

# Índice

Prefácio	15
Agradecimentos	17
Simbologia	19

## Capítulo 1

---

### **Introdução**

1.1. Água, um recurso natural escasso	31
1.2. Sistemas de adução em canal	35
1.2.1. Objectivos	35
1.2.2. Constituição geral	39
1.2.3. Controlo de canais	41
1.3. Âmbito e organização do livro	42

## Capítulo 2

---

### **Noções sobre escoamentos em canal**

2.1. Introdução geral	47
2.2. Classificação dos escoamentos	48
2.2.1. Escoamentos laminares e turbulentos	48
2.2.2. Escoamentos críticos, lentos e rápidos	49
2.2.3. Escoamentos permanentes e variáveis	52
2.2.4. Escoamentos uniformes e variados	53

2.3. Escoamentos uni, bi e tridimensionais	53
2.4. Regimes permanentes uniforme e gradualmente variado	54
2.5. Curvas de regolfo em canais prismáticos com caudal constante	59
2.6. Cálculo do regolfo com caudal constante	63
2.7. Curvas de regolfo em canais controlados	67
2.8. Regime rapidamente variado. Ressalto hidráulico	69
2.9. Regime variável em canais	75
2.9.1. Equações de base	75
2.9.2. Tempo de resposta de um canal	77
2.9.2.1. Velocidade teórica de propagação duma frente de onda	77
2.9.2.2. Tempo de resposta	80
2.9.2.3. Modelos de simulação da propagação	81
2.9.2.4. Influência das estruturas de controlo	83
2.10. Problemas resolvidos	86

## Capítulo 3

### **Projecto de canais de adução**

3.1. Introdução geral	115
3.2. Traçado	115
3.3. Perfis transversais	117
3.3.1. Considerações gerais	117
3.3.2. Secção hidraulicamente mais favorável em canais de fronteira rígida	118
3.3.3. Secção trapezoidal de escavação mínima	128
3.3.4. Secção trapezoidal de perímetro revestido mínimo	130
3.3.5. Aquedutos abobadados. Caso particular da secção circular	130
3.4. Perfil longitudinal	133
3.5. Optimização global do dimensionamento de canais	134
3.6. Dimensionamento de canais	145
3.6.1. Considerações gerais	145
3.6.2. Canais erodíveis	145
3.6.3. Canais revestidos a betão	147

3.7. Drenagem externa de canais revestidos	148
3.7.1. Introdução geral	148
3.7.2. Tipos de drenagem	148
3.7.2. Dreno longitudinal sob o rasto do canal	149
3.8. Problemas resolvidos	152

## Capítulo 4

---

### **Constituição geral dos sistemas de adução em canal**

4.1. Componentes principais	157
4.2. Estrutura e tomada de água da admissão geral	161
4.2.1. Considerações gerais	161
4.2.2. Tomadas de água em barragens (obturadores e válvulas)	161
4.2.3. Tomada de água numa linha de água	165
4.3. Estruturas de atravessamento	170
4.3.1. Apresentação geral	170
4.3.2. Passagem superior em canal	170
4.3.3. Passagem inferior em canal	171
4.3.4. Condução de atravessamento viário	173
4.3.5. Sifão invertido	175
4.4. Estruturas de controlo de alturas de água	179
4.5. Tomadas de água e estruturas de partição	180
4.5.1. Apresentação geral	180
4.5.2. Tomada de água do tipo tudo ou nada	180
4.5.3. Partidores de caudal	182
4.5.4. Orifício com carga constante	185
4.5.5. Condução com entrada controlada por adufa	187
4.5.6. Módulos Neyrpic	188
4.6. Estruturas de protecção	195
4.6.1. Objectivos e localização	195
4.6.2. Descarregador lateral de superfície	196

4.6.3. Sifões de escorvamento automático	201
4.6.4. Estruturas de descarga	202
4.7. Outras estruturas	205
4.8. Problemas resolvidos	215

## Capítulo 5

### **Controlo de canais. Variáveis, lógicas e algoritmos**

5.1. Considerações gerais	227
5.2. Variáveis consideradas no controlo	228
5.2.1. Definição	228
5.2.2. Variáveis controladas	229
5.2.3. Variáveis medidas	232
5.2.4. Variáveis de controlo	233
5.3. Lógicas de controlo	233
5.4. Arquitectura do algoritmo de controlo	241
5.4.1. Classificação geral	241
5.4.2. Controladores independentes	241
5.4.3. Controlo semi-local	243
5.4.4. Controlo centralizado	244
5.4.5. Controlo independente com supervisão centralizada	245
5.5. Controladores	246
5.5.1. Noções básicas de controlo de canais	246
5.5.2. Algoritmos	249
5.5.2.1. Forma polinomial RST	249
5.5.2.2. Outras formulações	252
5.5.2.3. Controlador <i>PID</i>	254
5.5.2.4. Calibração geral de controladores <i>PID</i>	259
5.5.2.5. Preditor de Smith	264
5.5.2.6. Controlador preditivo	265
5.5.2.7. Controlador óptimo	266

## Capítulo 6

---

### **Canais controlados. Distribuição de água, dimensionamento e operação**

6.1. Considerações gerais	273
6.2. Métodos de distribuição de água	275
6.2.1. Introdução	275
6.2.2. Parâmetros característicos da distribuição	275
6.2.3. Definição dos diferentes métodos	276
6.2.4. Métodos de distribuição <i>versus</i> operação e controlo dos canais	281
6.2.5. Organização da distribuição por rotação	284
6.2.5.1. Caudal de ponta, dose e duração da rega	284
6.2.5.2. Módulo de rega e rotação	286
6.3. Dimensionamento do trecho de canal	287
6.3.1. Capacidade de transporte	287
6.3.2. Dimensionamento e controlo	290
6.4. Funcionamento do trecho de canal em regime permanente	295
6.5. Resposta hidráulica do trecho de canal à variação de caudais	305
6.5.1. Controlo por montante	305
6.5.2. Controlo local próximo por jusante	308
6.5.3. Controlo local distante por jusante com variável controlada a meio do trecho de canal	310
6.5.4. Controlo do volume de água do trecho de canal	311
6.6. Problemas resolvidos	312

## Capítulo 7

---

### **Controlo de canais. Estruturas e equipamentos**

7.1. Apresentação geral	319
7.2. Controladores passivos. Descarregadores	319
7.2.1. Introdução geral	319
7.2.2. Descarregador labirinto. Descarregador bico de pato	321
7.2.2.1. Geometria e apresentação geral	321

7.2.2.2. Lei de vazão	324
7.2.2.3. Dimensionamento de descarregadores associados a módulos Neyrpic	324
7.3. Comportas	326
7.3.1. Caracterização geral	326
7.3.2. Comportas convencionais	328
7.3.3. Comportas auto-reguladoras	332
7.3.3.1. Apresentação geral	332
7.3.3.2. Comportas Neyrpic	334
7.3.3.3. Comporta Bengemann	348
7.3.3.4. Comporta Vlugter	350
7.3.3.5. Comportas com flutuador sob a acção indirecta do nível a controlar	351
7.4. Controladores electromecânicos	360
7.5. Controladores electrónicos	369
7.5.1. Apresentação geral	369
7.5.2. Computadores portáteis comerciais	370
7.5.3. Autómatos industriais	371
7.5.4. Controladores específicos de função única pré-programada	373
7.5.5. Controladores específicos pré-programados com multi-funções e multi-acções	377
7.6. Equipamentos de medição	378
7.6.1. Apresentação geral	378
7.6.2. Sensores de posição de comportas	378
7.6.3. Sensores de altura de água (limnímetros)	379
7.6.4. Equipamentos e procedimentos para cálculo dos caudais	382
7.6.4.1. Considerações gerais	382
7.6.4.2. Medidores de velocidade do escoamento	383
7.6.4.3. Descarregadores	390
7.6.4.4. Comportas	391
7.7. Sistemas de comunicação	392
7.7.1. Generalidades e arquitecturas de rede	392
7.7.2. Rede telefónica fixa	394
7.7.3. Rede de cabos em fibra óptica	395
7.7.4. Rede rádio VHF ou UHF de canal único	398

7.7.5. Sistema global para comunicações móveis	400
7.7.6. Protocolo <i>Modbus</i>	401
7.8. Outros equipamentos	402
7.9. Problemas resolvidos	402

## Capítulo 8

---

### **Controlo de canais. Aplicações**

8.1. Automação de canais. Síntese histórica	415
8.2. Sistemas de controlo em funcionamento em protótipos	426
8.2.1. Introdução geral	426
8.2.2. Aplicações do controlo por montante	427
8.2.2.1. Caracterização geral	427
8.2.2.2. Controlo Proporcional	428
8.2.2.3. Descarregadores bico de pato	429
8.2.2.4. Comportas AMIL	429
8.2.2.5. Comportas Bengemann	430
8.2.2.6. Comportas Vlugter	431
8.2.2.7. Controlador Danaide	431
8.2.2.8. Controlador DACL	432
8.2.2.9. Controlador Little-Man	432
8.2.2.10. Controlador Colvin	433
8.2.2.11. Controlador <i>P+PR</i>	434
8.2.2.12. Controlo UMA	434
8.2.3. Aplicações do controlo local próximo por jusante	435
8.2.3.1. Caracterização geral	435
8.2.3.2. Comportas AVIS ou AVIO	436
8.2.3.3. Comportas mistas	436
8.2.4. Aplicações do controlo local distante por jusante	437
8.2.4.1. Caracterização geral	437
8.2.4.2. Controlador BIVAL	438
8.2.4.3. Controlo CARA	438
8.2.4.4. Controlador EL-FLO+ <i>reset</i>	439
8.2.4.5. Controlo SOGREAH	440
8.2.4.6. Controlo IMTA – CEMAGREF	440

8.2.5. Aplicações do controlo semi-local	441
8.2.5.1. Caracterização geral	441
8.2.5.2. Controlo IMTA – CEMAGREF	441
8.2.5.3. Controlo MODUVAR 32	442
8.2.5.4. Controlo PIR (Proporcional, Integral, <i>Retard</i> ou atraso)	442
8.2.6. Aplicações do controlo centralizado	443
8.2.6.1. Apresentação geral	443
8.2.6.2. Regulação Dinâmica	451
8.2.6.3. Controlo CACG	452
8.2.6.4. Controlo ACS	453
8.2.6.5. Volume controlado	453
8.2.6.6. Controlo <i>Gate Strocking</i>	454
8.2.6.7. Controlo Sabet	454
8.3. Implementação de sistemas de controlo de canais	455
8.3.1. Considerações gerais	455
8.3.2. Calibração de controladores <i>PI</i>	458
8.3.2.1. Metodologias gerais	458
8.3.2.2. Metodologia do ITRC	460
8.3.2.3. Metodologia do CEMAGREF	467
8.3.2.4. Outra metodologia proposta	468
8.3.3. Desenvolvimento e calibração de controladores <i>PI</i> . Exemplo de aplicação	470

## Capítulo 9

### **Canais controlados. Modernização**

9.1. Introdução geral	477
9.2. SCADA – Sistema de supervisão e controlo manual à distância	480
9.2.1. Apresentação geral	480
9.2.2. Componentes principais	484
9.2.3. Controladores manuais	492
9.3. Caudais em estruturas hidráulicas	494
9.3.1. Caso geral	494
9.3.2. Associação soleira – comporta	495



9.3.3. Associação soleira – orifício	499
9.3.4. Comporta mergulhada	501
9.4. Controlo automático digital	504
9.5. Definição e implementação conjunta de sistemas SCADA e de controlo automático	507
9.6. Reservatórios de compensação e controlo	512
9.6.1. Definição e objectivos gerais	512
9.6.2. Tipos e localização	514
9.6.3. Critérios gerais de dimensionamento	516
9.6.4. Dimensionamento de reservatórios alimentados por bombagem	517
9.7. Problemas resolvidos	521
Referências bibliográficas	523