

ÍNDICE

PREFÁCIO xi

PREÂMBULO xv

1 INTRODUÇÃO 1

- 1.1 Energia 4
- 1.2 Formas de Energia 5
- 1.3 Energias Renováveis 8
 - 1.3.1 As Energias Renováveis no Mundo 14
 - 1.3.2 As Energias Renováveis em Portugal 17
- 1.4 Estatística breve do Sector Eléctrico em Portugal 19
- 1.5 Organização do Sistema Eléctrico Nacional 21
- 1.6 Sumário 25
- Referências 26

2 AVALIAÇÃO ECONÓMICA 27

- 2.1 Introdução 29
- 2.2 Custo Médio da Energia 29
 - 2.2.1 Custo Unitário Médio Anual 29
 - 2.2.2 Taxa de Actualização 30
 - 2.2.3 Custo Unitário Médio Actualizado 33
- 2.3 Indicadores de Avaliação de Investimentos 39
 - 2.3.1 Valor Actual Líquido — VAL 40
 - 2.3.2 Taxa Interna de Rendibilidade — TIR 41
 - 2.3.3 Tempo de Retorno Bruto 45
 - 2.3.4 Período de Recuperação 45
 - 2.3.5 Retorno do Investimento 46
- 2.4 Tarifários de Venda da Energia Renovável 49
 - 2.4.1 Produção em Regime Especial 50
 - 2.4.2 Microgeração 52
- 2.5 Sumário 54
- 2.6 Problemas 55
- 2.7 Anexo: Remuneração da Energia de Origem Renovável 57
 - 2.7.1 Produção em Regime Especial 57
 - 2.7.2 Microgeração 63
- Referências 67

3 ENERGIA MINI-HÍDRICA 69

- 3.1 Introdução 71
 - 3.1.1 Breve Perspectiva Histórica 71
 - 3.1.2 Classificações 72
 - 3.1.3 Situação em Portugal 74
 - 3.1.4 Custos Estimados 74
- 3.2 Curva de Duração de Caudais 75
- 3.3 Equipamento Mecanoeléctrico 78
 - 3.3.1 Escolha da Turbina 78
 - 3.3.2 Escolha do Gerador 82

3.4 Cálculo Energético	84
3.4.1 Modelo Simplificado	84
3.4.2 Introdução ao Modelo Detalhado	93
3.5 Bases da Metodologia de Anteprojecto	105
3.6 Sumário	106
3.7 Problemas	107

Referências 110

4 RECURSO EÓLICO 113

4.1 Introdução	115
4.2 O Vento	115
4.2.1 Atlas do Vento	116
4.2.2 Estrutura do Vento	119
4.3 Representação do Vento	122
4.3.1 Vento Quase-Estacionário	122
4.3.2 Distribuição de Weibull	124
4.3.3 Distribuição de Rayleigh	132
4.3.4 Lei de Prandtl	134
4.3.5 Vento Turbulento	137
4.4 Características Especiais do Vento	139
4.4.1 Obstáculos	139
4.4.2 Efeito de Esteira	140
4.4.3 Vento no Mar	141
4.5 Caracterização de um local	141
4.5.1 Identificação de Locais Potenciais	141
4.5.2 Medição do Vento	142
4.5.3 Representação do Perfil de Ventos	144
4.5.4 Modelos Físicos e Modelos Numéricos	145
4.6 Previsão do Vento	146
4.6.1 Método ARMA	148
4.6.2 Método ANN	151
4.6.3 Método de Referência — Persistência	155
4.6.4 Exemplos de Aplicação	156
4.7 Sumário	163

Referências 165

5 ENERGIA EÓLICA 167

5.1 Introdução	169
5.1.1 Enquadramento Geral	169
5.1.2 Situação em Portugal	171
5.1.3 Estado da Arte	173
5.1.4 Eólico no Mar	177
5.1.5 Custos	179
5.1.6 Ambiente	180
5.2 Potência Eólica	180
5.2.1 Coeficiente de Potência	181
5.2.2 Curva de Potência do Aerogerador	185

5.2.3	Expressões Analíticas para a Curva de Potência	186
5.3	Cálculo Energético	188
5.3.1	Cálculo Convencional	188
5.3.2	Cálculo Simplificado	196
5.4	Aspectos de Tecnologia	201
5.4.1	Componentes do Sistema	201
5.4.2	Aerodinâmica	206
5.4.3	Controlo de Potência	210
5.4.4	Referência aos Geradores Eléctricos	216
5.4.5	Turbinas de Eixo Vertical	218
5.4.6	Microgeradores Eólicos	219
5.5	Sumário	221
5.6	Problemas	222
	Referências	227
6	EQUIPAMENTO ELÉCTRICO DOS GERADORES EÓLICOS	229
6.1	Introdução	231
6.2	Máquina de Indução Duplamente Alimentada	232
6.2.1	Princípio de Funcionamento	233
6.2.2	Descrição do Equipamento	234
6.2.3	Esquema Equivalente	235
6.2.4	Modos de Operação	239
6.2.5	Introdução ao Controlo	240
6.2.6	Introdução ao Regime Transitório	253
6.3	Máquina de Indução de Rotor em Gaiola	260
6.3.1	Esquema de Funcionamento Tradicional	260
6.3.2	Esquema de Funcionamento Avançado — Associação com o STATCOM	262
6.4	Máquina Síncrona de Velocidade Variável	269
6.4.1	Descrição do Equipamento	269
6.4.2	Princípio de Funcionamento	270
6.4.3	Modelo do Sistema	271
6.4.4	Exemplo de Aplicação	283
6.5	Interligação com a Rede Eléctrica	291
6.5.1	Descrição da Rede de Teste	291
6.5.2	Descrição Sumária dos Modelos e Parâmetros Utilizados	293
6.5.3	Apresentação e Análise dos Resultados	297
6.6	Sumário	303
6.7	Problemas	304
	Referências	305
7	RECURSO E TECNOLOGIAS SOLARES	307
7.1	Introdução	309
7.2	Recurso Solar	310
7.2.1	Algumas Definições	310
7.2.2	Recurso Solar na Europa	311
7.2.3	Recurso Solar em Portugal	312
7.3	Sistemas de Seguimento Solar	314

7.3.1	Ângulo de Incidência Solar numa Superfície Fixa	315
7.3.2	Irradiância Solar em Sistemas com Seguimento a Dois Eixos	319
7.4	Tecnologias Fotovoltaicas	327
7.4.1	Tecnologias de 1ª Geração — Silício Cristalino	327
7.4.2	Novas Tecnologias Fotovoltaicas	331
7.4.3	Balanço Tecnológico	341
7.5	Sistemas Solares Termoelectricos de Concentração	341
7.5.1	Sistemas de Canal Parabólico	344
7.5.2	Sistemas de Canal de Fresnel	346
7.5.3	Sistemas de Disco Parabólico	347
7.5.4	Sistemas de Torre Solar	349
7.6	Sumário	351
	Referências	353
	8 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	355
8.1	Introdução	357
8.1.1	Aplicações de Grande e Média Potência	358
8.1.2	Situação no Mundo e em Portugal	359
8.1.3	Custos	361
8.2	Modelos Matemáticos	363
8.2.1	Modelo de Um Díodo e Três Parâmetros	363
8.2.2	Modelo de Um Díodo e Cinco Parâmetros	381
8.3	Sistemas Fotovoltaicos	386
8.3.1	Módulos e Painéis	387
8.3.2	Seguidor de Potência Máxima (MPPT) e Inversor	391
8.3.3	Irradiância e Temperatura	398
8.4	Cálculo Energético	402
8.4.1	Cálculo Convencional	402
8.4.2	Estimativa Rápida da Energia Eléctrica Produzida	406
8.4.3	Comparação com Resultados Experimentais	406
8.5	Sumário	409
8.6	Problemas	410
	Referências	414
	9 ENERGIAS RENOVÁVEIS E CO-GERAÇÃO	417
9.1	Introdução	419
9.1.1	Cogeração e Trigeração	419
9.1.2	Situação em Portugal	423
9.1.3	Tipos de Sistemas de Co-geração	423
9.2	Tecnologias de Sistemas de Co-Geração	424
9.2.1	Tecnologias Convencionais	424
9.2.2	Tecnologias Emergentes	437
9.3	Permutadores de Calor	441
9.3.1	Tipos de Recuperadores de Calor	442
9.3.2	Recuperadores de Calor de Passagem Simples	442
9.3.3	Diferença de Temperatura Média Logarítmica	443
9.4	Avaliação Tecnoeconómica	448

9.4.1 Índices de Avaliação de Desempenho	448
9.4.2 Repartição dos Custos de Combustível	450
9.5 Sumário	453
9.6 Problemas	454
Referências	458
REFERÊNCIAS ICONOGRÁFICAS	459
ÍNDICE REMISSIVO	463