



JOSE PERFETTO

PROGETTAZIONE DI IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

FONTI RINNOVABILI NEGLI EDIFICI, RISPARMIO ENERGETICO
E IL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO

Modalità di conduzione
di sopralluogo e collaudo

Studio di fattibilità
tecnico economica

Il progetto esecutivo
di un impianto FV

Iter autorizzativi e di
allaccio dei sistemi FV

Integrazione architettonica,
agrivoltaico e CER



**PRONTO
GRAFILL**
Clicca e richiedi di essere contattato
per informazioni e promozioni



SECONDA EDIZIONE

GRAFILL

Jose Perfetto

PROGETTAZIONE DI IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Ed. II (09-2026)

ISBN 13 978-88-277-0540-7

EAN 9 788827 705407

Collana **MANUALI**



**Licenza d'uso da leggere attentamente
prima di attivare la WebApp o il Software incluso**

Usa un QR Code Reader
oppure collegati al link <https://grafill.it/licenza>

Per assistenza tecnica sui prodotti Grafill aprire un ticket su <https://www.supporto.grafill.it>

L'assistenza è gratuita per 365 giorni dall'acquisto ed è limitata all'installazione e all'avvio del prodotto, a condizione che la configurazione hardware dell'utente rispetti i requisiti richiesti.

© **GRAFILL S.r.l.** Via Principe di Palagonia, n. 89 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

**CONTATTI
IMMEDIATI**



Pronto GRAFILL
Tel. 091/6823069



Chiamami
chiamami.grafill.it



Whatsapp
grafill.it/whatsapp



Messenger
grafill.it/messenger



Telegram
grafill.it/telegram

Finito di stampare presso **Tipografia Publistampa S.n.c. – Palermo**

Edizione destinata in via prioritaria ad essere ceduta nell'ambito di rapporti associativi.

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.



**PRONTO
GRAFILL**

**CLICCA per maggiori informazioni
... e per te uno SCONTO SPECIALE**

SOMMARIO

PREFAZIONE	p.	9
1. ENERGIA E CONTESTO ENERGETICO	"	11
1.1. La domanda e le fonti di energia	"	11
1.1.1. Nuovi operatori dettano le tendenze di mercato, mentre la domanda di servizi energetici continua a crescere.....	"	11
1.1.2. La continua crescita delle energie rinnovabili	"	12
1.1.3. Il nucleare sta tornando in auge	"	12
1.1.4. Percorsi divergenti per il mix energetico.....	"	13
1.1.5. Sfide e trasformazioni per i mercati petroliferi e i veicoli elettrici	"	13
1.1.6. Offerta di GNL in crescita	"	14
1.1.7. Carbone & Asia.....	"	15
1.1.8. L'accesso ai servizi di energia moderni rimane un problema fondamentale.....	"	15
1.1.9. Futuri divergenti per emissioni globali e cambiamento climatico	"	16
1.1.10. Definire le scelte fondamentali	"	17
1.2. Le Energie Rinnovabili	"	17
1.2.1. Definizione e classificazione.....	"	17
1.3. I sistemi solari attivi e passivi.....	"	20
1.3.1. Definizione dei sistemi solari	"	20
1.3.2. I sistemi solari passivi	"	21
1.3.3. I sistemi solari attivi	"	28
1.4. Il solare fotovoltaico: cenni storici	"	30
2. LA RADIAZIONE SOLARE	"	33
2.1. Potenza e costante solare.....	"	33
2.2. Irraggiamento extraterrestre.....	"	34
2.3. Irraggiamento solare al suolo	"	35

2.4.	Diagramma delle traiettorie solari.....	p.	40
2.4.1.	I diagrammi polari.....	"	40
2.4.2.	I diagrammi solari: gli elementi principali	"	43
2.4.3.	Applicazione dei diagrammi polari.....	"	46
2.5.	Banche dati della radiazione solare:		
	UNI 10349, ENEA e GIS.....	"	60
3.	ASPETTI TEORICI DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA	"	64
3.1.	Effetto fotovoltaico.....	"	64
3.2.	Caratteristiche della cella fotovoltaica	"	71
3.3.	Curva caratteristica e parametri di qualità di una cella.....	"	73
3.4.	Condizioni standard, STC (Standard Test Conditions)	"	82
4.	TECNOLOGIA DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA	"	87
4.1.	Cenni costruttivi della tecnologia	"	87
4.2.	Tipologia di cella in silicio monocristallino e policristallino.....	"	88
4.3.	Tipologia di cella a giunzione multipla, a film sottile e tecnologie innovative	"	89
4.4.	Tipologia costruttiva.....	"	92
4.5.	Curva caratteristica V-I di un modulo fotovoltaico e relativi parametri elettrici	"	95
4.6.	Configurazione elettrica dei dispositivi.....	"	98
4.6.1.	Collegamenti in serie o in parallelo.....	"	98
4.7.	Parametri elettrici di un modulo FV.....	"	99
4.7.1.	Diodi di by-pass ed effetto hot-spot	"	99
4.7.2.	Il fenomeno dell'hot-spot	"	100
4.8.	Il modulo fotovoltaico standard e vetro-vetro.....	"	102
5.	TIPOLOGIE E APPLICAZIONI	"	105
5.1.	Applicazioni della tecnologia fotovoltaica.....	"	105
5.2.	Impianti isolati dalla rete: componenti e criteri di dimensionamento, schemi di impianto	"	107
5.2.1.	Caratteristiche principali	"	107
5.2.2.	Il dimensionamento	"	108
5.2.3.	Esempi di cablaggio.....	"	114
5.2.4.	Approfondimento sulle batterie	"	116
5.2.5.	Tipologie di supporto.....	"	116
5.2.6.	Esempi di applicazione	"	118
5.2.7.	Manutenzione dei sistemi isolati.....	"	119
5.3.	Impianti collegati alla rete elettrica:		
	componenti e criteri di dimensionamento, schemi di impianto	"	119
5.3.1.	Caratteristiche principali	"	119

5.3.2.	Dimensionamento della potenza di un impianto connesso in rete.....	p. 121
5.3.3.	Dimensionamento della potenza per prevalente autoconsumo	" 122
5.3.4.	Il dimensionamento per area disponibile	" 124
5.3.5.	Schemi elettrici.....	" 125
6.	IL GENERATORE FOTOVOLTAICO: I DISPOSITIVI	" 128
6.1.	Opzioni di collegamento di moduli fotovoltaici	" 128
6.2.	Quadro di parallelo, di campo e manovra	" 129
6.2.1.	Sequenza dei dispositivi	" 129
6.3.	Inverter.....	" 132
6.3.1.	I convertitori statici.....	" 132
6.3.2.	Le verifiche.....	" 140
6.4.	Quadro di interfaccia	" 141
6.5.	Protezioni	" 142
6.5.1.	Messa a terra del generatore fotovoltaico	" 143
6.5.2.	Scelta della tensione degli SPD, per il lato corrente continua, nei sistemi fotovoltaici	" 144
6.6.	Collegamento alla rete secondo la norma CEI 11-20.....	" 146
6.6.1.	Il dispositivo generale (DG)	" 147
6.6.2.	Il dispositivo di interfaccia (DDI)	" 147
6.6.3.	Il dispositivo di generatore (DDG)	" 147
6.6.4.	Il sistema di protezione di interfaccia (SPI)	" 148
6.7.	Esempio di schema: impianto FV in parallelo alla rete elettrica di bassa tensione monofase e trifase	" 149
7.	REALIZZAZIONE DEI SISTEMI FOTOVOLTAICI	" 151
7.1.	Le modalità di conduzione di un sopralluogo e di collaudo	" 151
7.2.	Iter autorizzativo.....	" 157
7.2.1.	Introduzione	" 157
7.2.2.	Testo unico "Aree non idonee" – D.Lgs. n. 190/2024	" 158
7.2.3.	Edilizia libera o Procedura Autorizzativa Semplificata	" 164
7.2.4.	Il Modello Unico.....	" 165
7.3.	Vincoli paesaggistici, storici, architettonici	" 166
7.3.1.	Paesaggistica	" 169
7.4.	Componenti e modalità di montaggio	" 172
7.5.	Gestione del cantiere e sicurezza.....	" 174
7.5.1.	Fondamenti di sicurezza D.Lgs. n. 81/2008.....	" 175
7.6.	Il collaudo	" 178
7.7.	La manutenzione di un sistema solare fotovoltaico	" 181

8. INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA

DEL SOLARE FOTOVOLTAICO	p. 187
8.1. Le strutture di supporto	" 187
8.2. Il sistema ad inseguimento	" 188
8.3. Sistemi di integrazione del fotovoltaico su coperture, inclinate, piane, a risega, curve, facciate, frangisole, pensiline o tettoie	" 192
8.3.1. I sistemi integrati	" 206
8.3.2. La tegola fotovoltaica	" 209
8.3.3. I laminati fotovoltaici	" 211
8.3.4. Moduli fotovoltaici in sostituzione di superfici trasparenti degli edifici	" 211
8.3.5. Sistemi integrati a frangisole	" 213
8.3.6. Sistemi fotovoltaici integrati in facciata	" 214
8.4. Sistemi fotovoltaici di grandi dimensioni	" 218
8.4.1. Impianti fotovoltaici a terra: sistemi ad infissione diretta	" 219
8.4.2. Strutture a basamento	" 222
8.5. Sistemi agrivoltaici	" 222
8.5.1. Caratteristiche e requisiti degli impianti agrivoltaici	" 223

9. CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI	" 229
9.1. Criteri di dimensionamento per area, esposizione, consumi e riqualificazione energetica	" 229
9.1.1. Dimensionamento per area	" 229
9.1.2. Dimensionamento per consumi	" 231
9.2. Parametri di targa e configurazione moduli/inverter	" 232
9.2.1. Riepilogo	" 248
9.3. Layout di impianto	" 248
9.4. Configurazione e calcolo di un impianto da 3 kWp	" 257
9.4.1. Selezione dei moduli	" 257
9.4.2. Scelta dell'inverter	" 259
9.4.3. Scelta dei cavi	" 260
9.4.4. Verifica caduta di tensione	" 261
9.4.5. Dispositivi di manovra e protezione	" 261
9.5. Configurazione di un impianto da 60 kWp	" 263
9.5.1. Scelta inverter	" 264
9.5.2. Scelta dei cavi	" 265
9.5.3. Verifica caduta di tensione	" 266
9.5.4. Quadro di parallelo inverter	" 268
9.5.5. Quadro generale	" 269

9.6.	Configuratori per gli impianti fotovoltaici.....	p. 271
9.6.1.	Configurazione elettrica di impianto fotovoltaico collegato alla rete elettrica di distribuzione da 20 kWp	" 273
10.	APPLICAZIONI SPECIALI E CRITERI DI ALLACCIO	" 278
10.1.	Smart Grid e CEI 0-21	" 278
10.2.	Sistemi FV Grid Connected e Storage	" 285
10.3.	Simulazione del bilancio energetico	" 293
10.4.	Scelta del sistema di accumulo	" 296
10.4.1.	Dimensionamento	" 296
10.4.2.	Dimensionamento in sintesi.....	" 300
10.5.	Tipologie impiantistiche ammesse	" 301
10.5.1.	I sistemi più diffusi oggi in commercio	" 303
10.5.2.	I sistemi <i>on grid</i> post-produzione	" 304
10.5.3.	I sistemi <i>off grid</i>	" 305
10.6.	Le procedure necessarie	" 307
10.7.	Normativa di riferimento	" 316
10.8.	Le Comunità Energetiche.....	" 317
11.	GLI ASPETTI ECONOMICI DEL FOTOVOLTAICO	" 322
11.1.	Il mercato mondiale del fotovoltaico.....	" 322
11.1.1.	La competizione con le fossili	" 323
11.2.	Costo e vita dell'investimento	" 326
11.3.	Il <i>Business Plan</i>	" 336
11.4.	Simulazione di una valutazione finanziaria	" 340
11.4.1.	Simulazione del <i>Business Plan</i>	" 340
11.4.2.	Fotovoltaico e valutazioni finanziarie.....	" 346
11.4.3.	Conclusioni.....	" 347
11.5.	Altre forme di valorizzazione dell'energia da FV.....	" 347
11.5.1.	La <i>grid parity</i>	" 347
11.6.	Aspetti fiscali.....	" 350
11.6.1.	Detrazioni fiscali.....	" 350
12.	CASI STUDIO	" 353
12.1.	Impianto da 4,5 kWp a servizio di una utenza privata	" 353
12.1.1.	Composizione del sistema fotovoltaico.....	" 354
12.1.2.	Cenni sul progetto esecutivo	" 354
12.1.3.	Strutture di supporto	" 356
12.1.4.	La fase realizzativa	" 357
12.1.5.	Collaudi finali	" 358
12.2.	Impianto da 20 kWp a servizio di una scuola.....	" 360
12.2.1.	Descrizione dell'impianto fotovoltaico	" 361

12.3.	Impianto da 100 kWp a servizio di un'azienda.....	p.	367
12.3.1.	Descrizione degli impianti	"	368
12.3.2.	Produzione energetica stimata	"	369
12.3.3.	La fase realizzativa	"	372
12.3.4.	Collaudi finali	"	374
12.4.	Impianto da 1 MWp a terra	"	375
12.4.1.	Progettazione ed autorizzazioni	"	381
12.4.2.	Valutazione finanziaria	"	384
12.4.3.	Strutture di supporto moduli.....	"	385
12.4.4.	La fase realizzativa	"	385
12.4.5.	Quadri ed organizzazione lato corrente continua.....	"	390
BIBLIOGRAFIA			" 393
KIT OPERATIVO PER LA PROGETTAZIONE			
DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI			" 394
–	Contenuti del Kit operativo	"	394
–	Requisiti hardware e software	"	394
–	Installazione e attivazione del prodotto	"	395

PREFAZIONE

Quest'ultima edizione arriva in un momento in cui l'energia è sempre più al centro delle tensioni politiche e geopolitiche. Naturalmente, i legami tra energia e politica sono sempre stati stretti, ma se guardiamo al mondo dell'energia negli ultimi decenni, non c'è altro periodo in cui le tensioni per la sicurezza energetica abbiano interessato contemporaneamente così tanti combustibili e tecnologie.

I governi si trovano a dover affrontare una formidabile serie di potenziali minacce, vulnerabilità, dipendenze e incertezze che spaziano in settori come petrolio, gas naturale, elettricità, infrastrutture energetiche, minerali critici, catene di approvvigionamento tecnologiche, *data center* e intelligenza artificiale, e altro ancora.

La sicurezza energetica oggi è davvero una questione di sicurezza economica e nazionale e la sua salvaguardia richiede lo stesso spirito di cooperazione e la stessa determinazione che i governi dimostrarono quando dopo lo shock petrolifero del 1973 crearono un fermo riferimento come l'Agenzia Internazionale dell'Energia.

L'elettricità è il cuore delle economie moderne e in tutti gli scenari la domanda di elettricità cresce molto più rapidamente del consumo energetico complessivo. La domanda di elettricità aumenta circa del 40% al 2035 sia nello scenario CPS che in quello STEPS, e di oltre il 50% nello scenario NZE. La crescita della domanda deriva, in proporzioni diverse, da elettrodomestici e condizionatori d'aria, dalle industrie manifatturiere avanzate e altre industrie leggere, dalla mobilità elettrica, dai *data center* e dal riscaldamento elettrificato. Gli investitori stanno reagendo a questo *trend*: la spesa per la fornitura di elettricità e per l'elettrificazione degli usi finali rappresenta già la metà degli attuali investimenti energetici globali. L'aumento del consumo di elettricità indica che i prezzi dell'elettricità stanno diventando un *benchmark* fondamentale per i consumatori e i *policy maker*. Al momento, l'elettricità rappresenta solo il 21% del consumo finale complessivo a livello globale, ma è la principale fonte di energia per settori che costituiscono oltre il 40% dell'economia globale e per la maggior parte delle famiglie. Ciò evidenzia l'importanza di una fornitura di energia elettrica sicura e accessibile e la rilevanza dei costi economici e sociali di blackout come quelli verificatisi nel 2025 in Cile e nella penisola iberica.

Una questione cruciale per la sicurezza dell'energia elettrica nell'Era dell'Elettricità è la velocità con cui vengono realizzate le nuove reti, i sistemi di accumulo e tutte le altre fonti di flessibilità del sistema elettrico. Al momento, lo sviluppo di queste infrastrutture sta subendo dei rallentamenti. Gli investimenti nella generazione di elettricità sono au-

mentati quasi del 70% dal 2015, raggiungendo i 1.000 miliardi di dollari all'anno, ma nello stesso periodo il ritmo di crescita della spesa annuale per le reti è stato della metà, assestandosi a 400 miliardi di dollari. Questo aumenta la congestione, ritarda la connessione di nuove fonti di produzione e di domanda di energia elettrica, e fa aumentare i prezzi dell'elettricità. Si stanno verificando sempre più tagli alla produzione eolica e solare, così come i casi di prezzi negativi nei mercati all'ingrosso. Tuttavia, la lentezza degli iter autorizzativi frena i progetti di rete, e ciò è aggravato dalla scarsità dei mercati per trasformatori e altri componenti. I rischi sono stati in parte mitigati dall'aumento della crescita dello stoccaggio tramite batterie, con incrementi annuali per più di 75 gigawatt (GW) nel 2024. Tuttavia, le batterie non possono essere l'unica risposta, soprattutto con l'aumento delle esigenze di flessibilità stagionali e a quelle di breve termine.

Sottolineiamo inoltre, ancora una volta, due aree critiche in cui il mondo è chiaramente carente: **l'accesso universale all'energia e il cambiamento climatico**. Entrambi sono da decenni al centro dell'attenzione dell'AIE e del WEO (*World Energy Outlook*).

E sottolineiamo ancora una volta che, lungi dal limitare il riscaldamento globale a 1,5 °C o ben al di sotto dei 2 °C, ci stiamo attualmente dirigendo verso risultati compresi tra 2,5 e 3 °C, con gravi implicazioni per la vita e i mezzi di sussistenza in tutto il mondo. Esistono ancora percorsi che mitigano significativamente questi rischi, mentre le opzioni per ridurre sostanzialmente le emissioni sono ben note e, in molti casi, economicamente vantaggiose.

ENERGIA E CONTESTO ENERGETICO

L'energia è la possibilità di svolgere compiti, azioni, in fisica si dice **compiere un lavoro**.

Per inquadrare il tema relativo ai sistemi solari è necessario comprendere il contesto nel quale si colloca il tema delle energie rinnovabili; risulta quindi necessario affrontare il tema dell'energia inteso come panorama energetico ed a più largo raggio le fonti di energia, i settori più energivori, l'inquinamento e l'emissione di CO₂ legata alla produzione dell'energia, il concetto di Energia Primaria, le riserve, la produzione, il consumo o fabbisogno, le fonti fossili e quelle rinnovabili.

Essendo l'energia solare la fonte rinnovabile per eccellenza occorre distinguere tra i Sistemi Solari Attivi e Passivi per comprenderne le caratteristiche e le applicazioni.

Giungeremo quindi ad inquadrare il solare fotovoltaico attraverso brevi cenni storici per apprezzarne la peculiarità e l'evoluzione tecnologica.

1.1. La domanda e le fonti di energia

1.1.1. *Nuovi operatori dettano le tendenze di mercato, mentre la domanda di servizi energetici continua a crescere*

Le dinamiche del mercato energetico sono guidate sempre di più da un gruppo di economie emergenti, guidate dall'India e dal Sud-Est asiatico, e affiancate da paesi del Medio Oriente, dell'America Latina e dell'Africa. Nel complesso, queste economie raccolgono il testimone dalla Cina, che dal 2010 ha totalizzato oltre la metà della crescita della domanda globale di petrolio e gas e il 60% della crescita della domanda di elettricità, sebbene nessun paese da solo riesca a replicare la traiettoria energetica cinese. Questo spostamento del centro di gravità del sistema energetico si riflette in diversi indicatori. Ad esempio, tra il 2000 e il 2010, le economie avanzate hanno totalizzato metà della crescita del parco auto globale; nel decennio successivo, la Cina, da sola, ha fatto altrettanto. Tra oggi e il 2035, metà della crescita del parco auto globale proverrà da economie emergenti e in via di sviluppo al di fuori della Cina.

La mappatura della nuova geografia della domanda sulla distribuzione delle risorse energetiche globali rivela che, entro il 2035, l'80% della crescita dei consumi energetici avverrà nelle regioni con un'alta irradiazione solare. Si tratta di un dato in netto contrasto con l'ultimo decennio, quando le regioni a irradiazione solare media o bassa hanno guidato

metà della crescita. Ciò contribuisce a spiegare la rapida diffusione delle tecnologie solari nei nostri scenari e l'aumento della domanda di condizionatori. Molti dei nuovi centri della domanda in Asia dispongono di risorse nazionali di carbone e dipendono dalle importazioni di petrolio e gas.

1.1.2. *La continua crescita delle energie rinnovabili*

Nonostante vari il ritmo, in tutti gli scenari le fonti rinnovabili crescono più velocemente di qualsiasi altra fonte energetica rilevante, guidate dall'energia solare fotovoltaica. Nello scenario CPS, nonostante le condizioni meno favorevoli, le rinnovabili continuano a soddisfare la quota maggiore della crescita totale della domanda energetica, seguite da gas naturale e petrolio, nonostante le aggiunte annuali di energia solare fotovoltaica nel settore elettrico fino al 2035 si fermino ai livelli attuali di 540 GW. Nello STEPS, i cambiamenti nelle politiche pubbliche fanno sì che gli Stati Uniti raggiungano nel 2035 una capacità installata di rinnovabili inferiore del 30% rispetto all'*Outlook* dello scorso anno, ma a livello globale le rinnovabili continuano la loro rapida espansione.

Il boom della diffusione del solare è accompagnato da una solida crescita dell'eolico, dell'idroelettrico, della bioenergia, della geotermia e di altre tecnologie, nonché da miglioramenti nell'efficienza energetica. La Cina continua ad essere il più grande mercato per le rinnovabili, con una quota del 45-60% della diffusione globale nei prossimi dieci anni in tutti gli scenari, e a rimanere il principale produttore della maggior parte delle tecnologie rinnovabili.

La capacità produttiva elevata di pannelli solari e batterie, principalmente in Cina, contribuisce a mantenere i prezzi contenuti, ma solleva al contempo preoccupazioni in diversi mercati. Nel 2024, vi era sufficiente capacità produttiva per produrre più del doppio dei moduli fotovoltaici effettivamente installati e quasi il triplo delle celle per batterie. Le esportazioni cinesi di nuove tecnologie energetiche, compresi i veicoli elettrici, sono cresciute fino a rappresentare quasi il 5% delle esportazioni totali di beni; e le aziende cinesi hanno investito in impianti di produzione all'estero in Indonesia, Marocco, Ungheria, Brasile e altrove.

Se da un lato alcuni paesi, in particolare le economie in via di sviluppo, vedono una grande opportunità di accesso a tecnologie competitive dal punto di vista dei costi, dall'altro vi sono preoccupazioni per il dominio della Cina in queste nuove catene del valore. Una domanda fondamentale è cosa accadrà a questa capacità in eccesso nel contesto delle barriere commerciali, delle incertezze sul lato della domanda, delle forti pressioni sui prezzi delle tecnologie e dei margini di profitto in calo per alcuni produttori.

1.1.3. *Il nucleare sta tornando in auge*

Un altro elemento comune a tutti gli scenari è la rinascita dell'energia nucleare, con un aumento degli investimenti sia negli impianti tradizionali di grandi dimensioni che nei nuovi progetti, tra cui i piccoli reattori modulari (SMR). Oggi, più di 40 paesi includono l'ener-

LA RADIAZIONE SOLARE

2.1. Potenza e costante solare

Il Sole è la stella madre del sistema solare, attorno alla quale orbitano gli otto pianeti principali, tra cui la Terra, insieme ai pianeti nani, ai loro satelliti, a innumerevoli altri corpi minori e alla polvere diffusa nello spazio che costituisce il mezzo interplanetario. La sua massa rappresenta da sola il 99,9% della massa complessiva dell'intero sistema solare, rendendolo il corpo dominante dal punto di vista gravitazionale.

Il Sole costituisce inoltre la principale fonte di energia disponibile sulla Terra. È formato per circa l'80% da idrogeno e per il 19% da elio, mentre nel restante 1% sono stati individuati quasi tutti gli elementi conosciuti.

L'energia irradiata dal Sole deriva da una reazione di tipo termonucleare, attraverso la quale la massa viene continuamente trasformata in energia. In particolare, la fusione nucleare consiste nella trasformazione di quattro nuclei di idrogeno in un nucleo di elio. Poiché la massa del nucleo di elio ottenuto è minore della somma delle masse dei quattro nuclei di idrogeno iniziali, la differenza viene convertita in energia secondo la relazione:

$$E = mc^2$$

[Energia uguale massa per velocità della luce al quadrato]

La potenza associata alla radiazione solare emessa dai processi di fusione che incide sull'unità di superficie prende il nome di **irraggiamento solare**.

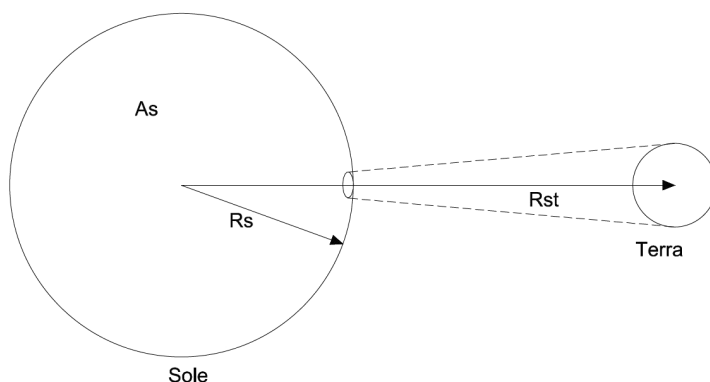


Figura 2.1. Potenza ed emissione per unità di superficie

In termini di calcolo, conoscendo la massa dell'idrogeno e dell'elio, il numero di reazioni, la velocità della luce, il raggio del Sole e quindi la sua superficie, oltre alla distanza minima e massima tra Terra e Sole, dato che l'orbita è ellittica, possiamo calcolare la quantità di energia irradiata verso la Terra. Ciò è possibile applicando la relazione di Einstein sulla trasformazione della massa in energia e determinando la potenza emessa per unità di superficie solare. In numeri:

Massa idrogeno	$(1.67356 \cdot 10^{-27} \text{ kg})$
Massa elio	$(6.64658 \cdot 10^{-27} \text{ kg})$
Velocità luce	$(2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s})$
Raggio del Sole	$(6.9626 \cdot 10^5 \text{ km})$
Distanza Terra-Sole min	$(1.471 \cdot 10^8 \text{ km})$
Distanza Terra-Sole max	$(1.521 \cdot 10^8 \text{ km})$

2.2. Irraggiamento extraterrestre

La potenza irradiata complessivamente dal Sole è pari ad oltre 60.000 kW per m². La potenza disponibile decresce via via che aumenta la distanza dal Sole, e dopo aver percorso i circa 150 milioni di km che separano la Terra dal Sole assume un valore molto più ridotto, di poco superiore ad 1.35 kW per m². Tale valore viene chiamato **costante solare**. Nella realtà tale valore non è costante perché dipende dall'attività solare (macchie solari) e dalla distanza Sole-Terra variabile nell'arco dell'anno. Il valore "medio" è di 1.353 W per m².

La **costante solare** è da intendersi come un valore medio di riferimento in quanto la potenza che raggiunge la fascia esterna della atmosfera terrestre in realtà oscilla a causa dell'orbita ellittica Terra-Sole.

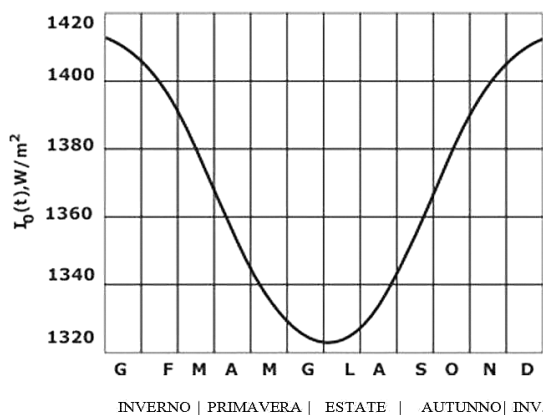


Figura 2.2. Valore della "costante solare"

La costante solare è la somma delle energie di tutte le frequenze dello spettro della radiazione solare, non soltanto quelle della banda visibile.

ASPETTI TEORICI DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA

3.1. Effetto fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico trasforma direttamente ed istantaneamente l'energia solare in energia elettrica; questa tecnologia funziona mediante l'effetto fotoelettrico, per mezzo del quale materiali semiconduttori opportunamente drogati generano elettricità se esposti alla radiazione solare.

Si definisce quindi sistema fotovoltaico:

«l'insieme dei componenti meccanici, elettrici, ed elettronici che concorrono a captare e trasformare l'energia solare disponibile, rendendola utilizzabile dall'utenza sotto forma di Energia elettrica».

Il solo insieme dei moduli fotovoltaici, pur costituendo l'elemento principale del sistema al centro del processo produttivo, non è sufficiente per la realizzazione di un impianto in grado di approvvigionare gli utenti dell'energia richiesta; il sistema nel suo complesso è quindi più esteso e comprende l'utilizzo di altri strumenti che permettono nel loro complesso la trasformazione, gestione, monitoraggio e trasmissione dell'energia prodotta in condizioni di sicurezza per l'utente, l'installatore e il gestore.

Il tutto inizia comunque da un **principio fotovoltaico** che permette di innescare la generazione di energia elettrica.

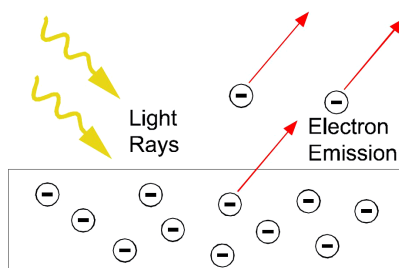


Figura 3.1. Schema del principio fotovoltaico

Il principio fotovoltaico consente di convertire la radiazione solare incidente in corrente elettrica continua utilizzando materiali semiconduttori, propri dell'industria elettronica, facendo interagire il fotone della radiazione solare con gli elettroni del materiale.

Tale effetto viene innescato da una sottile fetta di materiale semiconduttore opportunamente trattata; il trattamento è caratterizzato da diversi processi chimici, tra i quali vi sono i cosiddetti "drogaggi".

Inserendo nella struttura cristallina ad esempio del silicio delle impurità, cioè atomi di boro e fosforo, si genera un campo elettrico e si rendono anche disponibili le cariche necessarie alla formazione della corrente elettrica.

Il fotone risulta quindi una particella associata alle onde elettromagnetiche capace di fornire l'energia necessaria ad attivare il processo.

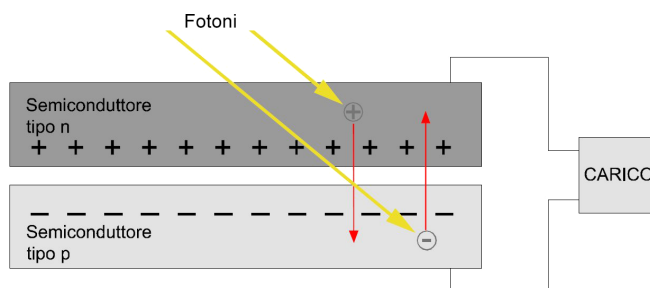


Figura 3.2. Le giunzioni di tipo "p" ed "n"

L'elemento certo è che questo processo è possibile grazie alle proprietà di alcuni materiali detti semiconduttori: si tratta di sostanze cristalline, organiche o inorganiche, con resistività intermedia tra quella dei conduttori e degli isolanti. La resistività di un materiale semiconduttore diminuisce all'aumentare della temperatura.

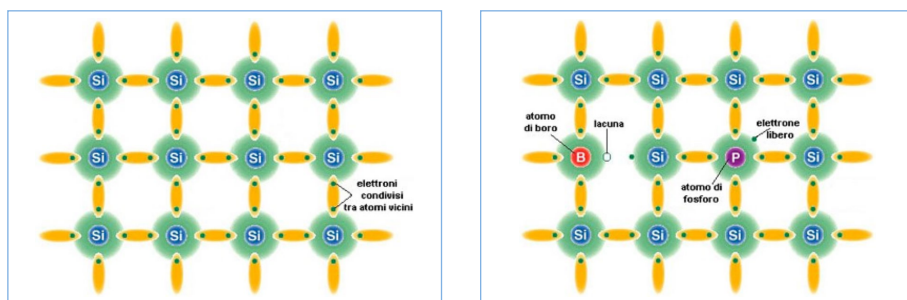


Figura 3.3. I reticoli cristallini

La conversione fotovoltaica avviene sfruttando le cosiddette giunzioni $p-n$, le quali sono alla base di gran parte della strumentazione elettronica (il che ha permesso di facilitare lo sviluppo della tecnologia solare sfruttando le conoscenze in precedenza acquisite, e le stesse fonti di materia prima cui attinge l'elettronica).

I semiconduttori, come per esempio il silicio (Si , numero atomico 14) sono organizzati in reticoli cristallini. Ogni atomo è circondato da altri 4, dove ognuno mette in comune uno dei suoi 4 elettroni di valenza per raggiungere la configurazione stabile ed avere l'ottetto

TECNOLOGIA DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA

4.1. Cenni costruttivi della tecnologia

Per diventare un prodotto utilizzabile le celle fotovoltaiche sono cablate elettricamente ed incapsulate in un insieme di layer volto a creare un modulo solare.

Il modulo fotovoltaico è l'elemento modulare alla base del generatore fotovoltaico ed è il dispositivo nel quale vengono organizzate le celle fotovoltaiche.

La singola cella può produrre una potenza da 3 a 6 W che risulta insufficiente per applicazioni pratiche.

Per accrescere la potenza, più celle sono collegate tra di loro in maniera da costituire un modulo, la cui potenza può arrivare oltre i 350 W.

Per ottenere i moduli fotovoltaici, le celle vengono collegate in serie e saldate tra loro mediante terminali sui **contatti anteriori e posteriori** (in sequenza Negativo-Positivo-Negativo-Positivo...) in modo da formare le **stringhe**.

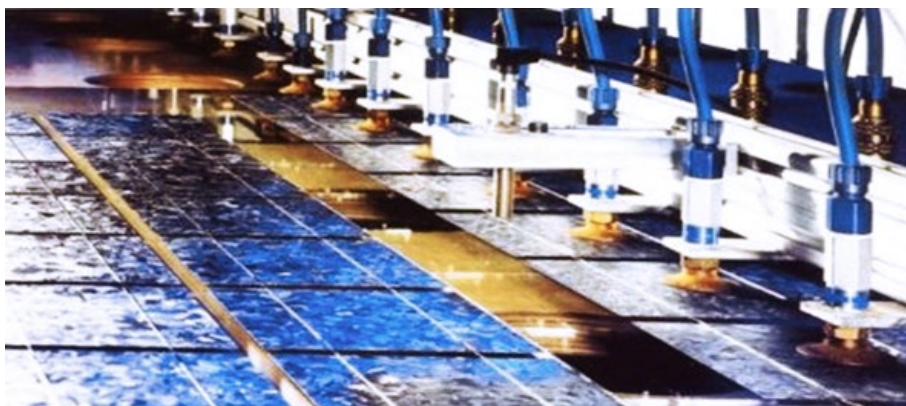


Figura 4.1. Fase di lavorazione di un modulo fotovoltaico (Saint Gobain)

I moduli fotovoltaici cristallini oggi più comuni sono costituiti da 48-60 e 72 celle con una configurazione elettrica utile a conseguire valori di tensione e corrente per l'accoppiamento con altri dispositivi come ad esempio convertitori o accumulatori elettrochimici.

Nell'esempio riprodotto si tratta di un modulo fotovoltaico costituito complessivamente da 72 celle organizzate in serie con una tensione di 40 V e una corrente di 4 A.

La connessione in serie consente di sommare la tensione di ogni cella, mentre la corrente rimarrà la corrente tipica della singola cella.

Otterremo così un generatore in corrente continua dotato dei due poli: il polo positivo e quello negativo.

In figura 4.2 si nota la presenza di **3 diodi**, ovvero dispositivi semiconduttori, che fungono da *by-pass* per la limitazione di perdite dovute a ombreggiamenti, di cui parleremo in seguito.

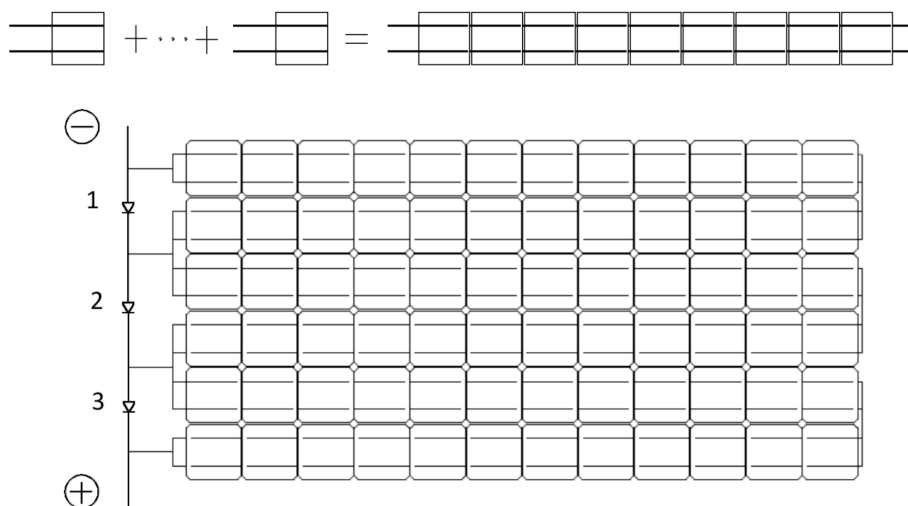


Figura 4.2. Organizzazione delle celle cristalline di un modulo fotovoltaico

4.2. Tipologia di cella in silicio monocristallino e policristallino

Esistono attualmente tre generazioni di tecnologie fotovoltaiche.

La prima, la tecnologia cristallina, è quella attualmente più utilizzata e viene denominata del tipo mono e policristallino.

Le differenze maggiori si hanno nella formazione della fetta di silicio, denominata *wafer*, che è la struttura principale sulla quale verranno eseguiti i diversi trattamenti di natura chimica, di cui abbiamo parlato nell'unità didattica precedente, che portano alla creazione della vera e propria cella.

Il *wafer* di monocristallo si produce con il metodo Czochralsky, basato sulla cristallizzazione che si origina immergendo un "seme" di materiale molto puro nel silicio liquido; viene poi estratto e raffreddato per ottenere un "lingotto" di monocristallo di forma cilindrica. Il lingotto verrà drogato e poi affettato in *wafer* aventi uno spessore compreso tra i 250 e i 350 micrometri.

Le celle in silicio poli-cristallino sono di solito quadrate perché ricavate da semplici lingotti di diversi cristalli.

TIPOLOGIE E APPLICAZIONI

5.1. Applicazioni della tecnologia fotovoltaica

Ad oggi, le applicazioni fotovoltaiche ricoprono la quasi totalità del mondo energetico.

Abbiamo visto che la generazione con celle, anche di piccolissime dimensioni, può rendere autosufficiente dispositivi quali calcolatrici ed orologi, che necessitano di qualche centesimo di watt per il loro funzionamento.

Sistemi isolati dalla rete elettrica e quindi ad alto onere di allaccio, come ripetitori, segnaletica e stazioni di monitoraggio, che necessitano di qualche decina di watt, sono già da tempo applicazioni affidabili ed economicamente vantaggiose, oltre a quelle per i Paesi in via di Sviluppo.

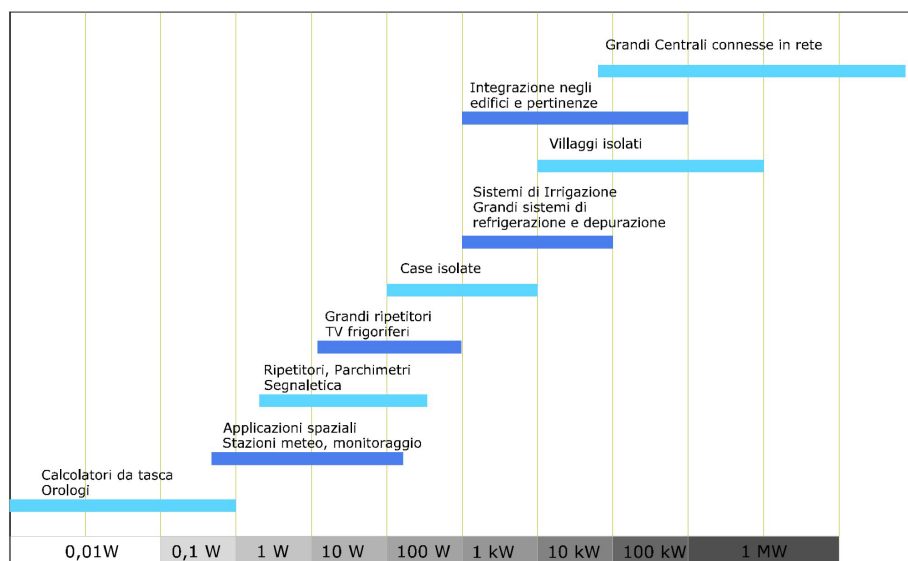


Figura 5.1. Applicazioni fotovoltaiche

Le applicazioni che riguardano potenze dal kilowatt in su sono invece quelle interessate principalmente dalla cosiddetta "generazione diffusa", ovvero delle vere e proprie piccole centrali fotovoltaiche che costituiscono una micro-generazione sul territorio di alimentazione della rete.

Generalmente, questi impianti connessi in rete sono anche integrati architettonicamente nell'involucro degli edifici o in elementi di arredo urbano.

Esistono quindi, fondamentalmente, due tipologie di sistemi fotovoltaici, ovvero i **sistemi isolati** e quelli **connessi in rete**, la cui architettura è sostanzialmente diversa.

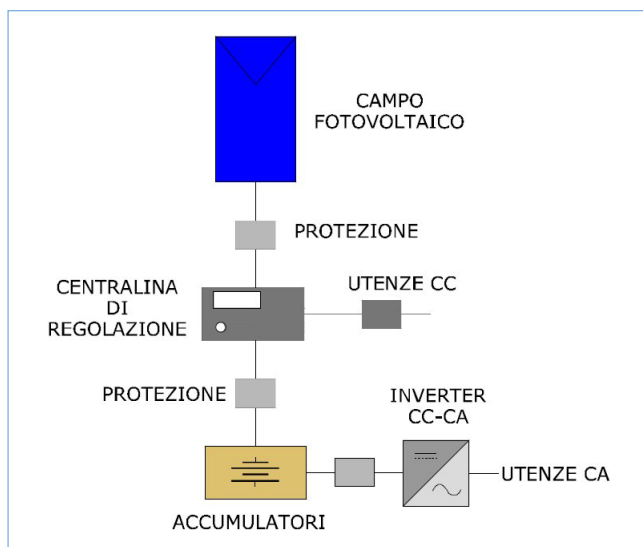


Figura 5.2. Sistema FV isolato: componenti principali

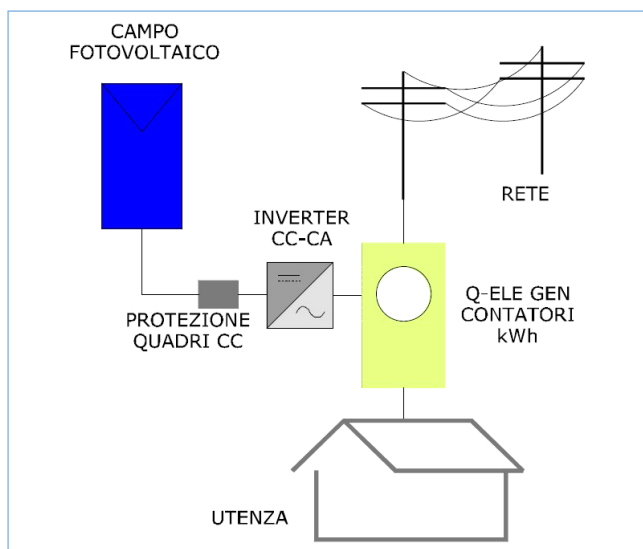


Figura 5.3. Sistema FV connesso alla rete: componenti principali

Nei sistemi fotovoltaici isolati, il campo fotovoltaico, l'insieme dei moduli, alimenta direttamente utenze o carichi in corrente continua oppure accumulatori elettrochimici, le

IL GENERATORE FOTOVOLTAICO: I DISPOSITIVI

In questo capitolo tratteremo i dispositivi che sostituiscono il generatore fotovoltaico che evidentemente non sono solo i moduli ma anche i quadri elettrici, gli *inverter*, le protezioni di interfaccia, i cavi, i connettori e tutto l'occorrente di cui tener conto in un progetto esecutivo. Verificheremo, inoltre, le opzioni di collegamento di moduli fotovoltaici con i quadri di parallelo, di campo e manovra e con l'*inverter*, e approfondiremo il quadro di interfaccia e relative protezioni di connessione alla rete secondo la CEI 11-20 e CEI 0-21.

Redigeremo infine un esempio di schema elettrico di un impianto FV in parallelo alla rete elettrica di bassa tensione monofase e trifase.

6.1. Opzioni di collegamento di moduli fotovoltaici

Quasi tutti i moduli fotovoltaici in commercio sono dotati oltre che di scatola di giunzione, contenente i diodi di by-pass, anche di cavi e connettori per il cablaggio rapido.

La connessione dei moduli in un sistema di connessione in rete dove sia necessario arrivare a tensioni considerevoli risulta agevolata dai tipi di connettori maschio/femmina corrispondenti ad un relativo polo. Unendo quindi un maschio con una femmina avremo la connessione positivo negativo fino al numero di moduli e quindi alla tensione desiderata.



Figura 6.1. Interconnessione dei moduli a costituire stringhe da attestare successivamente ad un quadro o inverter

I connettori sono generalmente del tipo *Multicontact*, *Radox* o *Tyco* e sono dotati di guarnizioni tali da rendere le connessioni sicure e stagne.

Avvenuta la connessione tra modulo e modulo avremo bisogno di costituire una linea positivo-negativo di ogni stringa per giungere ad un quadro di campo o all'*inverter*. I moduli possono essere cablati in maniera differente di come vengono posati meccanicamente.

A seconda anche del posizionamento della scatola di giunzione si può optare per file parallele o, come nell'ultimo caso in figura, effettuare un cablaggio di stringa in modo da formare due spire con correnti opposte.

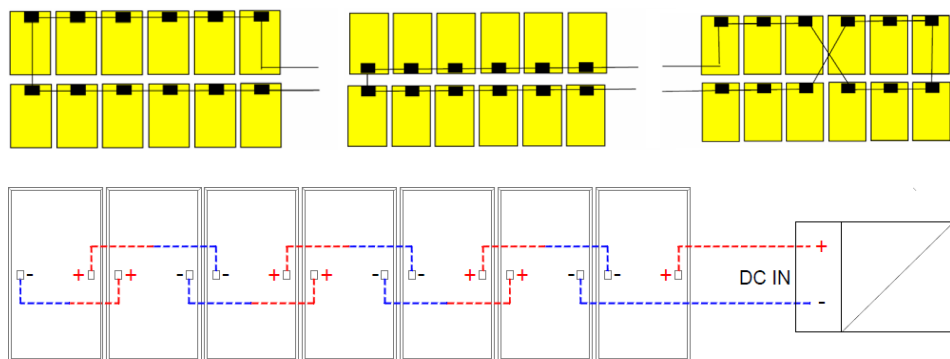


Figura 6.2. Cablaggio per file parallele o a formare due spire con correnti opposte

6.2. Quadro di parallelo, di campo e manovra

6.2.1. Sequenza dei dispositivi

Il collegamento moduli fotovoltaici/*inverter* viene realizzato con cavi di tipo solare a doppio isolamento FG21 con sezione da 4 a 6 mm².

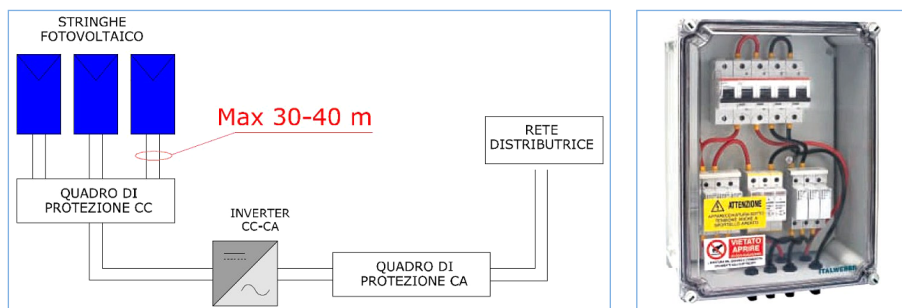


Figura 6.3. Massima distanza moduli / Quadro di manovra

Se l'*inverter* è vicino ai moduli fotovoltaici, ovvero considerando la lunghezza totale del circuito in corrente continua di 30-40 m, non si hanno perdite rilevanti; per cui è pos-

REALIZZAZIONE DEI SISTEMI FOTOVOLTAICI

7.1. Le modalità di conduzione di un sopralluogo e di collaudo

Il sopralluogo è una delle operazioni fondamentali per la realizzazione di un impianto fotovoltaico perché si evitino:

- spiacevoli imprevisti in fase realizzativa;
- stime errate dei costi di installazione;
- stime errate della produzione energetica.

Solo attraverso un sopralluogo mirato è possibile verificare la reale fattibilità tecnica ed economica dell'intervento. Conviene quindi verificare per prima cosa la fattibilità tecnica ed economica dell'intervento e in particolare, le verifiche devono riguardare:

- l'area di posa dei moduli;
- la presenza o meno di ombre;
- la condizione orografica dell'intorno del sito.

Gli strumenti utili per l'esecuzione di un buon sopralluogo in sito sono:

- bussola;
- clinometro: strumento per la misura dell'inclinazione di un corpo. È costituito da una parte fissa e da una mobile, che consente di traguardare l'oggetto della misura;
- bindella metrica o metro elettronico;
- macchina fotografica.

È consigliabile la predisposizione di un modulo di raccolta dati la cui compilazione rappresenta il sistema di acquisizione delle informazioni più importante di ogni altra operazione. In particolare, l'acquisizione di tali informazioni riguarderanno:

- Identificazione la miglior posizione per l'installazione tenendo presente:
 - orientamento della superficie di installazione;
 - tipo di struttura per il sostegno dei moduli;
 - acquisire materiale cartografico relativo all'area e al fabbricato in esame.
- Una volta stabilita l'area di installazione è necessario:
 - rilevare eventuali zone d'ombra;
 - scattare eventuali fotografie del previsto luogo di posa e della struttura esistente.

È importante in questa fase anche il rilievo dell'intorno del sito e quello orografico ovvero la verifica che l'area a disposizione non venga ombreggiata nella maggior parte delle ore di Sole utili anche nella stagione invernale.

Non è raro imbattersi in edifici che hanno un'ottima inclinazione ed esposizione della copertura, ma posizionati, ad esempio, sul versante Sud di una vallata aperta da Est ad Ovest oppure in presenza di alta vegetazione o edifici contigui più alti e posizionati a Sud rispetto all'edificio in questione. La perdita di produttività di queste tipologie di impianti può essere molto consistente e, spesso, può falsare un'analisi economica che non ha tenuto conto di tali fattori.

Al primo approccio con il cliente finale, conviene raccogliere più informazioni possibili sull'edificio e sul Comune; una buona pratica è farsi preparare, per il sopralluogo, una pianta della copertura ed altri dati cartografici dell'edificio, utili alla redazione del progetto.

Oltre alla copertura e/o all'area che si ritiene utile per la posa del campo fotovoltaico, occorre individuare un locale per l'installazione dell'*inverter* che sia il più vicino possibile al campo stesso ed, infine, un quadro elettrico generale che consenta l'inserimento di un dispositivo di sezionamento e protezione dedicato. Occorre valutare le opere edili da prevedere per il cablaggio dei dispositivi quali fori e rispristini di murature e solai e il materiale accessorio occorrente come canaline, tubi e scatole di derivazione. Occorre, infine, valutare le eventuali difficoltà logistiche che si possono verificare in fase di realizzazione per il trasporto e lo stoccaggio del materiale quali ad esempio la larghezza della strada, dell'accesso e l'acclività del terreno considerando che possono accedere al cantiere mezzi di trasporto anche di considerevoli dimensioni.

Risulta quindi importante la compilazione del modulo raccolta dati, necessario per la verifica delle informazioni per la redazione del progetto esecutivo e delle pratiche di connessione dell'impianto alla rete. Nello specifico, trattandosi ad esempio di un impianto da realizzarsi su copertura di un edificio residenziale sarà fondamentale riportare una serie di valori quali:

- *Consumo medio annuo*: abbiamo visto che sono il principale dato di riscontro dalle bollette per un dimensionamento preliminare dell'impianto.
- *Potenza desiderata*: a prescindere dalle considerazioni di disponibilità di superficie piuttosto che economiche è possibile che alcuni clienti chiedano espressamente la realizzazione di un impianto di potenza pari al contratto di fornitura come un 3 kW per una classica utenza residenziale.
- *Produzione energetica annua desiderata*: generalmente è quella che possa coprire interamente i consumi medi annui dell'utenza con un impianto in regime di scambio sul posto con la rete.
- *Tipologia di pannelli*: può succedere che sia il cliente stesso a suggerire l'utilizzo di alcune tipologie di moduli fotovoltaici in quanto imposte dal Comune o utilizzate da edifici attigui quali silicio mono o policristallino, amorfo o altre tecnologie.

Stralcio di un modulo di raccolta dati: informazioni relative al dimensionamento

5. Potenza desiderata (kWp):			
6. Produzione energetica annua desiderata (kWh/anno):			
7. Tipologia pannelli			
Monocristallino	☐	Policristallino	☐
		Thin-Film	☐

INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA DEL SOLARE FOTOVOLTAICO

8.1. Le strutture di supporto

I sistemi fotovoltaici sono soggetti, per la loro tipica collocazione ed esposizione, ad azioni degli agenti atmosferici che ne mettono a dura prova la solidità e durevolezza.

Le strutture di supporto di tali sistemi necessitano quindi di modalità di posa specifiche per soddisfare precisi requisiti quali la tenuta alle più comuni sollecitazioni meccaniche, termiche e di usura ma anche ad eventi ritenuti eccezionali.

Le tipologie di supporto dei moduli fotovoltaici sono essenzialmente di due tipi a seconda che il sistema sia **ad inseguimento** o **fisso**.

Mentre i sistemi ad inseguimento prevedono organi di movimentazione per appunto inseguire il Sole ed ottenere quanto più possibile l'irradianza incidente sul piano dei moduli, i sistemi di supporto fissi sono generalmente utilizzati per installazioni a terra, su edifici e pertinenze come pensiline e tettoie o elementi di arredo urbano oppure su qualsiasi superficie ben esposta alla radiazione solare.



Figura 8.1. Esempi di strutture di supporto dei moduli fotovoltaici:
ad inseguimento, fisse su copertura, fisse a terra

La produttività di tali sistemi dipenderà quindi da una serie di fattori quali sicuramente l'orientamento e l'esposizione ma anche il tipo di integrazione architettonica ovvero la capacità di raffreddamento mediante ventilazione naturale o indotta.

La produttività dei sistemi ad inseguimento dipenderà dalla capacità di inseguire il Sole per avere la radiazione solare sempre incidente ovvero dal numero di assi di rotazione e dal sistema di gestione di cui sono dotati.

8.2. Il sistema ad inseguimento

Il sistema di supporto ad inseguimento, attraverso opportuni movimenti meccanici, permette di orientare il piano moduli il più possibile in maniera incidente rispetto alla radiazione solare in modo da incrementarne la potenza e quindi la produzione.

I sistemi ad inseguimento sono utilizzati da sistemi fotovoltaici ma anche da sistemi solari termici, concentratori solari con riflettori o lenti. Lo scopo è massimizzare l'efficienza del modulo nella produzione di energia elettrica e si possono classificare sulla in base di:

- il numero di assi e la loro orientamento, ovvero inseguitori mono-assiali di tilt, mono-assiali di rollio ed altre tecnologie;
- il tipo di meccanismo di orientamento;
- la tipologia di comando elettronico.

Un inseguitore mono-assiale produce il 10-30% in più di energia rispetto ad un impianto fisso, a seconda del tipo di montaggio e di movimento. Un inseguitore bi-assiale, invece, può permettere un incremento del 35-40%, a seconda dei diversi modelli.



Figura 8.2. Esempi di strutture ad inseguimento

Il **sistema ad inseguimento** ha diversi assi di rotazione con le seguenti caratteristiche:

- inseguitore monoasse con vela che ruota su un asse inclinato di 30° ; garantisce, rispetto ad un impianto fisso tradizionale, un rendimento stimato annuo del 32%. Rotazione della ralla inclinata di $\pm 80^\circ$.
- inseguitore monoasse con movimento Est-Ovest ($\pm 120^\circ$) e angolo di tilt fisso (45°). Garantisce un 32% di resa in più rispetto ad un impianto fisso tradizionale.
- inseguitore biasse con movimento Est-Ovest ($\pm 20^\circ$) e tilt (da 20° a 70°) che raggiunge il 40% di resa in più rispetto ad un impianto fisso tradizionale.

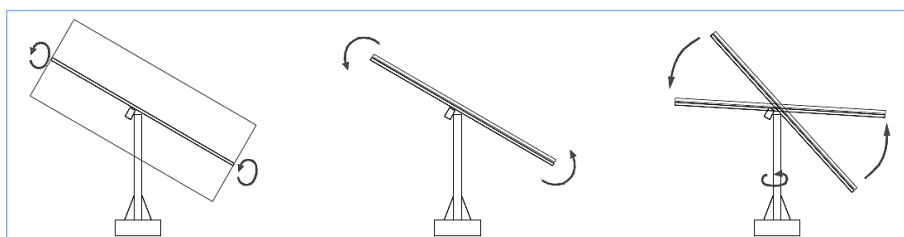


Figura 8.3. Inseguitori di tipo A, B e C

CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

9.1. Criteri di dimensionamento per area, esposizione, consumi e riqualificazione energetica

9.1.1. Dimensionamento per area

Nel dimensionare un sistema fotovoltaico abbiamo sempre parlato di area disponibile o area utile: in questa fase dobbiamo rapportarci alla necessità di trasformare l'area utile in un piano moduli interfacciandoci con i prodotti presenti sul mercato, le caratteristiche strutturali ed i supporti per redigere un vero e proprio esecutivo.

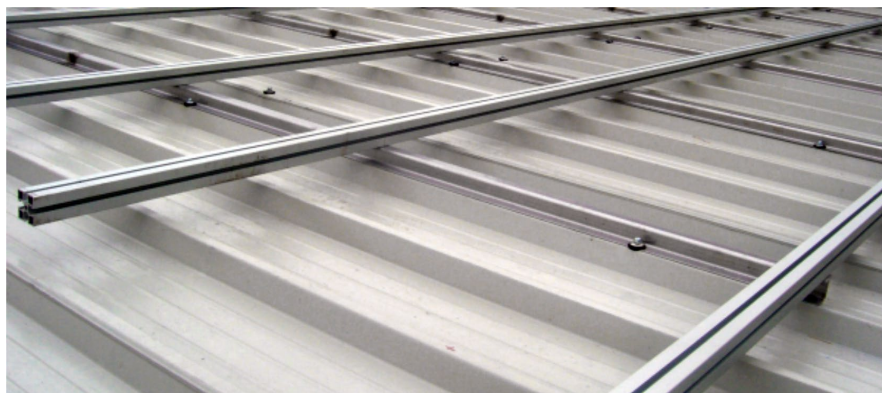
In primo luogo dovremo avere a disposizione la marca ed il modello dei moduli fotovoltaici scelti e la taglia del sistema ovvero il numero di moduli totali da predisporre ad esempio sulla copertura in lamiera grecata di un edificio industriale.

La particolarità di tali strutture sta nel fatto che spesso gli elementi portanti sono costituiti da travature ed arcarecci in acciaio alle quali viene ancorata la copertura mediante ganci; il passo tra gli elementi portanti difficilmente risulta lo stesso passo per l'installazione della struttura di supporto dei moduli. Questo si traduce nella necessità di realizzare una doppia struttura che consenta di realizzare i binari di supporto moduli incrociandoli su elementi trasversali a loro volta ancorati alla sottostruttura in acciaio.

Nell'esempio di figura 9.1 (a pagina seguente) la linea tratteggiata rappresenta la sottostruttura che sorregge la copertura in travi di acciaio, i longheroni sono ancorati alla sottostruttura in senso trasversale e i profili orizzontali rappresentano i binari di appoggio dei moduli posti ad una distanza tale da rispettare il rapporto 25-50-25%.

Per il dimensionamento di un sistema è quindi necessario disporre all'area utile ma sicuramente di tutti gli elementi che ci consentano la disposizione definitiva del piano moduli ovvero:

- la scheda tecnica del modulo che verrà effettivamente utilizzato con riportate le misure, lo spessore e le caratteristiche della cornice;
- il numero esatto dei moduli configurati elettricamente; può essere utile ai fini di velocizzare l'installazione e ridurre il rischio di errori di cablaggio far corrispondere file con stringhe;
- le caratteristiche meccaniche della struttura di copertura per individuare i punti e le modalità di fissaggio.



n. 12 linee di ancoraggio costituite da un profilo "Z" da 300 + 400 cm

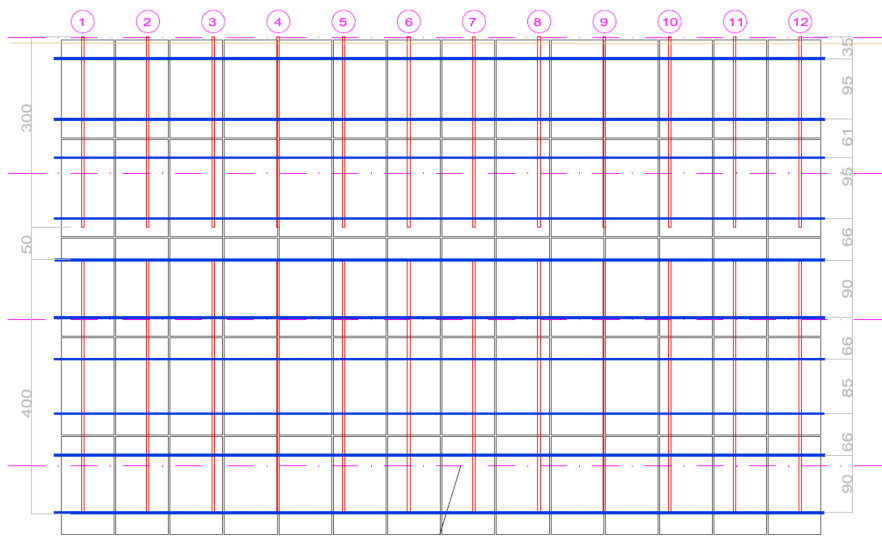


Figura 9.1. Struttura di sostegno a doppia orditura

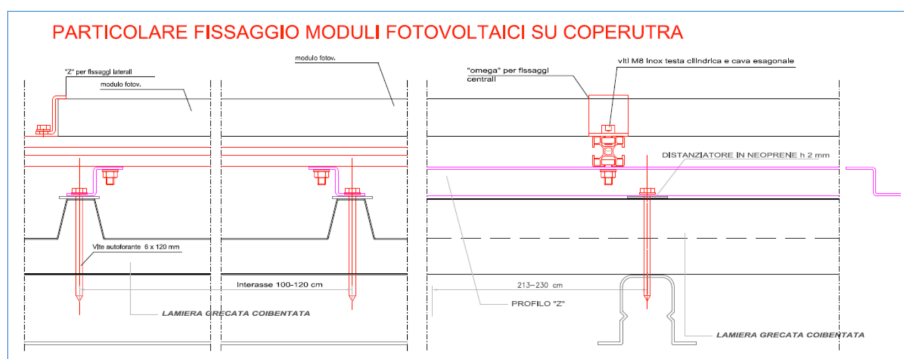


Figura 9.2. Dettaglio struttura di sostegno a doppia orditura

APPLICAZIONI SPECIALI E CRITERI DI ALLACCIO

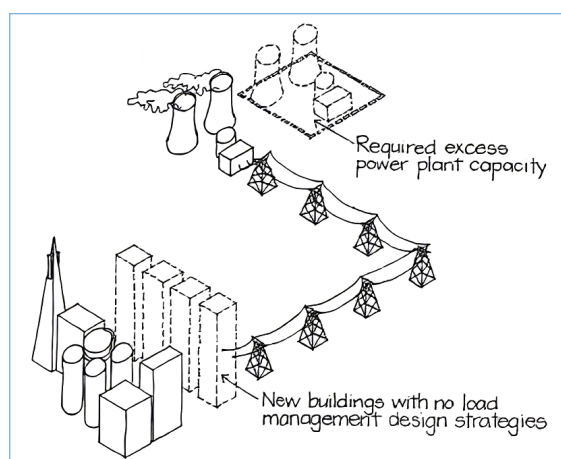
10.1. Smart Grid e CEI 0-21

Il D.Lgs. 16 marzo 1999, n. 79, recepimento della direttiva comunitaria 96/92/CE, introdusse in Italia la liberalizzazione del settore elettrico.

Gli effetti di questo decreto furono quelli di aprire un mercato elettrico che fin dalla nazionalizzazione del 1962 era di fatto monopolistico (per esempio con il solo operatore nazionale l'ENEL che poteva produrre e vendere energia elettrica agli utenti) ad altri operatori che diventano così concorrenti.

La rete elettrica, sempre stata fino a quel momento *unidirezionale*, distribuiva energia da pochi produttori a molti consumatori. Con tale provvedimento si aprì quindi la possibilità che ogni utente potesse diventare anche produttore attraverso, ad esempio, l'installazione di un generatore solare o d'impianti di produzione da altre fonti rinnovabili; per contro questo comporta la necessità di avere una rete *bidirezionale*.

Una rete cioè che possa trasportare oltre all'energia proveniente dai grandi impianti (ad esempio, una centrale termoelettrica), anche quella immessa in rete dai tanti piccoli produttori domestici e che eccede l'autoconsumo.



Questa produzione distribuita, però, essendo per gran parte legata a fonti rinnovabili, è per definizione intermittente: in assenza di vento, una pala eolica non può certo fun-

zionare, così come un pannello fotovoltaico riduce sensibilmente la propria produzione in mancanza di Sole.

La rete elettrica è quindi sottoposta ad un importante rinnovamento; sarà infatti gestita mediante tecnologie intelligenti in grado di integrare tutti gli utenti o prodotti connessi distribuendo loro energia in modo efficiente.

In sintesi le reti elettriche, come le conosciamo noi, vengono utilizzate per distribuire ininterrottamente enormi quantità di energia dalle centrali di produzione ai consumatori; il controllo di questa energia è centralizzato e il flusso dell'energia è sempre lo stesso.

Ora se pensiamo al numero sempre crescente degli impianti di approvvigionamento di energia da fonti rinnovabili che sono sparsi sul nostro territorio, in grandi installazioni come anche su piccola scala nelle nostre abitazioni, oppure se pensiamo all'impatto che avrà a breve il passaggio dalla mobilità a combustibile a quella elettrica oppure l'incremento esponenziale dei sistemi di climatizzazione elettrici su scala nazionale ci accorgiamo che una rete elettrica come quella attuale non è in grado di gestire i flussi e i carichi.

La rete elettrica deve diventare elettronica: una *smart grid* appunto, che faccia interagire produttori e consumatori, in grado di determinare in anticipo le richieste di energia e convogliare il flusso elettrico là dove serve.

Una vera e propria rete intelligente, non solo di trasporto di energia in una sola direzione, ma bidirezionale e attiva con l'aiuto dell'elettronica, dell'informatica e della comunicazione. Una rete composta di tante piccole reti che viaggiano tra produttori e consumatori, che comunicano tra loro e si scambiano informazioni; che gestiscono con migliore efficienza i picchi di richiesta, evitando interruzioni di elettricità e riducendo il carico dove necessario. Tutta la rete sarà tenuta sotto stretto monitoraggio per aver traccia di tutto il flusso elettrico del sistema.

Per fare un esempio, quando il costo dell'energia diventa conveniente una *smart grid* può decidere di attivare processi industriali oppure elettrodomestici casalinghi e le eventuali sovrapproduzioni di energia di alcuni luoghi possono essere distribuiti là dove ce ne sia necessità, in modo dinamico ed in tempo reale grazie al software di gestione.

Funzionamento

Per capire ancora meglio possiamo usare come esempio la rete di internet, i meccanismi sono molto simili: tutti gli utenti sono interconnessi tra loro, ricevono e inviano informazioni e traggono vantaggio da questo scambio.

Con le *smart grid* sarà garantita la fornitura di energia elettrica e sarà possibile accedere alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, il tutto con minori costi e ovviamente minore emissione di gas ad effetto serra. Inoltre ci sarà notevole flessibilità per ogni consumatore soprattutto relativamente al consumo di energia che potrà variare in base al periodo dell'anno o addirittura in base all'orario della giornata.

Ad occuparsi dello sviluppo delle *smart grid* è la *European Smart Grids Technology Platform* creata dai paesi dell'Ue per sviluppare una visione comune e delle linee guida sul tema. Negli Stati Uniti invece è stata già promossa un'altra importante iniziativa: un vasto programma di rinnovamento della rete elettrica con le stesse linee guida delle *smart grid*.

GLI ASPETTI ECONOMICI DEL FOTOVOLTAICO

11.1. Il mercato mondiale del fotovoltaico

Dalla commercializzazione della prima cella solare, avvenuta nel 1954, sono stati necessari ben 68 anni per raggiungere 1.000 GW di impianti installati a livello mondiale. Ne sono bastati soltanto due per raddoppiare tale risultato. Con 449 GW aggiunti nel 2023, 597 GW nel 2024 e 750 GW nel 2025, la capacità fotovoltaica mondiale ha oggi superato i 2.500 GW. Per la precisione, alla fine dello scorso anno si contavano 2,52 TW di potenza in esercizio, di cui ben 1,9 TW nella sola regione Asia-Pacifico.

Si tratta di uno dei più rapidi sviluppi industriali della storia, che i principali istituti di analisi finanziaria stimano possa rappresentare, entro il 2040, quasi i 3/4 di tutti i nuovi investimenti nel settore energetico, per un valore complessivo pari a 10.200 miliardi di dollari.

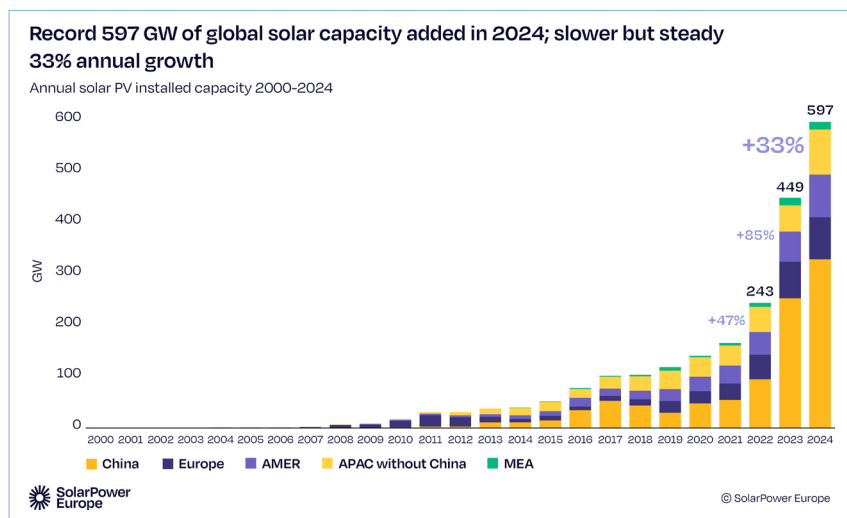


Figura 11.1. Crescita delle rinnovabili a livello globale

Oltre a sostenere il recente sviluppo del processo di decarbonizzazione del settore energetico, il comparto delle energie rinnovabili potrà con ogni probabilità contribuire a una riduzione delle emissioni stimata intorno al 5% annuo a partire dal 2030, rispetto ai livelli del 2020.

Nonostante la prevista riduzione di molti incentivi a favore delle energie rinnovabili, il continuo e rapido calo dei costi delle tecnologie eolica e fotovoltaica, unitamente alla crescita del comparto delle batterie e dei veicoli elettrici, influenzerà profondamente l'evoluzione dell'intero settore elettrico ed energetico.

In estrema sintesi, dai dati disponibili emerge con chiarezza che l'elettrificazione verde è ormai un processo inarrestabile.

11.1.1. *La competizione con le fossili*

Il calo più impressionante riguarda il comparto offshore, per il quale si prevede una diminuzione del costo lungo l'intero ciclo di vita dell'impianto pari a circa il 75%, anche grazie alle economie di scala derivanti da centrali e turbine di dimensioni sempre maggiori.

In questo scenario si inseriranno ulteriori innovazioni e un contributo crescente dei sistemi di accumulo, destinati a svolgere un ruolo sempre più rilevante nell'equilibrio e nella flessibilità del sistema elettrico rispetto ai picchi di domanda. Lo *storage utility-scale*, infatti, si configura come uno dei principali concorrenti degli impianti di generazione alimentati a gas naturale.

Il gas naturale non avrà un peso così rilevante come in passato, anche a causa dei recenti cambiamenti geopolitici.

Esso assumerà principalmente una funzione di supporto alla flessibilità del sistema elettrico, piuttosto che il ruolo di fonte primaria sostitutiva finora ricoperto dalle centrali a carbone, fatta forse eccezione, nel breve periodo, per gli Stati Uniti, dove il gas naturale è ancora particolarmente economico e abbondante. Tuttavia, va sottolineato che negli Stati Uniti la generazione elettrica da impianti a gas crescerà del 22% entro il 2040, mentre quella derivante da fonti rinnovabili aumenterà del 180%.

Secondo le analisi dei principali osservatori internazionali, gli accumuli domestici e quelli su scala commerciale abbinati agli impianti fotovoltaici rappresenteranno il 60% dello *storage* mondiale entro il 2040, contribuendo a una significativa diffusione delle energie rinnovabili nel settore elettrico, con quote che potrebbero raggiungere il 74% in Germania e il 55% in Cina.

Sul futuro del settore elettrico restano aperte alcune questioni che dovranno essere attentamente monitorate, come la quota di fonti rinnovabili intermittenti che il sistema sarà in grado di gestire sotto il profilo tecnico ed economico.

Tuttavia, le innovazioni nei sistemi di ricarica dei veicoli elettrici, la crescita dello *storage elettrochimico*, sia domestico sia *utility-scale*, e lo sviluppo del settore digitale saranno in grado di attenuare le difficoltà del sistema.

Tra gli scenari futuri più probabili si prevede una significativa riduzione dei costi anche per le altre fonti rinnovabili. Nell'arco di dieci anni, tale riduzione potrebbe raggiungere il 40% per il solare a concentrazione, il 35% per l'eolico offshore e il 26% per l'eolico *onshore*. Tuttavia, sarà necessario disporre di un quadro normativo adeguato e stabile.

Secondo un rapporto dell'*International Renewable Energy Agency* (IRENA), tra il 2015 e il 2020 il costo complessivo del kWh fotovoltaico, calcolato sull'intero ciclo di vita dell'im-

CASI STUDIO

12.1. Impianto da 4,5 kWp a servizio di una utenza privata

Viene per prima cosa redatto uno studio di fattibilità volto alla verifica tecnico-economica per la realizzazione di un sistema solare FV da installare sulla copertura di un edificio sito in Piemonte in una frazione del Comune di Settimo Torinese.

Il dimensionamento viene formulato in seguito a sopralluogo ed alla verifica delle aree effettivamente disponibili, al netto delle superfici soggette a persistenti fenomeni di ombreggiamento dovuti alla presenza di balaustre, camini, sfiati, alberi, pali ed edifici limitrofi.

Nell'ottica di realizzare un sistema solare fotovoltaico che sia in grado di contribuire efficacemente all'approvvigionamento energetico annuale dell'edificio, nelle condizioni geografiche ed ambientali di sito e tenuto conto della tipologia e morfologia dell'edificio su cui sarà installato l'impianto, viene proposta e descritta la migliore soluzione tecnica individuata.

I dati relativi al sito vengono riassunti in una tabella e viene valutata la migliore superficie esposta nel quadrante Sud Est – Sud Ovest.



Figura 12.1. Inquadramento e parametri climatici

A questo punto è possibile calcolare, partendo dai dati di irraggiamento della località in esame, l'irraggiamento sulla superficie considerata ovvero stima dell'irraggiamento solare sul piano moduli secondo UNI 10349.

Consideriamo adesso la caratteristica dei consumi utenza per stima energia in auto-consumo.

I consumi dell'utenza si attestano sui 4700 kWh all'anno e considerando l'importo delle bollette possiamo stimare un costo medio del kWh di circa 23 centesimi di euro.

L'utenza ha un consumo concentrato nelle ore diurne (F1) essendo gli utenti stessi attivi proprio nelle ore centrali della giornata: questo fa sì che si possa contare su un alto autoconsumo stimabile per i carichi presenti nell'ordine del 60%.

La superficie disponibile sulla falda Sud-Ovest è di oltre 60 m² e, considerando i consumi e le ipotesi di incremento a fronte dell'installazione di pompe di calore per il riscaldamento dell'acqua sanitaria e la deumidificazione del piano terra, si ipotizza la realizzazione di un impianto di 4,5 kWp.

Considerando una tecnologia di tipo monocristallino con efficienza media del 16-17% otterremmo un'occupazione di falda utile di 27 m² circa.

12.1.1. Composizione del sistema fotovoltaico

Per il dimensionamento del campo FV, si è considerato l'impiego di moduli fotovoltaici SHARP di produzione europea in silicio monocristallino con efficienza di conversione pari al 17% ovvero potenza di 170 W/m² di moduli installato, modello NU-RD 280 da 280 Wp.

Il sistema fotovoltaico proposto è composto quindi da 16 moduli fotovoltaici da 280 Wp ciascuno per una potenza nominale complessiva pari a 4,48 kWp.

Il sistema di conversione è effettuato mediante un *inverter* ABB modello PVI 4.2 Outdoor provvisto di sezionatore corrente continua.

L'organizzazione prevede la realizzazione di 2 stringhe da 8 moduli cadauna attestate rispettivamente agli inseguitori MPPT 1 e 2 in ingresso all'*inverter*.

CARATTERISTICHE DELL'UTENZA ELETTRICA (valori bimestrali stimati)				PRODUZIONE ELETTRICA MEDIA MENSILE		
Consumi Elettrici (bolletta)	kWh	Importo	€/kWh	Periodo	Consumi kWh	Produzione kWh
Dig-Gen	850	196	€ 0,23	Gennaio	420	229
Feb-Mar	830	191	€ 0,23	Febbraio	430	319
Apr-Mag	770	177	€ 0,23	Marzo	430	458
Giu-Lug	690	159	€ 0,23	Aprile	400	497
Ago-Set	754	173	€ 0,23	Maggio	390	563
Ott-Nov	860	198	€ 0,23	Giugno	380	587
Totale Anno	4754	1093	€ 0,23	Luglio	400	644
				Agosto	290	578
				Settembre	370	470
				Ottobre	384	328
				Novembre	410	221
				Dicembre	450	208
				Anno	4.754	5.100
Percentuale Autoconsumo	60%	→ kWh/anno	3060			
Percentuale Scambio con la rete	40%	→ kWh/anno	2040			

Figura 12.2. Consumi utenza e produzione stimata

12.1.2. Cenni sul progetto esecutivo

Il lato in corrente continua dell'impianto FV comprende i moduli fotovoltaici, il quadro di campo e manovra, i cavi di collegamento e termina ai morsetti di ingresso dell'*inverter*.

È esercito come sistema IT, ovvero senza punti direttamente collegati a terra.

Il campo fotovoltaico è organizzato con stretto riferimento allo schema elettrico multifilare (da allegare alla relazione tecnica):

KIT OPERATIVO PER LA PROGETTAZIONE DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Contenuti del Kit operativo

Il **Kit operativo per la progettazione di impianti fotovoltaici**, disponibile tramite una webapp dedicata, riporta i seguenti contenuti:

- **Foglio di calcolo Excel per il dimensionamento elettrico del sistema fotovoltaico:** lo strumento consente di verificare la compatibilità tra moduli fotovoltaici e inverter mediante l'inserimento dei dati riportati nelle rispettive schede tecniche. È inoltre disponibile la funzione di dimensionamento delle sezioni dei cavi elettrici in base alla lunghezza dei circuiti e alle perdite di tensione ammissibili, sia lato corrente continua (CC) sia lato corrente alternata (CA).
- **Foglio di calcolo Excel per la stima della producibilità energetica dell'impianto:** lo strumento consente di valutare gli indicatori economici dell'investimento, mediante l'inserimento dei dati tecnici ricavati dalle schede tecniche dei componenti previsti, inclusi il tempo di ritorno (Payback) e i benefici ambientali conseguibili. È inoltre disponibile una sezione dedicata alla redazione dell'offerta economica "chiavi in mano", mediante la compilazione di un computo metrico estimativo.
- **Foglio di calcolo Excel per l'analisi economico-finanziaria dell'investimento:** mediante l'inserimento dei dati relativi alla producibilità unitaria dell'impianto, ai costi di investimento e di esercizio e ai tassi di interesse, il foglio consente di valutare i principali indicatori finanziari, tra cui il tempo di ritorno dell'investimento (Payback) e il Tasso Interno di Rendimento (TIR).
- **Speciale Energia:** banca dati di normativa e giurisprudenza curata dalla redazione di www.lavoripubblici.it.
- **Raccolta di collegamenti ai siti web dei principali produttori del settore,** contenenti software e configuratori dedicati al dimensionamento dei dispositivi e alla progettazione degli impianti fotovoltaici.
- **Glossario** (termini più ricorrenti sull'argomento).
- **FAQ** (risposte alle domande più frequenti).
- **Test di autovalutazione.**

Requisiti hardware e software

I contenuti software sono disponibili tramite una webapp dedicata e, per accedere alla piattaforma e utilizzare i relativi contenuti, sono richiesti i seguenti requisiti di sistema:

- **Webapp:**
 - Dispositivi con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android;
 - Accesso a internet e browser web con Javascript attivo.
- **Kit operativo per la progettazione di impianti fotovoltaici:**
 - Microsoft Office (versione 2016 o successiva);
 - Software per gestire documenti PDF (consigliato Adobe Acrobat Reader).

Installazione e attivazione del prodotto

- 1) Collegati al seguente indirizzo internet:

https://www.grafill.it/pass/0540_7.php

- 2) Inserisci i codici **[A]** e **[B]** riportati alla fine del libro e clicca **[Continua]**;
- 3) Accedi al tuo **account Grafill** oppure creane uno;
- 4) Clicca sul pulsante **[Gcloud]**;
- 5) Clicca sul pulsante **[WebApp]** in corrispondenza del prodotto acquistato;
- 6) Fai il *login* con le credenziali del tuo **account Grafill**;
- 7) Clicca sulla copertina del libro presente nello scaffale **Le mie App**;
- 8) Si aprirà una finestra di dialogo con le risorse disponibili.



La progettazione energetica degli edifici richiede oggi competenze sempre più specialistiche e un costante aggiornamento normativo. Questa guida nasce dall'esperienza diretta dell'attività professionale per offrire a ingegneri, architetti, geometri e periti uno strumento operativo, pratico e immediatamente applicabile nella progettazione di edifici ad alta efficienza energetica e di impianti alimentati da fonti rinnovabili.

Attraverso un approccio chiaro e orientato alla pratica, il volume approfondisce il sistema edificio-impianto, il risparmio energetico e l'integrazione delle fonti rinnovabili, illustrando metodologie di calcolo, criteri progettuali, soluzioni tecnologiche e casi studio reali. Gli aspetti normativi sono analizzati e sintetizzati in modo da consentire al professionista di individuare con immediatezza i requisiti di legge e le procedure da seguire nelle diverse fasi della progettazione.

Questa **seconda edizione** è completamente aggiornata alle più recenti disposizioni normative in materia di aree idonee, agrivoltaico, Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) e procedure di connessione degli impianti alla rete, offrendo un riferimento affidabile per affrontare le sfide della transizione energetica.

Completa il volume un **Kit operativo per la progettazione di impianti fotovoltaici**, disponibile tramite una webapp* dedicata, che riporta i seguenti contenuti:

- **Foglio di calcolo Excel per il dimensionamento elettrico del sistema fotovoltaico:** lo strumento consente di verificare la compatibilità tra moduli fotovoltaici e inverter e di dimensionare le sezioni dei cavi elettrici lato CC e lato CA in funzione della lunghezza dei circuiti e delle perdite di tensione ammissibili.
- **Foglio di calcolo Excel per la stima della producibilità energetica dell'impianto:** lo strumento consente di valutare la producibilità dell'impianto, gli indicatori economici dell'investimento (tra cui il Payback) e i benefici ambientali, oltre a predisporre l'offerta economica "chiavi in mano" mediante computo metrico estimativo.
- **Foglio di calcolo Excel per l'analisi economico-finanziaria dell'investimento:** lo strumento consente, mediante l'inserimento dei dati relativi alla producibilità unitaria dell'impianto, ai costi di investimento e di esercizio e ai tassi di interesse, di valutare i principali indicatori finanziari, tra cui il tempo di ritorno dell'investimento (Payback) e il Tasso Interno di Rendimento (TIR).
- **Speciale Energia:** normativa e giurisprudenza a cura di www.lavoripubblici.it.
- **Siti web dei principali produttori del settore,** contenenti software e configuratori dedicati al dimensionamento dei dispositivi e alla progettazione di impianti FV.
- **Glossario, FAQ e Test di autovalutazione.**

* Requisiti di sistema disponibili nel volume

Jose Perfetto, libero professionista, Energy Manager e consulente esperto nella progettazione eco-compatibile di sistemi attivi e passivi utilizzando fonti di energia rinnovabili, fonda lo studio *Solardesign* nel 2002 ed avvia una serie di incarichi con enti pubblici, privati ed aziende volti al miglioramento dell'efficienza energetica e alla generazione da fonte solare. Didatta in ambito accademico e professionale per Ordini e operatori del settore, Enti pubblici ed Aziende, ha al suo attivo numerose pubblicazioni scientifiche, attività di ricerca e sviluppo delle nuove tecnologie ed applicazioni in ambito civile ed industriale.

ISBN 13 978-88-277-0540-7



9 788827 705407 >

Euro 52,00



ANCHE IN VERSIONE EBOOK