

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO EM SEÇÕES DE CANAIS DE ADUÇÃO E  
CONDUTOS FORÇADOS EM APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS**

**MATHEUS BRITO BRAGA**

**ORIENTADOR: ARTHUR TAVARES SCHLEICHER**

**COORIENTADOR: DANILO JORGE SANTOS**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA CIVIL**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL**

**ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO EM SEÇÕES DE CANAIS DE  
ADUÇÃO E CONDUTOS FORÇADOS EM  
APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS**

**MATHEUS BRITO BRAGA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

**APROVADA POR:**

---

**ARTHUR TAVARES SCHLEICHER, ENGENHEIRO CIVIL (P.E ENC/UNB)  
(ORIENTADOR)**

---

**FABIO ZANCHETTA, ENGENHEIRO CIVIL (P.E ENC/UNB)  
(EXAMINADOR INTERNA)**

---

**CELSO RUBENS VARETA, ENGENHEIRO CIVIL (PRIME PROJETOS)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 10 DE DEZEMBRO DE 2019.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

BRITO BRAGA, MATHEUS	
ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO EM SEÇÕES DE CANAIS DE ADUÇÃO E CONDUTOS FORÇADOS EM APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS.	
90 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019)	
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. HIDRELÉTRICA	2. CUSTO-BENEFÍCIO
3. OTIMIZAÇÃO	4. CIRCUITOS
I. ENC/FT/UnB	II. Análise Custo-Benefício Em Seções De Canais De Adução E Condutos Forçados Em Aproveitamentos Hidrelétricos

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

Brito, Matheus. (2019). Análise Custo-Benefício Em Seções De Canais De Adução E Condutos Forçados Em Aproveitamentos Hidrelétricos.

Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: MATHEUS BRITO BRAGA

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO EM SEÇÕES DE CANAIS DE ADUÇÃO E CONDUTOS FORÇADOS EM APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil/ 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

MATHEUS BRITO BRAGA

[MATHEUS.BRITO14@GMAIL.COM](mailto:MATHEUS.BRITO14@GMAIL.COM)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Samara, meu padrasto Max e demais membros da minha família que me educaram além de financiar e fomentar meus estudos na faculdade. Agradeço meus amigos, os amigos que levei do ensino médio e as novas amizades que fiz durante a faculdade. Foram pessoas que trouxeram amor e companheirismo para uma caminhada tão longa, notadamente Leonardo, Pedro Henrique, Gustavo, Arthur, Thayná, Cecília, Isadora, e, não menos importante, minha namorada Danielle.

Agradeço à Prime Projetos como corpo profissional onde tive a oportunidade de terminar minha formação como engenheiro civil. Aos sócios Danilo Jorge e Celso Vareta pelo o acréscimo valioso ao presente texto e aos demais colegas de trabalho Felipe e Gustavo pelo aprendizado e parceria no cotidiano da profissão.

Agradeço a Universidade de Brasília e os professores que fizeram parte da minha formação. Não acredito que cabe nomeação, pois vivemos em um período de questionamento das instituições. Quem ler este trabalho deve ter a consciência que a instituição Universidade de Brasília e seu crivo me formaram profissional com o currículo que julgo completo, passando pelo difícil ciclo básico, pelo complexo ciclo profissionalizante e visitando matérias de cunho social fundamentais para minha consciência como cidadão e engenheiro civil.

Exerço muita gratidão a todos referidos.

Matheus Brito

## RESUMO

Neste trabalho foi realizado o estudo das perdas hidráulicas envolvidas em circuitos de adução de hidrelétricas buscando a otimização de canais de adução e condutos forçados por meio da engenharia financeira envolvida na tomada de decisão de investimentos do setor. O texto se baseou na experiência obtida na execução de projetos básicos e executivos e possui simplificações de caráter prático que não interferem no resultado.

Como produto do estudo há uma planilha automatizada para cálculo de seções ótimas. Nesta plataforma se unem os conhecimentos de programação, engenharia hidráulica, engenharia geotécnica, engenharia financeira e critérios executivos de projetos de grande porte para fornecer uma otimização que gere valor para o investidor.

O programa foi pensado de maneira modular, pensando em eventualmente haver expansão de funções que o usuário julgar necessário, considerando os conhecimentos e métodos desenvolvidos neste texto.

## SUMÁRIO

Sumário.....	v
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. OBJETIVO GERAL.....	17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE CANAIS.....	18
3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS ESCOAMENTOS NO TEMPO E ESPAÇO.....	20
3.3. VISCOSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES.....	21
3.4. CARGA HIDRÁULICA.....	22
3.4.1. CONSERVAÇÃO DE MASSA.....	22
3.4.2. SEGUNDA LEI DA DINÂMICA.....	23
3.4.3. ENERGIA ESPECÍFICA.....	25
3.5. PERDAS DE CARGA EM CANAIS.....	26
3.6. PERDAS DE CARGA EM CONDUTOS FORÇADOS.....	27
3.6.1. EMBASAMENTO NORMATIVO.....	27
3.6.2. CONCEITOS GERAIS.....	29
3.6.3. PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS.....	30
3.6.4. PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS.....	32
3.7. MODELAGEM FINANCEIRA.....	32
3.8. QUANTIFICAÇÃO.....	34
4. METODOLOGIA.....	36
4.1. SOFTWARE.....	36
4.2. ESTUDOS DE ARRANJOS DE APROVEITAMENTOS.....	36
4.3. DIMENSIONAMENTO DE CANAIS DE ADUÇÃO.....	39

4.4.	DIMENSIONAMENTO DE CONDUTOS FORÇADOS .....	42
4.5.	DETERMINAÇÃO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO.....	47
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.1.	OBTENÇÃO DE DADOS PRELIMINAR .....	48
5.1.1.	DESCRIÇÃO BÁSICA DO APROVEITAMENTO .....	48
5.1.2.	DADOS GEOTÉCNICOS DO CANAL DE ADUÇÃO.....	50
5.1.3.	PARÂMETROS ECONÔMICOS .....	50
5.2.	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO CANAL DE ADUÇÃO .....	52
5.3.	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO CONDUTO FORÇADO .....	53
5.4.	DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO CANAL DE ADUÇÃO .....	56
5.5.	DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO CONDUTO FORÇADO.....	62
5.6.	APROXIMAÇÕES REALIZADAS .....	66
5.7.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	67
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	71
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72
	anexo 1.....	74
1.	canal.....	75
2.	conduto .....	79
3.	Financeiro .....	85
4.	Janelas.....	86
5.	navegacao .....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Seção transversal de escoamento trapezoidal .....	19
Figura 3-2: Seção longitudinal de escoamento .....	20
Figura 3-3: Seção longitudinal de escoamento forçado.....	30
Figura 3-4: Fluxo de caixa para cada investimento .....	33
Figura 4-1: Arranjo geral da PCH Urtiga .....	38
Figura 4-2: Seção transversal do canal da PCH Urtiga .....	41
Figura 4-3: Perfil longitudinal - Circuito de Geração.....	43
Figura 4-4: Planta - Circuito de Geração .....	45
Figura 5-1: Dados preliminares do empreendimento .....	48
Figura 5-2: Comparativo entre potências geradas mensais e garantia física.....	50
Figura 5-3: Parâmetros de dimensionamento do canal de adução.....	52
Figura 5-4: Determinação da declividade média do terreno.....	53
Figura 5-5: Parâmetros de dimensionamento do conduto forçado .....	53
Figura 5-6: Arranjos de condutos forçados e bifurcações .....	55
Figura 5-7: Definição dos trechos para um arranjo de duas bifurcações.....	56
Figura 5-8: Definição do material da seção do canal de adução .....	56
Figura 5-9: Janela de Otimização de Canais de Adução .....	57
Figura 5-10: Parâmetros da seção escavada em rocha .....	57
Figura 5-11: Áreas consideradas na seção em rocha.....	58
Figura 5-12: Parâmetros da seção escavada em solo.....	58
Figura 5-13: Áreas consideradas na seção em solo .....	59
Figura 5-14: Base para cálculos iterativos e estimativas de volumes.....	59
Figura 5-15: Base para cálculo das geometrias da escavação e materiais de proteção .....	60
Figura 5-16: Fluxograma de otimização da seção de canais de adução .....	61
Figura 5-17: Comprimento, custo e perda de carga para cada trecho do conduto .....	62
Figura 5-18: Cálculos energéticos e comprimento de cada espessura para o trecho 1 do conduto .....	63
Figura 5-19: Fluxograma de otimização da seção do conduto .....	64
Figura 5-20: Fluxograma do cálculo da espessura para condutos .....	65
Figura 5-21: Consolidação de Resultados .....	66
Figura 5-22: Comparativo entre a área fornecida para diferentes geologias.....	68

Figura 5-23: Comparativo entre o benefício de reduzir o valor de Manning por meio de proteção .....	69
Figura 5-24: Comparativo entre diferentes fatores de capacidade .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Fluxo de caixa em valor presente para o investimento de 3 anos .....	34
Tabela 3-2: Fluxo de caixa em valor presente para o investimento de 5 anos .....	34
Tabela 4-1- Valores de Rugosidade (n) de Manning.....	40
Tabela 4-2: Relação entre coeficiente de perda de carga e ângulo da curva.....	46

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1 .....	18
Equação 3.2 .....	19
Equação 3.3 .....	19
Equação 3.4 .....	19
Equação 3.5 .....	20
Equação 3.6 .....	21
Equação 3.7 .....	22
Equação 3.8 .....	22
Equação 3.9 .....	22
Equação 3.10 .....	23
Equação 3.11 .....	24
Equação 3.12 .....	24
Equação 3.13 .....	24
Equação 3.14 .....	24
Equação 3.15 .....	24
Equação 3.16 .....	24
Equação 3.17 .....	25
Equação 3.18 .....	25
Equação 3.19 .....	25
Equação 3.20 .....	26
Equação 3.21 .....	26
Equação 3.22 .....	26
Equação 3.23 .....	26
Equação 3.24 .....	28
Equação 3.25 .....	29
Equação 3.26 .....	29
Equação 3.27 .....	30
Equação 3.28 .....	31
Equação 3.29 .....	31
Equação 3.30 .....	31
Equação 3.31 .....	31
Equação 3.32 .....	32

Equação 3.33 .....	33
Equação 3.34 .....	34
Equação 3.35 .....	34
Equação 3.36 .....	34
Equação 3.37 .....	35
Equação 3.38 .....	35
Equação 3.39 .....	35
Equação 3.40 .....	35
Equação 4.1 .....	41
Equação 4.2 .....	44
Equação 4.3 .....	46
Equação 4.4 .....	46
Equação 4.5 .....	47
Equação 4.6 .....	47
Equação 4.7 .....	47
Equação 5.1 .....	49
Equação 5.2 .....	49
Equação 5.3 .....	54

## LISTA DE ABREVIACOES, SIGLAS E SÍMBOLOS

- A - rea da seção de escoamento
- A0 - rea da seção de maior diâmetro
- A1 - rea da seção de menor diâmetro
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- b - Largura da base do canal
- B - Largura de topo
- Cs - Sobrepressura de corrosão
- D - Diâmetro interno do conduto
- De - Diâmetro econômico (mm)
- Dh – Diâmetro hidráulico da seção
- e - Espessura da chapa do conduto
- f - Coeficiente de fricção
- Fr - Número de Froude
- g - Aceleração da gravidade
- GWh - Gigawatt-hora
- h - Altura do escoamento da seção
- H - Altura em relação a referencial fixo (m)
- hb - Queda bruta (m)
- hd - Perda de carga distribuída
- hl - Perda de carga localizada
- Hm - Altura hidráulica ou altura média
- hp - Perda de carga (m)
- Ht - Altura máxima de pressão no conduto
- Ia - Declividade da linha piezométrica ou linha d'gua
- If - Declividade da linha de energia
- Io - Declividade do fundo do canal
- K - coeficiente de perdas localizadas
- Kf - Eficiência da junta
- kn - Correção de unidades
- L - Comprimento do conduto (m)

M - Massa do sistema  
MPa - Megapascal (N/mm<sup>2</sup>)  
n - Coeficiente de rugosidade de Manning  
NB - Norma Brasileira  
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável  
ONU - Organização das Nações Unidas  
P - Momento linear  
p - pressão (Pa)  
Pa - Pascal (N/m<sup>2</sup>)  
Pm - Perímetro molhado  
Q - Vazão máxima turbinada  
r0 - Raio interno da curva do conduto  
r1 - Raio externo da curva do conduto  
Rey - Número de Reynolds  
Rh - Raio hidráulico  
SC - Superfície de controle  
u\* - Velocidade de atrito  
V - Velocidade de escoamento  
VC - Volume de controle  
y - Altura d'água ou tirante d'água  
z - Coordenada em relação a um datum  
 $\alpha$  - Coeficiente de Coriolis  
 $\beta$  - Coeficiente de Boussinesq  
 $\varepsilon$  - Coeficiente de rugosidade  
 $\theta$  - Inclinação do fundo do canal  
 $\mu$  - Viscosidade absoluta  
 $\nu$  - Viscosidade dinâmica  
 $\rho$  - Massa específica da água  
 $\sigma_{adm}$  - Tensão admissível  
 $\sigma_e$  - Tensão de escoamento  
 $\sigma_t$  - Tensão de resistência a tração  
 $\tau$  - Tensão de cisalhamento  
 $\tau_0$  - Tensão cisalhante

$\forall$  - Volume em  $m^3$

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

VP – Valor Presente

VPL – Valor Presente Líquido

$t_h$  – Aceleração do fluxo no conduto

## 1. INTRODUÇÃO

A geração energética é um dos indicadores de economias em desenvolvimento, uma vez que as grandes indústrias, o setor privado e a população em geral consomem mais energia conforme o desenvolvimento e crescimento socioeconômico do país. Além de caracterizar o nível de desenvolvimento do país por meio de seu consumo de energia, a forma como a energia é gerada em um país é um indicador da sustentabilidade e modernização de alternativas mais eficientes.

A importância da geração de energia no contexto atual desperta interesse de importantes atores no cenário global, notadamente as grandes economias, os grandes investidores e a Organização das Nações Unidas (ONU). A ONU desenvolveu os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são 17 metas socioculturais e econômicas a serem atingidas até 2030, que foram identificadas como soluções para a prosperidade, fim da pobreza extrema e desenvolvimento econômico por meio da educação, saúde, seguridade social, geração de empregos e luta contra as mudanças climáticas e proteção do meio-ambiente (ONU, 2018).

A realidade de consumo de energia elétrica no mundo é acompanhada pela ONU como forma de verificação das projeções de crescimento dos países, bem como para verificar o cumprimento da meta de desenvolvimento sustentável. Alguns dados relevantes que quantificam a realidade mundial no que diz respeito à energia limpa e acessível são apresentados a seguir (ONU, 2018):

- 13% da população não tem acesso à energia elétrica;
- 3 bilhões de pessoas consomem madeira, carvão ou restos animais como combustível para cozinhar alimentos e se aquecer;
- O consumo de energias não sustentáveis é o maior contribuinte para a mudança climática, sendo responsável por 60% das emissões de gases do efeito estufa;
- A parcela de energia sustentável para o consumidor final atingiu 17,5% do total em 2015.

No Brasil, em 2018, foram consumidos 472.242 GWh de energia (EPE, 2019), sendo que aproximadamente dois terços desse total foram destinados a indústrias e residências, com indústrias consumindo 7% a mais que as residências. Esses valores são condizentes com as teorias de medir desenvolvimento e crescimento econômico por meio do consumo de

energia. Deste montante de energia, 93% foram gerados por meio de fontes de energia sustentável: solar, eólica e hidrelétrica.

A energia hidrelétrica representa 64% do potencial instalado no Brasil (MME, 2018), em função da grande disponibilidade hídrica que o país possui, com hidrografia diversa e amplamente distribuída em todo o território. Diante dessa realidade, a importância da energia hidrelétrica e seu estudo é inegável.

Um arranjo de uma usina hidrelétrica é composto, de forma ampla e geral, por captação em uma cota mais elevada e geração em uma cota mais baixa, de forma a aproveitar a energia potencial gravitacional naturalmente presente nos rios. A ligação entre o ponto de captação e o ponto de geração, onde se encontra a casa de força com turbinas e geradores, usualmente feita por meio de um conduto forçado acompanhado ou não por um canal de adução, a depender do arranjo do aproveitamento. Neste trecho de conduto forçado e canal de adução há perdas do potencial energético devido ao comportamento de fluidos em escoamento, divididos em perdas distribuídas e localizadas.

As perdas distribuídas em um arranjo de uma usina ocorrem tanto nos canais quanto nos condutos forçados e se dão pelo atrito do fluxo com a superfície. As perdas localizadas ocorrem nas singularidades: curvas, contrações, expansões e nas estruturas hidráulicas necessárias para o funcionamento seguro de uma hidrelétrica. As principais estruturas são as válvulas, grades e estruturas de concreto.

Tendo em vista a complexidade de definir a melhor relação entre os custos de implantação da usina e as variações na produção de energia em função das perdas hidráulicas no circuito de geração, desenvolveu-se este estudo para auxiliar na tomada de decisão quanto à definição do ponto ótimo de dimensionamento destas estruturas, levando em consideração aspectos energéticos e econômicos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Desenvolver um programa em plataforma Excel, com auxílio da linguagem de programação embutida, Visual Basic Advanced (VBA) que permita analisar do ponto de vista energético e econômico um conjunto de adução para aproveitamento de geração hidrelétrica.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Otimizar estruturas com base na metodologia de custo/benefício incremental levando em consideração estimativas de perdas de carga distribuídas em circuitos de geração (canais e condutos forçados);
- A partir da parametrização das estruturas, estimar quantidades de materiais de implantação;
- Inserir uma abordagem sobre geração de energia e de receita em aproveitamentos hidrelétricos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se o embasamento teórico de hidráulica básica e especificidades de escoamentos em canais livres e condutos forçados. Além disso, apresenta-se os aspectos financeiros da tomada de decisão sobre investimentos.

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE CANAIS

Canais são cursos d'água caracterizados pela ocorrência de uma superfície livre, ou seja, uma superfície em contato com a pressão atmosférica, ocorrendo escoamento obrigatoriamente por efeitos gravitacionais (Porto, 2006). Assim, os rios são canais naturais, uma vez que possuem todas as características citadas. Porém, foi com o desenvolvimento de canais artificiais, notadamente os aquedutos romanos, que surgiram as grandes cidades, garantindo o abastecimento de água para consumo e agricultura mesmo longe de corpos hídricos naturais.

No estudo de canais é interessante estabelecer métricas e características geométricas que descrevam a seção de escoamento. Na Figura 3-1 e Figura 3-2 são apresentadas as seções transversais e longitudinais com as características geométricas descritas a seguir:

- Área molhada (A) é área da seção reta do escoamento, normal à direção do fluxo;
- Perímetro molhado (Pm) é o comprimento da parte da fronteira sólida da seção do canal (fundo e paredes) em contato com o líquido; a superfície livre não faz parte do perímetro molhado;
- Raio Hidráulico ( $R_h$ ) é a relação entre a área molhada e o perímetro molhado, conforme Equação 3.1. Por envolver dois parâmetros geométricos, o raio hidráulico é usado como dimensão característica dos escoamentos, indicando a eficiência da seção;

$$R_h = \frac{A}{P_m} \quad \text{Equação 3.1}$$

- Altura d'água ou tirante d'água (y) é a distância vertical do ponto mais baixo da seção do canal até a superfície livre;
- Altura do escoamento da seção (h) é a altura do escoamento medida perpendicularmente ao fundo do canal;
- Largura da base do canal (b) largura da base na superfície molhada;
- Largura de topo (B) é a largura da seção do canal na superfície livre, função da forma geométrica da seção e altura d'água;

- Altura hidráulica ou altura média ( $H_m$ ) é a relação entre a área molhada e a largura da seção na superfície livre conforme Equação 3.2. É a altura de um retângulo de área equivalente à área molhada.

$$H_m = \frac{A}{B} \quad \text{Equação 3.2}$$

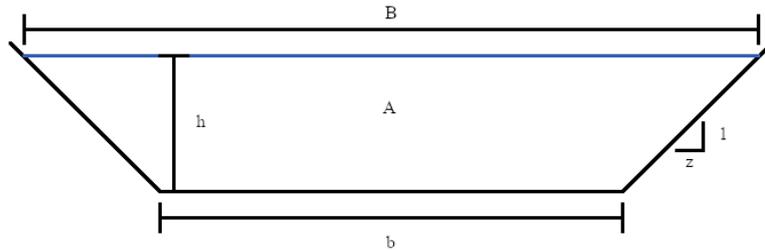


Figura 3-1: Seção transversal de escoamento trapezoidal

- Declividade de fundo ( $I_0$ ) é a declividade longitudinal do canal. Em geral, as declividades dos canais são baixas, podendo ser expressas pela Equação 3.3, onde  $\alpha$  é o ângulo entre o fundo do canal e a horizontal:

$$I_0 = \text{tg } \alpha \approx \text{sen } \alpha \quad \text{Equação 3.3}$$

- Declividade piezométrica ou declividade da linha d'água ( $I_a$ ). A linha piezométrica é função da soma da parcela de distribuição hidrostática com a carga de pressão atuante no fluido, dada pela Equação 3.4:

$$\text{Carga Piezométrica} = \frac{p}{\rho g} + h \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde  $p$  é a pressão em Pa,  $\rho$ , massa específica da água em  $\text{kg/m}^3$ ,  $g$ , a aceleração local da gravidade =  $9,81 \text{ m/s}^2$ , e  $h$ , profundidade média do escoamento.

- Declividade da linha de energia ( $I_f$ ) é a variação da energia corrente no sentido do escoamento. A linha de energia é igual a linha piezométrica acrescida da componente de energia cinética dos fluidos dada pela Equação

3.5, onde a  $V$  é a velocidade média do escoamento. A declividade da linha de energia é uma forma de calcular as perdas de carga no fluxo.

$$\text{Carga cinética} = \frac{V^2}{2g} \quad \text{Equação 3.5}$$

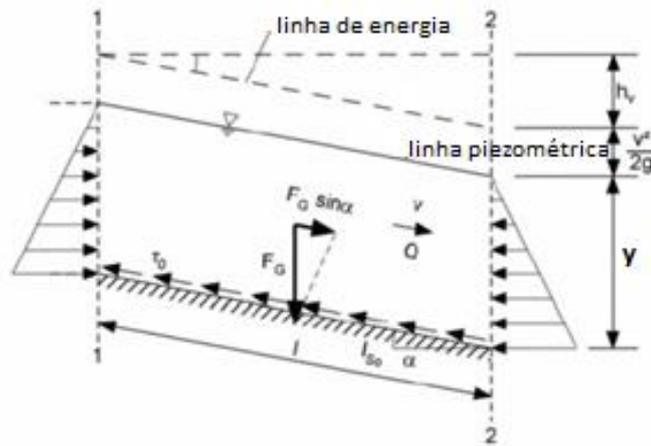


Figura 3-2: Seção longitudinal de escoamento

Nota-se que para declividade pequenas e seções retangulares, o valor de  $y$ , altura d'água, é aproximadamente igual à  $h$ , altura do escoamento.

No estudo de canais artificiais, não há grande variedade no número de seções, uma vez que há limitações construtivas e de custo. As seções mais comuns para grandes canais são a retangular e trapezoidal, enquanto para vazões menores são comuns às seções triangulares e circular (galeria de drenagem, esgoto).

### 3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS ESCOAMENTOS NO TEMPO E ESPAÇO

O regime de escoamento é dito permanente quando  $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ , onde  $V$  é o vetor de velocidade em um ponto na seção de escoamento. Caso o vetor  $V$  varie em relação ao tempo, o escoamento é dito não permanente.

Outra classificação para os escoamentos se refere à variação da linha d'água. Caso a linha d'água seja paralela ao fundo do canal, de forma que as trajetórias das linhas de fluxo sejam paralelas, o escoamento é dito uniforme. Quando há uma singularidade como alteração de fundo, o nível d'água pode variar consideravelmente em pequenas distâncias, como por exemplo em vertedouros, corredeiras, cachoeiras e ressaltos. Nestes casos o escoamento é

dito bruscamente variado (Porto, 2006). O escoamento pode ser gradualmente variado quando a alteração da linha d'água ocorrer de maneira suave.

### 3.3. VISCOSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADES

Os fluidos reais apresentam resistência ao deslocamento de uma camada em relação à outra, porém esta resistência surge somente durante o movimento. A resistência de deslocamento entre camadas adjacentes de fluidos é modelada pela Lei da Viscosidade de Newton, Equação 3.6, que postula: a tensão tangencial entre duas camadas adjacentes é proporcional ao gradiente de velocidade na direção perpendicular à camada (Chanson, 2004).

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde  $\tau$  é a tensão cisalhante e  $\mu$  é a viscosidade absoluta,  $dV/dy$  a variação da velocidade em relação ao fundo.

Quando em contato com um sólido, os fluidos apresentam uma condição de não-deslizamento na superfície de contato (princípio da aderência) de forma que a velocidade nessas fronteiras seja nula. No caso de canais, onde há uma superfície em contato com o ar e um perímetro molhado, o perfil de velocidades se aproxima de uma parábola. No perímetro, a velocidade do líquido é zero, na superfície livre a velocidade não é zero, uma vez que o ar é um fluido e suas camadas vão apresentar menor resistência ao deslocamento (comparado com a fronteira líquido-sólido) e haverá deslocamento de uma pequena massa de ar ao longo da superfície livre.

Diante desse perfil de velocidades, é intuitivo que a velocidade máxima do escoamento da seção ocorra longe das fronteiras sólidas e um pouco abaixo da superfície livre, normalmente entre profundidades de 5% a 25% da profundidade do escoamento (Chow, 1959).

No caso de canais muito largos, com largura da superfície livre maior que 10 vezes a profundidade, a distribuição de velocidades longe das bordas é equivalente à distribuição em um canal retangular de largura infinita, não havendo influência das bordas de forma que a velocidade só varie com a profundidade (Chow, 1959).

No desenvolvimento dos estudos da hidráulica é natural assumir uma velocidade média de escoamento na seção, mesmo sabendo que não é o comportamento real do fluido. Para corrigir estes desvios nos cálculos, usam-se os coeficientes de Boussinesq e Coriolis, na quantidade de movimento e energia cinética, respectivamente (Chanson, 2004).

Neste ponto, é interessante introduzir dois adimensionais amplamente usados na caracterização de fluxos. Estes adimensionais levam em consideração a relação entre as diferentes forças que atuam em um corpo d'água. São eles o número de Reynolds e o número de Froude., conforme a Equação 3.7 e Equação 3.8.

$$Rey = \frac{V \cdot Rh}{\nu} \quad \text{Equação 3.7}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot Hm}} \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde  $\nu$  é a viscosidade dinâmica dada por  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ,  $\rho$  sendo a massa específica do fluido e  $g$ , a aceleração da gravidade. O  $Rh$  e o  $Hm$  podem ser quaisquer outras dimensões características de comprimento do escoamento, porém estas são as mais usuais.

O número de Reynolds é a relação entre a força inercial (Segunda Lei da Dinâmica) e a força viscosa (Lei da Viscosidade de Newton). Este adimensional caracteriza o escoamento como laminar ou turbulento, com uma faixa de transição, e é utilizado como parâmetro de entrada para estimativa do coeficiente  $f$  (fator de atrito) da Lei de Darcy-Weisbach (ou Lei Universal da Perda de Carga). Nos estudos de adutoras e na maioria dos canais naturais, os escoamentos são quase sempre turbulentos, com número de Reynolds maiores que 2000.

O número de Froude é a raiz quadrada da relação das forças inerciais e força gravitacional. Este adimensional caracteriza o fluxo em subcrítico (fluvial), crítico, ou supercrítico (torrencial).

### 3.4. CARGA HIDRÁULICA

#### 3.4.1. CONSERVAÇÃO DE MASSA

O comportamento dos fluidos é dado por três equações fundamentais. A equação da continuidade, equação do momento (segunda lei de Newton para sistemas) e equação da energia (primeira Lei da Termodinâmica para sistemas).

A equação da continuidade trata da conservação de massa em um sistema fechado, de forma que a massa do sistema seja constante em relação ao tempo, conforme a Equação 3.9:

$$\frac{DM}{Dt} = 0 \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde  $\frac{D}{Dt}$  é a derivada material e M a massa do sistema. A derivada material é consequência da diferenciação de um sistema observado a partir de um volume de controle. O volume de controle surge como alternativa à análise convencional de corpos em movimento, onde os corpos se deslocavam em relação ao sistema de coordenadas. É óbvio a dificuldade de identificar e acompanhar o mesmo elemento de massa quando se trata de fluidos, assim um volume de controle é um volume definido, conhecido e fixo, ou não, no espaço.

O volume de controle relaciona as propriedades extensivas do sistema, N, com propriedades intensivas (por unidade de massa),  $\eta$  (Pitchard et al., 2014). Para as equações em foco:

- $N=M, \eta=1$  (conservação da massa)
- $N=P, \eta=V$  (conservação da quantidade de movimento linear)
- $N=E, \eta=e$  (primeira lei da termodinâmica)

Onde P é o vetor quantidade de movimento linear (momento linear) dado por  $P = M \cdot V$  e V, vetor velocidade. É possível provar por meio de conceitos básicos de cálculo e álgebra linear, conforme a Equação 3.10.

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \eta \rho dV + \int_{SC} \eta \rho dV \cdot dA \quad \text{Equação 3.10}$$

Sendo VC o volume de controle, SC a superfície de controle e dA o vetor de módulo igual à área dA e direção normal à dA,  $dA \in SC$ .

Aplicando a continuidade e assumindo que o líquido é incompressível, ou seja, a massa específica não varia com o tempo ou com a pressão, e que a vazão é dada por  $Q = V \cdot A$ , o fluxo na fronteira do volume de controle deve ser nulo. Fazendo os ajustes vetoriais, isso corresponde a dizer que a vazão que entra no volume de controle deve ser igual à vazão que sai do mesmo.

### 3.4.2. SEGUNDA LEI DA DINÂMICA

Supondo um volume de controle diferencial no espaço ao longo de uma linha de fluxo de um líquido com viscosidade baixa o suficiente para considerarmos o fluido aproximadamente invíscido, sujeito a pressão hidrostática e ação da gravidade, a variação do momento linear, P, ao longo do tempo deve ser igual ao somatório das forças externas, conforme a Equação 3.11.

$$\frac{DP}{Dt} = \sum F_{EXT} \quad \text{Equação 3.11}$$

As forças externas que atuam no corpo são a força da gravidade (força de campo) e a pressão hidrostática na superfície de controle (forças de contato). Por manipulações algébricas, é possível obter a Equação 3.12.

$$\frac{\partial}{\partial s} \left( \frac{p}{\rho} + gz + \frac{V^2}{2} \right) = - \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{Equação 3.12}$$

Onde  $p$  é pressão hidrostática e  $z$  é uma coordenada em relação a um datum. Supondo, além disso, que o regime é permanente e integrando ao longo de dois pontos na trajetória  $s$ , temos que (Equação 3.13):

$$\frac{p}{\rho} + gz + \frac{V^2}{2} = CTE \quad \text{Equação 3.13}$$

Expressando a equação acima em unidades de comprimento, temos a Equação 3.14

$$H = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g} = CTE \quad \text{Equação 3.14}$$

A expressão acima é conhecida como Equação de Bernoulli para líquidos ideais, onde  $H$  é a carga por unidade de peso. Ela é válida para regimes permanentes, líquidos invíscidos, distribuição hidrostática de pressão e ao longo de uma linha de fluxo.

É importante notar que foi adotada a velocidade média do fluxo. Conforme citado anteriormente, o coeficiente de Boussinesq,  $\beta$ , corrige a equação de Bernoulli na forma da Equação 3.15:

$$H = \frac{p}{\gamma} + z + \beta \frac{V'^2}{2g} = CTE \quad \text{Equação 3.15}$$

Onde  $V'$  é a velocidade média em relação a profundidade do escoamento.

E o coeficiente de Coriolis,  $\alpha$ , para correção da energia cinética nos fornece a Equação 3.16:

$$H = \frac{p}{\gamma} + z + \alpha \frac{V'^2}{2g} \quad \text{Equação 3.16}$$

O coeficiente de Coriolis varia entre 1 e 1,15, de acordo com a seção estudada (sob um ponto de vista geométrico e pelo princípio da aderência) e declividade.

### 3.4.3. ENERGIA ESPECÍFICA

A energia específica em uma seção é definida como a energia por unidade de peso medida a partir do fundo do canal. Assim, fazendo  $z = 0$  na Equação de Bernoulli temos Equação 3.17 (Chow, 1959):

$$E = d \cdot \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad \text{Equação 3.17}$$

Onde  $\theta$  é a declividade do fundo do canal e, lembrando,  $d$  é a altura do escoamento medida na seção perpendicular ao fluxo. Para  $\alpha = 1$  e declividades suaves a Equação 3.17 pode ser reescrita como a Equação 3.18 (Chow, 1959):

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad \text{Equação 3.18}$$

Para uma dada vazão sabe-se que a velocidade média na seção é dada por  $V = Q/A$ , logo a energia específica se torna função unicamente da profundidade de escoamento  $y$ , segue Equação 3.19:

$$E(y) = y + \frac{Q^2}{2 \cdot A(y)^2 \cdot g} \quad \text{Equação 3.19}$$

É possível identificar que para um mesmo valor de energia específica existem duas profundidades (conhecidas como alturas alternadas), o que faz sentido uma vez que a relação entre  $E$  e  $y$  se dá de forma quadrática. Além disso, é possível identificar um ponto no qual a energia específica do escoamento é mínima, esse ponto é conhecido como altura crítica ( $y_c$ ) levando a valores unitários do adimensional número de Froude.

A relação inversa entre profundidade do escoamento e carga cinética (velocidade) nos leva a concluir que para alturas superiores a crítica ( $y > y_c$ ), o escoamento é fluvial, lento, subcrítico. No caso de alturas inferiores a crítica ( $y < y_c$ ), o escoamento é torrencial, rápido e supercrítico.

No caso de regime permanente e uniforme, é possível provar que a declividade da linha de energia é igual a declividade do fundo e declividade da linha d'água (piezométrica),  $I_f$  e  $I_a$ , respectivamente.

### 3.5. PERDAS DE CARGA EM CANAIS

Para o desenvolvimento das equações até o momento, a viscosidade e tensão cisalhante entre duas camadas foi desprezada, porém quando o comprimento do trecho ou canal em estudo aumenta, as perdas de carga distribuídas devido à rugosidade da seção passam a ter importância significativa.

Segundo a lei de Darcy, a declividade da linha de energia,  $I_f$ , é dada pela Equação 3.20 :

$$I_f = \frac{\Delta H}{\Delta S} = \frac{f \cdot V^2}{8 \cdot R_h \cdot g} \quad \text{Equação 3.20}$$

Onde  $f$  é o coeficiente de fricção. Tal fator é obtido experimentalmente para diferentes tipos de escoamento, conforme o número de Reynolds e a rugosidade absoluta do canal.

No caso de regime permanente, o somatório das forças ao longo do escoamento deve ser nulo, de forma que a componente da força peso para um volume de controle se equilibre com a tensão cisalhante no perímetro molhado.

A tensão cisalhante,  $\tau_0$ , é dada em função do coeficiente de fricção na forma da Equação 3.21:

$$\tau_0 = \frac{f \rho V^2}{8} \quad \text{Equação 3.21}$$

A obtenção da seção de escoamento (raio hidráulico) e fator de fricção é um processo iterativo, uma vez que este depende daquele. Neste caso é usado o diagrama de Moody.

Entretanto, é importante notar que os escoamentos em canais são majoritariamente turbulentos, com número de Reynolds altos.

Foi por meio dos estudos de Manning e Strickler que a resistência ao escoamento foi simplificada a partir da equação de Chézy, assumindo escoamento turbulento e camada viscosa próxima à superfície, conforme mostrado na Equação 3.22 e na Equação 3.23:

$$V = \frac{k_n}{n} R_h^{2/3} I_f^{1/2} \quad \text{Equação 3.22}$$

Ou,

$$Q = \frac{k_n}{n} A R_h^{2/3} I_f^{1/2} \quad \text{Equação 3.23}$$

Para escoamento permanente e vazão  $Q$  dada por  $Q = V \cdot A$ . Onde  $k_n$  é um fator de correção de unidades (1 para sistema métrico e 1,49 para sistema imperial de unidades) e  $n$  é o número

de Manning, dado para cada material/condição de escoamento que compõem a superfície molhada do canal. A literatura é repleta de valores experimentais do  $n$  de Manning para materiais e alguns rios (Chow, 1959; Akan, 2006).

### **3.6. PERDAS DE CARGA EM CONDUTOS FORÇADOS**

Os conceitos geométricos e energéticos introduzidos nos capítulos anteriores permitem, além do desenvolvimento dos cálculos de perdas de carga distribuídas em canais, o desenvolvimento de perdas de carga em condutos forçados.

A perda de carga nos condutos pode ocorrer de duas maneiras. A primeira delas, por perdas distribuídas ao longo do escoamento e consequentes do princípio da aderência do fluxo às paredes do conduto (perímetro molhado). A segunda ocorre em singularidades de mudanças bruscas das características que definem aquele escoamento, ou seja, mudanças na seção de escoamento por contrações, alargamentos, soleiras delgadas, válvulas, comportas e reservatórios ou mudanças do vetor velocidade média do fluxo, principalmente seu módulo e direção em curvas e joelhos.

As perdas de carga decorrentes das situações citadas são denominadas perdas localizadas, uma vez que sua influência na linha de energia é significativa majoritariamente, mas não exclusivamente, nas proximidades da singularidade.

No estudo de perdas de carga ao longo de canais desprezou-se o estudo de perdas localizadas, pois se assume que as curvas ou mudanças de seções nos cursos d'água, naturais ou artificiais, são suaves o suficiente para que as mudanças das características dos fluidos ocorram de maneira gradual. Essa premissa permite concluir que nestes casos as perdas distribuídas ao longo do canal serão significativamente maiores que as perdas localizadas.

Deve-se ressaltar que na natureza as perdas de carga localizadas em rios podem ser significativas se há escoamento supercrítico. Estas perdas são observadas principalmente em casos de corredeiras, cachoeiras, lagos ou alterações bruscas de fundo por formações geológicas no leito. Neste caso, descarta-se a premissa e estudos detalhados do comportamento do rio devem ser desenvolvidos para segurança dos resultados.

A determinação do comportamento dos fluidos e das características do fluxo em locais de perdas localizadas decorre de pesquisa experimental.

#### **3.6.1. EMBASAMENTO NORMATIVO**

Como embasamento normativo para o dimensionamento de condutos forçados, escolheu-se a norma ABNT NBR-12296 (1991), que apesar de antiga e cancelada em 2017, ainda apresenta conceitos válidos na prática apresentando fórmulas de cálculo para elementos de

aço, matéria que não sofreu alterações fundamentais nos conceitos-chave de admissibilidade de tensões utilizados na norma.

De forma complementar, foram utilizadas memórias de cálculo de condutos forçados elaboradas para alguns empreendimentos hidrelétricos.

Na referida norma, são tratados os seguintes conceitos:

- O parâmetro característico do aço utilizado para condutos (tensões últimas e de escoamento);
- Cálculo da sobrepressão atuante no conduto;
- Determinação do diâmetro econômico;
- Determinação da espessura da chapa do conduto;
- Cálculo da espessura de chapa mínima.

A estimativa da sobrepressão provocada é função do tempo de fechamento do órgão de controle e proteção da máquina e da velocidade do escoamento, ressaltando que este evento de fechamento causa o conhecido golpe de aríete. Para efeitos de cálculo, neste trabalho será utilizada uma sobrepressão máxima de 40% da queda bruta, uma vez que este valor é consequência do tempo de fechamento determinado pelo fabricante do conjunto turbina-gerador. Este valor é amplamente utilizado em projeto, e valores distintos são aplicados somente em casos particulares.

A determinação do diâmetro econômico prevista na norma buscou analisar o dilema entre custos de implantação e ganhos com a redução da velocidade e, conseqüentemente, da perda de carga. A norma utiliza a fórmula de Bondushu, dada pela Equação 3.24.

$$D_e = 127 \sqrt[7]{\frac{Q^3}{H_t}} \quad \text{Equação 3.24}$$

Onde  $D_e$ , é o diâmetro econômico em cm,  $Q$ , a vazão máxima turbinada em  $m^3/s$ , e  $H_t$ , altura máxima de pressão sobre o conduto em metros.

Como premissa desse trabalho, decidiu-se por não utilizar equações e fórmulas empíricas para o dimensionamento de condutos uma vez que, apesar de úteis em cálculos rápidos e estimativas, não garantem a escolha da seção eficiente. A escolha do melhor diâmetro passa pelos parâmetros geométricos, tais como diâmetro, espessura e comprimento do conduto,

mas também pela valoração da energia produzida ou reduzida, dependentes do valor da tarifa e da vida útil do empreendimento.

Um estudo feito na Índia (Singhal M. K. & Arun Kumar, 2015) compara os métodos empíricos de determinação de diâmetro ótimo desenvolvidos por Moffat, Warnick, Sarkaria, Fahlbusch, USBR, Bier, ASCE e Voetsch & Fresen e mostra que não há homogeneidade suficiente entre os valores que justifique a adoção desse método em etapas mais avançadas do projeto de uma PCH.

Neste caso, serão determinadas as variáveis geométricas e quantitativas para esse cálculo iterativo e ficará a cargo do usuário o cálculo da modelagem financeira com base no tempo de contrato, energia média gerada, preço da energia e custos da tonelada do aço e demais custos de implantação.

No que tange ao cálculo da espessura do conduto, serão utilizadas as duas fórmulas fornecidas pela norma. A primeira, Equação 3.25, trata do cálculo com base na tensão admissível e sobrepressão máxima a qual o conduto está submetido e a segunda, Equação 3.26, trata da espessura mínima para evitar deformações excessivas.

$$e = \frac{H_t D}{200 \sigma_{adm} K_f} + C_s \quad \text{Equação 3.25}$$

$$e_{mín} = \frac{D + 500}{400} \quad \text{Equação 3.26}$$

Onde  $e$  e  $e_{mín}$  são a espessura da chapa do conduto em milímetros,  $D$ , diâmetro interno do conduto em milímetros  $H_t$ , a altura máxima de pressão sobre o conduto em metros,  $\sigma_{adm}$ , tensão máxima admissível,  $K_f$ , eficiência de junta igual a 0,8, e  $C_s$ , sobrepressão (NBR 12296, 1991) de corrosão igual a 1 mm.

### 3.6.2. CONCEITOS GERAIS

As características geométricas principais dos escoamentos em condutos forçados são a área molhada, que permite a determinação da velocidade média do fluxo, o raio hidráulico, que, junto com o comprimento, permite determinar as perdas de carga ao longo do conduto.

Nos condutos forçados, diferentemente dos fluxos com superfície livre, a linha piezométrica não se encontra na fronteira atmosfera-líquido, se diferenciando da linha d'água. Isso ocorre devido à pressão que atua no fluido, elevando a linha piezométrica. Na Figura 3-3 está representada essa situação.

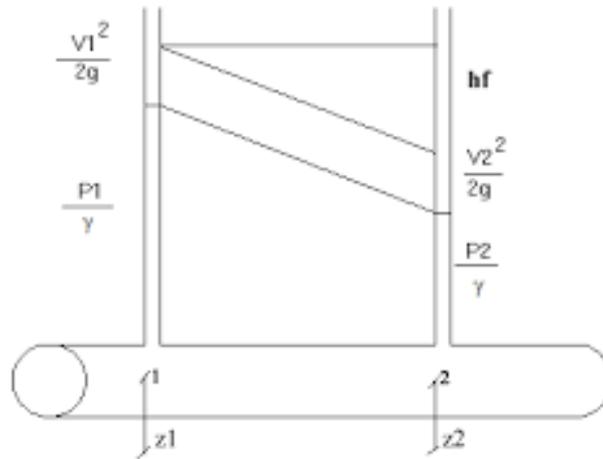


Figura 3-3: Seção longitudinal de escoamento forçado

### 3.6.3. PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS

A perda de carga distribuída nos condutos forçados é dada pela Lei de Darcy-Weisbach para inclinação da linha de energia, Equação 3.27, que também é conhecida como fórmula universal de perda de carga.

$$I_f = \frac{\Delta H}{\Delta S} = \frac{f \cdot V^2}{8 \cdot R_h \cdot g} \quad \text{Equação 3.27}$$

Dessa forma, para se obter a perda de carga distribuída ao longo do conduto, conhecendo a seção de escoamento forçado, comprimento do conduto e vazão, deve-se apenas determinar o coeficiente de fricção  $f$ . O fator de fricção é obtido experimentalmente para diferentes tipos de escoamento, conforme o número de Reynolds. As diferentes fórmulas de obtenção de  $f$  são descritas a seguir.

Nesta etapa, é necessário introduzir os conceitos de escoamentos hidraulicamente lisos ou rugosos. Este conceito leva em consideração a distribuição de velocidades do fluido no conduto e a rugosidade absoluta,  $\epsilon$ . Conforme citado nos estudos de canais, na proximidade da superfície de contato entre sólido e líquido há uma camada limite laminar que surge em decorrência do princípio da aderência e causa perdas de carga por atrito.

A distribuição de velocidades em condutos forçados é caracterizada pela velocidade de atrito,  $u^*$ , definida pela Equação 3.28.

$$u^* = V \sqrt{\frac{f}{8}} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad \text{Equação 3.28}$$

Quando relacionado com a rugosidade absoluta,  $\varepsilon$ , e viscosidade cinemática do fluido,  $\nu$ , obtemos o adimensional conhecido como número de Reynolds de rugosidade, expresso na Equação 3.29.

$$\begin{aligned} \text{Reynolds de rugosidade} & \quad \text{Equação 3.29} \\ & = \frac{u^* \cdot \varepsilon}{\nu} \end{aligned}$$

O valor deste adimensional define se um escoamento turbulento é hidraulicamente liso ou rugoso. Para valores menores que 5, o escoamento é considerado turbulento hidraulicamente liso, para valores maiores que 70, o escoamento é considerado turbulento e hidraulicamente rugoso.

Essa caracterização ocorre, pois quanto mais turbulento um escoamento, mais aleatória é a distribuição de linhas de fluxo. Isso faz com que a camada limite laminar próxima à fronteira do fluxo diminua expondo as rugosidades da superfície. Dessa forma, o fator de atrito,  $f$ , da fórmula universal de perda de carga pode ser diferente para um mesmo material, dependendo da turbulência do escoamento do fluido.

A Equação 3.30 e Equação 3.31 definem o fator de atrito para escoamentos turbulentos lisos e rugosos, respectivamente.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2. \log\left(\frac{Re \cdot \sqrt{f}}{2,51}\right) \quad \text{Equação 3.30}$$

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2. \log\left(\frac{3,71 \cdot D_h}{\varepsilon}\right) \quad \text{Equação 3.31}$$

Onde  $D_h$  é o diâmetro hidráulico da seção de escoamento.

A obtenção da perda de carga distribuída em um conduto forçado é facilmente obtida aplicando os valores de fator de atrito,  $f$ , obtidos pelas equações acima a fórmula universal da perda de carga.

### 3.6.4. PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS

A formulação das perdas de cargas localizadas é um procedimento experimental por diversos fatores, há uma dificuldade de formular os diferentes tipos de contrações e expansões, curvas, válvulas, bombas e turbinas. Ainda assim, deve-se observar que devido a incompressibilidade da água, aproximação realizada com o intuito de simplificar os cálculos, do conceito de conservação de massa e do estudo aplicado a uma linha de fluxo, os únicos parâmetros que podem variar na carga hidráulica do líquido são a velocidade,  $V$  e a pressão  $p$ . Dessa forma, é possível adotar a premissa que as perdas de carga localizadas,  $\Delta h$ , são diretamente proporcionais ao fator de energia cinética da equação de Bernoulli conforme a Equação 3.16 e Equação 3.32.

$$H = \frac{p}{\gamma} + z + \alpha \frac{V'^2}{2g} \quad \text{Equação 3.16}$$

$$H = \frac{p}{\gamma} + z + \alpha \frac{V'^2}{2g} \quad \text{Equação 3.16}$$

$$hl = K \frac{V^2}{2g} \quad \text{Equação 3.32}$$

O fator  $K$  é um coeficiente adimensional obtido experimentalmente para cada singularidade que se deseja estudar.

Na literatura (Idelchik,1996 e Eletrobrás, 2000), existem diversas tabelas que compilam o conhecimento experimental de determinação de valores  $K$  para cada situação.

### 3.7. MODELAGEM FINANCEIRA

Ao analisar alternativas de investimento, deve-se levar em consideração a variação das despesas ou receitas ao longo do tempo. Assim como outros ativos, os recursos financeiros para o investimento na construção de uma usina possuem seu custo. Os juros são uma forma de remuneração por capital líquido.

No caso da análise de investimentos, muitas vezes se compara duas alternativas de fluxo de caixa. Por exemplo, pode-se investir R\$100,00 hoje e retirar em 3 anos R\$107,00, ou investir R\$100,00 hoje e retirar R\$120 em 5 anos. Intuitivamente o cálculo do melhor investimento seria aquele que fornecesse o melhor retorno. Logo, o investimento de 5 anos, uma vez que rende R\$13,00 a mais que o investimento de 3 anos.

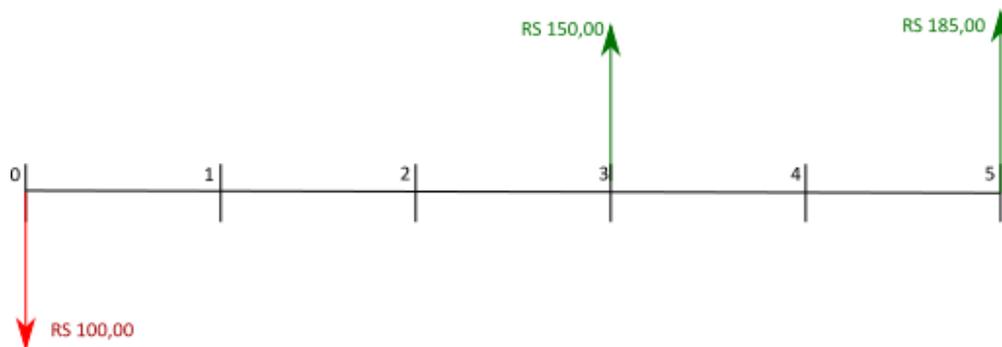


Figura 3-4: Fluxo de caixa para cada investimento

No entanto, analisar os investimentos apenas na remuneração no fim do período é um erro, uma vez que o capital possui um valor intrínseco variável ao longo do tempo. O valor de R\$1,00 hoje é maior que o valor da mesma quantidade nominal em 5 anos. Isso ocorre, pois a moeda normalmente é desvalorizada pela inflação e no sistema capitalista se remunera a mobilização de capital. No caso do Brasil, por exemplo, qualquer pessoa pode investir seu capital no Tesouro Direto e receber retornos sobre esse capital mobilizado. Logo, deve-se avaliar para qual taxa está sendo praticada em cada um dos casos citados e compará-la com uma taxa mínima que justifique o risco assumido e a liquidez no presente. Dessa forma, os estudos financeiros partem de dois conceitos: o custo de capital e a taxa mínima de atratividade (TMA).

No exemplo referido, o investimento de 3 anos apresenta um retorno anual de 14,47% e o investimento de 5 anos, um retorno anual de 13,09%. Para analisar o valor do retorno futuro, deve-se calcular qual valor investido hoje apresenta os ganhos futuros. Isto é o equivalente a se perguntar qual valor devemos ter em conta hoje para que, se investidos, retornem o valor futuro (Berk, Jonathan B.; DeMarco, Peter; Harford, Jarrad, 2015). Dessa forma, divide-se o valor futuro pela taxa de juros praticada, conforme Equação 3.33.

$$VP = \frac{\text{Valor Futuro}}{(1 + taxa)^n} \quad \text{Equação 3.33}$$

Onde  $n$  é o número do período analisado e VP é a abreviação de Valor Presente, o que significa que todos os ganhos futuros foram reduzidos em um fator proporcional à TMA do investidor.

O conceito de Valor Presente Líquido significa a aplicação da Equação 3.33 para cada período da visualização do fluxo de caixa da Figura 3-4.

No caso do exemplo citado e uma taxa mínima de atratividade 10% ao ano, o fluxo de caixa pode ser representado na Tabela 3-1 e Tabela 3-2.

Tabela 3-1: Fluxo de caixa em valor presente para o investimento de 3 anos

Período	0	1	2	3
Valor Nominal	-R\$ 100,00			R\$ 150,00
Valor Presente	-R\$ 100,00			R\$ 112,70

Tabela 3-2: Fluxo de caixa em valor presente para o investimento de 5 anos

Período	0	1	2	3	4	5
Valor Nominal	-R\$ 100,00					R\$ 185,00
Valor Presente	-R\$ 100,00					R\$ 114,87

O conceito de valor presente líquido (VPL), é a soma de todos os valores presentes para cada período do fluxo de caixa, conforme Equação 3.34. Nesta situação, com a TMA em 10% ao ano, o valor presente líquido do investimento de 3 anos e 5 anos, respectivamente são R\$12,70 e R\$14,87. Isso permite concluir que o investimento de maior prazo é mais vantajoso, pois apresenta o maior VPL.

$$VPL = \sum_0^n VP = \sum_0^n \frac{\text{Valor Futuro}}{(1 + taxa)^n} \quad \text{Equação 3.34}$$

No caso de fluxo de caixa de valores nominais idênticos ao longo de toda análise de fluxo de caixa, pode-se reduzir a Equação 3.34 para a Equação 3.35, onde o fator de recuperação de capital (FRC) é definido pela Equação 3.36.

$$VPL = \sum_0^n VP = \sum_0^n \frac{\text{Valor Futuro Fixo}}{(1 + taxa)^n} = \frac{\text{Valor Futuro Fixo}}{FRC} \quad \text{Equação 3.35}$$

$$FRC = \frac{taxa(1+taxa)^n}{(1+taxa)^n - 1} \quad \text{Equação 3.36}$$

### 3.8. QUANTIFICAÇÃO

A quantificação é fundamental para que as análises em relação a alterações de seções de escoamento em canais e em condutos sejam realizadas em busca do menor custo de implantação e menores perdas de carga e, conseqüentemente, maior potência gerada.

Tendo em vista que as estruturas que serão otimizadas neste trabalho são o canal e o conduto, não será feita qualquer abordagem a respeito de custos de outros componentes da usina, tais como turbinas, geradores, barragens, entre outros. Ou seja, este trabalho não tem como objetivo a estimativa de custos de um empreendimento hidrelétrico, e sim apoiar na escolha das dimensões do canal de adução e do conduto forçado.

Para canais, o volume escavado pode ser facilmente aproximado pela multiplicação do seu comprimento pela seção escavada, com exatidão suficiente tendo em vista os custos reduzidos de remoção desses materiais em comparação com os custos de concretos e condutos metálicos em usinas hidrelétricas. Normalmente, acrescenta-se borda livre à seção de escoamento para garantir que o fluxo se mantenha nos limites do canal ainda que haja uma eventual sobrecarga deste. Esta borda livre é passível de alteração pelo usuário.

Em condutos forçados, por serem mais homogêneos e simples de quantificação em relação aos canais, os quantitativos volumétricos serão dados pela Equação 3.37 a seguir.

$$V = L \cdot \pi (D \cdot e + e^2) \quad \text{Equação 3.37}$$

Onde  $V$  é o volume de aço,  $L$  o comprimento do trecho do conduto que possui diâmetro  $D$ , em metros e  $e$  é a espessura calculada para a chapa do conduto em metros. Esse valor multiplicado pela massa específica do aço de  $7860 \text{ kg/m}^3$  permite as estimativas de quantidades

O potencial energético de um aproveitamento deriva da fórmula de energia potencial,  $E$  gravitacional da física clássica, dado pela Equação 3.38:

$$E = m \cdot g \cdot H \quad \text{Equação 3.38}$$

Onde  $m$  é a massa do corpo sob efeito do campo gravitacional,  $g$ , a aceleração local da gravidade  $= 9,81 \text{ m/s}^2$  e  $H$ , altura em relação ao nível referencial.

A taxa de variação desse potencial em relação ao tempo como consequência do fluxo e queda disponível no aproveitamento fornece a potência bruta do aproveitamento dada pela Equação 3.39:

$$P_b = \rho \cdot Q \cdot g \cdot h_b \cdot \eta \quad \text{Equação 3.39}$$

Onde  $\rho$  é a massa específica da água,  $Q$ , a vazão turbinada,  $g$ , a aceleração local da gravidade  $= 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $h_b$ , queda bruta do aproveitamento dado pelo nível do reservatório e nível normal na saída do canal de fuga e  $\eta$  é o rendimento do grupo turbina e gerador.

Dessa forma, as potências perdidas em um aproveitamento devido à perda de carga são calculadas substituindo na Equação 3.39 a queda bruta,  $h_b$ , por  $h_p$  que é a soma das perdas de carga no trecho analisado. Ao longo de todo o circuito de adução a perda de carga é obtida pela soma de todas perdas distribuídas e locais conforme Equação 3.40:

$$h_p = h_d + h_l \quad \text{Equação 3.40}$$

Onde  $h_d$  e  $h_l$  são, respectivamente, perdas distribuídas e perdas localizadas.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. SOFTWARE**

A ferramenta a ser usada para o desenvolvimento desse estudo será o Microsoft Excel, produto do pacote Office da Microsoft, uma vez que este permite a inserção de diferentes parâmetros de forma independente e pode ser facilmente programado através da ferramenta Visual Basic Advanced para realizar as otimizações necessárias. Uma alternativa a esse método seria utilizar dados existentes e reconhecidamente bem-sucedidos de conjuntos de adução para calcular curvas de determinação do melhor arranjo hidráulico do ponto de vista energético e financeiro com base em ábacos ou criar equações com alguns fatores práticos que permitam o ajuste aos resultados.

Levando em consideração as alternativas e o objetivo do estudo, criar uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão e que permita o dimensionamento de circuitos de adução, o programa Excel se mostra adequado e suficiente para quaisquer desenvolvimentos futuros. Além disto, é uma ferramenta amplamente divulgada, de uso bastante simples e permite a customização visual de forma a criar uma interface amigável.

### **4.2. ESTUDOS DE ARRANJOS DE APROVEITAMENTOS**

O circuito de adução de um aproveitamento hidroelétrico de pequeno porte normalmente é composto por um trecho de baixa pressão, ou canal livre, uma câmara de carga com volume suficiente para garantir a partida e operação das turbinas nos primeiros minutos, uma tomada d'água dotada de grade para evitar a entrada de objetos e animais na turbina e danificá-la, comporta vagão (metálica com pistão hidráulico que garanta seu fechamento em casos de emergência) e comporta ensecadeira, mais simples com o objetivo de garantir a estanqueidade do circuito após seu fechamento com a comporta vagão, podendo esta ser usada em outro local. A Tomada d'Água normalmente é conectada à casa de força por meio de um conduto forçado metálico.

Conforme os objetivos determinados para este estudo, planeja-se estudar os circuitos compostos por canais como adução não forçada e condutos metálicos como adução forçada, pressurizada. No entanto, os arranjos apresentam grande variabilidade e podem ser

totalmente pressurizados, possuir chaminés de equilíbrio, galerias de adução de alta e baixa pressão. Na Figura 4-1 é apresentado, como exemplo, o arranjo geral da PCH Urtiga, a ser implantado no estado de Goiás, que possui além do barramento e as estruturas de passagem de cheias e desvio do rio, canal de adução, câmara de carga, conduto forçado e casa de força com turbinas e geradores.

A partir desta primeira ferramenta, soluções podem ser construídas para incorporar outras alternativas de arranjo para o circuito de geração.

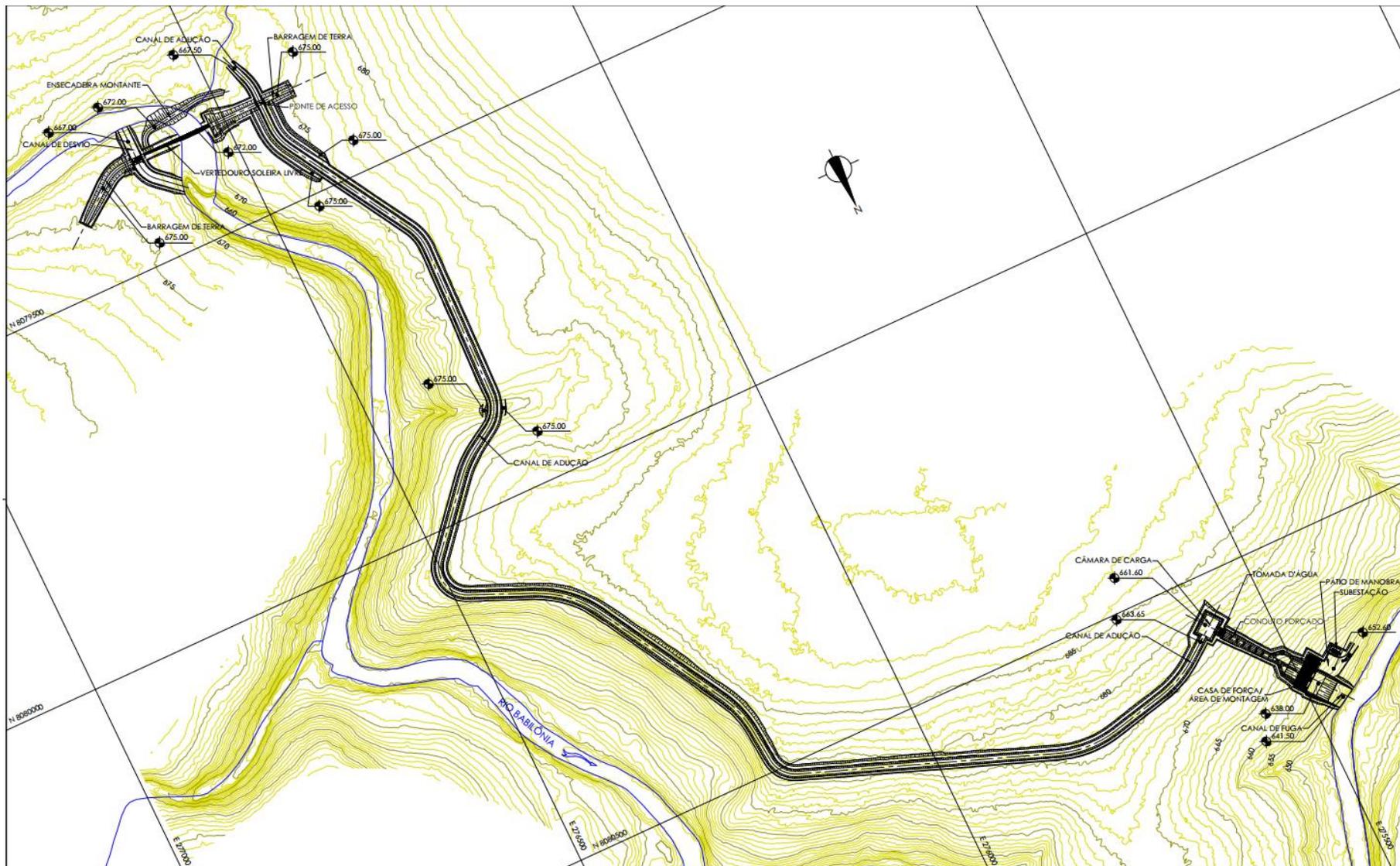


Figura 4-1: Arranjo geral da PCH Urtiga

Com este estudo busca-se obter auxílio à tomada de decisão por meio de uma ferramenta que leve em consideração as perdas de carga no canal, regidas pela equação de Manning, para determinar seu trajeto e declividade, e espera-se que a ferramenta permita estimar as perdas de carga distribuídas em condutos forçados.

O estudo de implantação de um aproveitamento normalmente acontece quando há um levantamento topográfico de precisão no sítio de implantação e o local do empreendimento já fora determinado na partição de queda do Estudo de Inventário Hidroelétrico. Dessa forma, o traçado em planta do traçado do canal de adução pode ser determinado de forma que acompanhe a topografia em cota e evite excessos de movimentações de terra para sua execução. Esta análise é feita com base em critérios técnicos e econômicos.

### **4.3. DIMENSIONAMENTO DE CANAIS DE ADUÇÃO**

Espera-se de um canal de adução uma geometria em planta majoritariamente comportada, ou seja, sem mudanças de direção bruscas que alterem bruscamente o perfil transversal de velocidades e facilite a formação de pequenos reservatórios de água em recirculação e pontos de erosão. A partir dessa premissa, o canal pode ser aproximado a um canal reto de comprimento igual ao canal real e o cálculo de perda de carga é realizado pela simples aplicação da equação de Manning. Nesta etapa, necessita-se de mais uma informação do sítio a respeito da espessura da camada de solo, uma vez que isso determina em que material, rocha ou solo, a seção molhada do canal se encontrará.

Na Figura 4-1, pode-se observar que o traçado do canal de adução acompanha as curvas de nível do terreno de forma a garantir a declividade necessária, reduzir custos de movimentações de terra e é composto majoritariamente por trechos retos e curvas suaves.

Os revestimentos do canal determinam qual é o valor do Manning a ser adotado de acordo com a rugosidade de cada material. Caso a seção do canal se encontre em solo, recomenda-se revestir o canal para evitar o rompimento dos taludes do canal. Normalmente os revestimentos em canais escavados em solo são mantas de material geotêxtil e acompanhadas de sistema de drenagem. O seu detalhamento foge ao escopo deste estudo e o que deve ser considerado, para efeitos de perdas energéticas, é que a manta apresenta rugosidade próxima ao concreto. No caso de seção hidráulica em rocha, tem-se duas opções: ou se mantém a rocha exposta, devendo se atentar para a perda d'água que pode ocorrer a depender das características da rocha do sítio, ou revestir a rocha com uma camada de concreto projetado. A Tabela 4-1 apresenta os valores do fator n de Manning que serão adotados estando estes de acordo com a literatura.

Tabela 4-1- Valores de Rugosidade (n) de Manning

<b>Revestimento</b>	<b>Valor de n</b>
Rocha exposta	0,035
Concreto	0,015
Manta geotêxtil	0,012

Fonte: Eletrobrás, 2000

Do ponto de vista geométrico, as seções serão trapezoidais por sua facilidade de execução e enorme aceitação nos diferentes aproveitamentos hidroelétricos de médio porte. As inclinações dos taludes do trapézio são definidas de acordo com o tipo, rocha ou solo, e competência geotécnica do ponto de vista de estabilidade. Por serem fatores dependentes da geotecnia, optou-se por colocá-los como variáveis passíveis de alteração por parte do usuário. Na Figura 4-2 observa-se a seção do canal de adução da PCH Urtiga, em rocha, com taludes de 1V:0,25H.

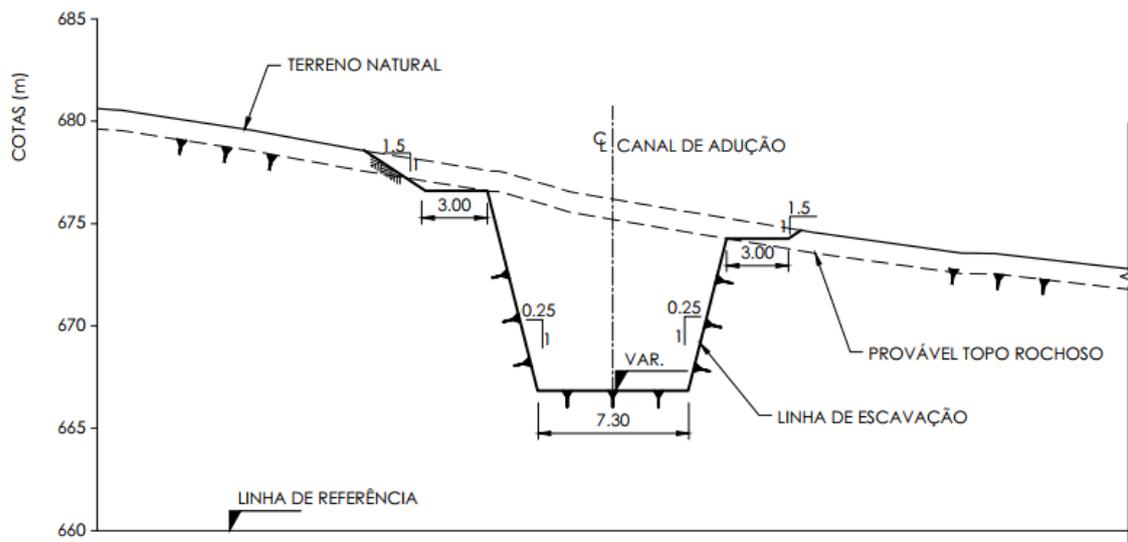


Figura 4-2: Seção transversal do canal da PCH Urtiga

Conforme citado anteriormente, a perda de carga influencia fortemente a geração de energia de aproveitamentos hidroelétricos. Logo deseja-se otimizar a seção no canal de forma que as perdas sejam mínimas. De acordo com a equação de Manning reescrita na forma da Equação 4.1, a declividade da linha de energia, ou perda de carga por unidade de comprimento, é inversamente proporcional ao raio hidráulico da seção. Ou seja, minimizar a perda de carga é maximizar o raio hidráulico. Essa otimização do raio hidráulico significa que a seção ótima é a maior área que pode se obter com o menor perímetro molhado possível, o que é condizente com a teoria da aderência, uma vez que um menor perímetro diminui a interface sólido-líquido onde se concentram as perdas por atrito.

$$Q = \frac{k_n}{n} AR_h^{2/3} I_f^{1/2} \quad \text{Equação 3.23}$$

$$Q = \frac{k_n}{n} AR_h^{2/3} I_f^{1/2} \quad \text{Equação 3.23}$$

$$I_f = \left( \frac{Qn}{AR_h^{2/3}} \right)^2 \quad \text{Equação 4.1}$$

Não obstante, para a determinação da seção ótima de escoamento, deve-se atentar para a velocidade, uma vez que a perda de carga cresce com o quadrado da velocidade de

escoamento. As velocidades máximas utilizadas na prática passada para cada tipo de revestimento são as seguintes:

- Canal em rocha, sem revestimento .....1,0 m/s
- Canal revestido em concreto projetado.....2,0 m/s
- Canal revestido com manta.....1,1 m/s

Deve-se considerar que o programa apresentará a melhor velocidade e conseqüente perda de carga para cada cenário estudado e estes valores servem como referência. Para o canal em rocha, sem revestimento, recomenda-se velocidade baixas, próximas de 1,0 m/s, para que as perdas não atinjam valores muito expressivos e impactem negativamente na produção de energia e também nos volumes de escavação (devido à alta declividade).

Para seções de escoamento em concreto projetado, velocidades superiores a 2,0 m/s são normais, uma vez que o valor de Manning é relativamente baixo.

Por fim, a velocidade máxima recomendada para canais com revestimento em manta, próximas de 1,0 m/s, visa preservar a integridade da estrutura, que não trabalha com velocidades elevadas.

#### **4.4. DIMENSIONAMENTO DE CONDUTOS FORÇADOS**

No dimensionamento de condutos forçados, além das perdas distribuídas, devem ser consideradas as perdas localizadas. As perdas localizadas se dão por efeitos de descolamento do fluxo, o que leva ao surgimento de zonas mais turbulentas, das paredes dos condutos causados por expansões, mudanças de direção, anteparos e demais obstáculos que causem este efeito.

Um circuito pressurizado é composto fundamentalmente por uma estrutura de controle, condutos ou galerias pressurizadas, turbinas hidroelétricas. Na Figura 4-3 é apresentado o arranjo básico do circuito de geração da PCH Urtiga

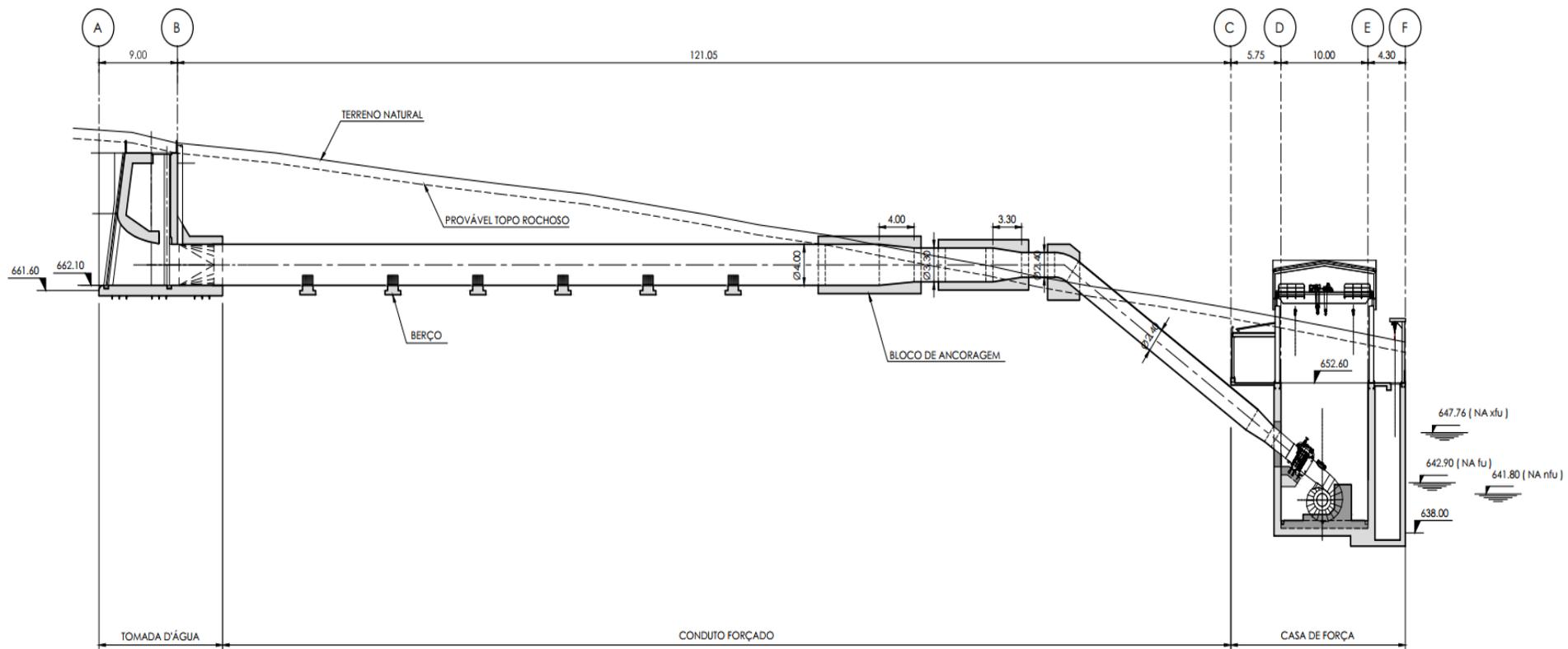


Figura 4-3: Perfil longitudinal - Circuito de Geração

A perda distribuída no conduto forçado dada pela Lei de Darcy-Weisbach é função de três fatores principais: diâmetro da tubulação, velocidade do escoamento e material. O material é o fator que define a rugosidade e rege as perdas por atrito na interface sólido líquido. No caso de aproveitamentos hidroelétricos o uso de condutos de aço com soldas inspecionadas com ultrassom é amplamente difundido de forma que a determinação da rugosidade relativa do circuito varie muito pouco e somente em alguns casos especiais. Equação 4.2.

$$I_f = \frac{\Delta H}{\Delta S} = \frac{f \cdot V^2}{8 \cdot R_h \cdot g} \quad \text{Equação 4.2}$$

O par diâmetro da tubulação e velocidade possuem grande variabilidade de acordo com cada aproveitamento e seu dimensionamento deve levar em consideração os requisitos da turbina, como regulação e velocidade do fluxo na entrada, os requisitos relacionados a carga hidráulica, uma vez que o conduto passará por situações de sobrepressão, bem como os requisitos de estabilidade estrutural.

Do ponto de vista energético e econômico, deseja-se dimensionar os condutos de forma que as velocidades sejam relativamente baixas e os diâmetros não sejam muito grandes, com intuito de reduzir custos de implantação que são muito maiores em obras metálicas do que nas obras de terra e concreto normalmente utilizadas em canais. Esse impasse entre duas necessidades contraditórias é vencido por meio de análise financeira dos ganhos energéticos em face aos custos de implantação de um conduto maior. Caso a geração extra proveniente de redução das perdas seja interessante, normalmente analisado o prazo de operação de 35 anos, opta-se por aumentar o diâmetro.

Nas ramificações do circuito, necessárias para alimentar com uma tomada d'água mais de uma turbina, deve-se buscar novos diâmetros compatíveis com a divisão de vazão, podendo ser simétrica ou não, dependendo da modulação das potências das turbinas, de forma que a velocidade do escoamento se mantenha a mesma, ou suficientemente próxima, pois assim se evita um ponto de perdas localizadas e reduz-se os possíveis efeitos de aumento da perda distribuída, já que a velocidade é, na Lei de Darcy-Weisbach, um fator quadrático. Na Figura 4-4 é apresentada a planta do circuito de geração da PCH Urtiga, onde pode-se observar as duas bifurcações necessárias.

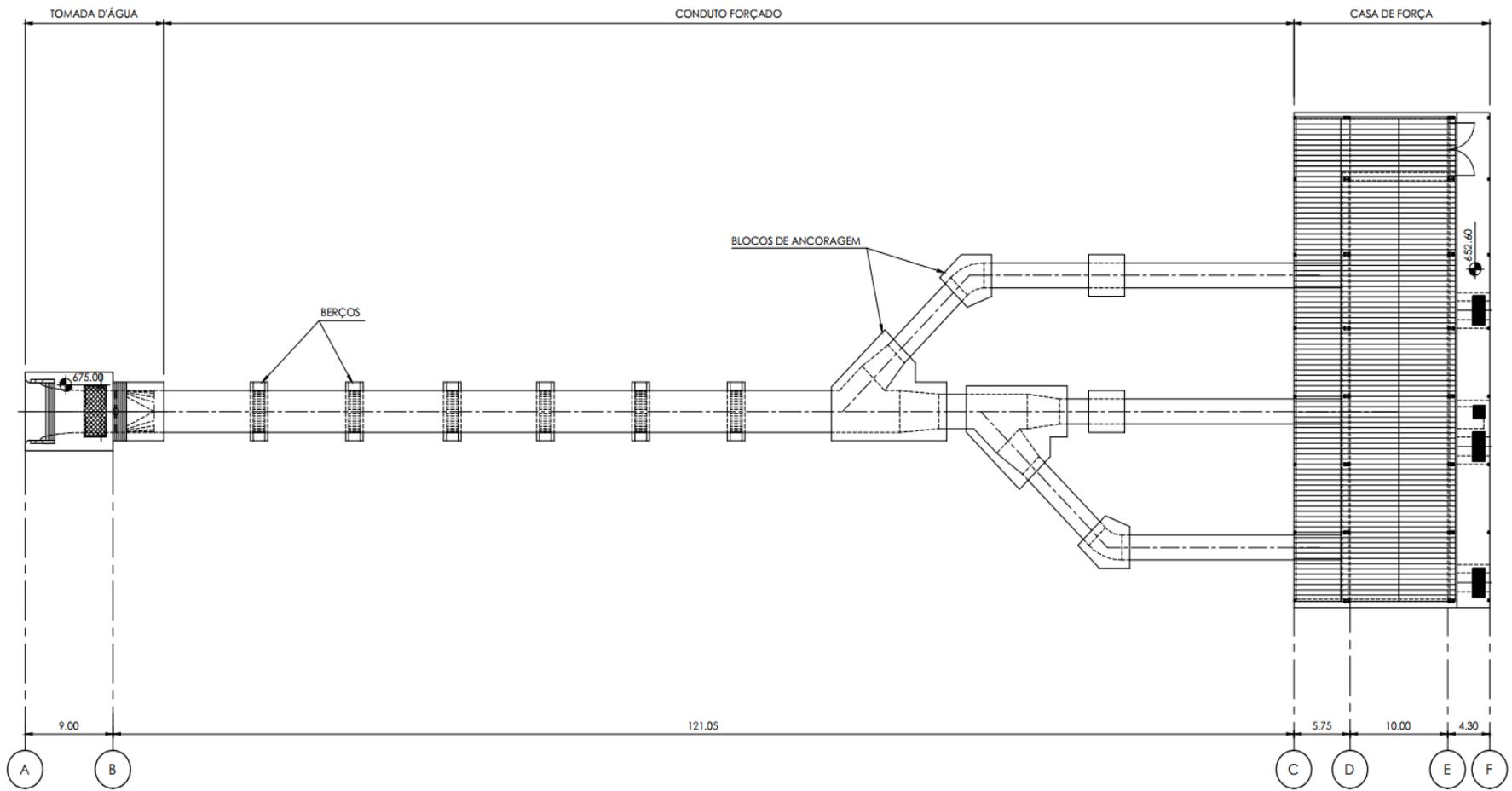


Figura 4-4: Planta - Circuito de Geração

Além das perdas por mudanças na seção, vazão e diâmetro nas bifurcações, neste caso específico, este é o primeiro ponto no circuito onde há mudança de direção, em planta, e contração. A mudança de direção possui valor de K, coeficiente de perda de carga localizada, dependente do raio da curva, diâmetro da tubulação e ângulo externo da curva. Para se evitar o aumento de perdas por arestas vivas, ou zonas de recirculação, as curvas devem obedecer a seguinte relação, conforme a Equação 4.3 (Idelchik,1986):

$$r_1 = r_0 + D \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde o seu raio interno,  $r_0$ , e externo,  $r_1$  devem ser distantes de um diâmetro D.

E o coeficiente K é calculado segundo a Tabela 4-2 disponibilizada no manual Eletrobrás em função do ângulo da curva.

Tabela 4-2: Relação entre coeficiente de perda de carga e ângulo da curva

ÂNGULO DE DEFLEXÃO	K
< 10°	0
10° a 15°	0,03
15° a 30°	0,06
30° a 45°	0,09
> 45°	0,13

Fonte: Eletrobrás, 2000

Para situações de contração, recomenda-se que o comprimento da contração seja igual ao maior diâmetro e o coeficiente K é dado pela relação entre a área das duas seções, conhecida como coeficiente de contração, conforme a Equação 4.4 (Porto, 2006).

$$K = \left(\frac{A_0}{A_1} - 1\right)^2 \quad \text{Equação 4.4}$$

Onde  $A_0$  é a área da seção de maior diâmetro e  $A_1$  a área de menor diâmetro.

Nas bifurcações o coeficiente K de perda de carga é igual a 0,25 quando há fluxo nas duas câmaras de bifurcação e, 1,20 quando o escoamento é feito somente para uma unidade. Além disso, a relação entre as áreas deve ser inferior a 2 (Eletrobrás, 2000)

Como não se pode saber quantos pontos de perdas localizadas haverá em um circuito, será feita uma tabela que acompanhará o programa com os coeficientes mais comuns em circuitos

de adução e o cálculo de perda de carga no circuito será a sobreposição dos diversos pontos de perda de carga localizada no circuito e as perdas distribuídas.

#### 4.5. DETERMINAÇÃO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO

Com base nos conhecimentos descritos no capítulo 3.7, deseja-se trazer as remunerações decorrentes da potência instalada estudada e perda de carga otimizada para os canais e condutos para o valor presente. Esse cálculo com base na engenharia financeira permite analisar as alternativas de implantação sob um mesmo critério. Dado a taxa mínima de atratividade do investidor, busca-se responder a questão de o que é melhor, reduzir os custos de implantação hoje e ter remunerações menores no futuro, ou aumentar o investimento hoje e ter remunerações maiores.

A determinação da seção que possui o maior valor presente líquido passa pela análise das perdas energéticas e comparação entre dois pares. Dessa forma, a energia anual média gerada em MWh/Ano deve ser calculada para cada seção na forma da Equação 4.5, onde  $Pot_{perdida}$  é a potência perdida devido à perda de carga na seção analisada e FC é o fator de capacidade do empreendimento, característica do comportamento hidrológico da bacia onde se encontra. O fator de capacidade é necessário para incorporar a sazonalidade anual do rio

$$Energia\ Gerada\ Anual = (Pot_{instalada} - Pot_{perdida}) * FC * 360\ dias * 24\ h/dia \quad Equa\c{c}\tilde{a}o\ 4.5$$

O fator de recuperação de capital é calculado a partir do tempo de recebíveis considerado, normalmente o tempo de concessão, bem como a taxa mínima de atratividade determinada investidor. De forma que aplicado esses fatores aplicados a Equação 3.36 fornecem a Equação 4.6, onde n é o tempo de concessão adotado.

O valor presente de cada investimento é consequência da aplicação da Equação 4.5 e Equação 4.6 à Equação 3.35.

$$FRC = \frac{TMA(1 + TMA)^n}{(1 + TMA)^n - 1} \quad Equa\c{c}\tilde{a}o\ 4.6$$

$$VPL = \frac{Energia\ Gerada * Tarifa}{FRC} \quad Equa\c{c}\tilde{a}o\ 4.7$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. OBTENÇÃO DE DADOS PRELIMINAR

O modelo foi configurado com foco na facilidade de caracterização de um empreendimento hidrelétrico de forma a fornecer, com precisão adequada, quais seriam as seções ótimas do canal de adução e do conduto forçado.

Devido à natureza complexa do processo de tomada de decisão e análise de alternativas em arranjos de hidrelétricas, buscou-se minimizar a quantidade de informações necessárias para a otimização. Assim, pode-se dividir as informações básicas em três grandes grupos que são inseridos no programa conforme a :

- Descrição básica do aproveitamento.
- Dados geotécnicos para o canal de adução;
- Critérios de modelagem financeira.

Projeto		PCH XXXX		
<b>Descrição básica do aproveitamento</b>			<b>Dados geotécnicos para o canal de adução</b>	
1. NA máx	814,0	m	1. Talude de escavação em solo	1,5 H:1V
2. NA jusante	747,0	m	2. Talude escavação em rocha	0,25 H:1V
3. Potência	3,0	MW	3. Espessura média da camada de solo	2,0 m
4. Vazão	4,1	m <sup>3</sup> /s		
5. Fator de capacidade	0,55			
<b>Critérios da modelagem financeira</b>				
1. Taxa mínima de atratividade	12%		5. Custo médio escavação em rocha	R\$ 45,00 /m <sup>3</sup>
2. Tempo de recebíveis	30	anos	6. Custo médio concreto projetado no canal	R\$ 1.200,00 /m <sup>3</sup>
3. Tarifa em análise	R\$ 220,00	por MWh	7. Custo médio manta geotêxtil	R\$ 50,00 /m <sup>2</sup>
4. Custo médio escavação em solo	R\$ 12,00	por m <sup>3</sup>	8. Custo médio do conduto em aço	R\$ 15,00 /kg

Figura 5-1: Dados preliminares do empreendimento

#### 5.1.1. DESCRIÇÃO BÁSICA DO APROVEITAMENTO

A descrição básica do aproveitamento contempla os dados de níveis operacionais em metros, potência instalada estimada em MW e fator de capacidade.

Os níveis operacionais, nível d'água de montante e jusante, permitem a determinação da queda bruta e são dados de simples obtenção para aproveitamentos que estão em fases iniciais de estudo. Caso não haja Estudo de Inventário Hidrelétrico para o rio e a partição de queda não esteja definida, uma boa estimativa é a obtenção dos níveis operacionais por meio do levantamento topográfico. Caso o aproveitamento se encontre em etapas mais avançadas, a queda pode ser definida por meio do perfil de linha d'água.

$$NA_{mon.} - NA_{jus.} = Queda Bruta = H_b \quad \text{Equação 5.1}$$

A potência instalada estimada é um dado de entrada definido pelo usuário e se faz necessário para o cálculo da vazão turbinada máxima. Em condições de projeto, a determinação da potência instalada é um cálculo complexo que envolve a análise de série de vazões, determinações do arranjo, perdas de carga, custo de turbinas e geradores e tarifas de energia. Logo, por critério de simplicidade aceita-se que a estimativa inserida pelo usuário é razoável e realista para as condições do aproveitamento.

$$Q(P) = \frac{P}{\rho g H_l \eta} \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde  $H_l$  é a queda bruta descontada a perda de carga, ou seja, a queda líquida. O fator de capacidade do aproveitamento é uma característica da sazonalidade das vazões na bacia e representa a energia média que pode ser gerada anualmente naquele aproveitamento. Este dado se faz necessário para manter a simplicidade do programa sem requisitar do usuário a inserção de uma série de vazões calculadas para o ponto de interesse. Caso a análise fosse realizada considerando apenas a potência instalada e não a potência média gerada, fator de capacidade igual a 1, haveria a superestimativa dos benefícios para a vazão turbinada máxima que ocorre apenas em alguns períodos do ano. A Figura 5-2 a seguir apresenta a relação entre as potências médias geradas e a garantia física. Nota-se que as potências geradas se distribuem em torno da garantia física conforme a alteração do regime de chuvas da bacia e pode ser considerada um evento de maior probabilidade e representatividade do aproveitamento.

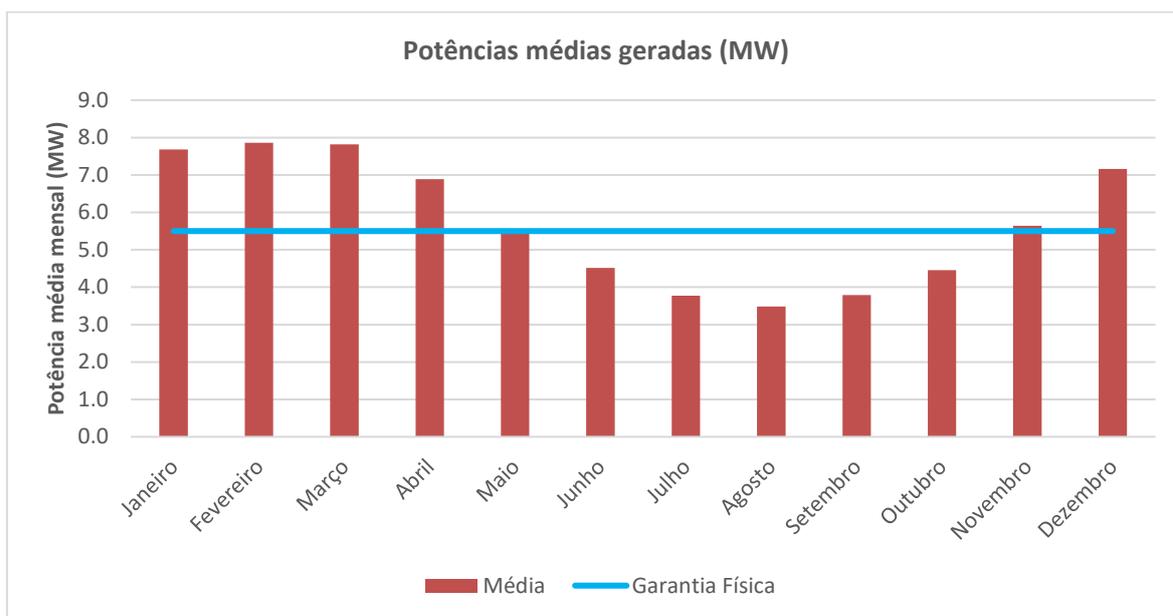


Figura 5-2: Comparativo entre potências geradas mensais e garantia física

### 5.1.2. DADOS GEOTÉCNICOS DO CANAL DE ADUÇÃO

Os dados geotécnicos da implantação do canal são utilizados para dois fatores. Primeiramente, a partir das condições de contorno inseridas no canal, as quais serão especificadas posteriormente, estimar em qual material, rocha ou solo. Em seguida, os parâmetros geotécnicos determinam os taludes que serão consideradas em cada material.

A definição de taludes e estudos de qualidade do solo ou rocha onde ocorre o escoamento, bem como as especificações dos materiais de proteção como manta geotêxtil, concreto projetado e demais dispositivos necessários para a implantação e operação, são de competência do campo de engenharia geotécnica e não são avaliados pelo programa.

Como recomendação de valores adotados na prática de projetos hidrelétricos, pode-se adotar taludes de inclinação 1V:1,5H para escavações em solo. Para rochas competentes, como basaltos e gnaisses, recomenda-se taludes de 1V:0,25H. Para rochas menos competentes, como arenitos, recomenda-se taludes de 1V:0,4H. Os valores adotados para os taludes do canal devem ser verificados pela equipe geotécnica no decorrer do avanço do projeto.

### 5.1.3. PARÂMETROS ECONÔMICOS

Os critérios de modelagem fornecem os custos estimados para cada material, as tarifas de energia praticadas, a taxa mínima de atratividade praticada pelo investidor e o período de recebíveis.

No caso de escavações, o custo é uma função da dificuldade de remoção do material, e geralmente são fornecidos pelas construtoras com base na experiência destas. As escavações em solo podem ser divididas em três tipos:

- Escavação tipo 1 - Material de fácil remoção, solos;
- Escavação tipo 2 – Material de remoção mais complexa, solos de alteração, rochas alteradas moles, entre outros.
- Escavação tipo 3 – Material de difícil remoção, uso de explosivos, remoção de maciços rochosos.

Como valores padrão da planilha, considera-se o custo por metro cúbico de escavação em solo, escavações tipo 1, com valor de R\$12,00 e para escavações em rocha, tipo 3, o valor de R\$45,00 por metro cúbico. Caso a seção se encontre em um material de alteração, pode-se simplesmente alterar o valor da escavação tipo 1 ou tipo 3, conforme o problema requisitar. Além disso, recomenda-se que a base de custo seja reavaliada periodicamente.

A determinação dos custos de aço do conduto, concreto projetado e sistema de manta geotêxtil, materiais em sua maioria provenientes de fornecedores, pode ser específica a cada aproveitamento e sua estimativa se mostrar fora da realidade devido à variação do câmbio e dos preços de commodities. No presente estudo, adotou-se custo de R\$15,00 para o kg de conduto em aço, R\$1200 o metro cúbico de concreto projetado, e R\$50,00 para o metro quadrado de manta, sem estimar os custos de sistemas de drenagem.

A tarifa de energia a ser comercializada pode ser estimada com base nos últimos leilões de energia. A tarifa considerada é de fundamental importância, pois pode determinar o valor limite que o investidor pode praticar e alterar os resultados das seções estimadas pelo programa. Os dados dos leilões realizados pelo portal da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) podem ser obtidos no caminho: [http://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso\\_rapido\\_header\\_publico\\_nao\\_logado/biblioteca\\_virtual?tipo=Resultado%20Consolidado&assunto=Leil%C3%A3o](http://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso_rapido_header_publico_nao_logado/biblioteca_virtual?tipo=Resultado%20Consolidado&assunto=Leil%C3%A3o).

A taxa mínima de atratividade, característica particular a cada investidor, representa o custo do capital mobilizado para o empreendimento. Em última instância, esta taxa determina o valor mínimo que justifique o aporte por parte do investidor. Esse valor é usado no cálculo do fluxo de caixa descontado para o empreendimento, base para análise de custo-benefício no longo prazo.

Por último, deve-se considerar o tempo em anos de recebíveis de dado empreendimento. O valor padrão adotado é de 30 anos, apesar de que a vida útil do empreendimento pode ultrapassar 100 anos.

## 5.2. DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO CANAL DE ADUÇÃO

Os parâmetros do canal de adução que devem ser inseridos pelo usuário irão determinar três fatores da análise de custo benefício. A perda de carga neste trecho, o custo de implantação estimado e as condições de contorno para a otimização.

Seleção qual estrutura dimensionar:		
Canal de Adução	Conduto Forçado	RESULTADOS
Dimensionamento do Canal de Adução		
1. Comprimento	1300	m
2. Declividade média na área de implantação	0,1	V/H
3. Bermas de acesso	3,0	m
4. Bermas de transição	3,0	m
5. Borda livre	1,0	m
6. Talude em solo	1,5	H/V
7. Talude em rocha	0,25	H/V
Seção		
8. Largura mínima da base desejada	5,0	m
9. Altura mínima do escoamento desejada	4,0	m

Figura 5-3: Parâmetros de dimensionamento do canal de adução

O comprimento do canal (item 1) e os taludes adotados (itens 6 e 7) irão determinar a perda de carga total no canal e, conseqüentemente, a potência perdida e energia média perdida para cada par de largura e altura de seção estudada.

A declividade média do terreno na área de implantação, bermas de acesso, bermas de transição entre os materiais, borda livre e taludes (itens 2, 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente) irão determinar o custo de implantação de cada seção. A declividade média do terreno na área de implantação (item 2) é definida pela morfologia do terreno. Recomenda-se que ela seja obtida considerando um desnível no terreno de 10 m, ou um valor maior caso a base da seção estudada extrapole demais este valor inicial. Por fim, a declividade é obtida dividindo

o desnível (neste exemplo 25 m) pela distância entre as duas curvas de nível, conforme a Figura 5-4.

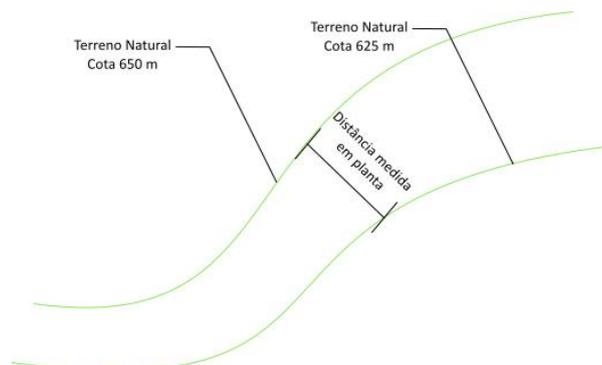


Figura 5-4: Determinação da declividade média do terreno

Por fim, insere-se o par de largura e altura mínima desejada (itens 8 e 9). Esses fatores podem depender da vazão, material da seção e logísticas de construção. O programa irá computar 10.000 seções, equivalente a um aumento máximo de 10 m em relação a cada parâmetro para pares incrementais de 0,1 m.

### 5.3. DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DO CONDUTO FORÇADO

De maneira similar ao processo de definição de parâmetros de dimensionamento do canal de adução, parâmetros equivalentes devem ser inseridos conforme Figura 5-5 para o dimensionamento e otimização da seção do conduto forçado. Neste caso, busca-se estimar quais são as espessuras, diâmetro, custos de implantação e perda de carga para o conduto.

**Selecione qual estrutura dimensionar:**

Canal de Adução

Conduto Forçado

RESULTADOS

---

**Dimensionamento do Conduto Forçado**

1. Comprimento do trecho em conduto	300	m	
2. Comprimento até a bifurcação	300	m	
3. Nº de tomadas d'Água	3,0		
4. Rugosidade do material	0,00015	m	
5. Sobrepressão adotada	40%		
6. Tensão de escoamento do aço	380,0	MPa	
7. Critério de regulação da máquina	LV/H menor que:		15,0

Ajuda

Figura 5-5: Parâmetros de dimensionamento do conduto forçado

O comprimento do trecho em conduto (item 1) é necessário para se calcular a velocidade máxima admissível. Para isso, usa-se o critério de regulação da máquina (item 7) no qual o produto do comprimento pela velocidade média de escoamento dividido pela queda bruta deve ser inferior a um valor previamente definido. Este fator está relacionado à garantia de regulação da máquina sem necessidade de chaminé de equilíbrio, envolvendo o tempo de fechamento da máquina cujo estudo é complexo e não faz parte do escopo desse projeto. Conforme o manual da eletrobras, a verificação de regulação do circuito sem chaminé de equilíbrio passa pela estimativa da constante de aceleração do escoamento ( $t_h$ ) no circuito de alta pressão de acordo com a seguinte relação:

$$t_h = \frac{v L}{g H_b} \quad \text{Equação 5.3}$$

Para valores de aceleração inferiores a 3 segundos, não há necessidade de chaminé de equilíbrio. Ou seja, para valores de  $L V / H_b$  menores que aproximadamente 27. Entretanto, a experiência mostra que com a diminuição da inércia das máquinas, valores próximos de 15 são aceitáveis.

Decorre do processo de fechamento a sobrepressão no circuito causada pelo golpe de aríete. Essa sobrecarga e aumento de pressão interna é considerada máxima no trecho final do conduto, imediatamente antes da casa de força. Esse valor (item 5) é um dos critérios que determina a espessura mínima do conduto e foi considerado 40% da queda bruta.

Para o cálculo da espessura se considera também a resistência, tensão de escoamento do aço do conduto (item 6). Utilizando as recomendações da ABNT NBR-12296 (1991), calcula-se a espessura mínima pela Equação 3.25 e Equação 3.26. Não sendo inferior a 6,35 mm, ou 1/4".

$$e = \frac{H_t D}{200 \sigma_{adm} K_f} + C_s \quad \text{Equação 3.25}$$

$$e_{mín} = \frac{D + 500}{400} \quad \text{Equação 3.26}$$

A rugosidade absoluta do material (item 4) é utilizada para determinar o fator de atrito do escoamento e a perda de carga consequente. A rugosidade é consequência do material e do

processo de fabricação. Para os aços usados em condutos forçados de aproveitamentos hidrelétricos adota-se o valor de 0,15 mm.

Os critérios de comprimento até a bifurcação e número de tomadas (itens 2 e 3) são parâmetros derivados da modulação da casa de força e um aspecto econômico não avaliado nesse estudo. A modulação da casa de força determina quantas máquinas devem ser alimentadas por condutos individuais e o aspecto econômico citado é consequência da vazão, comprimento e diâmetro do conduto necessário para alimentar as máquinas. Em última instância o número de tomadas define a vazão no maior trecho do conduto e o item 2 define seu comprimento.

Os fatores relacionados ao arranjo são complementados pela definição da quantidade de bifurcações em cada conduto, cabendo ao usuário selecionar a configuração da Figura 5-6 que mais se aproxima da sua condição.

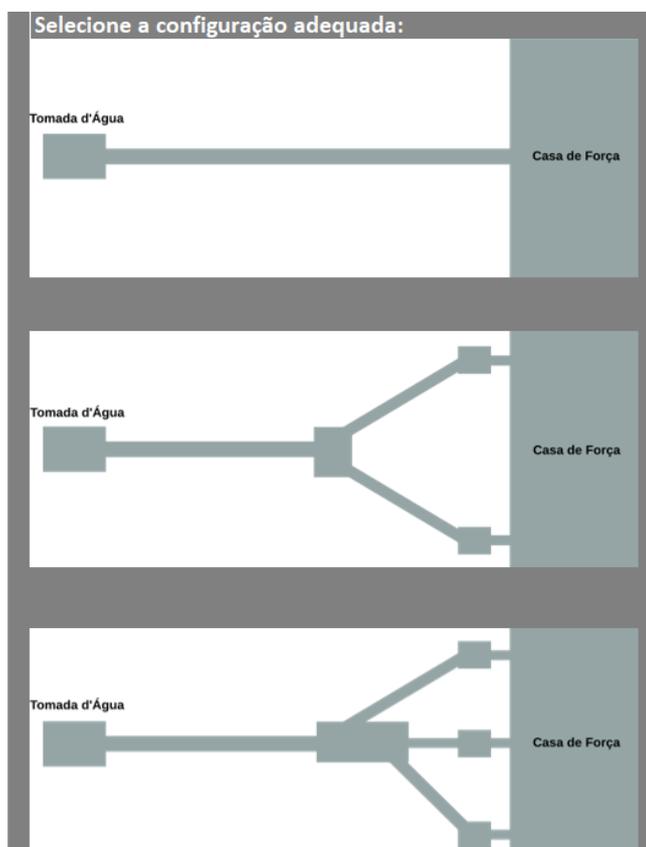


Figura 5-6: Arranjos de condutos forçados e bifurcações

Ao selecionar uma das três imagens, surgirá uma janela, Figura 5-7, na qual devem ser inseridos os comprimentos de cada trecho do conduto. Supõe-se que o trecho 1 é o mesmo comprimento do item 2, mas esse valor pode ser alterado conforme necessidade do usuário. Definidos os comprimentos, pode-se iniciar o processo de otimização.

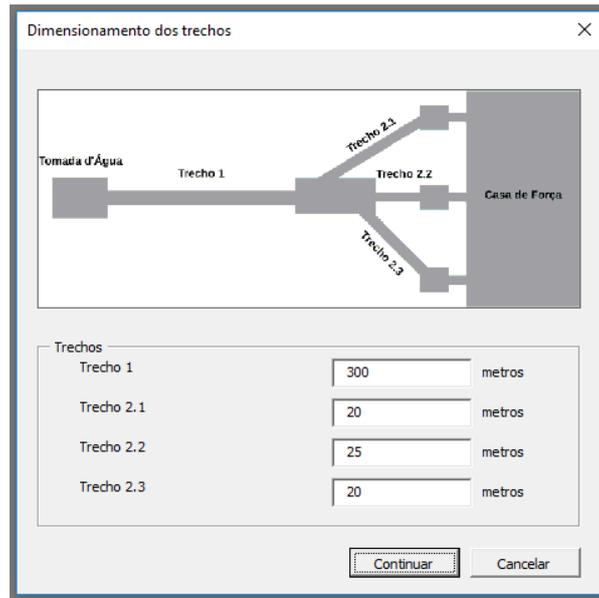


Figura 5-7: Definição dos trechos para um arranjo de duas bifurcações

#### 5.4. DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO CANAL DE ADUÇÃO

Definidos os parâmetros citados no capítulo 5.2, o usuário deve selecionar o botão verde da Figura 5-3 e serão definidas as características do escoamento, qual material escavado da seção e se há algum tipo de proteção (concreto projetado ou manta geotêxtil).

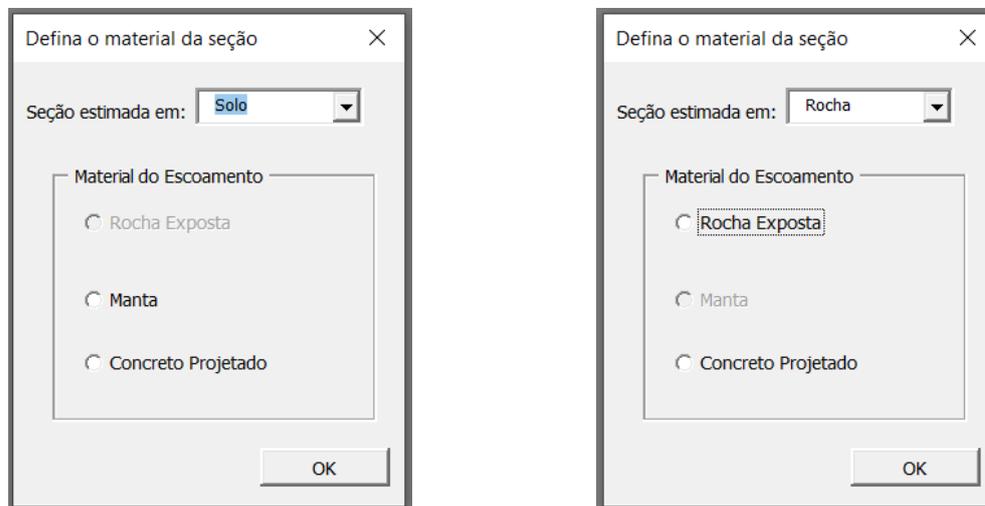


Figura 5-8: Definição do material da seção do canal de adução

Esse processo define as estimativas geométricas e taludes da seção, bem como o valor de Manning a ser utilizado, conforme Tabela 4-1.



Figura 5-9: Janela de Otimização de Canais de Adução

Na Figura 5-9 são apresentados os dados básicos da otimização do canal de adução. Conforme as condições de contorno de etapas anteriores, estima-se a quantidade de material de cada solução.

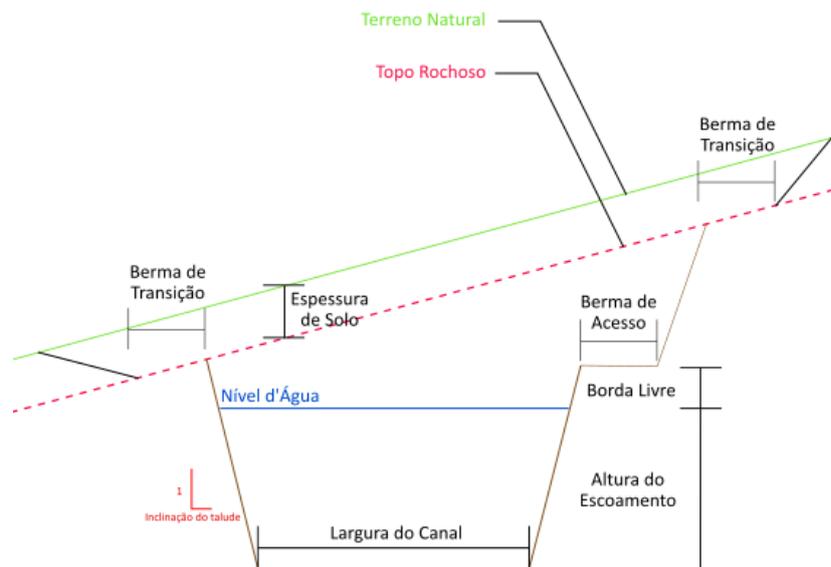


Figura 5-10: Parâmetros da seção escavada em rocha

Na Figura 5-10 são representados os parâmetros definidos no capítulo 5.2 que serão utilizados para a estimativa de volumes a partir das áreas da Figura 5-11.

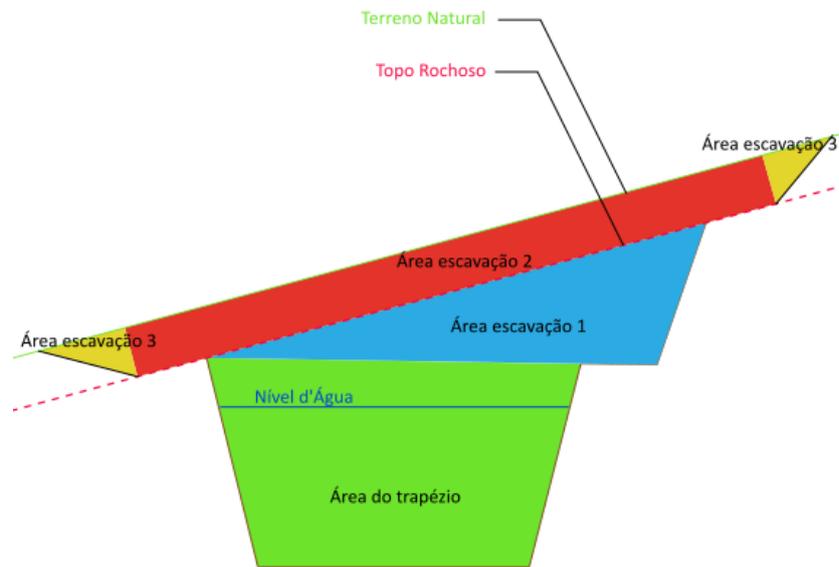


Figura 5-11: Áreas consideradas na seção em rocha

No caso de seção em solo, os parâmetros de 5.2 considerados se encontram na Figura 5-12.

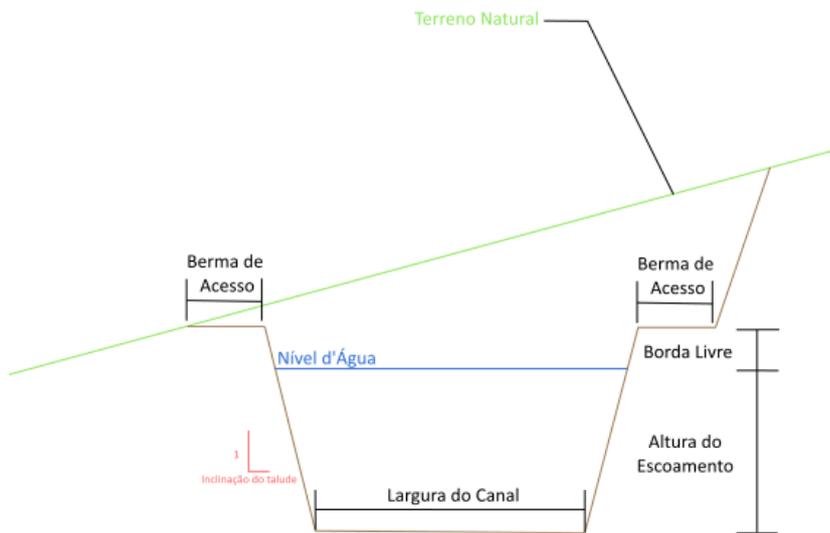


Figura 5-12: Parâmetros da seção escavada em solo

E as áreas consideradas se reduzem à área do trapézio e área de escavação 1, conforme a Figura 5-13.

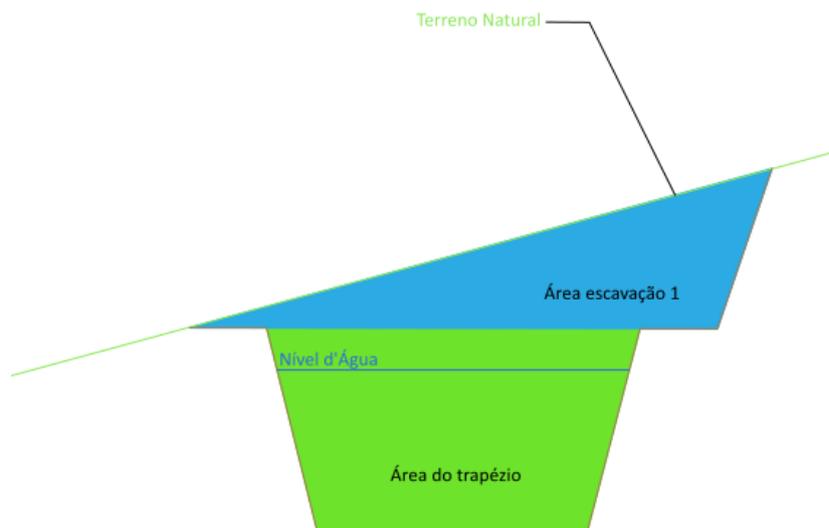


Figura 5-13: Áreas consideradas na seção em solo

Para o cálculo da área de manta geotêxtil calcula-se o comprimento dos taludes e do fundo do canal e multiplica-se esse valor pelo comprimento do canal. No caso do concreto projetado calcula-se a mesma área considerada no caso de manta geotêxtil, porém adiciona-se uma terceira dimensão, a espessura do concreto projetado, em 7 cm.

Ao escolher para exibir os detalhes do cálculo o usuário pode ter acesso aos parâmetros que são utilizados como apoio para cada iteração do programa.

Cálculos Iterativos			Estimativas de Volume		
1. Largura da base	2.00	m	1. Área do trapézio	10.44	m <sup>2</sup>
2. Altura do escoamento	2.60	m	2. Área escavação 1	2.37	m <sup>2</sup>
3. Área do escoamento	6.89	m <sup>2</sup>	3. Área escavação 2	25.95	m <sup>2</sup>
4. Raio Hidráulico	0.94	m	4. Área escavação 3	6.14	m <sup>2</sup>
5. Perda de carga	0.62	m	5. Área em rocha	<b>12.81</b>	m <sup>2</sup>
6. Potência perdida	24.77	kW	6. Área em solo	<b>32.09</b>	m <sup>2</sup>
7. Energia perdida	217.11	MWh	7. Volume total em rocha	16654.67	m <sup>3</sup>
8. Custo da energia perdida	47.76	x10 <sup>3</sup> R\$	8. Volume total em solo	41712.87	m <sup>3</sup>

Figura 5-14: Base para cálculos iterativos e estimativas de volumes

Dados de apoio			Manta e concreto projetado		
$Y = a * X + b$					
	a	b			
1. Terreno	0.1		1. Perímetro de tratamento	9.42	m
2. Talude em rocha após berma	4	-27.2	2. Espessura do concreto	0.07	m
3. Inclinação do talude em solo ( $\beta$ )		0.59	3. Volume de concreto	857.36	m <sup>3</sup>
4. Inclinação do talude em rocha ( $\theta$ )		1.33	4. Área em manta	12248.07	m <sup>2</sup>
5. Inclinação do terreno ( $\alpha$ )		0.10			
6. Inclinação do talude do canal ( $\theta_c$ )		1.33			
7. Largura da escavação em rocha		6.80			
8. Altura perpendicular entre os terrenos		1.99			
9. Largura do triângulo de escavação 1		3.75			
10. Largura do triângulo de escavação 2		2.42			
11. Comprimento do retângulo de escavação em solo		13.04			
	x	y			
12. Fim do talude em rocha	6.97	0.70			

Figura 5-15: Base para cálculo das geometrias da escavação e materiais de proteção

Os cálculos iterativos feitos pelo programa para a escolha da seção ótima do canal são descritos no fluxograma da Figura 5-16. De forma analítica, pode-se descrever o processo como:

1. Coleta de informações básicas e critérios de modelagem financeira;
2. Largura inicial definida pela condição de contorno;
3. Cálculo da seção de maior Valor Presente Líquido (VPL) para cada largura;
4. Definição da largura ótima e altura ótima;
5. Incremento do passo de 0,1 m na largura e retorno aos itens 3 e 4;
6. Fim da análise após rodar todos os casos.

Ao finalizar o processo iterativo, os últimos valores de largura ótima e altura ótima são inseridos nos campos da Figura 5-9 e replicados na aba Resultados.

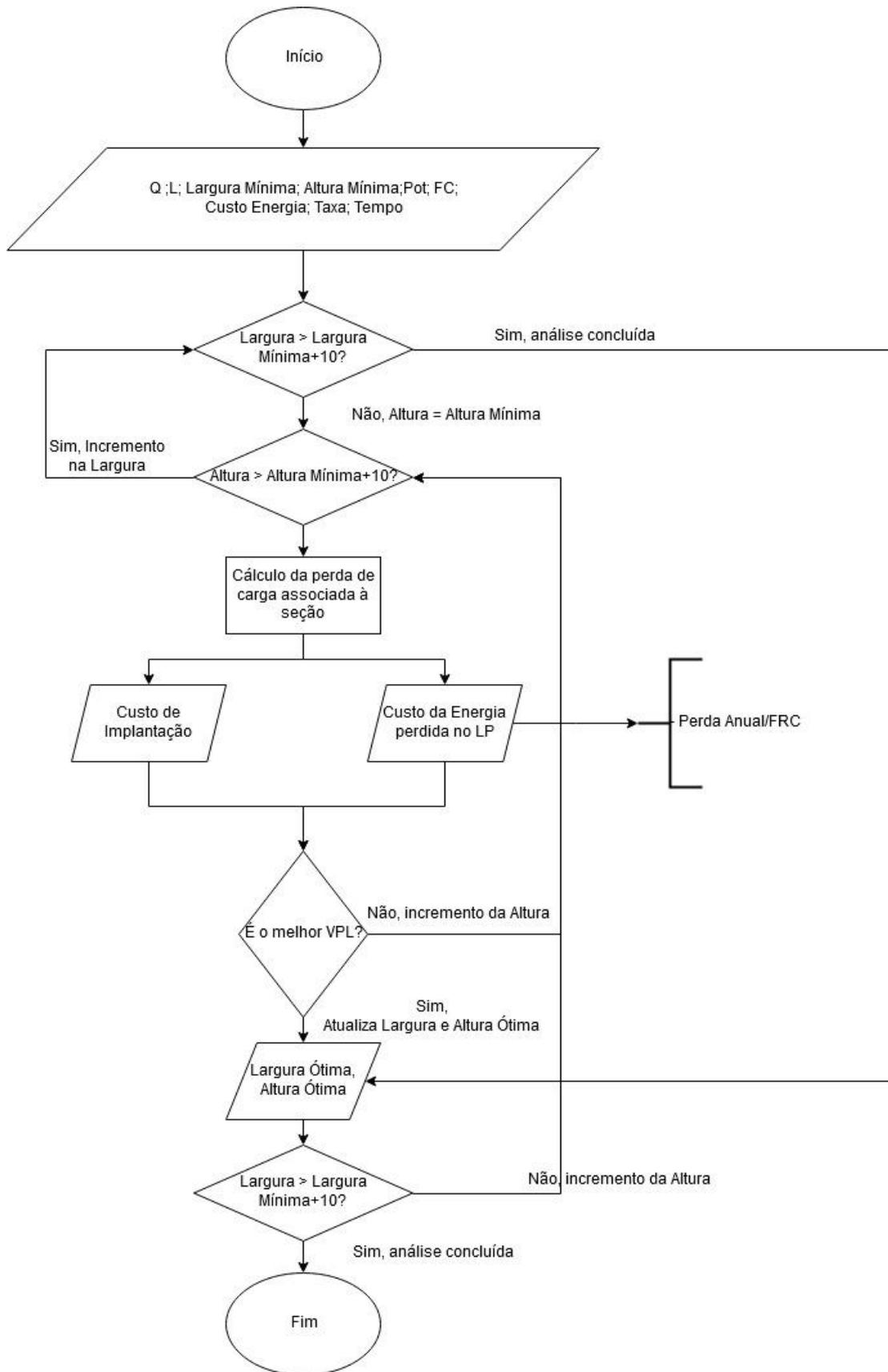


Figura 5-16: Fluxograma de otimização da seção de canais de adução

## 5.5. DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO CONDUTO FORÇADO

Definidos os parâmetros em 5.3, e o comprimento de cada trecho de conduto forçado a ser dimensionado, o processo de otimização e dimensionamento é resumido na janela seguinte, Figura 5-17, na qual são apresentados os diâmetros, velocidade e perdas de cargas associadas a cada trecho definido na etapa da Figura 5-7..

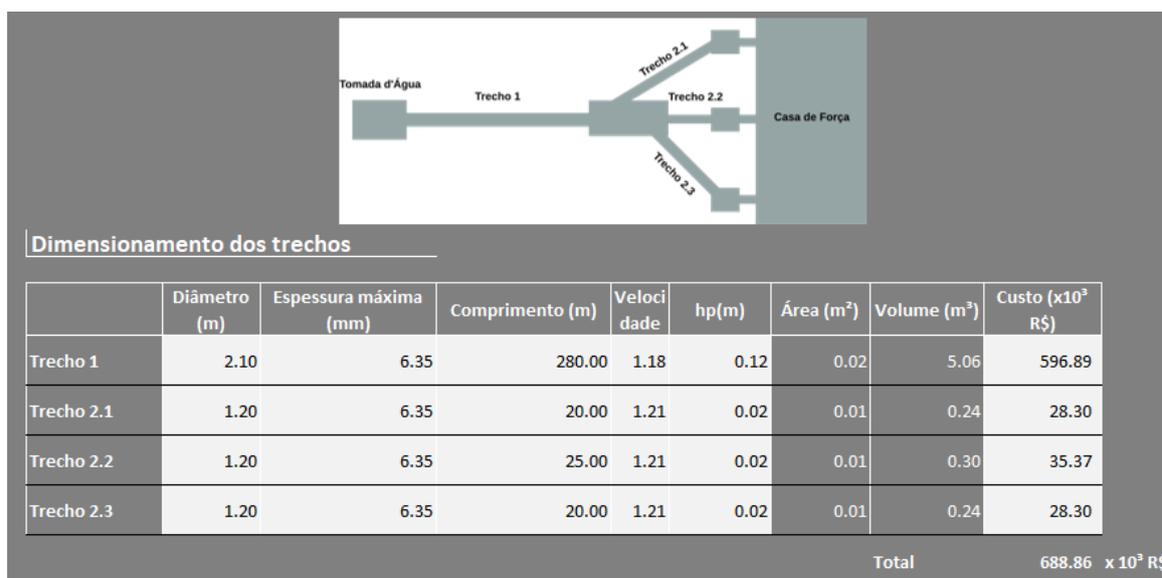


Figura 5-17: Comprimento, custo e perda de carga para cada trecho do conduto

Para os arranjos com apenas uma bifurcação, a linha do Trecho 2.3 não estará preenchida, visto que se possui apenas dois trechos finais. Para os arranjos sem bifurcação, apenas a linha Trecho 1 estará preenchida, pelo mesmo motivo citado.

A Figura 5-18 apresenta o detalhamento do Trecho 1, uma vez que devido a sobrepressão, as espessuras podem ser menores nos trechos iniciais, onde esta é menor, dependendo da verificação da Equação 3.25. Não haverá detalhamento somente em casos de diâmetros relativamente grandes em relação a carga, devido a análise da condição de autoportante dada pela Equação 3.26 .



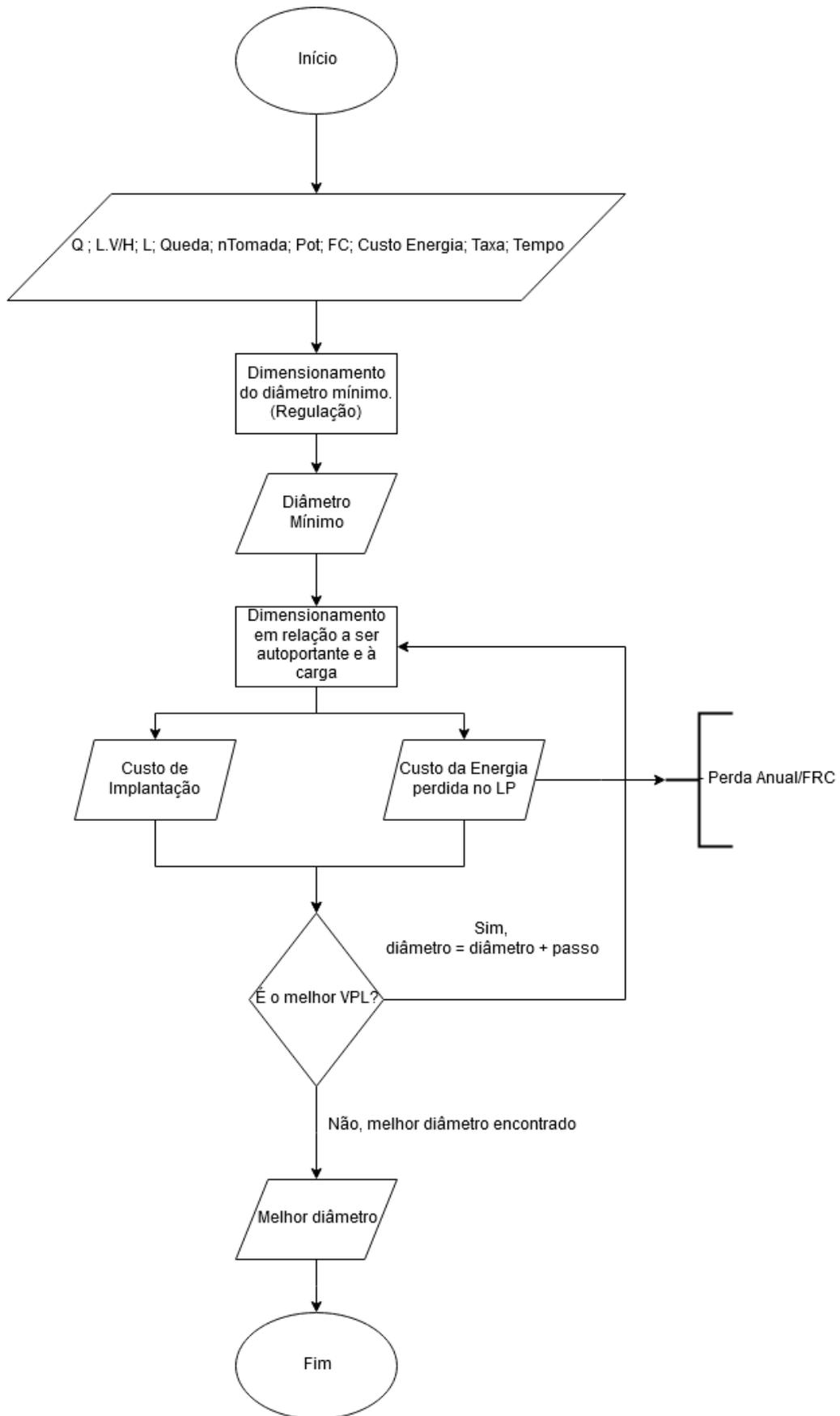


Figura 5-19: Fluxograma de otimização da seção do conduto

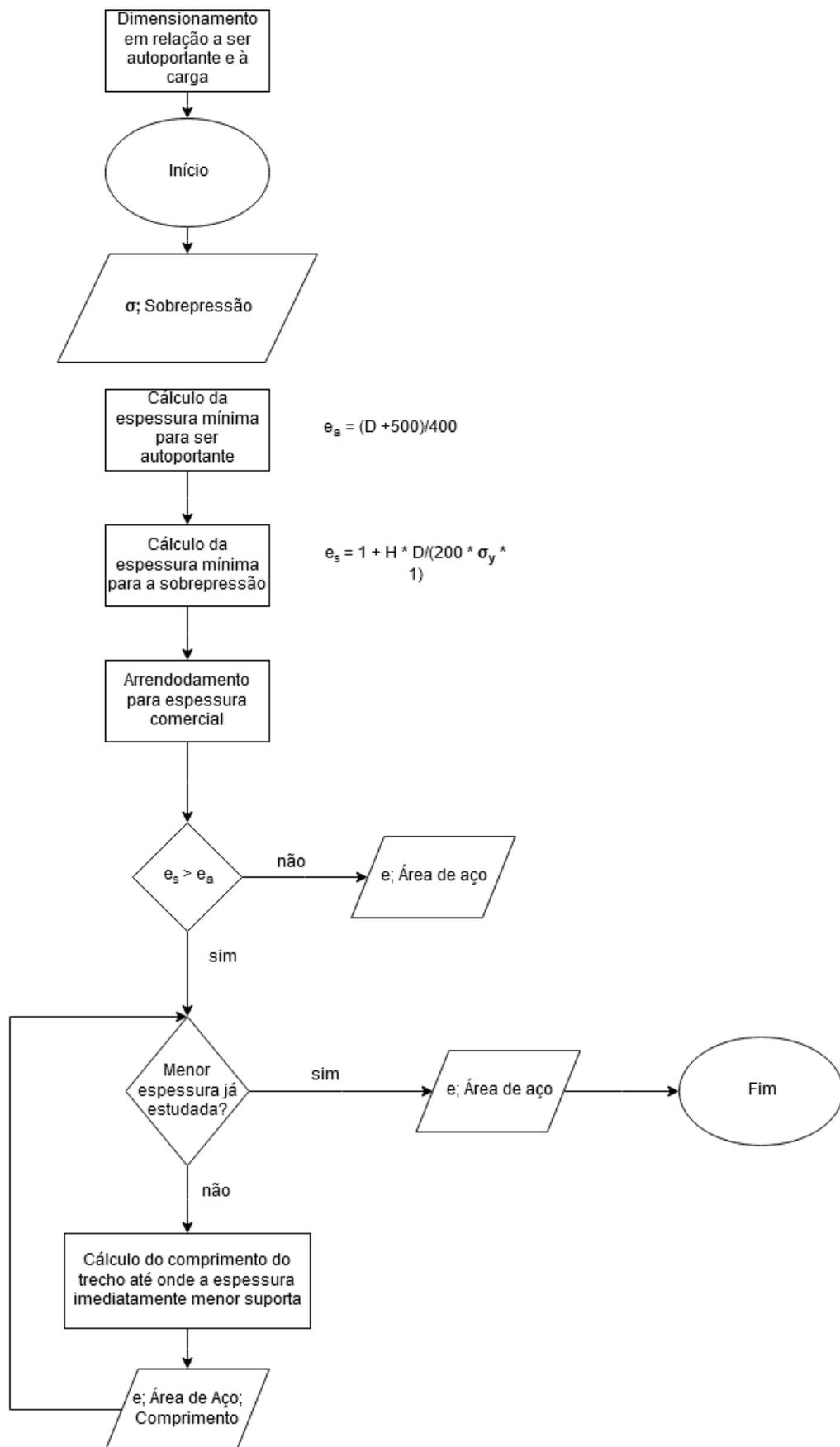


Figura 5-20: Fluxograma do cálculo da espessura para condutos

Por fim, os resultados obtidos nas etapas anteriores são consolidados na aba Resultados, Figura 5-21.

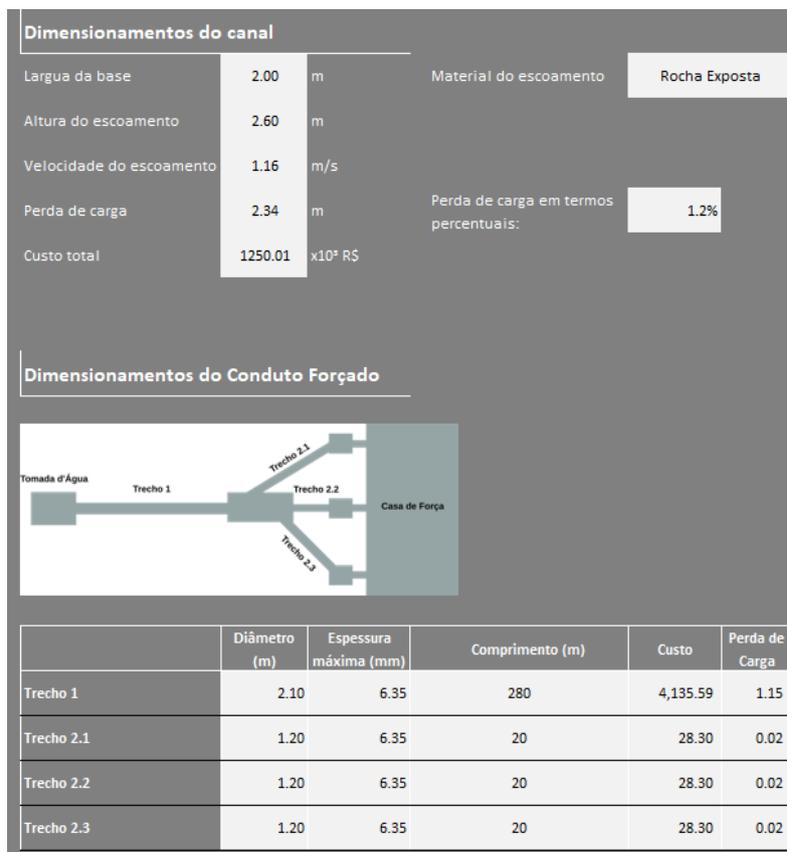


Figura 5-21: Consolidação de Resultados

Ainda que o programa seja eficiente do ponto de vista de fornecer um estudo de custo-benefício por meio da análise de fluxo de caixa descontados para empreendimentos hidrelétricos, para que a simplicidade fosse mantida foram feitas algumas aproximações que serão comentadas.

### 5.6. APROXIMAÇÕES REALIZADAS

Por se tratar de um programa que servirá como uma ferramenta comparativa de auxílio a tomada de decisão, foram adicionadas aproximações de forma a reduzir a necessidade de *inputs* e cálculos por parte do usuário.

A primeira aproximação que é considerada na planilha é o fator de capacidade. Esse número é consequência de estudos hidrológicos da bacia e da conclusão dos estudos energéticos do aproveitamento, algo que demandaria inúmeras informações do usuário e faria com que o uso do programa desenvolvido nesse projeto fosse desnecessário. Além disso, se supõe que as gerações dos próximos 30 anos serão fixas.

Atrelada à aproximação do fator de capacidade, a perda de carga a ser considerada na geração média do aproveitamento foi estimada em uma parcela da perda de carga calculada para os eventos de geração máxima. Por se tratar de um arranjo com reservatório a montante, os controles do escoamento se encontram no final do canal de forma que a perda de carga para condições que não a máxima, para a qual a declividade do canal foi definida, implicaria o estudo de remanso para o canal. Esse estudo pode ser feito no programa HEC-RAS fazendo estimativas de níveis no final do canal, para a vazão correspondente a geração média, até que a perda de carga seja compatível com o nível operacional de montante.

Ainda no canal houve estimativas de morfologia e geologia que podem impactar a validade da otimização desta estrutura. A primeira, morfológica, se trata da declividade média transversal da área de implantação do canal, que foi considerada constante em todo comprimento do canal. E a segunda, é a suposição de camada de solo constante.

As demais estruturas de um circuito de derivação, estruturas de controle, câmara de cargas e tomadas d'água não foram consideradas, pois as perdas de carga envolvidas são muito pequenas em relação as perdas no canal e no conduto. Dessa forma, a tomada de decisão em relação a essas estruturas não é feita, na maioria das vezes, em torno de uma análise de custo-benefício, adotando-se a menor estrutura compatível.

No estudo de fluxo de caixa descontado, fundamental para a valoração de benefícios futuros no tempo atual, não foram considerados os custos de manutenção, nem as correções pela inflação. O que é uma aproximação razoável uma vez que a otimização passa por comparação entre seções de mesma ordem de grandeza.

## **5.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE**

Para avaliar a sensibilidade da ferramenta, estudou-se a implantação do canal de adução da PCH Urtiga em diferentes cenários. O primeiro cenário seria o dimensionamento do canal em rocha, o segundo seria o dimensionamento do canal em rocha com concreto projetado no fundo e nos taludes, por último, supôs o canal implantado em uma região com topo rochoso muito profundo, ou seja, canal em solo.

Além disso, o dimensionamento do canal em rocha e solo foi avaliado para diferentes fatores de capacidade. Considerou-se nestes casos diferentes cenários de valor do MWh para avaliar o desempenho do programa diante dos cenários otimista (R\$ 250,00), pessimista (R\$ 180,00) e conservador (R\$ 220,00). Demais análises de sensibilidade podem ser realizadas, caso seja necessário. Os parâmetros de fator de capacidade também foram avaliados para a seção em

rocha e solo. Os resultados desse estudo estão a seguir na Figura 5-22, Figura 5-23 e Figura 5-24.

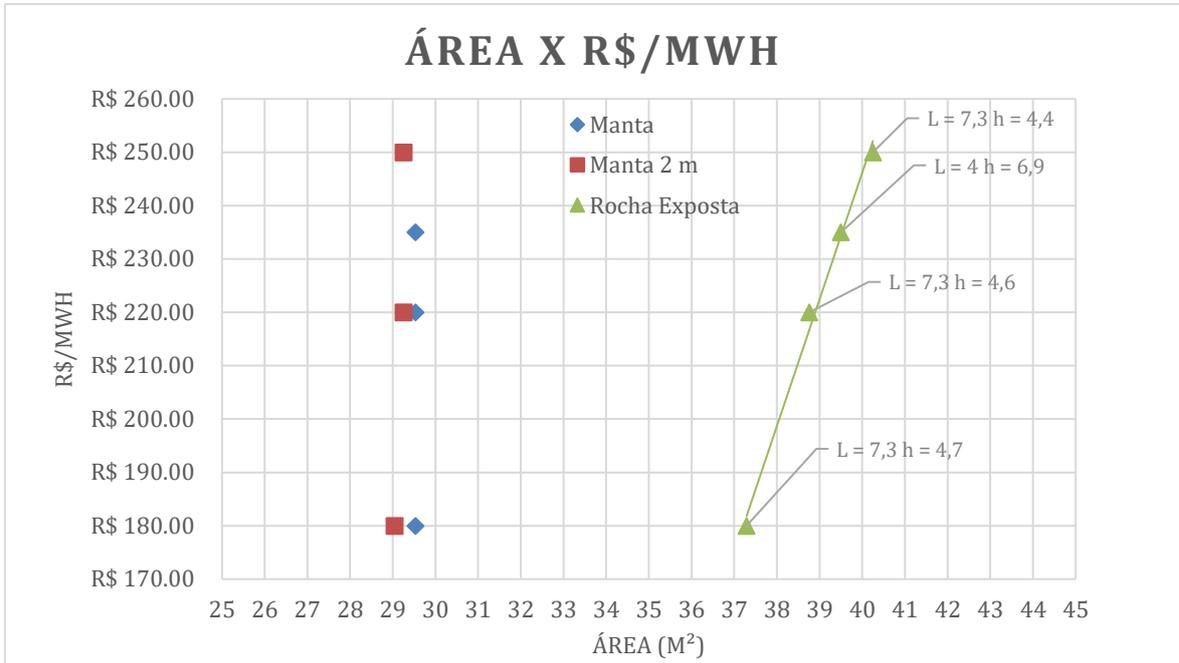


Figura 5-22: Comparativo entre a área fornecida para diferentes geologias

Conforme se observa na Figura 5-22, mudando a geologia da região de implantação do arranjo, a seção escolhida sofre grande variação. Mantidas as condições de contorno a área da seção sai da ordem de 38 m<sup>2</sup> para 29 m<sup>2</sup>, ou seja, há um aumento significativo da velocidade devido a redução do Mannig considerado. Variou-se a condição de contorno para base com 2 m para verificar se haveria alguma alteração da seção, porém como as seções em manta são limitadas a 1,10 m/s a área obtida foi muito próxima independente do valor do MWh.

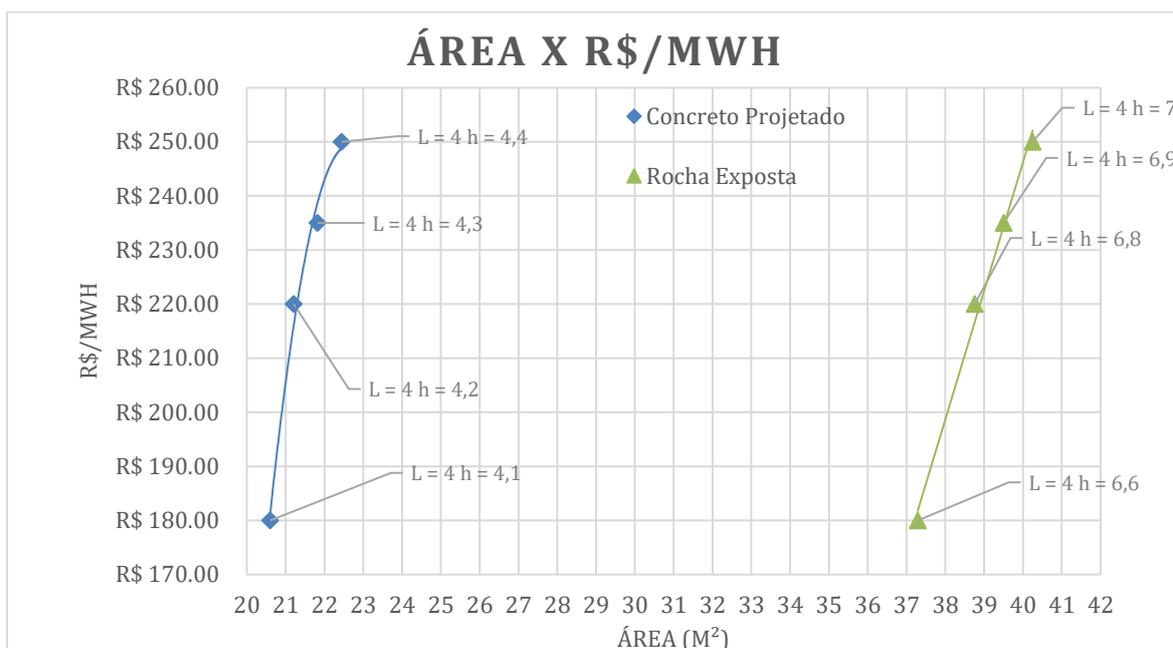


Figura 5-23: Comparativo entre o benefício de reduzir o valor de Manning por meio de proteção. Na Figura 5-23 observa-se que optando por proteger uma seção em rocha, a seção escavada diminuirá significativamente devido a redução do valor de Manning e consequente redução da perda de carga, ainda que as velocidades aumentem muito.

Além disso, observa-se que no caso de seções em rocha, a alteração do valor do MWh representa ganhos mais significativos e o programa opta por aumentar a seção em uma taxa maior do que na seção protegida. Isso se deve a dois fatores, primeiro há o custo do material a ser projetado que tão significativo quanto o comprimento do canal e seção deste, segundo que com a proteção, atinge-se um ponto de benefícios reduzidos. Ou seja, o benefício de seção projetada com concreto é mais significante do que o aumento desta seção.

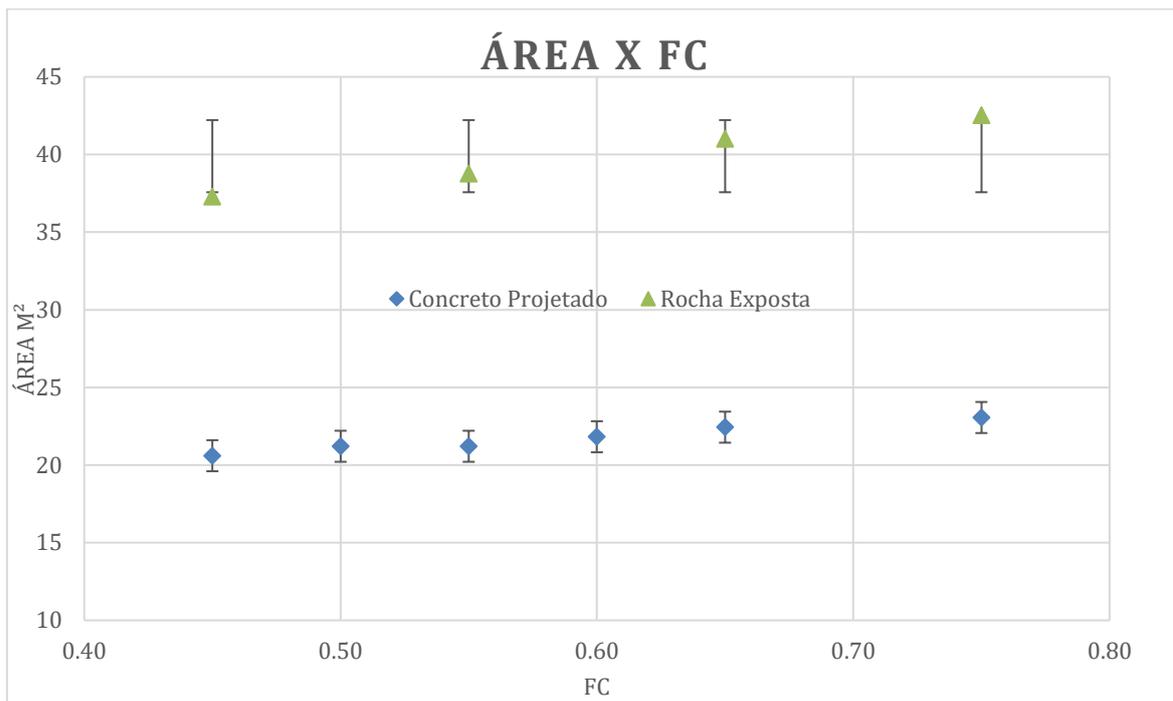


Figura 5-24: Comparativo entre diferentes fatores de capacidade

Na figura é possível observar que apesar de haver influência do fator de capacidade, esta é muito sutil de forma que as áreas das seções escolhidas não variam mais que 15%. No caso de sistemas de proteção, a diferenciação da seção de acordo com o fator de capacidade é ainda mais sutil.

## **6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

O estudo consistiu na busca de uma solução ótima para seções de canais de adução e condutos forçados em arranjos de aproveitamentos hidrelétricos. Para isto, foram utilizados os conceitos de hidráulica básica para o cálculo da perda de carga em cada trecho e conhecimentos de caráter prático para quantificar e precificar o custo de implantação de cada solução. Diante disso, utilizou-se da engenharia financeira e métodos de programação para obter, com precisão adequada à estudos preliminares, a alternativa de implantação com a melhor relação custo benefício.

Pode-se concluir que os objetivos gerais e específicos foram alcançados e que as aproximações realizadas não interferem na ordem de grandeza dos resultados.

Tendo como base os conceitos e metodologias definidos neste estudo, entende-se ser possível desenvolver a ferramenta e ampliar seu escopo de atuação, ainda que tais escolhas possam reduzir a simplicidade. As seguintes premissas e variáveis poderiam ser trabalhadas em nova versão:

- Inserir a série vazões médias mensais;
- Definição dos canais em trechos, com morfologia e geologia variável;
- Inserir estimativas das perdas de carga localizadas;
- Inserir demais cálculos financeiros como inflação e Taxa Interna de Retorno;
- Otimizar os cálculos por métodos numéricos de convergência;
- Inserir outros elementos que fazem parte de sistemas de adução, como chaminés de equilíbrio e túneis.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akan, A O. Open channel hydraulics. Amsterdam Boston: Elsevier/BH, 2006.

Porto, Rodrigo de Melo. “Hidráulica Básica”. 4. Ed – EESC-USP, 2006.

Chow, Ven T. “Open-channel hydraulics”. Caldwell, N.J: Blackburn Press, 1959.

Chanson, Hubert. “The hydraulics of open channel flow: an introduction; basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures”. Amsterdam Boston: Elsevier Butterworth Heinemann, 2004.

Pitchard et al. “Introdução À Mecânica Dos Fluidos”. 8. Ed – LTC, 2014

Idel’chik, I. E., and M. O. Steinberg. “Handbook of hydraulic resistance”. New York: Begell House, 1996.

Eletrobrás. Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas. 2000. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1991). NBR 12296: Dimensionamento de condutos forçados para pequenas centrais hidrelétricas. Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Singhal M. K., Arun Kumar. “Optimum Design of Penstock for Hydro Projects” Vol. 4, No. 4, 2015, pp. 216-226. doi: 10.11648/j.ijjepe.20150404.14. International Journal of Energy and Power Engineering.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). “Consumo Anual de Energia Elétrica por classe (nacional)”. 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional>

Organização das Nações Unidas (ONU). “Analysis Of The Voluntary National Reviews Relating To Sustainable Development Goal 7”. 2018. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg7>

Resultados de leilões de energia, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Disponível em: [http://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso\\_rapido\\_header\\_publico\\_nao\\_logado/biblioteca\\_virtual?tipo=Resultado%20Consolidado&assunto=Leil%C3%A3o](http://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso_rapido_header_publico_nao_logado/biblioteca_virtual?tipo=Resultado%20Consolidado&assunto=Leil%C3%A3o).

Berk, Jonathan B.; DeMarco, Peter; Harford, Jarrad. “Fundamentals of Corporate Finance”, 3rd Edition, Pearson, 2015

**ANEXO 1**

**ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO EM SEÇÕES DE CANAIS DE ADUÇÃO E  
CONDUTOS FORÇADOS EM APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS**

**MATHEUS BRITO BRAGA**

**ORIENTADOR: ARTHUR TAVARES SCHLEICHER**

**COORIENTADOR: DANILO JORGE SANTOS**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA CIVIL**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2019**

## 1. CANAL

```
Sub otimizacaoCanal_2()  
Application.ScreenUpdating = False  
Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Canal de Adução")  
Set largura = ws.Range("C28")  
Set altura = ws.Range("C29")  
Set LarguraOtm = ws.Range("C11")  
Set AlturaOtm = ws.Range("C12")  
Set minLargura = Sheets("Menu").Range("C27")  
Set minAltura = Sheets("Menu").Range("C28")  
Set velocidade = Sheets("Menu").Range("C29")  
Set velocidadeObs = ws.Range("C18")  
'determina vazao  
Range("E2").Value = Sheets("Menu").Range("C6").Value  
'determinar FRC  
taxa = Sheets("Menu").Range("C9").Value  
tempo = Sheets("Menu").Range("C10").Value  
FRC1 = (taxa * (1 + taxa) ^ tempo) / (((1 + taxa) ^ tempo) - 1)  
'energia média anual  
potInstalada = 1000 * Sheets("Menu").Range("C5").Value  
fatorCapacidade = Sheets("Menu").Range("C7").Value  
precoEnerg = Sheets("Menu").Range("C11").Value  
  
largura.Value = minLargura.Value  
altura.Value = minAltura.Value  
step = 0.1  
  
If ws.Range("C16").Value = "Manta" Then  
    manta = True  
End If  
  
Do While largura.Value <= (minLargura.Value + 10)  
    Do While altura.Value <= (minAltura.Value + 10)  
        'manta  
        veloOK = False
```

```

If manta Then
  If velocidadeObs.Value < 1.1 Then
    veloOK = True
  End If
Else
  veloOK = True
End If
'atualizar vazao
Set hp = Range("C19")
If hp.Value < 0.2 * Range("E3").Value Then
  vazao1 = 1000000 * ws.Range("E4").Value / (9810 * (ws.Range("E3").Value - hp.Value))
  Range("E2").Value = vazao1
  vazao = 1000000 * ws.Range("E4").Value / (9810 * (ws.Range("E3").Value - hp.Value))
  Range("E2").Value = vazao
End If
'energia
perdaDePot = ws.Range("C34")
potGer = (potInstalada - perdaDePot) * fatorCapacidade
If potGer > 0 Then
  ValorEnergia = potGer * precoEnerg * 365.25 * 24 / 1000000

'custos
custoTotal = ws.Range("I15").Value

'valor presente
ValorPresente = -custoTotal + (ValorEnergia / FRC1)

If ValorPresente > melhorVPL And veloOK Then
  melhorVPL = ValorPresente
  LarguraOtm.Value = largura
  AlturaOtm.Value = altura
End If
End If
altura.Value = altura.Value + step
Loop
largura.Value = largura.Value + step
altura.Value = minAltura.Value

```

Loop

'atualiza os quantitativos para a melhor seção

largura.Value = LarguraOtm.Value

altura.Value = AlturaOtm.Value

Application.ScreenUpdating = True

'analise do dimensionament

MsgBox "Análise concluída"

If LarguraOtm.Value = minLargura.Value Then

    MsgBox "Recomenda-se a redução da largura mínima"

End If

If Round(altura.Value, 2) = Round((minAltura.Value + 5), 2) Then

    MsgBox "Recomenda-se aumentar a altura mínima do escoamento"

End If

End Sub

Sub dimen2()

Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Canal de Adução")

Set largura = ws.Range("C28")

Set altura = ws.Range("C29")

Set LarguraOtm = ws.Range("C11")

Set AlturaOtm = ws.Range("C12")

Set minLargura = Sheets("Menu").Range("C27")

Set minAltura = Sheets("Menu").Range("C28")

Set velocidade = Sheets("Menu").Range("C29")

Set velocidadeObs = ws.Range("C18")

Set talude = ws.Range("C13")

Set vazao = ws.Range("E2")

AA = vazao.Value / velocidade.Value

Z = talude.Value

Lb = minLargura.Value

$h = (-Lb + (Lb * Lb - 4 * Z * (-AA)) ^ (0.5)) / (2 * Z)$

altura.Value = h

custo = ws.Range("I15").Value

End Sub

## 2. CONDUTO

Public FS As Double

Public comprimento As Double

Public tensaoFS As Double

Public queda As Double

Public Function Rey(D As Double, V As Double) As Double

KVisc = 0.0000010023

Rey = D \* V / KVisc

End Function

Public Function areaD(diametro As Double) As Double

areaD = (WorksheetFunction.Pi \* diametro \* diametro) / 4

End Function

Public Function dimCorrespondente(area As Double) As Double

dimCorrespondente = (4 \* area / WorksheetFunction.Pi) ^ (1 / 2)

End Function

Public Function espessuraMin(diametro As Double) As Double

espessuraMin = (diametro \* 1000 + 500) / 400

End Function

Public Function verEspessura(diametro As Double) As Double

Dim Ltrecho As Double

Set Menu = ThisWorkbook.Sheets("Menu")

Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Conduto Forçado")

Set tension = Menu.Range("C38")

Ltrecho = Menu.Range("C34").Value

FS = 1.7

tensaoFS = tension.Value / FS

S = Sobrepressao(Ltrecho)

verEspessura = (S \* diametro \* 1000 / (200 \* tensaoFS \* 1)) + 1

End Function

```

Public Function calcEspessura(espessuraPreliminar As Double, espessuraVer As Double,
inicio As Range) As Double
i = 1
e1 = inicio.Value 'e1 = espessura 1
Do While espessuraPreliminar > e1 Or espessuraVer > e1
If e1 = "" Then
e1 = "Espessura maior que valores analisados"
Exit Do
End If
e1 = inicio.Offset(0, i).Value
i = i + 1
Loop
If TypeName(e1) = "Double" Then
calcEspessura = e1
Else
MsgBox "Espessura maior que valores analisados", vbOKOnly
End If
End Function

Public Function Sobrepressao(trecho As Double) As Double
Set Menu = ThisWorkbook.Sheets("Menu")
Set sobreP = Menu.Range("C37")
Set comp = Menu.Range("C33")
queda = Menu.Range("C3").Value - Menu.Range("C4").Value
comprimento = comp.Value
Sobrepressao = (sobreP.Value + 1) * (queda / comprimento) * trecho
End Function

Public Function espessuraAnterior(espessura As Double, inicio As Range) As Double
e1 = inicio.Value 'e1 = espessura 1
Do While espessura > e1
If e1 = "" Then
e1 = "Espessura maior que valores analisados"
Exit Do
End If

```

```

eAnt = e1
e1 = inicio.Offset(0, i).Value
i = i + 1
Loop
espessuraAnterior = eAnt
End Function

Public Function limpar()
Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Conduto Forçado")
ws.Range("B29:C36").ClearContents
ws.Range("e29:e36").ClearContents
End Function

Public Function dimConduto(diam1 As Double, vazao As Double)
Dim eaux As Double
Dim AreaMin As Double
Dim ep1 As Double
Dim eVer As Double
Dim e1 As Double
Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Conduto Forçado")
Set Menu = ThisWorkbook.Sheets("Menu")
Set sobreP = Menu.Range("C37")
ep1 = (diam1 * 1000 + 500) / 400 'ep = espessura preliminar
v1 = vazao / areaD(diam1)
eVer = verEspessura(diam1)
e1 = calcEspessura(ep1, eVer, ws.Range("R10"))
cleaner = limpar()
ws.Range("C29").Value = comprimento
ws.Range("C29").Offset(0, -1).Value = e1
ws.Range("C29").Offset(0, 2).Value = areaD((diam1 + 0.002 * e1)) - areaD(diam1)
ws.Range("C21").Value = diam1
i = 0
eaux = e1
If eVer > ep1 Then
Do While eaux > ep1

```

```

eAnt = espessuraAnterior(eaux, ws.Range("R10"))
S = ((eAnt - 1) * 200 * tensaoFS) / (diam1 * 1000)
comprimentoeAnt = S / ((sobreP.Value + 1) * (queda / comprimento))
'comprimentoeAnt = (S - queda) / (sobreP.Value * queda / comprimento) ' comprimento
espessura anterior
areaAco = areaD((diam1 + 0.002 * eAnt)) - areaD(diam1)
ws.Range("C30").Offset(i, 0).Value = Round(comprimentoeAnt)
ws.Range("C30").Offset(i, -1).Value = eAnt
ws.Range("C30").Offset(i, 2).Value = areaAco
eaux = eAnt
i = i + 1
Loop
End If
End Function
Sub dimCondutoForc()
Set Menu = ThisWorkbook.Sheets("Menu")
Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Conduto Forçado")
Set vazao = Menu.Range("C6")
Set lvh = Menu.Range("E39")
Set comp = Menu.Range("C33")
Set nTomadas = Menu.Range("C35")
queda = ws.Range("G3").Value
comprimento = comp.Value
Dim AreaMin As Double
Dim diametro As Double
Dim diametroOtimo As Double
Vmax = (lvh.Value * queda) / comprimento
AreaMin = (vazao.Value / nTomadas.Value) / Vmax
diam1 = Application.WorksheetFunction.RoundUp(dimCorrespondente(AreaMin), 1)
diametro = diam1
potInstalada = Menu.Range("C5") * 1000
fatorCapacidade = Menu.Range("C7")
precoEnerg = Menu.Range("C11")

```

```

'determinar FRC
taxa = Menu.Range("C9").Value
tempo = Menu.Range("C10").Value
FRC1 = (taxa * (1 + taxa) ^ tempo) / (((1 + taxa) ^ tempo) - 1)
continue = True
step = 0.1
Do While diametro < diam1 + 10
    'atualizar vazao
    Set hp = Range("G22")
    If hp.Value < 0.2 * Range("G3").Value Then
        vazao1 = 1000000 * ws.Range("G4").Value / (9810 * (ws.Range("G3").Value -
hp.Value))
        Range("G2").Value = vazao1
        vazao = 1000000 * ws.Range("G4").Value / (9810 * (ws.Range("G3").Value -
hp.Value))
        Range("G2").Value = vazao
    End If
    dimensionamento = dimConduto(diametro, Range("G2").Value)
    custoTotal = ws.Range("I37").Value * Menu.Range("C35").Value

    perdaDePot = ws.Range("G23") * Menu.Range("C35").Value
    potGer = (potInstalada - perdaDePot) * fatorCapacidade
    If potGer > 0 Then
        ValorEnergia = potGer * precoEnerg * 365.25 * 24 / 1000000
        'custos
        'valor presente
        ValorPresente = -custoTotal + (ValorEnergia / FRC1)

        If ValorPresente > melhorVPL Then
            melhorVPL = ValorPresente
            diametroOtimo = diametro
            diametro = diametro + step

```

```

'ElseIf ValorPresente < melhorVPL And potGer > 0 Then
    continue = False
Else
    diametro = diametro + step
End If
End If
Loop
ws.Range("C21").Value = diametroOtimo
If hp.Value < 0.2 * Range("G3").Value Then
    vazao1 = 1000000 * ws.Range("G4").Value / (9810 * (ws.Range("G3").Value -
hp.Value))
    Range("G2").Value = vazao1
    vazao = 1000000 * ws.Range("G4").Value / (9810 * (ws.Range("G3").Value -
hp.Value))
    Range("G2").Value = vazao
End If

dimensionamento = dimConduto(diametroOtimo, Range("G2").Value)

If ws.Range("H20").Value <> 0 Then
Call outrosDiam
End If
End Sub
Sub outrosDiam()
Set Menu = ThisWorkbook.Sheets("Menu")
Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Conduto Forçado")
Set vazao = Menu.Range("C6")
Set nTomadas = Menu.Range("C35")
Dim AreaMin As Double
Dim diam1 As Double
Dim ep1 As Double
Dim eVer As Double

```

```

'gato
LBirfuca = Menu.Range("C34").Value
Menu.Range("C34").Value = Menu.Range("C33").Value
'fim do gato
n = ws.Range("H20").Value
V = ws.Range("C22").Value
AreaMin = ((vazao.Value / n) / nTomadas.Value) / V
diam1 = Application.WorksheetFunction.RoundUp(dimCorrespondente(AreaMin), 1)
ep1 = (diam1 * 1000 + 500) / 400 'ep = espessura preliminar
eVer = verEspessura(diam1)
e1 = calcEspessura(ep1, eVer, ws.Range("R10"))
If n = 2 Then
ws.Range("C15").Value = diam1
ws.Range("C16").Value = diam1
ws.Range("C15").Offset(0, 1).Value = e1
ws.Range("C16").Offset(0, 1).Value = e1
Else
ws.Range("C15").Value = diam1
ws.Range("C16").Value = diam1
ws.Range("C17").Value = diam1
ws.Range("C15").Offset(0, 1).Value = e1
ws.Range("C16").Offset(0, 1).Value = e1
ws.Range("C17").Offset(0, 1).Value = e1
End If
Menu.Range("C34").Value = LBirfuca
End Sub

```

### **3. FINANCEIRO**

```

Public Function FRC(taxa As Double, tempo As Double)
FRC = (taxa * (1 + taxa) ^ tempo) / (((1 + taxa) ^ tempo) - 1)
End Function

```

#### 4. JANELAS

Public seSolo As Boolean

Sub bifa1()

ThisWorkbook.Sheets("Conduto Forçado").Shapes("Imagem 2").ZOrder msoBringToFront

ThisWorkbook.Sheets("Resultados").Shapes("Imagem 3").ZOrder msoBringToFront

Bifurca1.TextBox1.Value = ThisWorkbook.Sheets("Menu").Range("C34").Value

Bifurca1.Show

End Sub

Sub bifa2()

ThisWorkbook.Sheets("Conduto Forçado").Shapes("Imagem 5").ZOrder msoBringToFront

ThisWorkbook.Sheets("Resultados").Shapes("Imagem 2").ZOrder msoBringToFront

Bifurca2.TextBox1.Value = ThisWorkbook.Sheets("Menu").Range("C34").Value

Bifurca2.Show

End Sub

Sub NB()

ThisWorkbook.Sheets("Conduto Forçado").Shapes("Imagem 4").ZOrder msoBringToFront

ThisWorkbook.Sheets("Resultados").Shapes("Imagem 4").ZOrder msoBringToFront

NBifurca.TextBox1.Value = ThisWorkbook.Sheets("Menu").Range("C33").Value

NBifurca.Show

End Sub

Sub abrir()

CommandBars.ExecuteMso "HideRibbon"

End Sub

Sub DetalheCanal()

Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Menu")

Set espessura = ws.Range("I5")

Set altura = ws.Range("C28")

Set bordaL = ws.Range("C23")

If espessura.Value < (altura.Value + bordaL.Value) Then

seSolo = False

Else

seSolo = True

End If

Material.Show

End Sub

## 5. NAVEGACAO

```
Sub voltar_inicio()
```

```
Application.ScreenUpdating = False
```

```
Set wb = ThisWorkbook
```

```
Set home = wb.Sheets("Menu")
```

```
home.Activate
```

```
Application.ScreenUpdating = True
```

```
End Sub
```

```
Sub resultados()
```

```
Application.ScreenUpdating = False
```

```
Set wb = ThisWorkbook
```

```
Set result = wb.Sheets("Resultados")
```

```
result.Activate
```

```
Application.ScreenUpdating = True
```

```
End Sub
```

```
Sub dim_canal()
```

```
Set wb = ThisWorkbook
```

```
Set ws = wb.Sheets("Canal de Adução")
```

```
Call DetalheCanal
```

```
ws.Activate
```

```
End Sub
```

```
Sub dim_Conduto()
```

```
Application.ScreenUpdating = False
```

```
Set wb = ThisWorkbook
```

```
Set ws = wb.Sheets("Conduto Forçado")
```

```
ws.Activate
```

```
Application.ScreenUpdating = True
```

```
End Sub
```

```
Sub toggle_Canal()
```

```
If Range("A18:A30").Rows.Hidden = True Then
```

```
If Range("A32:A75").Rows.Hidden = False Then 'verifica se o outro ta aberto
```

```
Call toggle_Conduto
```

```

End If
ThisWorkbook.Sheets("Menu").Shapes("Retângulo: Cantos Arredondados
1").Fill.ForeColor.RGB = RGB(37, 211, 102) 'colore
Range("A18:A30").Rows.Hidden = False 'mostra
Application.Goto ThisWorkbook.Sheets("Menu").Range("A14"), True 'move a tela
Else
ThisWorkbook.Sheets("Menu").Shapes("Retângulo: Cantos Arredondados
1").Fill.ForeColor.RGB = RGB(64, 64, 64) 'colore
Range("A18:A30").Rows.Hidden = True 'esconde
End If
End Sub
Sub toggle_Conduto()
If Range("A32:A75").Rows.Hidden = True Then
If Range("A18:A30").Rows.Hidden = False Then
Call toggle_Canal
End If
ThisWorkbook.Sheets("Menu").Shapes("Retângulo: Cantos Arredondados
12").Fill.ForeColor.RGB = RGB(37, 211, 102) 'colore
Range("A32:A75").Rows.Hidden = False
Application.Goto ThisWorkbook.Sheets("Menu").Range("A14"), True
Else
ThisWorkbook.Sheets("Menu").Shapes("Retângulo: Cantos Arredondados
12").Fill.ForeColor.RGB = RGB(64, 64, 64)
Range("A32:A75").Rows.Hidden = True
End If
End Sub
Sub toggle_CálculosCanal()
If Range("A26:A75").Rows.Hidden = True Then
Range("A26:A75").Rows.Hidden = False
Else
Range("A26:A75").Rows.Hidden = True
End If

```

```
End Sub
Sub toggle_cálculosConduto()
Set ws = ThisWorkbook.Sheets("Conduto Forçado")
If Range("A19:A40").Rows.Hidden = True Then
Range("A19:A40").Rows.Hidden = False
Else
Range("A19:A40").Rows.Hidden = True
End If
End Sub
```