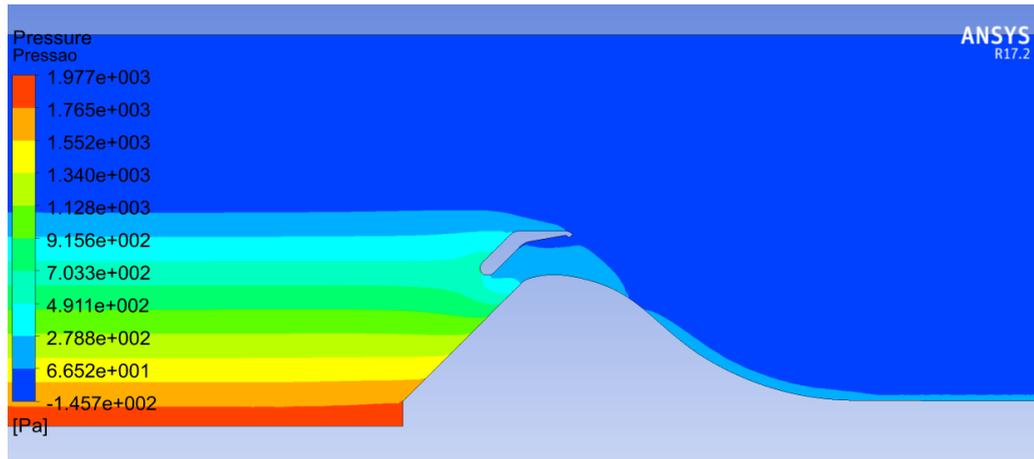
(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 73 – Variação do contorno de pressão estática em função do ângulo de abertura do mecanismo: (a) – 5°; (b) – 10°; (c) – 15°; (d) – 20°; (e) – 25°; (f) – 30°; (g) – 35°; (h) – 40° e (i) – 45°.

A resultante das pressões sobre o mecanismo é de grande importância para o cálculo dos esforços atuantes, de modo a ser uma das determinantes para o dimensionamento dos componentes mecânicos de transmissão de movimento, e para a operação do mecanismo.

Demonstra-se no resultado gráfico que, à montante da estrutura hidráulica (vertedouro e mecanismo), as pressões se comportam como hidrostáticas, sendo condizentes com a representação estática de um reservatório, apresentando maior ordem de grandeza conforme se distanciam da linha da superfície da água. No mais, a diferença de valores de pressões encontradas na região entre a face inferior do jato e o perfil vertente não é expressiva, de forma a não exigir análises estruturais específicas ou criação de alternativas que contornem este entrave. Trata-se de uma informação extremamente pertinente, visto que a prática tem mostrado que este tipo de soleira (soleiras livres), por apresentar mudanças de curvatura, pode induzir a criação de zonas de baixas pressões que facilitam a ocorrência dos fenômenos de cavitação e o surgimento de condições favoráveis para erosões nas estruturas.

É importante destacar que o uso do paramento de montante inclinado, muitas vezes utilizado por questões construtivas ou de estabilidade, pode afetar os coeficientes de descarga em função da alteração do comportamento das pressões no contato entre a face inferior do jato e o perfil vertente. Dessa forma, a ocorrência de pressões negativas pode ser prejudicial à estrutura de concreto, uma vez que valores instantâneos muito baixos podem aproximar-se da pressão de vapor da água e ocasionar a formação de bolhas de vapor que tenderão a desaparecer nas regiões de alta pressão, podendo. Como este efeito pode ocorrer próximo ao contato com o concreto, as elevadas tensões de tração geradas podem ocasionar o chamado efeito de erosão por cavitação. Portanto, a identificação de uma diferença de valores de

pressões inexpressiva na região entre a face inferior do jato e o perfil vertente é imprescindível para que se evite manutenções preventivas frequentes.

### 4.2.3 Ensaios laboratoriais

Os ensaios laboratoriais utilizando a bancada tiveram como objetivo o estudo e a compreensão do comportamento fluido-estrutura, bem como uma análise do funcionamento do perfil hidrodinâmico do mecanismo. Foi possível ainda, observar o comportamento hidráulico-hidrológico do vertedouro, analisando sua carga a montante, e dissipação de sua energia, a jusante.

Foram realizados três tipos de ensaios, sendo estes, para:

- Determinação do ângulo máximo de abertura do mecanismo, de forma que o mesmo ainda atue automaticamente, e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura;
- Determinação do nível a montante no instante da abertura do mecanismo; e
- Análise do comportamento do nível a montante em função do ângulo de abertura do mecanismo e da vazão de vertimento.

Os roteiros para os referidos ensaios estão dispostos, respectivamente, no Apêndice A, Apêndice B e Apêndice C.

Durante a realização dos ensaios, verificou-se também o aspecto visual do escoamento e da estabilidade do mecanismo, bem como do seu comportamento, procurando identificar possíveis falhas do mecanismo. Portanto, foram realizadas análises qualitativas do comportamento das estruturas hidrodinâmicas em estudo, tais como:

- a interação fluido-estrutura após abertura inicial do mecanismo;
- a reação da estrutura do mecanismo enquanto permite a passagem da vazão de vertimento, bem como após a passagem do fluxo; e o fechamento do mecanismo após o vertimento;
- a determinação se há dissipação da energia a jusante do vertedouro, dentre outras observações consideradas pertinentes;

#### 4.2.3.1 Ensaio para determinação do ângulo de abertura máximo do mecanismo e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura

A execução deste ensaio foi realizada de acordo com o roteiro disponível no Apêndice A. Os resultados encontrados para este procedimento se encontram dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados laboratoriais referentes ao ensaio para determinação do ângulo de abertura máximo do mecanismo e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura

Ângulo	Nível Piezômetro		Vazão		Nível Montante (no vertimento)	
	[mm]	[cm]	[L/s]	[m <sup>3</sup> /s]	[mm]	[cm]
5	3,5	0,35	0,190	0,00019	*	*
10	5,0	0,50	0,325	0,00033	72,5	7,25
20	8,0	0,80	0,658	0,00066	62,5	6,25
30	10,5	1,05	0,990	0,00099	54,0	5,40
40	11,5	1,15	1,135	0,00113	51,0	5,10
48	12,0	1,20	1,209	0,00121	42,0	4,20

- Não foi possível determinar com precisão

Os resultados laboratoriais dispostos na Tabela 14 foram transpostos para a escala real, isto é, aplicados para o reservatório do Cipó. O resultado deste procedimento pode ser observado na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados laboratoriais, referentes ao ensaio para determinação do ângulo de abertura máximo do mecanismo e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura, transpostos para a escala real

Ângulo	Vazão		Nível Montante (no vertimento)	
	[L/s]	[m <sup>3</sup> /s]	[cm]	[m]
5	761,56	0,76	*	*
10	1300,34	1,30	128,89	1,29
20	2631,71	2,63	111,11	1,11
30	3957,19	3,96	96,00	0,96
40	4535,75	4,54	90,67	0,91
48	4834,76	4,83	74,67	0,75

- Não foi possível determinar com precisão

Por meio da análise da Tabela 15 e da Tabela 16, nota-se, a priori, que a partir do ângulo de  $48^\circ$  o mecanismo não apresentou operação automática, sendo portanto, seu ângulo máximo de abertura. A representação deste ângulo de abertura está na Figura 74.

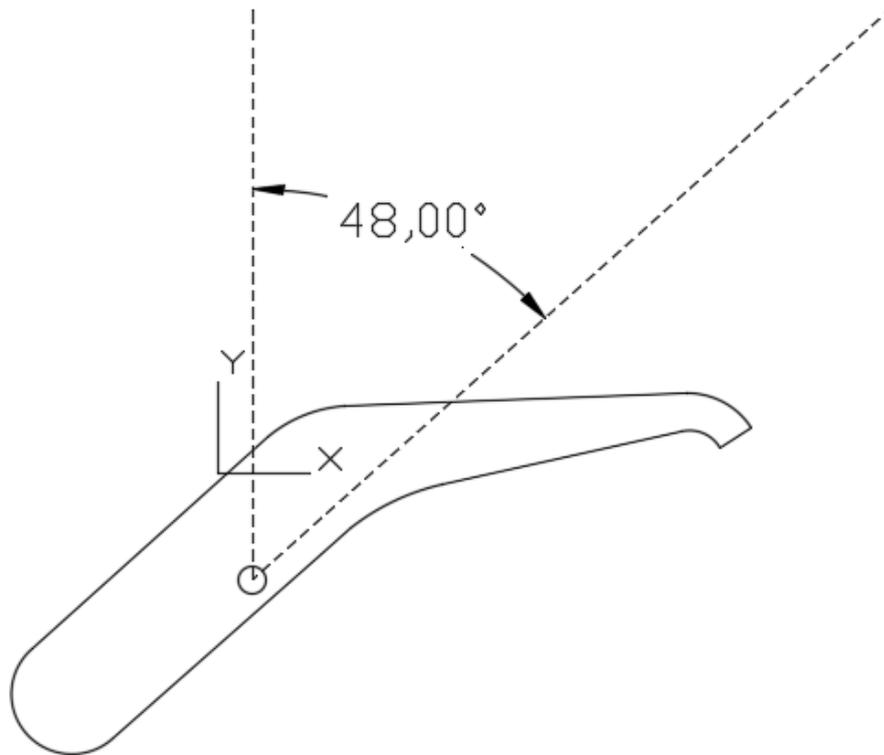


Figura 74 – Representação da abertura máxima do mecanismo

Salienta-se que, com a execução deste ensaio, foi possível observar o bom funcionamento do perfil hidrodinâmico do mecanismo. O mesmo apresentou operação de abertura e fechamento automática, até aproximadamente  $48^\circ$ , e boa estabilidade enquanto permitia a passagem da vazão de vertimento. No entanto, como observado na Tabela 15, o nível a montante do mecanismo ultrapassou o valor de alteração da cota de vertimento previsto, que era de 1 metro. Isto ocorre devido ao mecanismo realizar sua operação de abertura, e conseqüente, vertimento, só na cota de sua extremidade superior (81,19 [mm]), e não com o nível em 56,25 [mm] – correspondente a 1 [m] na escala de 1:17 – como previsto na simulação computacional. Atribui-se este comportamento ao fato de que a posição do eixo é o principal fator de influência na determinação do nível para abertura do mecanismo. Neste caso, uma simples variação de 2 [mm], verticalmente, na posição do centro do eixo, é suficiente para a ocorrência deste fato. Além do mais, a prototipação rápida (impressão 3D), técnica utilizada para fabricação do modelo reduzido, deixa material residual em orifícios de

pequenas proporções (como o utilizado para acoplamento do eixo), sendo necessário um processo de lixagem, e não permitindo precisão milimétrica.

Por meio da análise da Tabela 14 e da Tabela 15, é possível ainda estabelecer uma relação tanto entre ângulo de abertura e vazão de vertimento, quanto entre ângulo de abertura e nível a montante, permitindo assim o levantamento de uma curva de ângulo de abertura *versus* vazão de vertimento e nível a montante. Esta curva está representada tanto para as condições laboratoriais do modelo reduzido, na Figura 75, quanto para os dados transpostos para a escala real, na Figura 76.

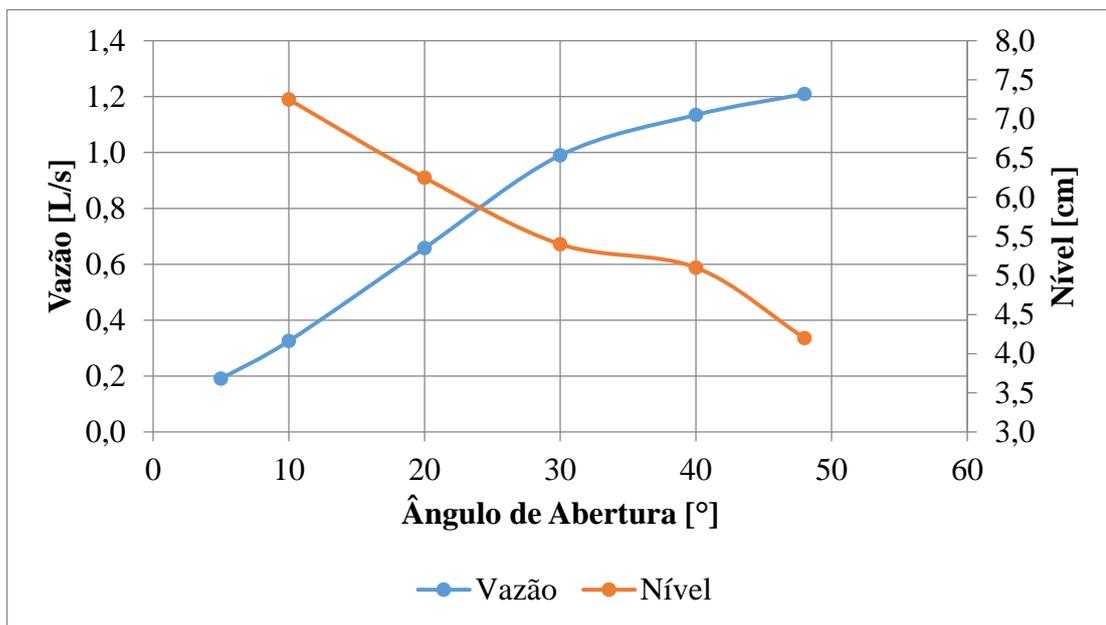


Figura 75 – Relação entre ângulo de abertura e vazão de vertimento para o modelo reduzido

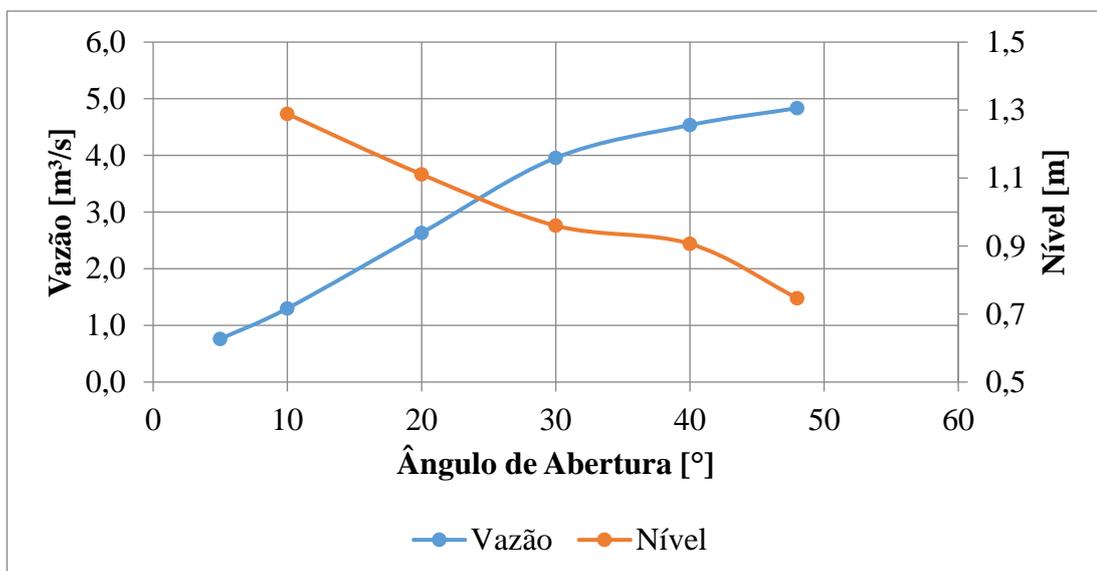


Figura 76 – Relação entre ângulo de abertura e vazão de vertimento para o modelo em escala real

#### 4.2.3.2 Ensaio para determinação do nível a montante no instante da abertura do mecanismo

A execução deste ensaio foi realizada de acordo com o roteiro disponível no Apêndice B. Os resultados encontrados para este procedimento se encontram descritos a seguir.

Tabela 16 – Resultados laboratoriais referentes ao ensaio para determinação do nível a montante no instante da abertura do mecanismo

Ensaio	Nível de Abertura		Nível de Fechamento*		Variação de Nível	
	[mm]	[cm]	[mm]	[cm]	[mm]	[cm]
Vazão de ensaio:	68	6,8	35	3,5	33	3,3
0,325 [L/s]	68	6,8	37	3,7	31	3,1
0,003 [m <sup>3</sup> /s]	69	6,9	38	3,8	31	3,1
Média	<b>68</b>	<b>6,8</b>	<b>37</b>	<b>3,7</b>	<b>32</b>	<b>3,2</b>
Vazão de ensaio:	72	7,2	45	4,5	27	2,7
1,69 [L/s]	73	7,3	44	4,4	29	2,9
0,0017 [m <sup>3</sup> /s]	71	7,1	46	4,6	25	2,5
Média	<b>72</b>	<b>7,2</b>	<b>45</b>	<b>4,5</b>	<b>27</b>	<b>2,7</b>

\* Com batente permitindo angulação máxima de 48°

Os resultados laboratoriais dispostos na Tabela 16 foram transpostos para a escala real, isto é, aplicados para o reservatório do Cipó. O resultado pode ser observado na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados laboratoriais, referentes ao ensaio para determinação do nível a montante no instante da abertura do mecanismo, transpostos para a escala real

Ensaio	Nível de Abertura		Nível de Fechamento*		Variação de Nível	
	[cm]	[m]	[cm]	[m]	[cm]	[m]
Vazão de ensaio:	120,89	1,21	62,22	0,62	58,67	0,59
1299,27 [L/s]	120,89	1,21	65,78	0,66	55,11	0,55
1,30 [m <sup>3</sup> /s]	122,67	1,23	67,56	0,68	55,11	0,55
Média	<b>121,48</b>	<b>1,21</b>	<b>65,19</b>	<b>0,65</b>	<b>56,30</b>	<b>0,56</b>
Vazão de ensaio:	128,00	1,28	80,00	0,80	48,00	0,48
6756,78 [L/s]	129,78	1,30	78,22	0,78	51,56	0,52
6,76 [m <sup>3</sup> /s]	126,22	1,26	81,78	0,82	44,44	0,44
Média	<b>128,00</b>	<b>1,28</b>	<b>80,00</b>	<b>0,80</b>	<b>48,00</b>	<b>0,48</b>

\* Com batente permitindo angulação máxima de 48°

Para melhor percepção, representou graficamente a variação de nível devido à operação de vertimento (processo de abertura e fechamento do mecanismo) para o modelo reduzido e para a escala real. É possível notar também nesta representação gráfica o nível a montante no instante, tanto de abertura quanto de fechamento do mecanismo. A representação desta variação de nível para o modelo reduzido e para os dados transpostos em escala real está disposta na Figura 77 e na Figura 78, respectivamente.

Confirma-se também neste ensaio, que o nível a montante do mecanismo ultrapassou o valor de alteração da cota de vertimento previsto, que era de 1 metro. Como já explicitado para o ensaio para determinação do ângulo de abertura máximo do mecanismo e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura, isto ocorreu devido o mecanismo realizar sua operação de abertura, e consequente, vertimento, só na cota de sua extremidade superior (81,19 [mm]), e não com o nível em 56,25 [mm] – correspondente a 1 [m] na escala de 1:17 – como previsto na simulação computacional. Atribuiu-se este comportamento ao fato de que a posição do eixo se trata do principal fator de influência na determinação do nível para abertura do mecanismo. Neste caso, uma simples variação de 2 [mm], verticalmente, na posição do centro do eixo, é suficiente para a ocorrência deste fato. Além do mais, a prototipação rápida (impressão 3D), técnica utilizada para fabricação do modelo reduzido, deixa material residual em orifícios de pequenas proporções (como o utilizado para acoplamento do eixo), sendo necessário o processo de lixagem, não permitindo precisão milimétrica, neste caso.

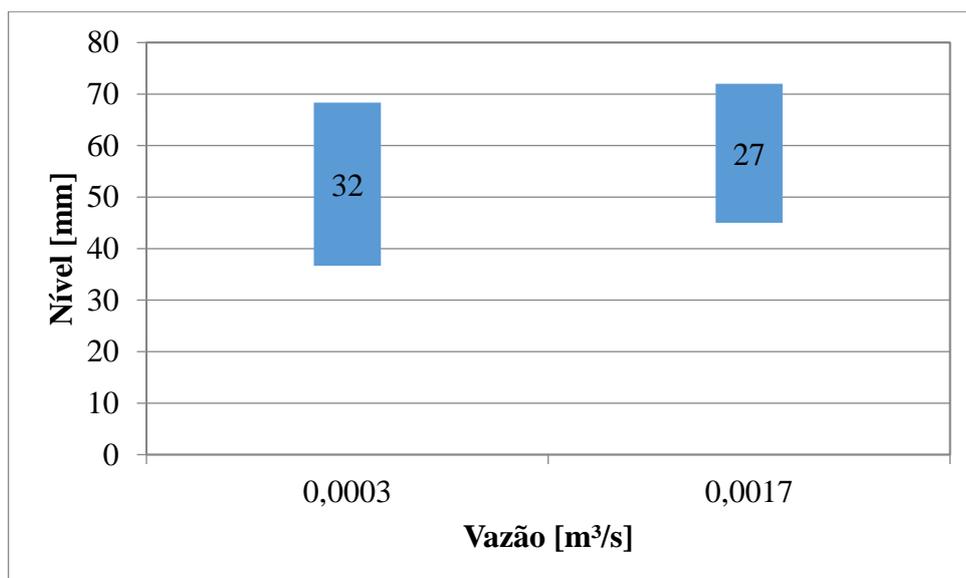


Figura 77 – Variação de nível devido à operação de vertimento do mecanismo, no modelo reduzido

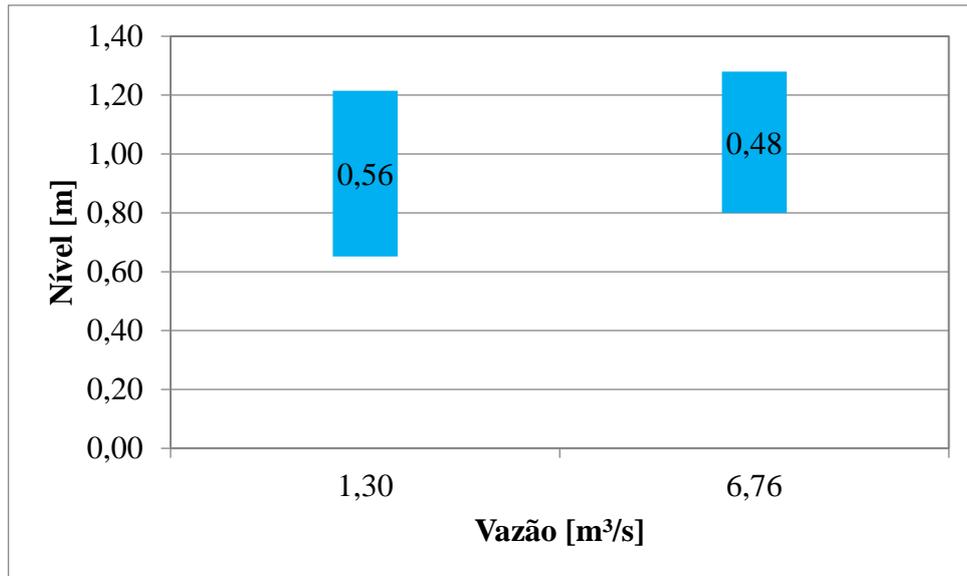
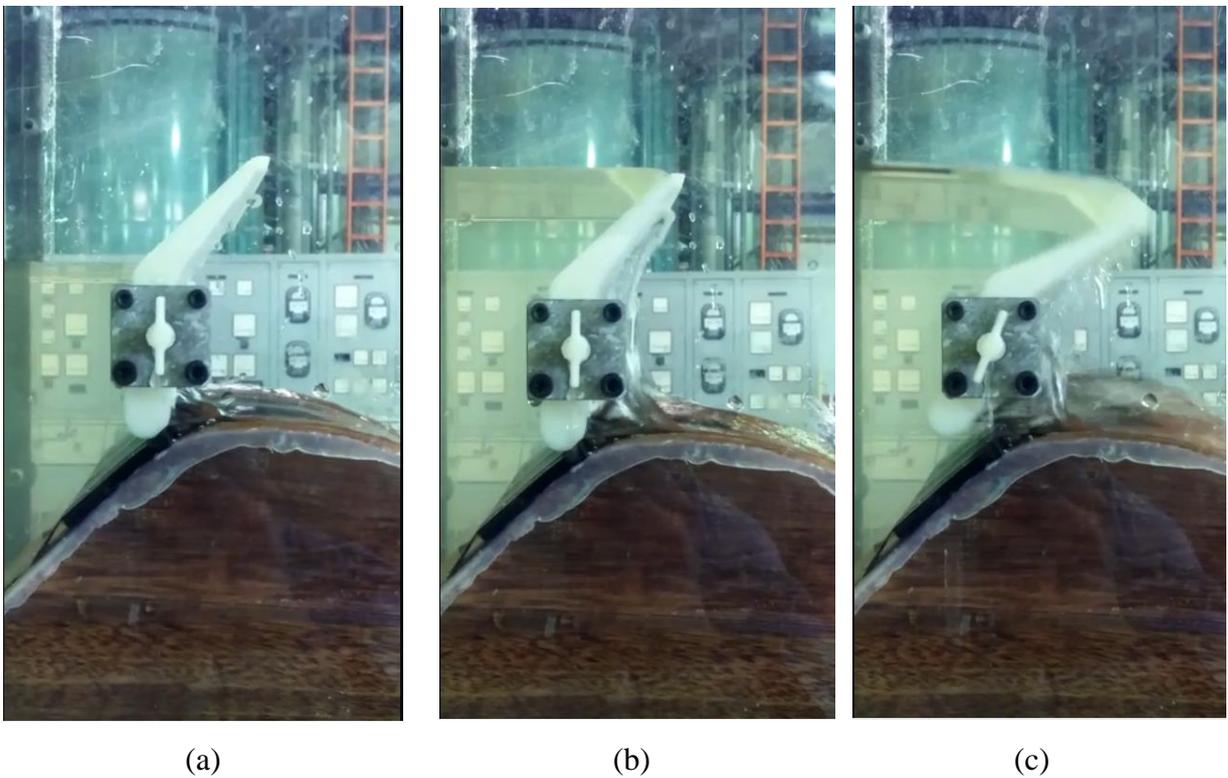


Figura 78 – Variação de nível devido à operação de vertimento do mecanismo, transposto para a escala real

Nota-se por meio da análise da Figura 77 e da Figura 78, que há uma perda considerável de volume durante a operação de vertimento do mecanismo, com valores de aproximadamente 40%.

O funcionamento bem como a operação de vertimento, com os processos de abertura e fechamento automática do mecanismo estão representados na Figura 79.



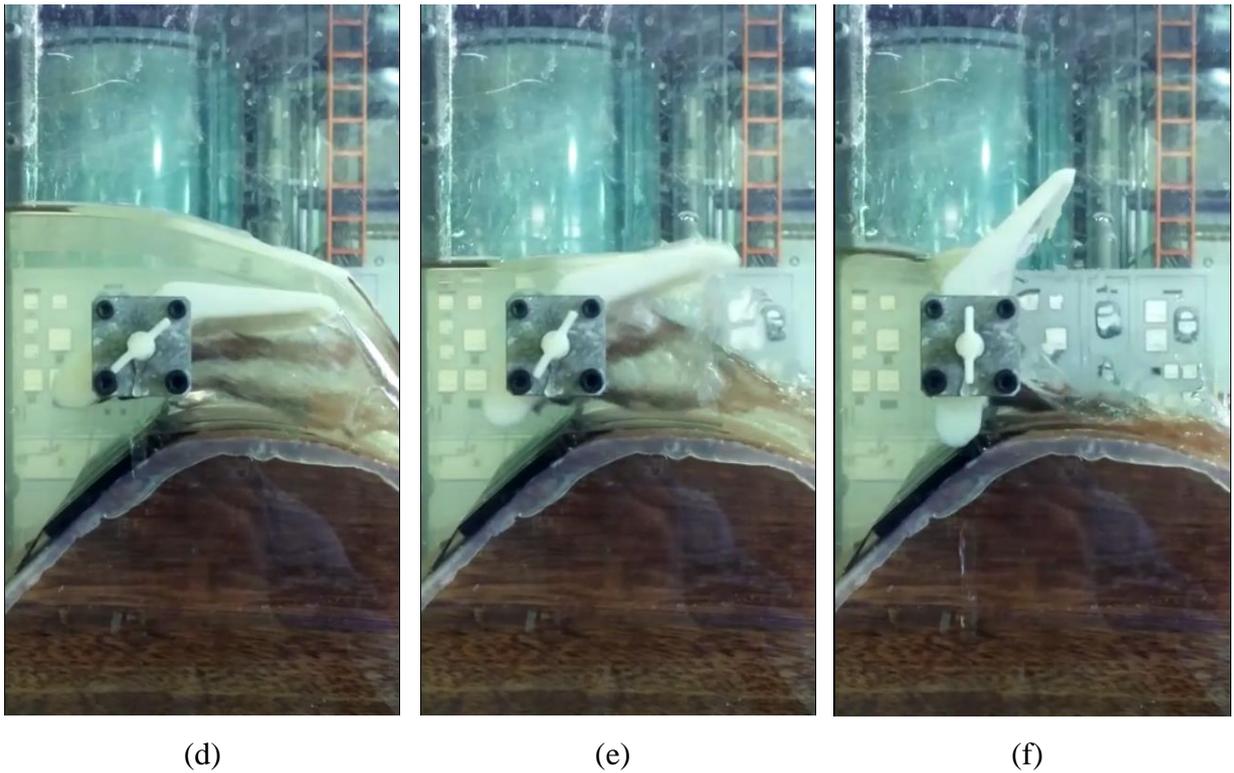


Figura 79 – Representação do funcionamento e operação de vertimento do mecanismo

#### 4.2.3.3 Ensaio para análise do comportamento do nível a montante em função do ângulo de abertura e da vazão de vertimento

A execução deste ensaio foi realizada de acordo com o roteiro disponível no Apêndice C. Os resultados se encontram dispostos desde a Figura 80 até a Figura 83.

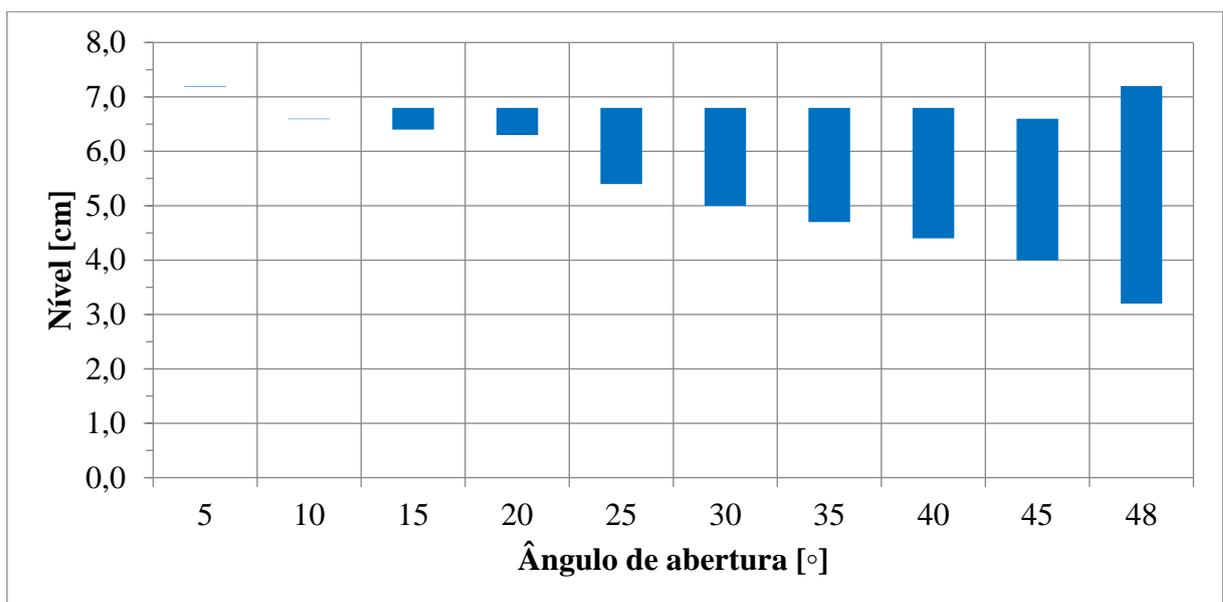


Figura 80 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura do modelo reduzido com vazão de vertimento de 0,33 [L/s]

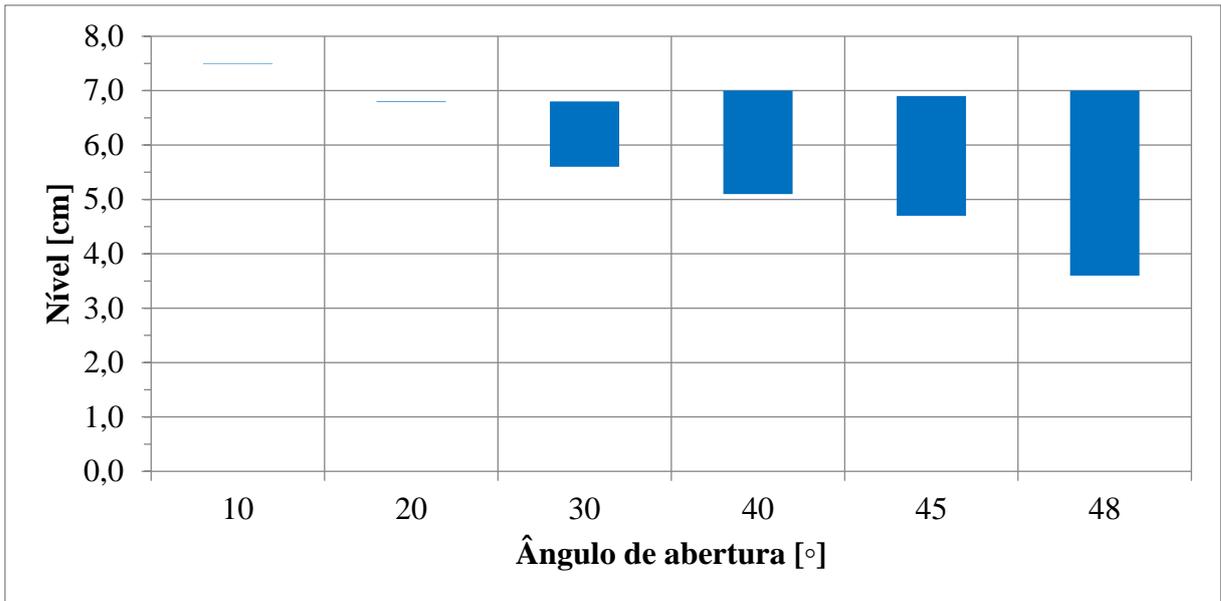


Figura 81 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura do modelo reduzido com vazão de vertimento de 0,92 [L/s]

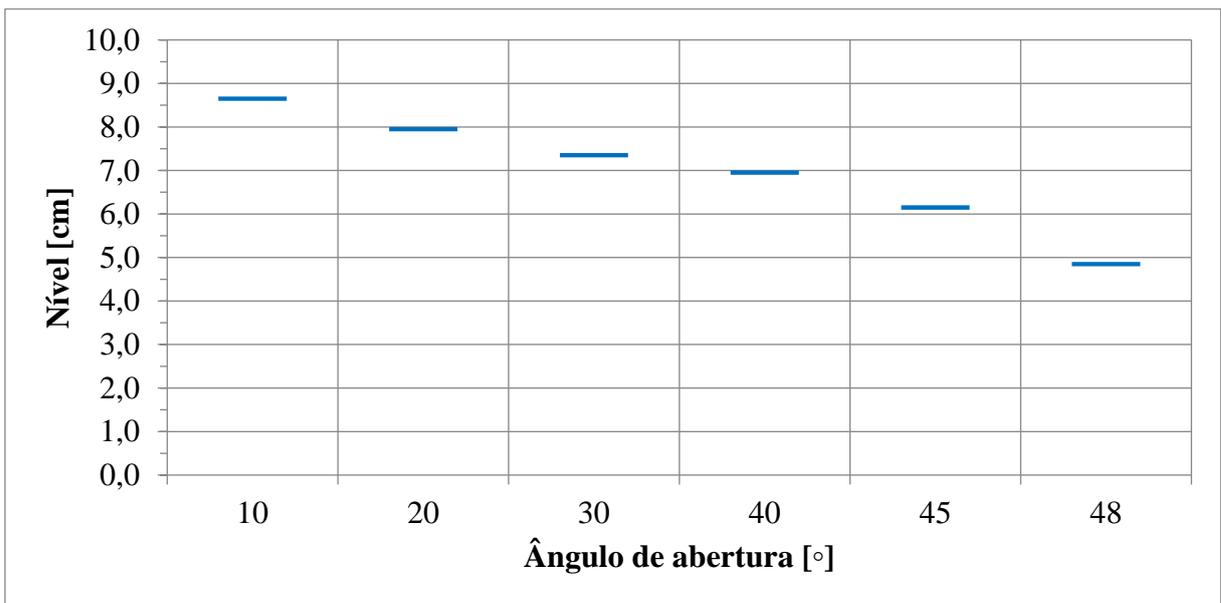


Figura 82 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura do modelo reduzido com vazão de vertimento de 1,69 [L/s]

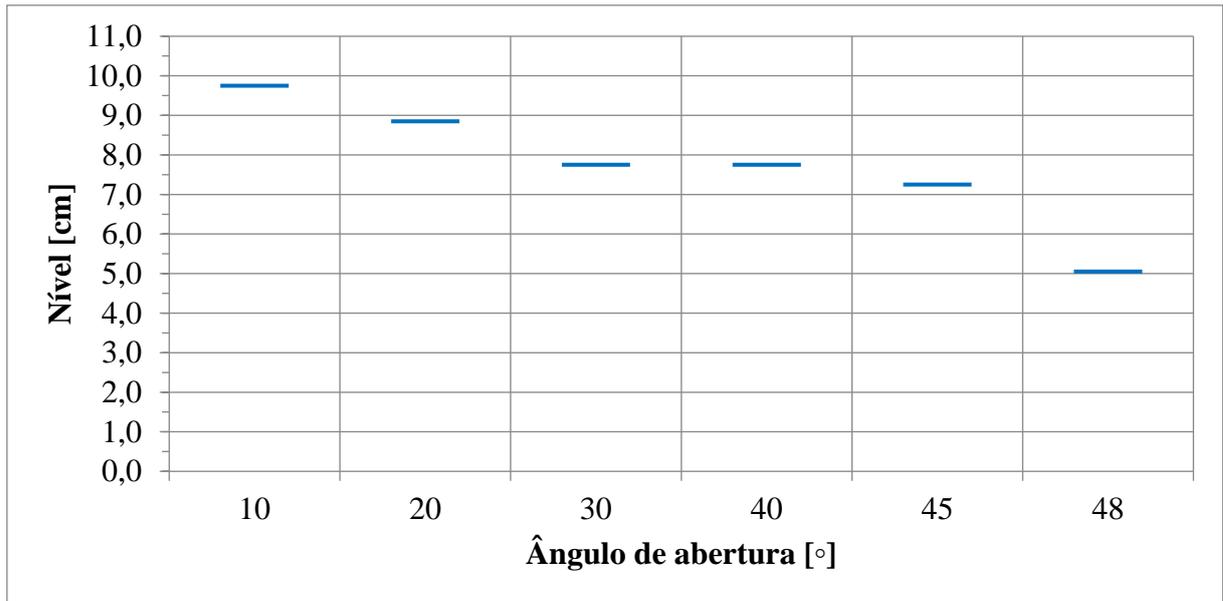


Figura 83 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura do modelo reduzido com vazão de vertimento de 2,60 [L/s]

Os resultados laboratoriais dispostos desde a Figura 80 até a Figura 83 foram transpostos para a escala real, isto é, aplicados para o reservatório do Cipó. O resultado deste procedimento pode ser observado desde a Figura 84 até a Figura 87.

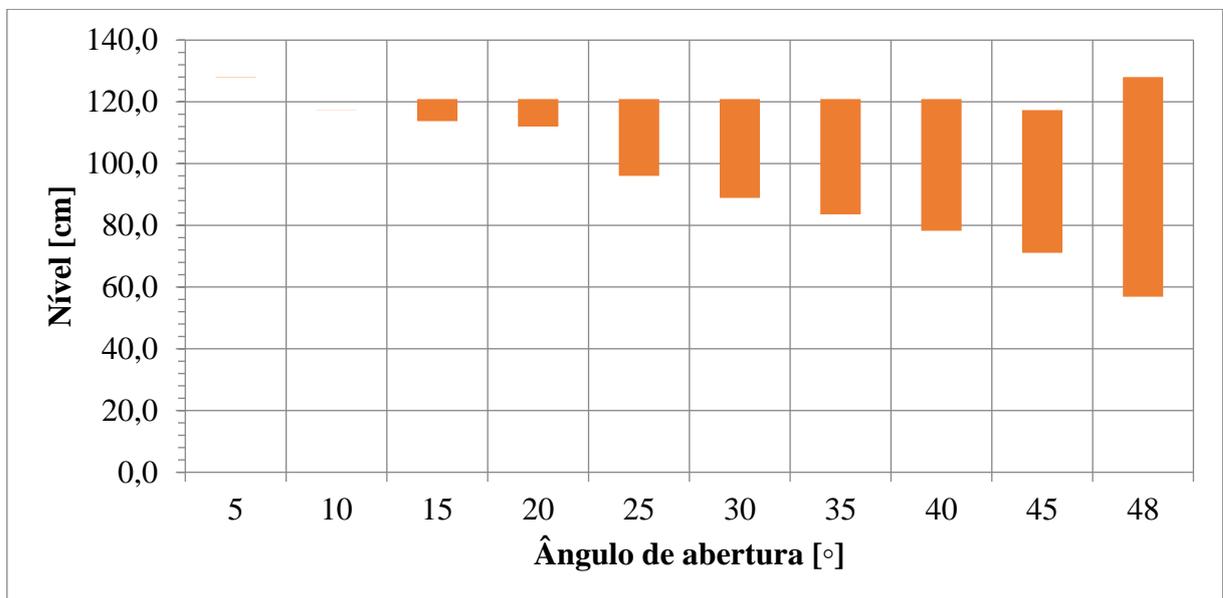


Figura 84 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura para vazão de vertimento de 1,30 [m³/s] utilizando os dados transpostos em escala real

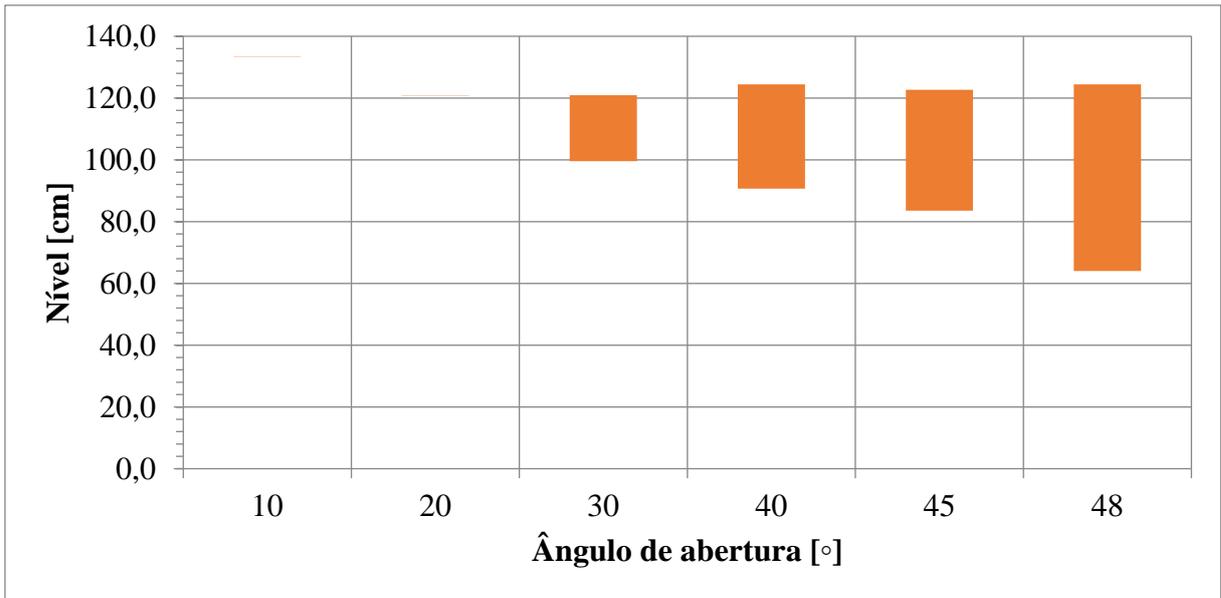


Figura 85 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura para vazão de vertimento de 3,68 [m³/s] utilizando os dados transpostos em escala real

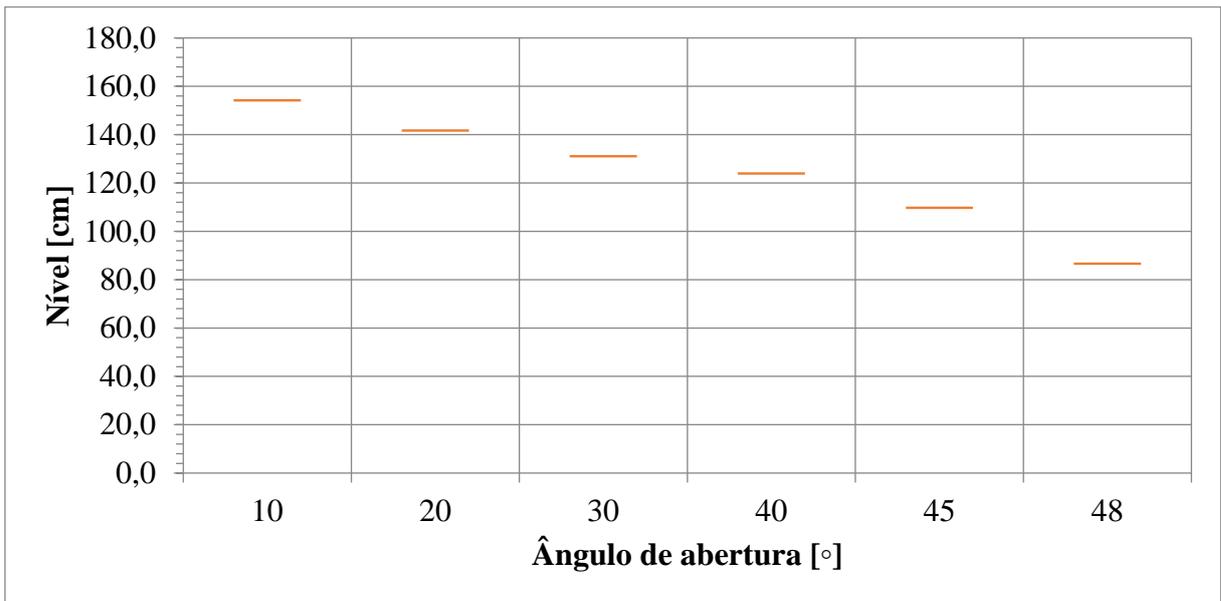


Figura 86 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura para vazão de vertimento de 6,76 [m³/s] utilizando os dados transpostos em escala real

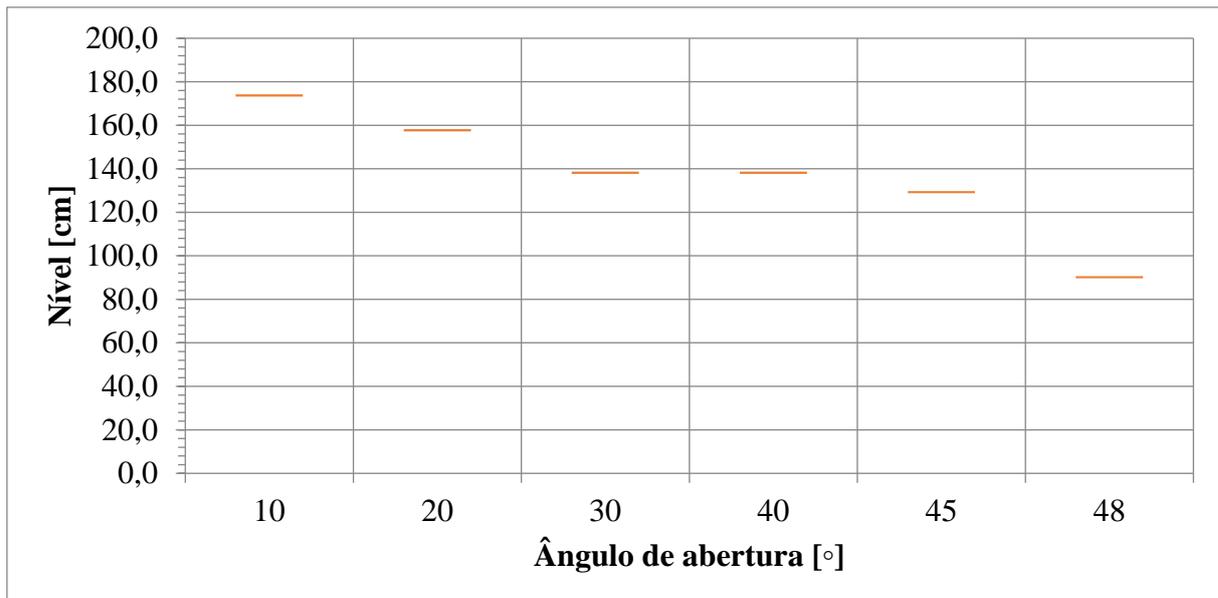


Figura 87 – Relação entre nível a montante e ângulo de abertura para vazão de vertimento de 10,40 [m³/s] utilizando os dados transpostos em escala real

Por meio da análise tanto da Figura 80 até a Figura 83, para os resultados do ensaio laboratorial, quanto da Figura 84 até a Figura 87, para os resultados transpostos para a escala real, nota-se que quanto maior o ângulo de abertura permitido, maior a perda de volume na operação de vertimento. Salienta-se que para as vazões de vertimento de 0,33 [L/s] e 0,92 [L/s], correspondentes em escala real respectivamente à 1,30 [m³/s] e 3,68 [m³/s], o mecanismo ainda realiza sua operação de vertimento, com o processo de abertura e fechamento; enquanto que para as vazões de vertimento de 1,69 [L/s] a 2,60 [L/s], correspondentes em escala real respectivamente à 6,76 [m³/s] e 10,40 [m³/s], não é possível analisar a perda de volume durante a operação de vertimento, e sim analisar apenas o nível mantido durante o vertimento. Outro ponto a ser enfatizado é que estas perdas de volume são valores obtidos apenas em condições laboratoriais. Caso este modelo seja ensaiado em campo, o nível do reservatório não se deplecionará da mesma maneira que representado em laboratório, isto é, por um canal, e com volume “limitado”, necessitando de uma bomba hidráulica para tentar “compensar” o volume utilizado na operação de vertimento. Ademais, não é possível controlar a vazão da bomba de modo a manter o nível constante enquanto há a operação de vertimento, sem que o mesmo não perca volume.

Em conformidade com isso, têm-se, para as vazões de vertimento de 1,69 [L/s] a 2,60 [L/s], correspondentes em escala real respectivamente à 6,76 [m³/s] e 10,40 [m³/s], que o nível a montante durante a operação de vertimento diminui em função do aumento do ângulo de

abertura, inferindo-se, portanto, o comportamento da lâmina vertente bem como o remanso para pequenas aberturas.

Realizou-se também o ensaio do vertedouro, sem o mecanismo acoplado, para a vazão de vertimento de 3,20 [L/s], o correspondente a 12,79 [m<sup>3</sup>/s] em escala real, de modo a determinar o nível a montante, durante o vertimento. Deste processo, resultou-se em um nível de 1,7 [mm]. Para o mesmo valor de vazão, porém com o mecanismo acoplado, e em sua posição de abertura máxima (48°), infere-se um nível a montante de 6 [mm]. Com isso, depreende-se uma elevação de 4,3 [mm] no nível a montante (correspondente a 0,70 [cm] em escala real).

Outra análise realizada por meio deste ensaio se trata da estabilidade do mecanismo durante a operação de vertimento. Praticamente, não apresentou vibrações em função da carga exercida pelo escoamento, nem regiões com formação de bolhas no escoamento (Figura 88).



Figura 88 – Ensaio para análise do comportamento do nível a montante em função do ângulo de abertura para a vazão de vertimento de 1,69 [L/s].

Fonte: elaborada pelo autor. Data: 16/05/2017.

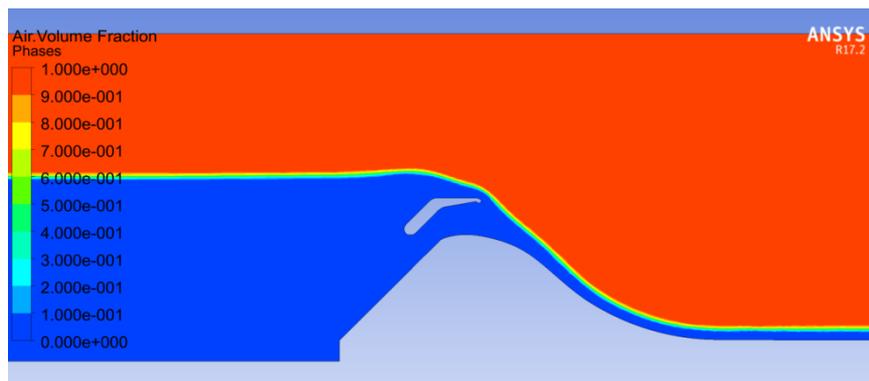
#### 4.2.4 Avaliação entre os aspectos laboratorial e computacional

Visto que se procurou o estudo e a compreensão do comportamento fluido-estrutura, bem como análises sobre o funcionamento do perfil hidrodinâmico do mecanismo, tanto por meio de simulação de dinâmica dos fluidos computacional quanto pela técnica da utilização de modelos reduzidos em experimentação laboratorial, tem-se que ambos os métodos empregados nas análises descritas se mostram eficientes em relação à proposta, podendo ser replicadas e/ou utilizadas em futuros trabalhos.

Buscando uma relação entre os métodos empregados, comparou-se uma representação da distinção de fases (ar e água) gerada pela simulação de dinâmica dos fluidos computacional e um registro fotográfico realizado durante os ensaios laboratoriais. Esta comparação pode ser observada na Figura 89.



(a)



(b)

Figura 89 – Comparação do comportamento do fluido entre o modelo experimental (a) e modelo computacional representado em fases (b).

Por meio dos dois métodos, pode-se concluir que o perfil do modelo do mecanismo atende as exigências propostas, pois demonstraram coerência em seus resultados, tanto ao comportamento da interação fluido-estrutura quanto no seu funcionamento.

A partir da simulação de fluidos computacional também foi possível estipular uma curva para a determinação da vazão de vertimento em função do ângulo de abertura do mecanismo, até que o ponto de equilíbrio do mesmo, isto é, até que sua posição esteja estabilizada após o total afogamento – ou abertura máxima. Esta estipulação foi comparada com os resultados obtidos laboratorialmente, e representada graficamente na Figura 90.

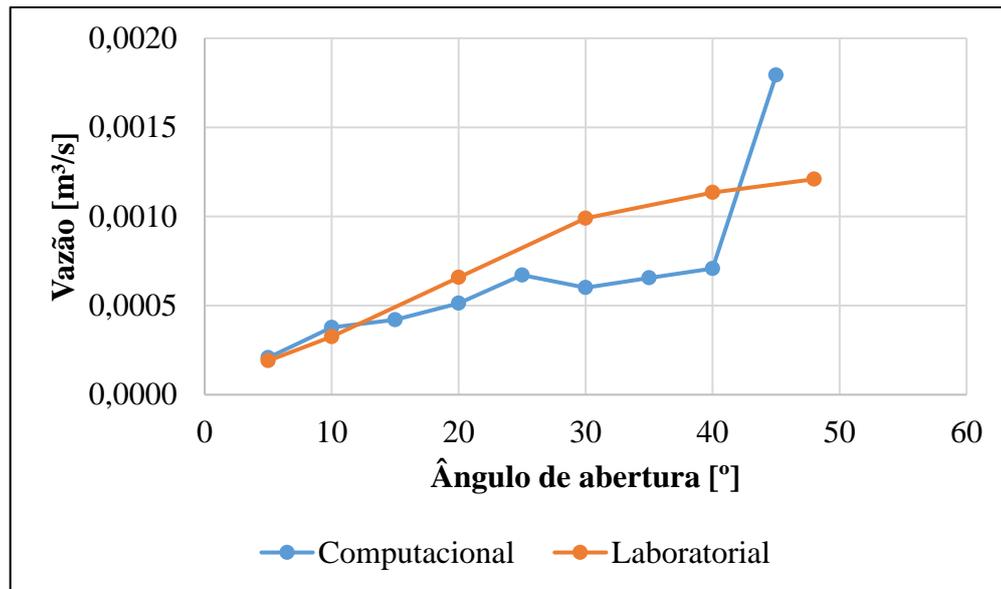


Figura 90 – Curva de ângulo de abertura *versus* vazão para os métodos computacional e laboratorial

Por meio da análise da Figura 90, é possível notar que há coerência entre os resultados. O processo laboratorial acabou superestimando um pouco os valores em função do modelo reduzido do mecanismo somente realizar sua operação de abertura, e consequente, vertimento, na cota da extremidade superior (81,19 [mm]), e não com o nível em 56,25 [mm] – correspondente a 1 [m] na escala de 1:17 – como previsto na simulação computacional. Este comportamento está relacionado a posição do eixo se trata do principal fator de influência na determinação do nível para abertura do mecanismo. Neste caso, uma simples variação de 2 [mm], verticalmente, na posição do centro do eixo, foi suficiente para a ocorrência deste fato. Além do mais, a prototipação rápida (impressão 3D), técnica utilizada para fabricação do modelo reduzido, deixa material residual em orifícios de pequenas proporções (como o utilizado para acoplamento do eixo), sendo necessário o processo de lixagem, não permitindo precisão milimétrica, neste caso.

Outro aspecto que pode ser avaliado da Figura 90, é que por meio da simulação de fluidos computacional, esperava-se uma mudança um pouco mais abrupta na vazão, com a abertura total, no entanto, a partir da experimentação laboratorial se observou um comportamento mais suave próximo a abertura máxima total.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do planejamento hidroenergético do reservatório, observou-se que:

O reservatório da barragem do Cipó apresenta uma vazão média mensal ( $\bar{Q}$ ) de aproximadamente 2,02 [m<sup>3</sup>/s], e os meses considerados como período de estiagem são de maio a outubro. Para manutenção dessa vazão média neste período de estiagem, estimou-se um volume necessário de aproximadamente 28 milhões de metros cúbicos. Portanto, a capacidade mínima atual do reservatório, de aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos, é suficiente para atender tal demanda. A operação nestas condições seria dada por uma vazão regularizada de 1,52 [m<sup>3</sup>/s] somada ao fluxo residual de 0,50 [m<sup>3</sup>/s] durante os meses de estiagem (maio a outubro), e manutenção apenas do fluxo residual de 0,50 [m<sup>3</sup>/s] no restante do período (novembro a abril).

No entanto, de acordo com os dados disponibilizados pela concessionária, e perante aos dados apresentados no licenciamento ambiental para construção do barramento (SUPRAM, 2012), a operação exercida atualmente dispõem de valores na ordem de 2,27 [m<sup>3</sup>/s] durante os meses de seca, e de 0,50 [m<sup>3</sup>/s] no restante do período. Ou seja, estabeleceu-se uma vazão de regularização de 1,635 [m<sup>3</sup>/s] e um fluxo residual permanente de 0,50 [m<sup>3</sup>/s]. Para essas condições, o volume útil mínimo estimado é de 30 a 32 milhões de metros cúbicos, sendo o nível de garantia de 95%.

Com a alteração da cota de vertimento em 1 [m], isto é, atingindo aproximadamente o valor de 1263,50 [m], mantendo-se o nível de garantia de 95%, têm-se uma vazão regularizada de 2,47 [m<sup>3</sup>/s] e um volume útil necessário de 35 milhões de metros cúbicos. Portanto, com esta alteração, deve-se ter um incremento de aproximadamente 0,21 [m<sup>3</sup>/s] na vazão regularizada e de 5 milhões de metros cúbicos na capacidade de armazenamento. Isso permite um ganho energético de aproximadamente 3341 [MWh/ano] em toda a cascata de reservatórios que no qual a barragem do Cipó se insere.

Por meio do estudo preliminar de viabilidade econômica, foi possível perceber que:

Para ambos métodos empregados na análise, Valor Presente Líquido (VPL) e Custo Nivelado de Energia (LCOE), obtiveram curto tempo de retorno para grandes investimentos. Além do mais, houve coerência entre os métodos em relação aos valores estimados. Em síntese, para retorno em curto prazo (até um ano), há possibilidade de investimentos na ordem de R\$ 1.000.000,00; para retorno em médio prazo (até cinco anos), pode-se realizar investimento na ordem de R\$ 2.000.000,00 a R\$ 4.000.000,00, e para longo prazo (acima de cinco anos), na ordem de R\$ 5.000.000,00 a R\$ 9.000.000,00.

Em relação ao desenvolvimento do mecanismo, observou-se que:

Ambos métodos empregados, simulação de dinâmica dos fluidos computacional e utilização de modelos reduzidos em experimentação laboratorial, mostraram eficientes em relação às propostas, podendo ser replicadas e/ou utilizadas em futuros trabalhos. Em todas as análises foi possível perceber uma coerência entre os resultados e o bom funcionamento do perfil hidrodinâmico do mecanismo. O mesmo apresentou operação de abertura e fechamento automática, até aproximadamente 48°, e boa estabilidade enquanto permitia a passagem da vazão de vertimento. Notou-se também que há uma perda considerável de volume durante a operação de vertimento do mecanismo, com valores de aproximadamente 40%. No entanto, salienta-se que são valores obtidos apenas em condições laboratoriais. Caso este modelo seja ensaiado em campo, o nível do reservatório não se deplecionará da mesma maneira que representado em laboratório.

Em relação a outras aplicações que este tipo de mecanismo pode dispor, avalia-se que: em barramento de cursos d'água em trechos de baixas declividades, o mesmo pode ser utilizado de forma a permitir o uso da água para fins de geração de energia elétrica; permitindo o afogamento de máquinas hidráulicas, e. g., de baixíssima ou ultra-baixa-queda; em regularização do nível do água, o mesmo pode ser aplicado para fins de navegação, mantendo o nível do reservatório contido na calha natural do rio, mesmo sob vazões extremas; e dentre outras aplicações que possam vir a ser desenvolvidas juntamente com novas tecnologias ou que possam ser originadas a partir de um novo ponto de vista desse produto.

## 5.1 Trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros:

- A fabricação de um modelo, em maior escala, com processo semelhante à de um projeto para aplicação em campo, bem como a realização de ensaios laboratoriais, buscando comparações com os resultados obtidos para o modelo reduzido deste trabalho;
- Análises estruturais específicas para o mecanismo desenvolvido, procurando alternativas de arranjos e processo de montagem e construção para este modelo em maior escala bem como para um protótipo a ser projetado em escala real;
- Análises sobre o comportamento hidráulico durante a operação do mecanismo principalmente em maior escala, visando obter um bom projeto básico que poderá ser implantado em campo.

---

# **APÊNDICE A – Ensaio para determinação do ângulo de abertura máximo do mecanismo e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura**

## **1. Objetivos**

Determinação do ângulo máximo de abertura do mecanismo, de forma que o mesmo ainda atue automaticamente, isto é, se feche, e mantenha o incremento de capacidade de armazenamento.

## **2. Procedimentos**

- Colocar um batente, para auxílio de fechamento, na posição correspondente à primeira linha da Tabela 1 (5°);
- Ligar a bomba, e operá-la na vazão mínima;
- Permitir o enchimento do canal a montante do vertedouro, e permitir que o mecanismo inicie sua operação automática de vertimento;
- Controlar a vazão da bomba, aumentando-a gradualmente, até que o mecanismo cesse sua operação automática de vertimento, e se mantenha na posição do batente;
- Realizar a leitura do piezômetro, do canal do LHPCH, e conseqüentemente, calcular a vazão (Q) correspondente à esta leitura;
- Realizar a leitura do nível a montante do mecanismo;
- Anotar observações relevantes durante a realização do mesmo;
- Realizar o mesmo procedimento para as demais posições de batente, repetindo todo o roteiro, até que o mecanismo para de atuar automaticamente, determinando assim seu ângulo máximo de abertura.

Tabela 1 – Determinação do ângulo de abertura máximo do mecanismo e determinação da vazão por meio do ângulo de abertura

Ângulo máximo de abertura [°]	Nível do Piezômetro [mm]	Vazão [m <sup>3</sup> /s]	Nível a montante (durante o vertimento) [mm]	Observações pertinentes
5				
10				
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				
100				

---

# APÊNDICE B – Ensaio para determinação do nível a montante no instante da abertura do mecanismo

## 1. Objetivos

Determinação do nível do reservatório no instante de abertura do mecanismo.

## 2. Procedimentos

- Ligar a bomba, e operá-la na vazão mínima, primeira leitura do piezômetro (5 mm) referente à Tabela 2;
- Permitir o enchimento do canal a montante do vertedouro;
- Assim que iniciar a operação automática de vertimento do mecanismo, anotar o valor do nível a montante;
- Observar a variação de nível durante o processo de vertimento, e anotar o valor de nível assim que o mecanismo iniciar o fechamento;
- Realizar o ensaio pelo menos três vezes;
- Realizar a leitura do piezômetro, do canal do LHPCH, e conseqüentemente, calcular a vazão (Q) correspondente à esta leitura;
- Anotar observações quanto ao comportamento do mecanismo;
- Alterar a vazão da bomba para a próxima leitura do piezômetro, e repetir todo o procedimento

Fórmula do piezômetro

$$Q = 1,84 \cdot 0,5 \cdot \left( \frac{N}{1000} \right)^{1,5}$$

Sendo:

Q – Vazão [m<sup>3</sup>/s]

N – Leitura no piezômetro [mm]

Tabela 2 – Nível do reservatório a montante, no instante de abertura da comporta.

Nível no Piezômetro [mm]	Vazão [L/s]	Nível de Abertura [mm]	Nível de Fechamento [mm]
05	0,33		
10	0,92		
15	1,69		
20	2,60		
25	3,64		

Observações pertinentes durante a realização do ensaio:

---

# **APÊNDICE C – Ensaio para análise do comportamento do nível a montante em função do ângulo de abertura e da vazão de vertimento**

## **1. Objetivos**

Determinação do comportamento do fluido de acordo com a variação do ângulo de abertura do mecanismo.

## **2. Procedimentos**

- Ligar a bomba, e permitir o enchimento do canal a montante do vertedouro;
- Controlar a vazão da bomba, para que a leitura do piezômetro, do canal do LHPCH, seja inicialmente, de 5 mm, referente à Tabela 3, e conseqüentemente, tenha-se a vazão (Q) correspondente à esta leitura;
- Mantida esta vazão, realizar a primeira variação do ângulo ( $\Theta$ ) de abertura, em  $5^\circ$ , de acordo com a Tabela 3;
- Anotar, na Tabela 3, o nível a montante ( $N_m$ ), e se possível o nível da lâmina vertente ( $N_j$ ) a jusante;
- Anotar, caso necessário, observações relevantes durante a realização do mesmo;
- Realizar o mesmo procedimento para os demais ângulos;
- Alterar a vazão da bomba para a próxima leitura do piezômetro, e repetir todo o procedimento.

Observações pertinentes durante a realização do ensaio:

Tabela 3 – Análise do comportamento do nível a montante em função do ângulo de abertura e da vazão de vertimento

Leitura do piezômetro: 05 [mm]				Leitura do piezômetro: 10 [mm]				Leitura do piezômetro: 15 [mm]			
Q [L/s]	$\Theta$ [°]	$N_m$ [cm]	$N_m$ [cm]	Q [L/s]	$\Theta$ [°]	$N_m$ [cm]	$N_m$ [cm]	Q [L/s]	$\Theta$ [°]	$N_m$ [cm]	$N_m$ [cm]
0,33	5			0,92	5			1,69	5		
0,33	10			0,92	10			1,69	10		
0,33	15			0,92	15			1,69	15		
0,33	20			0,92	20			1,69	20		
0,33	25			0,92	25			1,69	25		
0,33	30			0,92	30			1,69	30		
0,33	35			0,92	35			1,69	35		
0,33	40			0,92	40			1,69	40		
0,33	45			0,92	45			1,69	45		
Leitura do piezômetro: 20 [mm]				Leitura do piezômetro: 25 [mm]							
Q [L/s]	$\Theta$ [°]	$N_m$ [cm]	$N_m$ [cm]	Q [L/s]	$\Theta$ [°]	$N_m$ [cm]	$N_m$ [cm]				
2,60	5			3,64	5						
2,60	10			3,64	10						
2,60	15			3,64	15						
2,60	20			3,64	20						
2,60	25			3,64	25						
2,60	30			3,64	30						
2,60	35			3,64	35						
2,60	40			3,64	40						
2,60	45			3,64	45						

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS). **Manual do Empreendedor – Volume V - Guia para a Elaboração de Projetos de Barragens**. Brasília, Distrito Federal, 2015. 195 p.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **Ranking das Tarifas**. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas](http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas)>. Acesso em: 10/7/2017.

ANSYS, C. F. X. Ansys Inc. Canonsburg, PA, USA, 1998.

AUGHTON, D.; MAREELS, I.; ERIK WEYER. **Porta de controle e método para controle de fluxo de líquido através de uma porta em um canal**. AUS PI 0113419-1, 21 ago. 2001, 17 maio 2016.

BAYSSIGUIER, J. **Automatic wicket for a hydraulic structure**. U.S. Patent n. 6,196,764, 21 jan. 1999, 6 mar. 2001.

BRANKER, K. PATHAK, M. J. M.; PEARCE, J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4470–4482, 2011.

DE BRITO FRANCISCO SATURNINO, R. **Dam**. U.S. Patent n. 2,966,77, 8 maio 1956, 3 jan. 1961.

CHEVALIER, S. Fusegates mitigate silting at Beni Amrane reservoir, Algeria. **International Journal on Hydropower & Dams**, v.11, n. 5, p. 118-119, 2004.

CHUQUIMUNI, R. A. A. **Análise Numérica do Alçamento de Barragens de Terra**. 2005. 165 f. Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro. 2005.

ELETROBRÁS (CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A.). **Diretrizes para Elaboração de Projeto Básico de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 1999.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017. 467 p.

ERBISTI, P. C. F. **Comportas Hidráulicas**. Rio de Janeiro: Campus, 1987. 358 p.

ERHA (ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS APLICADA LTDA); DME-PC, (DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ELETRICIDADE DE POÇOS DE CALDAS). **Projeto de Instalação de Estações Hidrométricas em Atendimento à Resolução Conjunta 03/2010**. Belo Horizonte, 2012. 118 p.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 504 p.

FRANTISEK, J. **Hydrostatic weir, gate, and the like**. U.S. Patent n. 2,598,389, 5 maio 1949, 27 mai. 1952.

GODOI, M. **País sofre com a falta de novas hidrelétricas com reservatórios**. Rio de Janeiro: Canal Energia, 2013.

HIDROWEB. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 10/7/2017.

HUNT, J. D.; GUILLOT, V.; FREITAS, M. A. V. DE; SOLARI, R. S. E. Energy crop storage: An alternative to resolve the problem of unpredictable hydropower generation in Brazil. **Energy**, v. 101, p. 91–99, 2016.

HYDROPLUS. Disponível em: <[www.hydroplus.com/](http://www.hydroplus.com/)>. Acesso em: 10/7/2017.

MILOVANOVITCH, P. D. J; MILOVANOVITCH, V. **Vanne automatique, autonome et montante**. FR Patent n. WO1996001925, 26 jan. 1995, 25 jan. 1996.

KEZELE, D.; CERNY, J.; ROYCE, A.; TAGHIPOUR, F.; TRAUBENBERG, G. **Fluid level control system**. U.S. Patent n. WO20030024865, 26 jul. 2002, 13 fev. 2003.

LACROIX, S.; CHEVALIER, S.; LEBLANC, M. **Secured fusegate for flood control**. U.S. Patent n. 8,591,149, 17 out. 2008, 26 nov. 2013.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 61st ed. [São Paulo]: Edusp, 2005. 497 p.

MME (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA). **Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2007. 684 p.

MÜLLER, A. C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995. 393 p.

NOS (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA). **Histórico da operação: dados hidrológicos/níveis**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 4/3/2017.

OTA, J. J. Noções gerais sobre o uso de barragens infláveis. **Revista Brasileira de Engenharia Caderno de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 1, p. 85–89, 1991.

PAIVA, J. B. D. DE; PAIVA, E. M. C. D. DE. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. 625 p.

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. **Introduction to Simulation Using SIMAN**. [São Paulo]: McGraw-Hill, 1995.

PREFEITURA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS. Decreto n° 5.075, de 05 de julho de 1994. Regulamenta o uso e ocupação do solo da área destinada à implantação da

represa "Ribeirão do Cipó" e dá outras providências. **Lex:** legislação municipal, Poços de Caldas, 1994.

PREFEITURA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS. Lei nº 6551, de 21 de novembro de 1997. Estabelece a obrigatoriedade de implantação de via perimetral à represa do Cipó acrescenta dispositivos à lei nº 3.562, de 14 de setembro de 1984, que estabelece o macrosistema viário do município, e dá outras providências. **Lex:** legislação municipal, Poços de Caldas, 1997.

PREFEITURA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS. Decreto nº 6240, de 7 de abril de 1999. Regulamenta o uso e ocupação do lago e do solo na represa e bacia do Ribeirão do Cipó e dá outras providências. **Lex:** legislação municipal, Poços de Caldas, 1999.

PREFEITURA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS. Lei Complementar nº 74, de 27 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a revisão do plano diretor do município de Poços de Caldas nos termos da Lei Federal nº 10.257/2001, altera, revoga e acrescenta dispositivos à lei 5488, de 4 de Janeiro de 1994 e dá outras providências. **Lex:** legislação municipal, Poços de Caldas, 2006.

PREFEITURA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS. Lei Complementar nº 84, de 26 de julho de 2007. Altera os anexos I, II e III de que trata o art. 2º da Lei Complementar nº 74, de 29/12/2006 e fixa o novo perímetro urbano para o município de Poços de Caldas, com base na Lei Complementar nº 74, de 29 de dezembro de 2006, que dispõe sobre a revisão do Plano Direto do Município de Poços de Caldas, e dá outras providências. **Lex:** legislação municipal, Poços de Caldas, 2007.

RANGEL, M. S. **Estudo de viabilidade econômica de geração de eletricidade por fonte renováveis no Brasil**. 2016. Trabalho final de graduação (em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Itajubá. 2016.

RODRIGUEZ, A. L. **Estudo e dimensionamento de uma comporta fusível para a UHE Guaporé**. 2014. 59 f. Trabalho final de graduação (em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Itajubá. 2014.

ROSS, E. J. **Water Control Gate**. U.S. Patent n. W0 2000026476 A1. 24 ago. 1999, 11 de maio 2000.

SOLIDWORKS. Solidworks corporation. Concord, MA, 2002.

SUPRAM (SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE REGULARIZAÇÃO AMBIENTAL). Parecer Único SUPRAM SUL. Protocolo nº 0013637/2012. Autoriza a construção do Barramento. Licenciamento Ambiental nº 11381/2005/003/2010. Varginha, p. 1–14, 2012.

TIAGO FILHO, G. L. **Desenvolvimento teórico e experimental para dimensionamento de turbina hidráulica Michell-Banki**. 1987. 283 f. Dissertação de Mestrado (em Ciências - Engenharia Mecânica) – Escola Federal de Engenharia, Itajubá. 1987.

TIAGO FILHO, G. L. Turbina de Fluxo Cruzado - Considerações sobre o número de pás. IN: Encuentro Latinoamericano de Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos, 1991, v. IV, Cusco, Peru, **Anais...** Lima: PROMIHDEC, 1991.

TIAGO FILHO, G. L.; STANO JÚNIOR, Â.; NOGUEIRA, F. J. H. **Barragem Móvel e auto-operada**. BR Patent n. PI 0606082-0 A, 17 maio 2006, 15 jan. 2008.

TOKMAJYAN, V. H. **Engineering Measures to Increase the Useful Volume of the Reservoir and Increase Efficiency of Water Intake Structures**. 2005. Thesis on scientific degree of Doctor of Technical sciences in the specialty – Instituto de Problemas hidráulicos e Hidrotécnicos, República da Arménia, Yerevan, 2005.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill. 1975. 245 p.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 10th ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002. 570 p.

YAN, H.; MINFEI, H.; JIANHUA, F. **Automatic panel-turning gate**. CHN Patent n. CN2719912Y, 15 ago. 2004, 24 ago. 2005.