

# Indice

<b>Prefazione</b>	<b>xi</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>xvii</b>
<b>Elenco dei simboli</b>	<b>xix</b>
<b>1 CARATTERISTICHE DEGLI IMPIANTI MOTORI EOLICI</b>	<b>1</b>
1.1 Introduzione . . . . .	1
1.2 Rassegna dei principali concetti di conversione eolica . . . . .	2
1.3 Specificità degli impianti motori eolici . . . . .	6
1.4 Problemi connessi con l'utilizzazione dell'energia del vento . . . . .	7
1.4.1 Energia specifica e potenza specifica disponibile . . . . .	7
1.4.2 Irregolarità della risorsa e accoppiamento motore-utilizzatore . . . . .	7
1.5 Cenni storici ragionati sullo sviluppo tecnologico . . . . .	10
1.5.1 Dalle origini all'era elettrica . . . . .	10
1.5.2 L'era elettrica . . . . .	18
1.5.3 Le turbine ad asse verticale . . . . .	30
1.5.4 Le turbine ad asse verticale di piccola taglia . . . . .	41
1.6 Confronto tra le architetture ad asse orizzontale e verticale . . . . .	42
1.6.1 Fluidodinamica del rotore . . . . .	42
1.6.2 Comportamento strutturale . . . . .	42
1.6.3 Confronto dimensionale . . . . .	42
1.6.4 Confronto prestazionale . . . . .	43
1.6.5 Effetti del coefficiente di velocità periferica . . . . .	45
1.6.6 Effetti del momento di inerzia . . . . .	45
1.6.7 Sviluppo prototipale e commerciale . . . . .	48
1.7 Limiti di potenza delle turbine eoliche . . . . .	50
1.7.1 Le turbine ad asse orizzontale . . . . .	50
1.7.2 Limiti di potenza delle turbine eoliche ad asse orizzontale . . . . .	51
1.7.3 L'analisi logistica . . . . .	57
<b>Bibliografia</b>	<b>59</b>
<b>2 ENERGETICA APPLICATA ALLE MACCHINE EOLICHE</b>	<b>63</b>
2.1 Introduzione . . . . .	63
2.2 Principi dell'interazione rotore-fluido . . . . .	63
2.3 La potenza specifica . . . . .	67
2.4 La raccolta di lavoro limite . . . . .	68

2.5	La raccolta di lavoro reale e le curve generalizzate . . . . .	69
2.6	Il fattore di utilizzazione . . . . .	72
2.7	Confronto con altre fonti energetiche . . . . .	77
2.7.1	Confronto sulla base del lavoro meccanico specifico . . . . .	77
2.7.2	Confronto sulla base della potenza specifica . . . . .	78
2.7.3	Il potenziale delle fonti . . . . .	80
2.7.4	Confronto sulla base dell'unità di superficie di territorio . . . . .	81
2.8	La risorsa in Italia . . . . .	84
2.8.1	La risorsa eolica terrestre . . . . .	84
2.8.2	La risorsa eolica marina . . . . .	91
<b>Bibliografia</b>		<b>95</b>
<b>3</b>	<b>MODELLI FLUIDODINAMICI DEL ROTORE</b>	<b>97</b>
3.1	Introduzione . . . . .	97
3.2	Analisi aerodinamica dei profili palari . . . . .	97
3.2.1	Caratteristiche geometriche dei profili aerodinamici a bassa velocità . . . . .	97
3.2.2	Triangoli delle velocità . . . . .	98
3.2.3	Le forze aerodinamiche . . . . .	99
3.2.4	I coefficienti di portanza, resistenza e di momento . . . . .	104
3.2.5	La previsione delle prestazioni ad elevati angoli di attacco . . . . .	109
3.2.6	Generalità sulle condizioni di moto attorno al profilo . . . . .	119
3.2.7	Effetti del numero di Reynolds sulle prestazioni . . . . .	125
3.2.8	Effetto della rugosità superficiale . . . . .	130
3.3	Dispositivi aerodinamici . . . . .	134
3.4	Effetto Robins-Magnus . . . . .	143
3.5	Effetti 3D . . . . .	146
3.5.1	Effetto della rotazione . . . . .	146
3.5.2	Effetti della lunghezza finita di pala . . . . .	147
3.5.3	Lo stallo dinamico . . . . .	153
3.6	Analisi fluidodinamica del rotore . . . . .	154
3.6.1	Teoria alare . . . . .	154
3.6.2	Rappresentazione dei triangoli di velocità . . . . .	156
3.6.3	Analisi delle forze . . . . .	159
3.6.4	Il grado di reazione . . . . .	161
3.6.5	Teoria classica . . . . .	162
3.7	Considerazioni sulla scelta dei profili palari per le turbine ad asse orizzontale . . . . .	163
3.7.1	Mutuazione dei profili aerodinamici dal settore aeronautico . . . . .	163
3.7.2	Lo sviluppo dei profili per il settore eolico . . . . .	164
3.7.3	Considerazioni sulla scelta dei profili . . . . .	169
3.8	Considerazioni sulla scelta dei profili palari per le turbine ad asse verticale . . . . .	171
3.9	Modelli del rotore della turbina . . . . .	173
3.9.1	Modelli basati sul disco attuatore . . . . .	173
3.9.2	Modelli vorticali . . . . .	174

<b>4</b>	<b>MODELLI FLUIDODINAMICI DELLA SCIA</b>	<b>181</b>
4.1	Introduzione . . . . .	181
4.2	La teoria impulsiva semplice . . . . .	184
4.2.1	Cenni sullo sviluppo storico della teoria impulsiva . . . . .	184
4.2.2	Applicazione del principio di conservazione della massa . . . . .	185
4.2.3	Applicazione del principio di conservazione della quantità di moto . . . . .	186
4.2.4	Applicazione del principio di conservazione dell'energia . . . . .	188
4.2.5	Ottimizzazione della corrente 1-D . . . . .	190
4.2.6	La produzione di entropia nel processo di trasformazione . . . . .	195
4.2.7	La teoria impulsiva semplice applicata al rotore confinato . . . . .	198
4.2.8	Il concentratore di flusso . . . . .	207
4.3	La teoria impulsiva vorticoso: effetto della rotazione del disco . . . . .	210
4.4	La teoria impulsiva applicata al cilindro attuatore . . . . .	214
4.5	Correzioni alla teoria impulsiva vorticoso . . . . .	216
4.5.1	Correzioni 2D . . . . .	216
4.5.2	La distribuzione di pressione nella scia . . . . .	221
4.5.3	Limiti di validità della teoria impulsiva . . . . .	223
4.6	Struttura della scia e modello del cilindro vorticoso . . . . .	227
4.7	Modelli analitici della scia . . . . .	229
4.7.1	La scia a valle . . . . .	230
4.7.2	La scia molto a valle . . . . .	233
4.7.3	La scia intermedia . . . . .	233
4.7.4	Il modello della scia composta . . . . .	235
4.8	Cenni di analisi del moto tridimensionale . . . . .	239
4.8.1	Campo di moto interpolare . . . . .	243
4.8.2	Campo di moto extrapolare . . . . .	244
	<b>Bibliografia</b>	<b>249</b>
<b>5</b>	<b>ARCHITETTURA DELLE MACCHINE EOLICHE</b>	<b>251</b>
5.1	Introduzione . . . . .	251
5.2	Classificazione . . . . .	251
5.3	Interazione sulla base della resistenza . . . . .	254
5.3.1	Analisi del moto . . . . .	255
5.3.2	Anemometro a coppe . . . . .	264
5.4	Interazione sulla base della portanza: macchine ad asse verticale . . . . .	266
5.4.1	Analisi del moto . . . . .	267
5.4.2	Analisi delle forze . . . . .	272
5.4.3	La prestazione aerodinamica con la teoria analitica semplificata . . . . .	279
5.4.4	Limiti di validità della teoria classica . . . . .	288
5.4.5	Effetto del numero e della spaziatura delle pale . . . . .	289
5.4.6	Cenni di analisi strutturale . . . . .	291
5.5	Interazione sulla base della portanza: macchine ad asse orizzontale . . . . .	293
5.5.1	Analisi delle forze . . . . .	299
5.5.2	La prestazione aerodinamica con la teoria analitica . . . . .	304
5.5.3	Proporzionamento della pala . . . . .	312
5.5.4	Proporzionamento della pala con il modello a scia vorticale . . . . .	319
5.5.5	Cenni di analisi strutturale . . . . .	321
5.6	Turbine con pala rotanti a sezione cilindrica . . . . .	327
5.7	Interazione sulla base di resistenza e di portanza . . . . .	328

5.8	Effetti fluidodinamici delle strutture di supporto . . . . .	332
5.8.1	Macchina ad asse verticale . . . . .	332
5.8.2	Macchina ad asse orizzontale . . . . .	335
5.9	Effetti generali dell'architettura sul comportamento dinamico della turbina . . . . .	344
5.9.1	Comportamento alla partenza . . . . .	344
5.9.2	Il comportamento alla partenza delle turbine ad asse verticale . . . . .	344
5.9.3	Effetto dell'inerzia del rotore . . . . .	346
<b>Bibliografia</b>		<b>351</b>
<b>6</b>	<b>CARATTERISTICHE FUNZIONALI DELLE TURBINE EOLICHE</b>	<b>353</b>
6.1	Introduzione . . . . .	353
6.2	Descrizione della turbina dal punto di vista funzionale . . . . .	353
6.3	Il modello del vento . . . . .	356
6.4	Il modello aerodinamico . . . . .	359
6.4.1	Le curve funzionali del rotore della turbina . . . . .	361
6.5	Il modello strutturale . . . . .	363
6.6	Il modello del generatore elettrico . . . . .	367
6.6.1	Le curve funzionali del generatore asincrono o a induzione . . . . .	367
6.6.2	Le curve funzionali del generatore sincrono . . . . .	372
6.7	Analisi delle curve di funzionamento della turbina . . . . .	372
6.7.1	Velocità di rotazione fissa - calettamento fisso (stallo passivo) . . . . .	375
6.7.2	Velocità di rotazione costante-calettamento variabile . . . . .	376
6.7.3	Velocità di rotazione variabile-controllo di stallo . . . . .	381
6.7.4	Velocità di rotazione variabile-controllo di passo . . . . .	385
6.8	La similitudine nelle turbine eoliche . . . . .	387
6.8.1	I coefficienti di flusso e pressione . . . . .	388
6.8.2	Prove in scala . . . . .	391
<b>Bibliografia</b>		<b>395</b>
<b>7</b>	<b>MODELLI INGEGNERISTICI PER IL CALCOLO DELLE PRESTAZIONI</b>	<b>397</b>
7.1	Introduzione . . . . .	397
7.2	BEM statico . . . . .	398
7.3	BEM statico per macchine ad asse verticale . . . . .	399
7.3.1	Sottomodelli . . . . .	404
7.3.2	La procedura iterativa di soluzione . . . . .	416
7.3.3	Analisi delle prestazioni . . . . .	417
7.3.4	Confronto con dati sperimentali . . . . .	430
7.4	BEM statico per macchine ad asse orizzontale . . . . .	431
7.4.1	Sottomodelli . . . . .	435
7.4.2	Procedura iterativa di soluzione . . . . .	441
7.4.3	Analisi delle prestazioni . . . . .	443
7.4.4	Confronto con dati sperimentali . . . . .	446
7.5	Metodi a vortice per le turbine ad asse verticale . . . . .	447
7.6	Il modello a vortice libero <i>quasi-3D</i> per turbine ad asse verticale . . . . .	448
7.6.1	Rappresentazione geometrica della turbina . . . . .	449
7.6.2	Il sistema di vortici . . . . .	450
7.6.3	Le forze aerodinamiche . . . . .	451
7.6.4	Schema di soluzione . . . . .	453

7.6.5	Sottomodelli . . . . .	454
7.6.6	Effetti 3D . . . . .	460
7.6.7	Analisi delle prestazioni . . . . .	462
7.7	Rassegna delle curve funzionali teoriche . . . . .	476
<b>Bibliografia</b>		<b>479</b>
<b>8</b>	<b>MODELLAZIONE DELLA RISORSA EOLICA</b>	<b>483</b>
8.1	Introduzione . . . . .	483
8.2	Le caratteristiche generali della risorsa . . . . .	485
8.2.1	Variazione della densità dell'aria con la quota altimetrica del sito . . . . .	488
8.3	L'analisi statistica dei dati di vento . . . . .	491
8.3.1	La media . . . . .	493
8.3.2	La varianza e la deviazione standard . . . . .	493
8.3.3	La velocità media cubica . . . . .	494
8.4	Rappresentazione dei dati di vento . . . . .	496
8.4.1	La distribuzione di probabilità della velocità e del flusso di energia . . . . .	496
8.4.2	Distribuzione cumulata e di durata . . . . .	496
8.4.3	La distribuzione di Weibull . . . . .	499
8.4.4	Variazioni sul lungo periodo . . . . .	504
8.4.5	Rosa dei venti e delle energie . . . . .	507
8.5	Struttura del vento a terra ed effetti sulla turbina . . . . .	510
8.5.1	Modelli ed effetti della non uniformità spaziale del vento . . . . .	512
8.5.2	Effetti dei terreni a morfologia complessa . . . . .	533
8.5.3	Modelli ed effetti della non stazionarietà del vento . . . . .	538
8.5.4	Effetti della non stazionarietà del flusso sulla macchina . . . . .	553
8.6	Modellazione della risorsa nei parchi eolici . . . . .	568
8.6.1	Correlazione del vento in diversi punti del parco . . . . .	569
8.6.2	Funzionamento delle turbine nella scia di altre . . . . .	569
8.7	La risorsa eolica negli ambienti antropizzati . . . . .	575
8.7.1	Effetto della morfologia urbana sulle turbine . . . . .	578
8.7.2	Caratteristiche della risorsa nei siti urbani . . . . .	579
<b>Bibliografia</b>		<b>585</b>
<b>9</b>	<b>CALCOLO DEL LAVORO ELETTRICO</b>	<b>589</b>
9.1	Introduzione . . . . .	589
9.2	Valutazione del lavoro prodotto attraverso modelli statistici . . . . .	589
9.3	Stima del lavoro prodotto con dati reali . . . . .	592
9.4	Fattori di perdita e livello di incertezza . . . . .	592
9.4.1	Le perdite . . . . .	593
9.4.2	L'incertezza . . . . .	595
9.5	Esempio . . . . .	597
9.6	Il concetto della P50, P75 e P90 . . . . .	599
9.7	Curva di potenza ottima . . . . .	601
<b>Bibliografia</b>		<b>605</b>
<b>Indice analitico</b>		<b>607</b>