

INDICE

PARTE A – TECNOLOGIA DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA

Capitolo 1 – Fonte solare e dispositivi di conversione	9
1.1 – La radiazione solare al suolo	9
1.2 – Energia solare e celle fotovoltaiche	12
I materiali semiconduttori.....	12
La conversione fotovoltaica.....	15
1.3 – Tipologie di celle fotovoltaiche	19
Celle fotovoltaiche in silicio monocristallino e policristallino..	20
Celle fotovoltaiche a film sottile	22
I moduli fotovoltaici	23
1.4 – L'impianto fotovoltaico	23
Impianti isolati dalla rete (stand-alone o off-grid)	25
Impianti collegati alla rete elettrica (grid-connected)	28

PARTE B – COMPONENTI DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO

Capitolo 1 – Moduli fotovoltaici	33
1.1 – Tecnologia costruttiva dei moduli fotovoltaici	33
Composizione di un modulo fotovoltaico in silicio cristallino	34
Composizione di un modulo fotovoltaico a film sottile	36
1.2 – Collegamenti elettrici	37
Collegamenti tra le celle fotovoltaiche	37
Cassetta di terminazione	39
Dal modulo fotovoltaico al campo fotovoltaico	40
Prestazioni di un campo fotovoltaico	40
Sottocampi fotovoltaici	42
1.3 – Connessioni meccaniche	42
Moduli fotovoltaici con cornice	43
Moduli fotovoltaici senza cornice	43
1.4 – Criticità del processo costruttivo e difetti in un modulo cristallino.....	45
1.5 – Prove sui moduli	49
Prove elettriche	50

Prove termiche	50
Prove meccaniche	51
1.6 – Film sottili e cristallini: confronto tecnico-economico	52
Silicio amorfo: il primo film sottile	54
Celle CIS (Copper Indium Diselenide) e CIGS (Copper Indium Gallium Diselenide)	55
Celle a film sottile in CdTe (Telloruro di Cadmio)	56
Pay back time a confronto.....	57
1.7 – Smaltimento e riciclaggio del fotovoltaico.....	58
Capitolo 2 – Sistema di accumulo dell'energia	61
2.1 – Peculiarità e caratteristiche tecniche delle tipologie commerciali	61
Peculiarità	61
Caratteristiche tecniche	65
Stato di carica	67
2.2 – Regolazione della carica: tecnica e prestazioni	69
2.3 – L'installazione degli accumulatori	75
Immagazzinamento	75
Alloggiamento	76
Riempimento	81
Installazione	82
Messa in servizio	82
Controllo finale	83
CAPITOLO 3 – Convertitori statici e connessione alla rete elettrica ..	85
3.1 – Considerazioni generali e principali tipologie	85
Inverter per applicazioni isolate (stand-alone)	85
Inverter per il funzionamento in parallelo alla rete elettrica ...	86
Tipologie particolari di inverter	89
3.2 – Componenti e funzioni principali degli inverter	91
Parallelo stringhe	91
Maximum Power Point Tracker (MPPT)	93
Ponte di conversione	94
Trasformatore	95
Protezione di massima corrente	95
Protezioni di interfaccia con la rete elettrica	96
3.3 – Principali caratteristiche costruttive	97
Circuiti di conversione della potenza	99
Caratteristiche della conversione cc/ca	101
3.4 – Compatibilità elettromagnetica	102
Armoniche	104

Altri disturbi	105
3.5 – Allacciamento alla rete di distribuzione	106
Quadro normativo generale	106
Norma CEI 11-20	109
Documento Enel DK 5990	113
Documento Enel DK 5740	121
Documento Enel DK 5310	134

PARTE C – INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA DEL FOTOVOLTAICO

Capitolo 1 – Strutture di sostegno	155
1.1 – Considerazioni generali	155
Effetti del carico neve	156
Effetti dell'azione del vento	156
1.2 – Materiali per strutture di sostegno	157
1.3 – Tipologie tradizionali per posa a terra: strutture a cavalletto e a palo	159
Strutture a cavalletto	159
Strutture a palo	161
1.4 – Strutture di sostegno ad inseguimento	163
 Capitolo 2 – Fotovoltaico per l'architettura	173
2.1 – Tetti fotovoltaici: interventi con strutture retrofit	173
2.2 – Architettura industriale: costruire sui capannoni.....	181
2.3 – Sistemi fotovoltaici integrati.....	182
Facciate.....	183
Tetti integrati.....	185
Comportamento termico	188
Isolamento acustico	190
2.4 – Nuove frontiere: arredo urbano polifunzionale e barriere fonoassorbenti fotovoltaiche	192
Arredo urbano polifunzionale	192
Barriere fonoassorbenti fotovoltaiche	193

PARTE D – PROGETTAZIONE ELETTRICA, REALIZZAZIONE E MANUTENZIONE DEGLI IMPIANTI

Capitolo 1 – Analisi di producibilità di un impianto fotovoltaico	197
1.1 – Calcolo della radiazione solare teorica sul piano dei moduli ..	197
Calcolo dell'angolo orario w	197
Calcolo della declinazione d	200
Calcolo dell'angolo di incidenza q	200
Radiazione diretta	201

Radiazione diffusa	202
Radiazione riflessa, albedo	202
1.2 – Soleggiamento di un sito: dati caratteristici	203
I dati di radiazione solare in Italia	204
Metodo di Liu-Jordan	210
Tabelle di dati caratteristici ed osservazioni empiriche	211
Località senza archivio di dati storici di radiazione	212
Moduli orientati a sud con inclinazione diversa da una di quelle tabulate	212
Moduli posizionati verticalmente e con orientamento diverso da uno di quelli tabulati (tipico caso di facciata fotovoltaica) ..	212
1.3 – Influenza dell'ambiente sull'energia captata	212
1.4 – Producibilità di un impianto fotovoltaico in un sito	215
Parametri tecnici che influenzano la producibilità di un impianto	216
Capitolo 2 – Criteri di dimensionamento degli impianti	225
2.1 – Valutazioni di idoneità di un sito: sopralluogo	225
Impianto collegato alla rete elettrica (Modulo fac-simile “Impianti fotovoltaici collegati alla rete”)	226
Alimentazione di utenza isolata (Modulo “Impianti fotovoltaici isolati dalla rete”)	228
2.2 – Dimensionamento di un sistema per utenze isolate	235
Continuità ed indisponibilità di alimentazione	235
Metodo di analisi	236
Dati di ingresso	237
Metodo di calcolo	241
Dati di uscita	244
2.3 – Dimensionamento di un sistema collegato alla rete elettrica ..	247
Capitolo 3 – Architettura del sistema elettrico e sicurezza	251
3.1 – Generalità	251
3.2 – Considerazioni sulle tipologie d'impianto	252
3.3 – Conversione centralizzata e conversione di stringa	254
Scatole di parallelo stringhe e quadri elettrici	255
Diodi di blocco	257
Fusibili	257
Dispositivi di sezionamento	258
Architettura generale di un sistema di grande potenza	260
Livello di affidabilità	263
3.4 – Criteri di scelta della tensione nominale	265
3.5 – Configurazione elettrica del generatore fotovoltaico	267
Sistema in corrente continua vincolato al potenziale di terra ..	267

Sistema in corrente continua isolato (flottante)	268
3.6 – Criteri di sicurezza	269
Sistemi TN	269
Sistemi TT	270
Sistemi IT	271
Impianti in corrente continua di categoria 0	272
Sistemi elettrici utilizzati per gli impianti fotovoltaici	273
Sistemi fotovoltaici a configurazione TN e TT	274
Sistema IT	276
Circuiti di tipo SELV e PELV	277
Sistema a bassissima tensione funzionale (FELV)	278
Classe di isolamento dei sistemi verso l'esterno	278
3.7 – Impianto di terra	279
Dispersore	280
Conduttore di terra	280
Conduttori di protezione	280
Conduttori equipotenziali	281
Nodo di terra	281
Collegamento a terra dell'impianto fotovoltaico	281
Capitolo 4 – Criteri di protezione contro le scariche atmosferiche ...	283
4.1 – Considerazioni introduttive	283
4.2 – Scariche atmosferiche e loro effetti	284
Tipi di fulmine	284
Formazione del fulmine	285
Dati sperimentali	288
Parametri caratteristici dei fulmini	289
Carica elettrica: $\int i \, dt$	290
Energia termica: $\int i^2 \, dt$	290
Valore di picco della corrente di fulmine: I	290
Variazione della corrente di fulmine: di/dt	291
4.3 – Protezione contro i fulmini secondo le norme	
CEI EN 62305/1-4	291
4.4 – LPS esterno	295
Metodo dell'angolo di protezione	295
Metodo della sfera rotolante	295
Metodo della maglia	297
4.5 – LPS interno	299
Collegamenti equipotenziali	299
Distanza di sicurezza	299
4.6 – Corrente di fulmine e origine delle sovratensioni	300

Accoppiamento resistivo.....	300
Accoppiamento induttivo	301
4.7 – Criteri di intervento	301
Verifica del volume protetto	302
Geometria di cablaggio delle stringhe	302
Utilizzo di SPD	303
Costruzioni dotate di impianto LPS	305
Costruzioni sprovviste di impianto LPS	306
Capitolo 5 – Progetto elettrico dell'impianto fotovoltaico	307
5.1 – Layout d'impianto	307
5.2 – Scelta dei componenti	312
Moduli fotovoltaici	312
Sistema di accumulo	316
Regolatore di carica	318
Convertitore statico	319
5.3 – Protezioni elettriche del generatore fotovoltaico	326
Diodi di blocco e diodi di by-pass	326
Scaricatori di sovratensione	329
Controllo dell'isolamento (nel caso di generatore flottante)	329
5.4 – Quadri elettrici	330
Quadri in corrente continua	330
Quadri in corrente alternata	335
Verifiche e prove.....	335
5.5 – Cavi elettrici, collegamenti e montaggio	335
Cablaggio del generatore fotovoltaico	335
Collegamento elettrico fra componenti	336
5.6 – Verifiche di progetto	337
Coordinamento tra conduttori e dispositivi di protezione	337
Installazione dei conduttori	338
5.7 – Verifiche di collaudo	339
Capitolo 6 – Redazione del progetto a guida CEI	343
6.1 – Generalità	343
6.2 – Redazione del progetto preliminare	344
Relazione tecnica	344
Planimetria generale e schemi elettrici	345
Piano di sicurezza (preliminare ed obbligatorio solo per le opere pubbliche).....	346
Preventivo di spesa.....	346
Check list di collaudo sull'impianto (facoltativo)	346

6.3 – Redazione del progetto definitivo	346
Relazione tecnica	346
Schemi elettrici	347
Planimetrie di disposizione dei componenti	347
Prescrizioni tecniche di fornitura ed elenco componenti	347
Computo metrico e computo metrico estimativo	347
Quadro economico	347
6.4 – Redazione del progetto esecutivo	347
Relazione tecnica sulla consistenza e tipologia dell'opera	348
Schemi elettrici	348
Planimetrie costruttive.....	348
Prescrizioni tecniche di fornitura ed elenco componenti	348
Computo metrico e computo metrico estimativo	348
Quadro economico	348
Capitolato speciale d'appalto.....	348
Manuale d'uso, manutenzione e sicurezza	348
Programma cronologico delle attività realizzative	349
 Capitolo 7 – Manutenzione	351
7.1 – Manutenzione ordinaria preventiva	351
Moduli fotovoltaici	351
Stringhe fotovoltaiche	351
Struttura di sostegno	352
Quadri elettrici	352
Batteria di accumulatori (se presente e di tipo VLA)	352
Convertitore statico	353
Collegamenti elettrici	353
7.2 – Affidabilità e parti a scorta	353
7.3 – Check list di controllo periodico	354
 Capitolo 8 – La valorizzazione dell'energia fotovoltaica ed analisi economica finanziaria di un impianto di grande taglia.	357
8.1 – Premessa	357
8.2 – Tariffa incentivante del conto energia	358
8.3 – Prezzo di vendita dell'energia	361
8.4 – Scambio sul posto	362
8.5 – Analisi economico-finanziaria di un impianto di grande taglia	363
Indicazioni generali	363
Breakdown dei costi	364
Assunzioni tecniche, economiche e finanziarie	364

Business Plan d'approccio	364
8.6 – Analisi di sensibilità sul TIR di progetto	369
Sensibilità al costo del modulo fotovoltaico	369
Sensibilità alla forbice delle ore equivalenti	369
Capitolo 9 – Normativa e disposizioni legislative per i sistemi fotovoltaici	375
9.1 – Premessa	375
9.2 – Gli organismi normatori	375
CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano)	376
IEC (Comitato Elettrotecnico Internazionale)	376
CENELEC (Comitato Europeo di Normazione Elettrica)	376
9.3 – Normativa vigente e disposizioni legislative	377
Legislazione tecnica	383
Regolamenti	383
PARTE E – FILIERA FOTOVOLTAICA E LINEE DI ASSEMBLAGGIO MODULI	
Capitolo 1 – La filiera organizzativa del mercato fotovoltaico	389
1.1 – Ruoli e peculiarità	389
1.2 – System integrator	392
General Contractor per impianti di grande taglia	392
Capofila di un network di installatori per impianti di piccola e media taglia	393
1.3 – Investitore/produttore di energia elettrica	393
Capitolo 2 – Linea di produzione per assemblaggio moduli cristallini	395
2.1 – Le fasi tecniche di lavorazione: la linea di processo	396
2.2 – Layout di una linea di produzione e analisi mansioni addetti	398
2.3 – Taglia della linea e selezione del catalogo dei prodotti	398
Taglia della linea di produzione	398
Catalogo dei prodotti	402
2.4 – Attrezzature della linea di produzione	402
2.5 – Produttività della linea e turni di produzione	407
2.6 – Costi di prodotto	408
2.7 – Costi di linea	409
2.8 – Costi di allestimento della linea e magazzino	409
2.9 – Costi di progettazione e start-up	410
2.10 – Costi operativi di una linea di produzione	410

APPENDICI

Appendice A – Progetto preliminare per un impianto fotovoltaico di piccola potenza in c. c. con convertitore ausiliario	413
Appendice B – Esempio di progetto definitivo per un Tetto fotovoltaico	439
Glossario fotovoltaico	471
Bibliografia	477