



Indice

Unità 1 Sicurezza, risparmio energetico e tutela ambientale, 1

- 1.1 Progetto architettonico e progetto degli impianti, 2
- 1.2 La sicurezza degli impianti, 3
 - 1.2.1 Le norme principali, 3 – 1.2.2 Il D.P.R. 22-1-2008 n. 37, 4 – 1.2.3 Scheda di dichiarazione di conformità, 5
- 1.3 L'impiantistica e il risparmio energetico, 6
 - 1.3.1 Il consumo di energia, 6 – 1.3.2 Problemi dovuti agli impianti di riscaldamento, 7 – 1.3.3 Fattori incidenti sul consumo energetico per il riscaldamento, 8 – 1.3.4 Il D.Lgs. 29-12-2006 n. 311, 9 – 1.3.5 Definizioni contenute nel D.Lgs. 29-12-2006 n. 311, 10 – 1.3.6 Accorgimenti per ridurre il consumo per riscaldamento, 11
- 1.4 L'impiantistica e la tutela ambientale, 12
 - 1.4.1 L'effetto serra, 12 – 1.4.2 Iniziative per la difesa dell'ambiente a livello mondiale, 13 – 1.4.3 Riduzione della concentrazione dell'ozono atmosferico, 14

 **SINTESI**, 15
 **VERIFICA**, 16
 **ESERCIZI GUIDATI**, 18

Unità 2 Le energie integrative, 19

- 2.1 Fonti energetiche integrative, 20
- 2.2 L'energia solare, 21
 - 2.2.1 Costante solare e insolazione, 21
- 2.3 Sistemi a bassa temperatura, 22
 - 2.3.1 I pannelli solari, 22 – 2.3.2 L'impianto a pannelli solari, 23 – 2.3.3 Dimensionamento dell'impianto a pannelli solari, 24
- 2.4 Sistemi ad alta temperatura, 25
- 2.5 Impianti solari fotovoltaici, 26
 - 2.5.1 La conversione fotovoltaica, 26 – 2.5.2 Celle, moduli, pannelli e stringhe, 27 – 2.5.3 Impiego del fotovoltaico in edilizia, 28 – 2.5.4 La facciata fotovoltaica, 29
- 2.6 Sistemi passivi a guadagno diretto e isolato, 30
- 2.7 Sistemi passivi a guadagno indiretto, 31
- 2.8 La pompa di calore, 32
 - 2.8.1 Funzionamento ed efficienza della pompa di calore, 32 – 2.8.2 Il ciclo termico della pompa di calore, 33 – 2.8.3 La pompa di calore a ciclo reversibile, 34
- 2.9 Processi di trasformazione energetica a energia totale, 35
 - 2.9.1 La cogenerazione, 35
- 2.10 Il teleriscaldamento, 36
- 2.11 Energia eolica, da biomasse e geotermica, 37
- 2.12 L'architettura sostenibile, 38

 **SINTESI**, 39
 **VERIFICA**, 40
 **ESERCIZI GUIDATI**, 41

Unità 3 Le macchine, 43

- 3.1 Classificazione, 44
- 3.2 Macchine semplici, 45
 - 3.2.1 La leva, 45 – 3.2.2 Il piano inclinato, 46
- 3.3 Macchine per il sollevamento di materiali, 47
- 3.4 La trasmissione del moto, 48
 - 3.4.1 Classificazione secondo il rapporto di trasmissione, 48 – 3.4.2 Classificazione secondo il tipo di moto, 50

- 3.5 Macchine oleodinamiche, 51
 - 3.5.1 Le pompe, 51 – 3.5.2 Motori oleodinamici, 52 – 3.5.3 Il funzionamento di un impianto oleodinamico, 53
- 3.6 Macchine pneumatiche, 54
- 3.7 Macchine termiche, 55
 - 3.7.1 Motori a combustione esterna, 55 – 3.7.2 Motori a combustione interna, 56 – 3.7.3 Il motore a quattro e a due tempi, 57 – 3.7.4 Il motore a idrogeno, 58
- 3.8 Motori elettrici, 59
 - 3.8.1 Generalità, 59 – 3.8.2 Motori a corrente continua e a corrente alternata, 60

 **SINTESI**, 61
 **VERIFICA**, 62
 **ESERCIZI GUIDATI**, 64

Unità 4 Gli impianti di sollevamento, 65

- 4.1 Sistemi meccanizzati di sollevamento, 66
- 4.2 Tipi di ascensori, 67
- 4.3 L'ascensore a fune, 68
- 4.4 L'ascensore oleodinamico, 70
 - 4.4.1. Tipi di ascensori oleodinamici, 71
- 4.5 Il vano ascensore, 72
- 4.6 Il locale macchine, 73
- 4.7 La cabina e le porte degli ascensori, 74
 - 4.7.1 La cabina, 74 – 4.7.2 Le porte di cabina e di piano, 75
- 4.8 I dispositivi di sicurezza degli ascensori, 76
- 4.9 I montacarichi, 77
- 4.10 Scale e marciapiedi mobili, 78
- 4.11 Caratteristiche delle scale mobili, 79
- 4.12 Impianti di sollevamento per disabili, 80

 **SINTESI**, 82
 **VERIFICA**, 83

Unità 5 Gli impianti elettrici, 85

- 5.1 La produzione e il trasporto dell'energia elettrica, 86
- 5.2 Il circuito elettrico, 87
- 5.3 La distribuzione dell'energia elettrica, 88
- 5.4 L'interruttore differenziale, 89
- 5.5 Effetti della corrente elettrica sul corpo umano, 90
- 5.6 La rete di messa a terra, 91
 - 5.6.1 Tipi di messa a terra e componenti della rete di messa a terra, 91 – 5.6.2 Schema di impianto di messa a terra, 92
- 5.7 Impianti di protezione contro le scariche atmosferiche, 93
 - 5.7.1 L'impianto parafulmine, 93 – 5.7.2 Livelli di protezione e volume protetto, 94 – 5.7.3 Metodi per la determinazione del volume protetto, 95
- 5.8 Conduttori e cavi, 96
 - 5.8.1 Caratteristiche dei cavi e dimensionamento dei conduttori, 96 – 5.8.2 Designazione dei cavi e colore degli isolanti, 97
- 5.9 La rete di distribuzione interna, 98
 - 5.9.1 Impianto sotto traccia, 98 – 5.9.2 Impianti a vista e in canalina, 99 – 5.9.3 Impianto sotto il pavimento, 100

- 5.10 Elementi di completamento dell'impianto elettrico, 101
- 5.11 Impianti elettrici esterni in ambienti speciali, 103
 - 5.11.1 Gli ambienti speciali, 103 – 5.11.2 Grado di protezione degli involucri, 104 – 5.11.3 Locali da bagno, 105
- 5.12 Impianti elettrici in zone a rischio di esplosione, 106
- 5.13 Il progetto dell'impianto elettrico, 107
 - 5.13.1 La rappresentazione grafica del progetto, 107 – 5.13.2 Segni grafici convenzionali per schemi di impianti elettrici, 108 – 5.13.3 Dotazione elettrica degli impianti domestici, 109

■ **SINTESI**, 110
 ■ **VERIFICA**, 111
 ► **ESERCIZI GUIDATI**, 113

Unità 6 Elementi di illuminotecnica, 117

- 6.1 La trasmissione della luce, 118
- 6.2 Principali grandezze fotometriche, 119
- 6.3 Le lampade, 120
- 6.4 Le lampade a incandescenza, 121
 - 6.4.1 Lampade a filamento, 121 – 6.4.2 Lampade alogene, 122
- 6.5 Le lampade a scarica, 123
- 6.6 Illuminatori a diodi e a fibre ottiche, 124
- 6.7 Sistemi di illuminazione, 125
- 6.8 Tonalità della luce, 126
- 6.9 Indice di resa cromatica, 127
- 6.10 Gli apparecchi illuminanti, 128
- 6.11 Caratteristiche degli apparecchi illuminanti, 129
- 6.12 Progetto dell'impianto di illuminazione, 130
 - 6.12.1 Il calcolo tradizionale, 130 – 6.12.2 Il progetto informatico, 131
- 6.13 Illuminazione stradale, 132

■ **SINTESI**, 133
 ■ **VERIFICA**, 134
 ► **ESERCIZI GUIDATI**, 136

Unità 7 Telecomunicazioni e automazioni, 137

- 7.1 La telecomunicazione, 138
 - 7.1.1 La trasmissione dell'informazione, 138 – 7.1.2 I cavi per le linee a conduttori metallici, 139 – 7.1.3 La trasmissione mediante fibre ottiche, 140 – 7.1.4 La posa dei cavi ottici, 141
- 7.2 La telefonia, 142
 - 7.2.1 Il principio della trasmissione telefonica e la rete telefonica, 142 – 7.2.2 L'apparecchio telefonico, 143 – 7.2.3 La rete telefonica all'interno dell'edificio, 144 – 7.2.4 Tipi di impianto telefonico, 145
- 7.3 Onde elettromagnetiche e loro effetti, 146
- 7.4 Impianti citofonici e videocitofonici, 147
- 7.5 Impianto di antenna TV, 148
- 7.6 Automatismi, 149
 - 7.6.1 Porte ad apertura automatica, 149 – 7.6.2 Portoni e cancelli ad apertura automatica, 150
- 7.7 Sistemi antintrusione, 151
 - 7.7.1 I sistemi passivi: porte di sicurezza, 151 – 7.7.2 Sistemi attivi per interni, 152 – 7.7.3 Sistemi di rive-

lazione per esterni, 153 – 7.7.4 Il progetto dell'impianto antifurto, 154

7.8 L'edificio intelligente, 155

■ **SINTESI**, 156
 ■ **VERIFICA**, 157

Unità 8 L'approvvigionamento idrico, 159

- 8.1 Prelievo e smaltimento di una risorsa vitale, 160
- 8.2 La normativa per la tutela dell'acqua, 161
- 8.3 Qualità e usi dell'acqua, 162
- 8.4 Fattori inquinanti dell'acqua, 163
- 8.5 Il trattamento dell'acqua, 164
- 8.6 Il prelievo dell'acqua, 165
 - 8.6.1 Acque meteoriche, sorgive e di falda, 165 – 8.6.2 Prelievo mediante pozzi, 166 – 8.6.3 Prelievo da acque superficiali, 167
- 8.7 Condotte e canali, 168
- 8.8 La distribuzione dell'acqua potabile, 169
- 8.9 Trattamenti dell'acqua potabile, 170
 - 8.9.1 La durezza e il suo abbattimento, 170 – 8.9.2 Gli impianti di trattamento domestici, 171 – 8.9.3 Addolcimento a scambio ionico, 172 – 8.9.4 Addolcitori a osmosi inversa e sistemi fisici mediante acceleratori ionici, 173

■ **SINTESI**, 174
 ■ **VERIFICA**, 175
 ► **ESERCIZI GUIDATI**, 176

Unità 9 Impianti idro-sanitari, 177

- 9.1 Prelievo e misura dell'acqua potabile, 178
- 9.2 Alimentazione idrica diretta e a gravità, 179
- 9.3 Dimensionamento dell'impianto di alimentazione diretta, 180
 - 9.3.1 Determinazione della pressione, 180 – 9.3.2 Determinazione della portata, 181
- 9.4 Alimentazione idrica mediante pompe, 182
- 9.5 Il funzionamento dell'autoclave, 183
- 9.6 La rete di distribuzione idrica, 184
 - 9.6.1 L'impianto di distribuzione dell'acqua fredda, 184 – 9.6.2 Dimensionamento della rete di distribuzione, 185
- 9.7 La produzione di acqua calda per uso domestico, 186
 - 9.7.1 Scaldacqua a gas istantanei, 186 – 9.7.2 Scaldacqua a gas ad accumulo, 187 – 9.7.3 Scaldacqua elettrici, 188 – 9.7.4 Impianti centralizzati ad accumulo, 189 – 9.7.5 Impianti centralizzati istantanei, 190
- 9.8 L'impianto di distribuzione dell'acqua calda, 191
- 9.9 Tubi per la distribuzione idrica, 192
- 9.10 Dispositivi di intercettazione, 193
- 9.11 Gruppi di erogazione idrica, 194
- 9.12 Apparecchi idro-sanitari, 195
 - 9.12.1 Lavabi, lavelli e lavamani, 195 – 9.12.2 Vasche da bagno, 196 – 9.12.3 Bidet, docce e orinatoi, 197 – 9.12.4 Vasi, 198 – 9.12.5 Apparecchi per persone con ridotte capacità motorie, 199

■ **SINTESI**, 200
 ■ **VERIFICA**, 201
 ► **ESERCIZI GUIDATI**, 202

Unità 10 Raccolta e trattamento delle acque reflue urbane, 207

- 10.1 Gli scarichi idrici, 208
- 10.2 La rete di scarico delle acque nere domestiche, 209
 - 10.2.1 Diramazioni, 209 – 10.2.2 Lo scarico delle vasche da bagno e delle docce, 210 – 10.2.3 Scarico degli apparecchi sospesi e dei vasi, 211 – 10.2.4 Dimensionamento delle diramazioni, 212 – 10.2.5 Colonne di scarico e loro ventilazione, 213 – 10.2.6 Collettori, 214 – 10.2.7 Dimensionamento dei collettori, 215
- 10.3 Lo scarico delle acque piovane di un edificio, 216
- 10.4 Materiali per tubazioni di scarico, 217
- 10.5 Trattamento delle acque reflue urbane, 218
 - 10.5.1 Fognature e depuratori, 218 – 10.5.2 Ciclo di trattamento del liquame grezzo, 219 – 10.5.3 Fosse settiche, 220
- 10.6 Dispersione nel terreno delle acque chiarificate, 221
 - 10.6.1 Dispersione per sub-irrigazione diretta, 221 – 10.6.2 Altre tecniche di dispersione, 222
- 10.7 Dispersione di acque piovane in terreni permeabili, 223
- 10.8 Gli impianti di depurazione a fanghi attivi, 224

■ **SINTESI**, 225
 ■ **VERIFICA**, 226
 ► **ESERCIZI GUIDATI**, 227

Unità 11 La gestione dei rifiuti, 229

- 11.1 Obiettivi della gestione dei rifiuti, 230
- 11.2 I tipi di rifiuti, 231
- 11.3 Fasi della gestione dei rifiuti, 232
- 11.4 Recupero e riciclaggio, 233
- 11.5 Reimpiego delle frazioni merceologiche più comuni, 234
 - 11.5.1 Reimpiego della carta e della plastica, 234 – 11.5.2 Reimpiego del vetro e dell'alluminio, 235 – 11.5.3 La frazione compostabile e il trattamento TMB, 236
- 11.6 Gli imballaggi, 237
- 11.7 La discarica controllata, 238
- 11.8 I trattamenti a caldo dei rifiuti, 239
- 11.9 Gli scarichi atmosferici, 240

■ **SINTESI**, 241
 ■ **VERIFICA**, 242

Unità 12 Gli impianti a gas, 243

- 12.1 I combustibili gassosi, 244
- 12.2 L'approvvigionamento del metano, 245
- 12.3 Le tubazioni per gli impianti a gas, 246
 - 12.3.1 Prescrizioni per l'attraversamento di interapedini, muri e solai, 246 – 12.3.2 Posizione delle tubazioni rispetto al muro e al terreno, 247
- 12.4 Ventilazione in presenza di impianti a gas, 248
 - 12.4.1 Ventilazione dei locali ed evacuazione dell'aria viziata, 248 – 12.4.2 Ventilazione naturale diretta e indiretta, 249
- 12.5 Classificazione secondo il criterio di evacuazione, 250
 - 12.5.1 Apparecchi di tipo A, 250 – 12.5.2 Apparecchi di tipo B, 251 – 12.5.3 Scarico diretto all'esterno di apparecchi di tipo B, 252 – 12.5.4 Distanze dei termi-




nali di tiraggio rispetto agli elementi edilizi, 253 – 12.5.5 Apparecchi di tipo C a tiraggio naturale, 254 – 12.5.6 Apparecchi di tipo C a tiraggio forzato, 255

- 12.6 Apparecchi di cottura, 256
- 12.7 Generatori di calore a gas, 257
 - 12.7.1 Le piccole caldaie a gas, 257 – 12.7.2 I bruciatori a gas, 258
- 12.8 Serbatoi per impianti a GPL, 259
 - 12.8.1 Caratteristiche dei serbatoi, 259 – 12.8.2 Ubicazione e distanze di sicurezza dei serbatoi, 260




■ **SINTESI**, 261
 ■ **VERIFICA**, 262
 ► **ESERCIZI GUIDATI**, 263

Unità 13 Gli impianti termici, 265

- 13.1 Impianti di riscaldamento autonomi, 266
 - 13.1.1 Impianti di riscaldamento autonomi con rete di distribuzione, 266 – 13.1.2 Impianti senza rete di distribuzione, 267 – 13.1.3 Il caminetto a legna, 268
- 13.2 Impianti di riscaldamento centralizzati, 269
- 13.3 Elementi principali di un impianto di riscaldamento, 270
 - 13.3.1 La caldaia, 270 – 13.3.2 Il bruciatore, 271 – 13.3.3 Pompe e valvole di miscelazione, 272 – 13.3.4 Sistemi di espansione, 273 – 13.3.5 Dispositivi di regolazione e apparecchiature di sicurezza, 274
- 13.4 La centrale termica, 275
 - 13.4.1 Ubicazione e aerazione della centrale termica, 275 – 13.4.2 Dimensioni e caratteristiche costruttive della centrale termica a gas, 276 – 13.4.3 Dimensioni e caratteristiche costruttive della centrale termica a gasolio, 277 – 13.4.4 Impianto elettrico del locale caldaia, 278
- 13.5 Simboli grafici per i disegni di impianti termici, 279
- 13.6 Evacuazione dei prodotti della combustione, 280
 - 13.6.1 Il camino, 280 – 13.6.2 I canali da fumo, 281 – 13.6.3 Le canne fumarie, 282 – 13.6.4 Canne fumarie collettive, 283 – 13.6.5 Comignoli, 284
- 13.7 Serbatoi per il gasolio, 285
- 13.8 La distribuzione del calore negli impianti ad acqua, 286
 - 13.8.1 Distribuzione a circolazione naturale e a circolazione forzata, 286 – 13.8.2 Distribuzione a circolazione forzata con collettore, 288 – 13.8.3 I collettori, 289 – 13.8.4 Impianti modul e in serie, 290
- 13.9 Terminali di erogazione, 291
 - 13.9.1 Radiatori, 291 – 13.9.2 Sistemi convettivi, 292 – 13.9.3 Elementi radianti, 293
- 13.10 La distribuzione del calore negli impianti a vapore, 294
- 13.11 La distribuzione del calore negli impianti ad aria, 295
- 13.12 La certificazione energetica degli edifici, 296
- 13.13 Definizioni principali, 297
- 13.14 Dal fabbisogno energetico all'indice di prestazione, 298
- 13.15 Fasi del calcolo del fabbisogno energetico, 299
- 13.16 Dati climatici e gradi giorno, 300
- 13.17 Zone termiche e temperature di progetto, 301
- 13.18 Energia scambiata per trasmissione e ventilazione, 302
 - 13.18.1 Gli scambi per trasmissione, 302 – 13.18.2 Cal-




- colo degli scambi per trasmissione, 303 – 13.18.3 Calcolo degli scambi per ventilazione e infiltrazione, 304
- 13.19 Apporti solari o da sorgenti interne, 305
13.19.1 Apporti dovuti alle radiazioni solari, 305
- 13.20 Determinazione della classe energetica, 306
13.20.1 Le attestazioni energetiche, 306 – 13.20.2 Esempio di classificazione di un edificio, 307
-  **SINTESI**, 308
 **VERIFICA**, 309
 **ESERCIZI GUIDATI**, 313

Unità 14 Gli impianti di climatizzazione, 315



- 14.1 La climatizzazione, 316
14.1.1 Condizioni di benessere, 316 – 14.1.2 Il diagramma di Mollier, 317
- 14.2 Il progetto dell'impianto di climatizzazione, 318
14.2.1 Dimensionamento dell'impianto, 318 – 14.2.2 Il carico termico, 319
- 14.3 Impianti di climatizzazione centralizzati, 320
14.3.1 Schema di funzionamento, 320 – 14.3.2 Sistemi a sola aria, a sola acqua e misti, 321 – 14.3.3 Il trasferimento dell'aria trattata, 322 – 14.3.4 La diffusione dell'aria trattata, 323
- 14.4 Impianti di climatizzazione autonomi, 324
14.4.1 Climatizzatori con condensatore raffreddato ad acqua e ad aria, 324
- 14.5 Tipi di climatizzatori autonomi, 325
14.5.1 Climatizzatori monoblocco e da finestra, 325 – 14.5.2 Climatizzatori split, 326
-  **SINTESI**, 327
 **VERIFICA**, 328
 **ESERCIZI GUIDATI**, 329

Unità 15 Elementi di acustica, 331

- 15.1 Il suono, 332
15.1.1 Definizioni, 332 – 15.1.2 I livelli sonori misurati in decibel, 333 – 15.1.3 Misura della sensazione sonora, 334 – 15.1.4 Livelli sonori ponderati, 335
- 15.2 Norme per la protezione dal rumore, 336
15.2.1 Limiti di esposizione al rumore, 336 – 15.2.2 Legge Quadro sull'inquinamento acustico, 337
- 15.3 I limiti del rumore nel territorio comunale, 338
- 15.4 Requisiti acustici degli ambienti, 339
15.4.1 Classificazione degli ambienti abitativi, 339 – 15.4.2 Echi e rumori prodotti da impianti, 340
- 15.5 La misura del rumore, 341
- 15.6 Propagazione del suono in ambiente aperto, 342
- 15.7 Propagazione del suono negli edifici, 343
15.7.1 Isolamento e assorbimento acustico, 343 – 15.7.2 Materiali fonoassorbenti, 344 – 15.7.3 Coefficiente di assorbimento acustico dei materiali, 345 – 15.7.4 Elementi edilizi fonoisolanti, 346 – 15.7.5 Misura del potere fonoisolante degli elementi divisorii, 347 – 15.7.6 Valori dell'indice R_w delle pareti, 348 – 15.7.7 Criteri di miglioramento dei valori dell'indice R_w delle pareti, 349 – 15.7.8 Valori di R_w dei serramenti, 350 – 15.7.9 Criteri per migliorare i valori di R_w dei serramenti, 351 – 15.7.10 Il ruolo dei controsoffitti in acustica, 352 – 15.7.11 Valori ottimali di R_w nei vari ambienti, 353
- 15.8 Propagazione del suono attraverso le strutture, 354
15.8.1 Caratteristiche del rumore trasmesso attraverso le strutture, 354 – 15.8.2 Tecniche per ridurre il valore di $L_{n,w}$ dei solai, 355

- 15.9 La pianificazione acustica, 356
- 15.10 Correzioni acustiche in edifici esistenti, 357
- 15.11 Il rumore degli impianti tecnici, 358
15.11.1 Impianti termici, 358 – 15.11.2 Impianti di climatizzazione, 359 – 15.11.3 Impianti idraulici, elettrici e di sollevamento, 360
-  **SINTESI**, 361
 **VERIFICA**, 362
 **ESERCIZI GUIDATI**, 364

Unità 16 Elementi di progettazione antincendio, 365

- 16.1 La sicurezza antincendio, 366
- 16.2 Definizioni, 367
16.2.1 Caratteristiche costruttive degli edifici, 367 – 16.2.2 Compartimenti, filtri e intercapedini, 368 – 16.2.3 Comportamento al fuoco, 369 – 16.2.4 Carico d'incendio, 370 – 16.2.5 Distanze di sicurezza e di protezione, 371 – 16.2.6 Affollamento ed esodo, 372 – 16.2.7 Scale di sicurezza, a prova di fumo e protette, 373 – 16.2.8 Mezzi antincendio, 374
- 16.3 Il Certificato di Prevenzione Incendi, 375
- 16.4 Il progetto antincendio, 376
16.4.1 Esempio di progetto, 376 – 16.4.2 Simboli grafici per il progetto antincendio, 377
- 16.5 Valutazione della resistenza al fuoco, 378
16.5.1 Resistenza al fuoco di materiali ed elementi costruttivi, 378 – 16.5.2 Resistenza al fuoco delle strutture, 379
- 16.6 Protezione delle strutture metalliche, 380
- 16.7 La rivelazione degli incendi, 381
16.7.1 Gli impianti di segnalazione d'incendio, 381 – 16.7.2 Tipi di rivelatori, 382 – 16.7.3 Qualificazione e posizionamento del rivelatore, 383
- 16.8 Lo spegnimento degli incendi, 384
16.8.1 Agenti estinguenti ed estintori, 384 – 16.8.2 Impianti fissi di estinzione a idranti, 385 – 16.8.3 Impianti fissi di estinzione a sprinkler, 386 – 16.8.4 Impianti fissi a schiuma, a polvere, ad anidride carbonica, 387 – 16.8.5 Impianti fissi di estinzione a estinguenti gassosi, 388
- 16.9 Norme antincendio per gli edifici civili, 389
16.9.1 Classificazione e requisiti costruttivi, 389 – 16.9.2 Scale, ascensori e comunicazioni con aree a rischio, 390 – 16.9.3 Predisposizione di impianti e sistemi di aerazione, 391
- 16.10 Norme antincendio per le autorimesse, 392
- 16.11 Autorimesse con capacità non superiore a 9 auto, 393
- 16.12 Autorimesse costituite da box, 394
- 16.13 Autorimesse con capacità superiore a 9 autoveicoli, 395
16.13.1 Ubicazione, dimensionamento e collegamenti, 395 – 16.13.2 Corsie di manovra, accessi e vie d'uscita, 396 – 16.13.3 Ventilazione, 397 – 16.13.4 Impianti elettrici e antincendio, 398
- 16.14 Norme antincendio per le scuole, 399
16.14.1 Classificazione delle scuole, 399 – 16.14.2 Disposizioni normative, 400 – 16.14.3 Caratteristiche costruttive delle scale, 401
-  **SINTESI**, 402
 **VERIFICA**, 403

Indice analitico, 405

Soluzioni delle domande a risposta chiusa, 410

Le energie integrative

2

L'Italia importa il 97% circa delle materie prime necessarie per la produzione di energia (soprattutto petrolio e gas) e il 13% circa dell'energia elettrica.

Le radiazioni solari e le altre fonti energetiche non tradizionali, pur non essendo in grado di soddisfare da sole il sempre crescente fabbisogno di energia, possono fornire un contributo al quale non è ormai più assolutamente lecito rinunciare.

- **Scopo di questa unità** è l'esame delle fonti energetiche non tradizionali e delle tecniche per il loro sfruttamento, dei principi e delle tecniche per la trasformazione dell'energia solare in energia termica e in energia elettrica, dei criteri di funzionamento della pompa di calore, delle tecniche di recupero e ottimizzazione dell'energia nei processi di trasformazione energetica e dei rapporti tra architettura e ambiente.

Sommario

- 2.1 Fonti energetiche integrative
- 2.2 L'energia solare
- 2.3 Sistemi a bassa temperatura
- 2.4 Sistemi ad alta temperatura
- 2.5 Impianti solari fotovoltaici
- 2.6 Sistemi passivi a guadagno diretto e isolato
- 2.7 Sistemi passivi a guadagno indiretto
- 2.8 La pompa di calore
- 2.9 Processi di trasformazione energetica a energia totale
- 2.10 Il teleriscaldamento
- 2.11 Energia eolica, da biomasse e geotermica
- 2.12 L'architettura sostenibile



2.1 Fonti energetiche integrative

Si definiscono **integrative** le fonti energetiche che sono in grado di contribuire, in misura più o meno grande, al soddisfacimento del fabbisogno energetico. Quando queste fonti sono disponibili in misura tale da sostituire del tutto quelle tradizionali vengono chiamate **alternative** (vedi [scheda 1.3.1](#)).

Le principali fonti energetiche integrative sono:

- il **Sole**, che fornisce energia che può essere trasformata in energia termica mediante *sistemi a bassa temperatura* (inferiore a 100 °C) costituiti da *pannelli o collettori solari* (vedi [scheda 2.3.1](#)) o *sistemi ad alta temperatura* (400 ÷ 580 °C) costituiti da *pannelli concentratori* (vedi [scheda 2.4](#)) oppure in *energia elettrica* mediante *processi di conversione fotovoltaica* (vedi [scheda 2.5.1](#));
- il **vento**, che può essere sfruttato mediante *generatori a pale* per produrre energia elettrica (vedi [scheda 2.11](#));
- le **biomasse** e i **rifiuti solidi**, che consentono di produrre energia attraverso appositi sistemi di trasformazione basati su processi termochimici e biochimici (vedi [scheda 2.11](#));
- il **vapore** e l'**acqua calda** (*fonti geotermiche*) fuoriuscenti dal sottosuolo, che possono essere trasformati

in energia elettrica o in energia termica per impianti di riscaldamento (vedi [scheda 2.11](#)).

Nella maggior parte dei sistemi (fig. 2.1) la trasformazione in energia elettrica avviene per *conversione di energia meccanica* (in genere un alternatore messo in moto da una turbina); solo in alcuni sistemi la trasformazione in energia elettrica avviene per *conversione diretta*.

approfondimento

Sistemi attivi e passivi di utilizzo dell'energia solare

I sistemi per la trasformazione dell'energia solare in energia termica per il riscaldamento di edifici possono essere *attivi* o *passivi*.

Sono **sistemi attivi** i pannelli solari e le altre tecniche che consentono di produrre *energia rinnovabile* attraverso veri e propri impianti, più o meno complessi, che possono essere installati in edifici di ogni tipo, di nuova costruzione e già esistenti (vedi [schede 2.3 e 2.5](#)).

Sono **sistemi passivi** tutti gli accorgimenti che consentono agli edifici di generare o conservare l'energia (vedi [schede 2.6 e 2.7](#)).

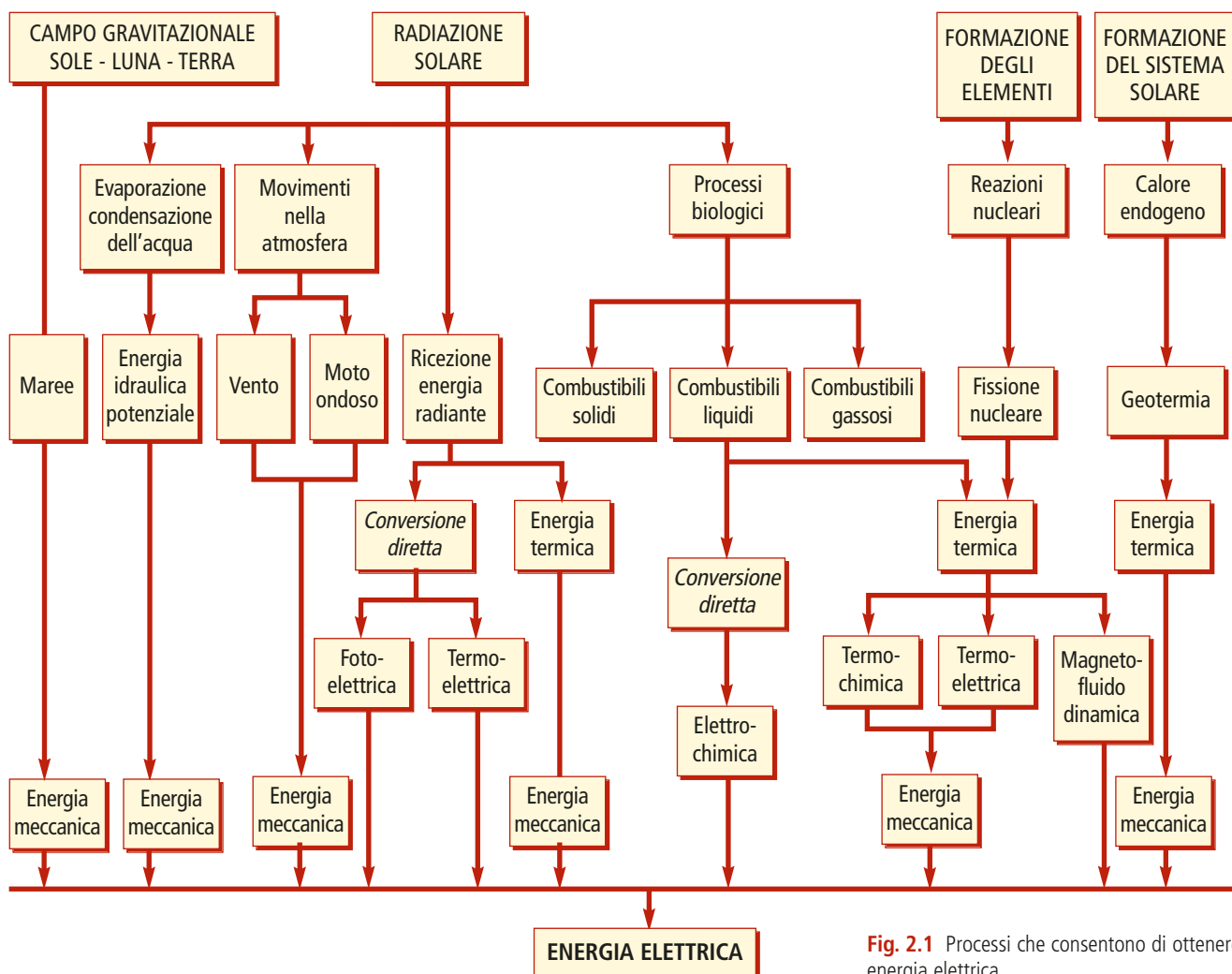


Fig. 2.1 Processi che consentono di ottenere energia elettrica.

2.2 L'energia solare

2.2.1 Costante solare e insolazione

La costante solare

Il Sole trasmette la maggior parte del suo calore per *irraggiamento*, sotto forma di raggi infrarossi. La quantità di energia trasmessa in un secondo è praticamente costante e, su una superficie perpendicolare alla direzione della radiazione posta al di fuori dell'atmosfera terrestre, vale 1395 W/m^2 (fig. 2.2). Tale valore viene chiamato **costante solare**. Non tutta l'energia che arriva sulla superficie esterna dell'atmosfera terrestre raggiunge però la Terra, perché parte di essa viene riflessa e parte assorbita dalle molecole dell'aria, dalle nubi e dalle polveri.

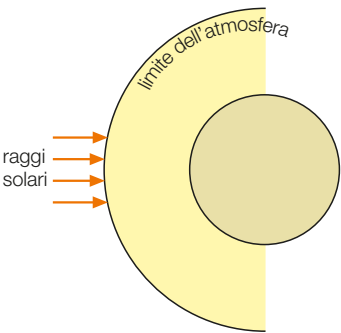


Fig. 2.2 Al di fuori dell'atmosfera il Sole trasmette ogni secondo una quantità di energia pari a $1,395 \text{ kW/m}^2$ detta *costante solare*.

Essa varia da luogo a luogo e, nello stesso luogo, varia nell'arco della giornata e dell'anno a causa della variazione dell'inclinazione dell'asse terrestre, del moto di rotazione e del moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole. Il suo valore è massimo all'equatore e minimo ai poli perché al crescere della latitudine aumentano sia l'inclinazione dell'orizzonte rispetto alla direzione dei raggi solari, sia lo spessore d dello strato di atmosfera che i raggi devono attraversare per raggiungere la superficie terrestre (fig. 2.3).

L'insolazione media effettiva

Per aumentare la quantità di energia solare captata bisogna fare in modo che le *superfici captanti* siano orientate perpendicolarmente alla direzione dei raggi solari, inclinandole rispetto al piano orizzontale di un angolo uguale alla latitudine del luogo (fig. 2.4). Un ulteriore incremento dell'energia captata si ottiene attraverso la correzione degli effetti prodotti dalla diffrazione della luce ottenuta riducendo di 10° l'inclinazione delle superfici captanti nella stagione invernale e aumentandola di 10° in quella estiva. Con questi accorgimenti si ottiene l'**insolazione media effettiva**, i cui valori, riferiti a ciascun mese dell'anno su una superficie inclinata verso sud-ovest rispetto al piano orizzontale di un angolo uguale alla latitudine del luogo considerato, sono riportati nella tabella 2.1.

L'insolazione teorica

L'**insolazione teorica** è la quantità di energia solare captata da una superficie orizzontale α nell'unità di tempo (giorno, mese ecc.), misurata in $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{giorno})$.

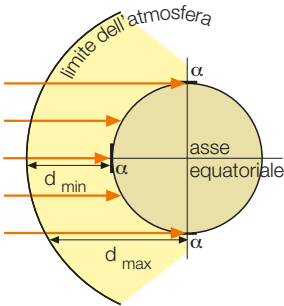


Fig. 2.3 L'insolazione teorica su una superficie orizzontale α è massima all'equatore dove è minima la distanza dal limite dell'atmosfera e si riduce progressivamente al crescere della latitudine.

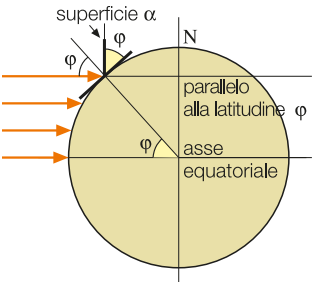


Fig. 2.4 Poiché i raggi solari raggiungono la superficie terrestre inclinati di un angolo φ pari alla latitudine del luogo, per captare la massima quantità di energia occorre inclinare di φ le superfici captanti.

Tab. 2.1 Valori di insolazione media mensile effettiva in alcune località italiane in $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{giorno})$.

Lat.	Città	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Set.	Ott.	Nov.	Dic.
39°15'	Cagliari	10,478	12,139	15,291	16,715	18,297	18,180	19,791	18,870	16,983	13,705	10,034	8,079
44°25'	Genova	7,874	9,368	15,107	14,504	16,108	16,300	17,539	14,404	14,517	11,340	7,426	6,769
30°12'	Messina	8,012	10,884	12,771	15,446	16,740	18,272	17,795	16,999	14,764	11,687	4,312	7,007
45°26'	Milano	5,710	7,732	11,637	14,149	15,241	15,463	16,426	15,488	13,709	9,163	6,250	5,195
40°51'	Napoli	7,543	9,213	11,097	13,600	15,631	16,551	17,163	16,145	14,345	11,855	7,983	6,112
41°48'	Roma	10,310	11,880	14,848	17,058	18,820	19,235	20,348	19,356	17,338	14,324	9,900	8,343
45°39'	Trieste	7,857	9,414	13,035	14,902	16,493	15,718	17,460	17,368	15,748	13,253	7,656	7,058

2.3 Sistemi a bassa temperatura

2.3.1 I pannelli solari

I pannelli solari

Il più diffuso sistema per produrre energia rinnovabile attraverso la trasformazione dell'energia solare in energia termica a bassa temperatura è costituito dai **collettori piani**, meglio conosciuti come **pannelli solari**, che normalmente vengono installati sui tetti. Il principio di funzionamento dei pannelli solari si basa sull'utilizzo del calore emesso dalle radiazioni solari per riscaldare un *fluido termovettore*, che può essere *aria* (fig. 2.5) o *acqua* (fig. 2.6), che a sua volta trasmette il calore acquisito all'impianto di distribuzione dell'acqua sanitaria o dell'acqua per il riscaldamento. Lo scambio di calore tra il fluido termovettore e l'impianto avviene attraverso un serbatoio coibentato, detto *scambiatore di calore*.

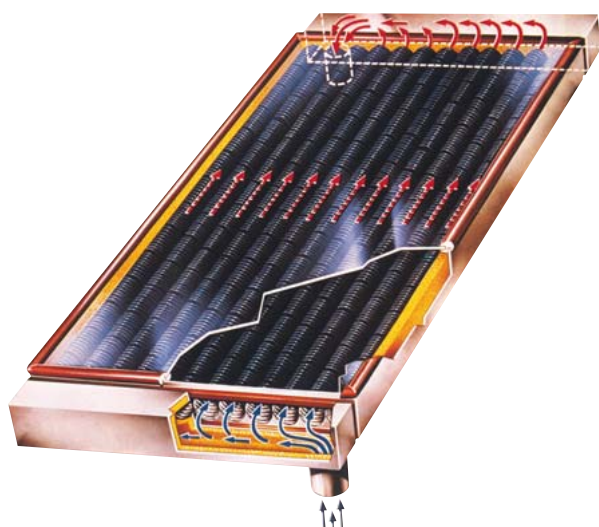


Fig. 2.5 Spaccato di pannello solare ad aria.

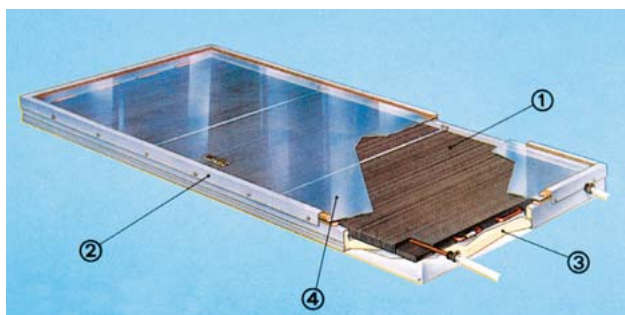


Fig. 2.6 Spaccato di pannello solare ad acqua: 1) piastra di colore scuro assorbente; 2) involucro esterno di alluminio; 3) isolante; 4) lastra di vetro di copertura.

Con un buon pannello solare si raggiungono normalmente temperature del fluido termovettore di $60 \div 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ampiamente sufficienti per produrre le relativamente modeste quantità di acqua calda intorno ai $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ che servono per gli usi sanitari, ma non per produrre le notevoli quantità di acqua intorno a $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ necessarie per il riscaldamento di ambienti.

Una tecnica che favorisce l'utilizzo dell'energia termica prodotta dai pannelli solari anche per il riscaldamento è quella dei **pannelli radianti** (vedi [scheda 13.9](#)) annegati nel pavimento, per il cui funzionamento sono sufficienti temperature dell'acqua comprese tra 36 e $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Componenti di un pannello solare

Componenti essenziali di un pannello solare sono (fig. 2.7):

- la **piastra captante** di colore nero, di metallo o di gomma speciale, all'interno della quale circola il fluido termovettore;
- l'**involucro**, metallico o di resina poliestere, rivestito internamente di isolante termico.

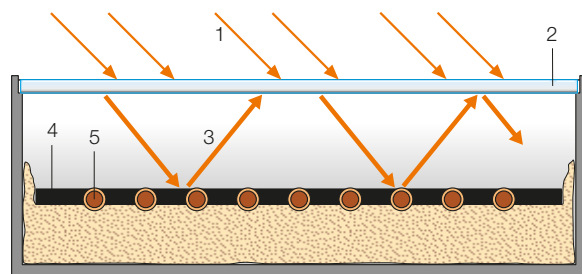


Fig. 2.7 Schema di collettore solare piano: 1) raggi solari; 2) lastra di vetro o di materiale plastico trasparente alla radiazione incidente e opaco alla radiazione riflessa; 3) raggi infrarossi che per effetto serra rimangono intrappolati all'interno del collettore riscaldando il fluido termovettore; 4) isolante termico; 5) sistema di tubi che convogliano il fluido riscaldato.

approfondimento

Prescrizioni del D.M. 27-7-2005

Il **D.M. 27-7-2005** prescrive che in tutti gli edifici pubblici o a uso pubblico di nuova costruzione vengano installati pannelli solari o sistemi fotovoltaici (vedi [scheda 2.5](#)) e che negli edifici privati di nuova costruzione vengano realizzate le predisposizioni necessarie per l'eventuale futura installazione di impianti solari. Questo principio è stato ribadito anche da tutti i successivi decreti in materia.

2.3 Sistemi a bassa temperatura

2.3.2 L'impianto a pannelli solari

Un **impianto a pannelli solari** (fig. 2.8) è sostanzialmente costituito da:

- *collettore* (o pannello solare);
- *impianto di distribuzione*;
- *serbatoio di accumulo* dell'acqua calda.

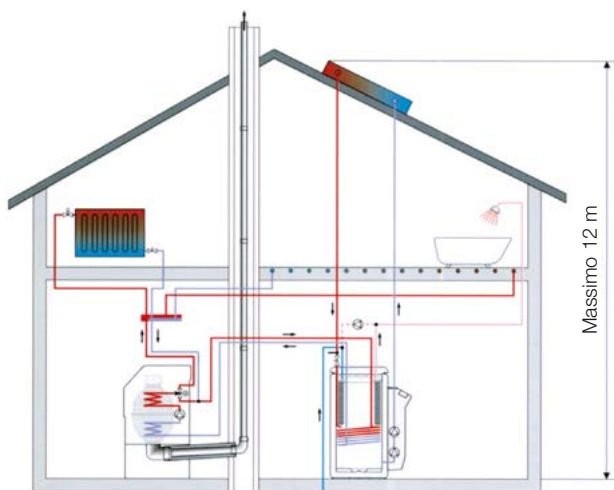


Fig. 2.8 Schema di un impianto integrato solare e termico per la produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento. L'acqua calda sanitaria (la doccia) proviene dal serbatoio d'accumulo che è riscaldato dal pannello solare, con eventuale integrazione della caldaia, mentre l'impianto di riscaldamento (rappresentato da un radiatore e da pannelli radianti a pavimento) è riscaldato esclusivamente dalla caldaia.

Il **collettore** (o *pannello solare*) non è altro che uno scambiatore di calore che trasferisce all'impianto di distribuzione l'energia termica captata dai raggi solari. L'**impianto di distribuzione** (fig. 2.9), il cui rendimento è tanto maggiore quanto migliore è il suo isolamento termico, è percorso da una miscela di acqua e di additivi che hanno la funzione di migliorarne la *conduttività termica* e di ridurne la temperatura di congelamento.

Un **termostato differenziale** (dotato di una sonda nel collettore e una nel serbatoio, in modo da poter registrare la differenza di temperatura nei due luoghi) attiva una pompa che mette in moto il liquido dell'impianto di distribuzione il quale, attraverso una serpentina immersa nel **serbatoio di accumulo**, cede il proprio calore all'acqua in esso contenuta. Se il serbatoio di accumulo è correttamente dimensionato e ben isolato termicamente, l'impianto è in grado di erogare acqua calda anche quando i pannelli solari non captano calore dal Sole.

In un buon impianto, il raffreddamento dell'acqua dopo 24 ore di totale mancanza di Sole è di circa 7 °C: l'impianto deve dunque essere abbinato a generatori di calore di tipo tradizionale che, in caso di maltempo prolungato, vengono automaticamente attivati da termostati.

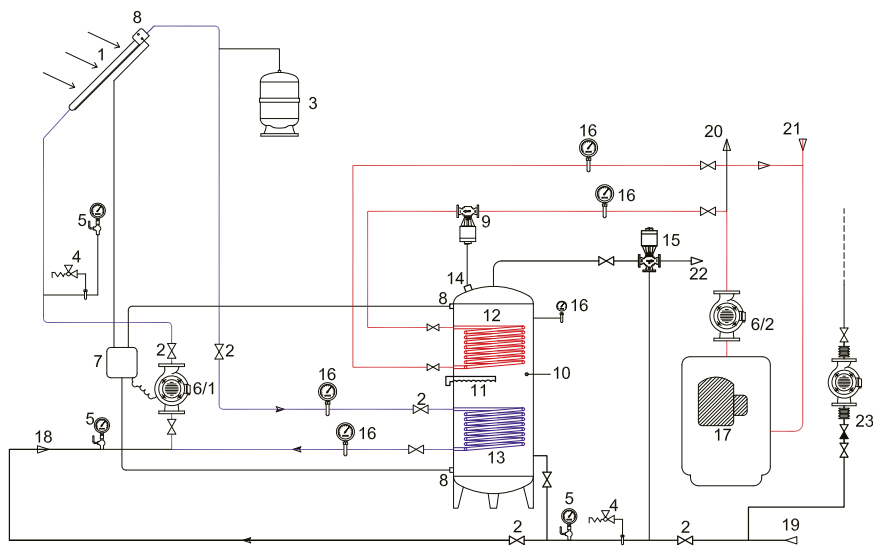


Fig. 2.9 Schema di impianto per la produzione di acqua calda sanitaria con pannelli solari integrato da un impianto di riscaldamento ausiliario.

- circuito che utilizza l'acqua calda prodotta dalla caldaia ausiliaria
- circuito che utilizza l'acqua calda prodotta dal pannello solare
- circuito di alimentazione dell'acqua proveniente dall'acquedotto

L'acqua fredda prelevata dall'acquedotto (19) si miscela con quella riscaldata dai pannelli solari che percorre le serpentine (13) all'interno del serbatoio di accumulo (10). Il termostato differenziale (14) registra la differenza di temperatura dell'acqua all'interno del serbatoio e nei collettori attraverso le sonde (8).

Il tubo di alimentazione (18) ha la funzione di integrare l'acqua nel circuito dei pannelli solari nel caso che il manometro rilevi una riduzione di pressione dovuta a evaporazione o a perdita. Se i pannelli non sono in grado di fornire acqua alla temperatura prefissata (normalmente 50 °C), la centralina (7) arresta la pompa dei pannelli e il termostato (14) apre la valvola a due vie (9) in modo da consentire all'acqua prodotta dalla caldaia di alimentare la serpentina (12). L'acqua calda giunge alle utenze attraverso

so il miscelatore (15) e ritorna al serbatoio attraverso il circuito di ricircolo (23).

1) Collettori solari; 2) rubinetti di intercettazione; 3) vaso di espansione; 4) valvola di sicurezza; 5) manometro; 6/1) elettropompa circuito pannelli; 6/2) elettropompa circuito caldaia; 7) centralina di controllo; 8) sonda; 9) valvola a due vie motorizzata; 10) boiler; 11) resistenza elettrica con termostato incorporato; 12) serpentina caldaia; 13) serpentina solare; 14) termostato; 15) valvola miscelatrice; 16) termometro; 17) caldaia ausiliaria; 18) alimentazione del collettore; 19) alimentazione dall'acquedotto; 20) mandata dell'impianto di riscaldamento; 21) ritorno dell'impianto di riscaldamento; 22) mandata acqua calda sanitaria ai servizi; 23) ritorno (ricircolo) dell'acqua sanitaria.

2.3 Sistemi a bassa temperatura

2.3.3 Dimensionamento dell'impianto a pannelli solari

Il dimensionamento di un impianto a pannelli solari consiste sostanzialmente nel calcolo della superficie di pannelli occorrente per soddisfare un determinato fabbisogno di acqua calda.

Il calcolo viene condotto come segue.

Calcolo dell'energia termica giornaliera richiesta all'impianto termico

L'energia q misurata in J/giorno, viene calcolata mediante la formula:

$$q = c_s \cdot V \cdot (t - t_a)$$

dove c_s è il calore specifico dell'acqua, che vale $4186 \text{ J}/(\text{dm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, V è il fabbisogno di acqua calda in litri/giorno, t è la temperatura richiesta (vedi **approfondimento**), t_a è la temperatura dell'acqua erogata dall'acquedotto, che è mediamente di 15°C al Nord e 20°C al Centro-Sud.

Per esempio, la quantità di energia che l'impianto deve fornire per soddisfare un fabbisogno di 200 l/giorno di acqua alla temperatura di 40°C , supponendo che la temperatura dell'acqua erogata dall'acquedotto sia di 15°C è:

$$q = 4186 \times 200 \times (40 - 15) = 20930 \text{ J/giorno}$$

Calcolo dell'energia solare fornita da 1 m^2 di pannello in un giorno

La quantità di energia solare e ($\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{giorno}$) che 1 m^2 di pannello è in grado di captare in un giorno, viene fornita dalla formula $e = A \cdot \eta \cdot k$, dove A è il valore medio giornaliero dell'insolazione calcolato sulla media mensile (che si ricava dalla tabella 2.1), η è il rendimento del pannello, che varia da $0,5$ a $0,75$ a seconda della qualità del pannello e k è un *coefficiente di efficienza di captazione* che dipende dall'inclinazione del pannello, che varia da $0,10$ a $0,15$ ma che, nel caso di pannelli installati su un tetto con falda di pendenza normale rispetto alle tradizioni costruttive italiane (vedi volume *Tecniche*) viene normalmente considerato $k = 1,12$.

Per esempio, l'energia captata in un giorno del mese di gennaio in varie località risulta:

■ a **Genova** 1 m^2 di pannello di *buona qualità* capta in un giorno l'energia:

$$e = 7,874 \times 0,75 \times 1,12 = 6,614 \text{ J}/\text{m}^2 \cdot \text{giorno}$$

■ a **Messina** 1 m^2 di pannello di *mediocre qualità* capta in un giorno l'energia:

$$e = 8,012 \times 0,5 \times 1,12 = 4,486 \text{ J}/\text{m}^2 \cdot \text{giorno}$$

■ a **Milano** 1 m^2 di pannello di *qualità ordinaria* capta in un giorno l'energia:

$$e = 5,710 \times 0,6 \times 1,12 = 3,837 \text{ J}/\text{m}^2 \cdot \text{giorno}$$

Calcolo dell'energia solare fornita da 1 m^2 di pannello in un anno

L'energia E captata da un pannello di superficie unitaria in un intero anno si ottiene moltiplicando per 365 quella giornaliera.

Occorre però tenere presente che il valore dell'insolazione giornaliera A deve essere ricavato dalla tabella 2.1 con un criterio diverso da quello visto sopra, perché in questo caso esso non deve risultare dalla media di un solo mese, ma da quella dell'intero anno. Occorre dunque dividere per 12 la somma dei valori medi mensili della località oppure, più semplicemente, assumere in via approssimata il **valore dell'insolazione media mensile del mese di marzo**, che non si discosta di molto dalla media annua.

Per esempio, il valore dell'insolazione giornaliera calcolato sulla base della media annua a Cagliari risulta di $14,88 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{giorno}$, mentre quello relativo al mese di marzo risulta di $15,29 \text{ MJ}/\text{m}^2$. Ai fini pratici la differenza tra i due valori è sostanzialmente trascurabile.

Calcolo della superficie di pannelli necessaria per soddisfare il fabbisogno

La superficie S dei collettori necessaria per soddisfare un determinato fabbisogno di acqua calda si ricava semplicemente dal rapporto tra la quantità annua di acqua calda che deve essere fornita dall'impianto ($Q = q \cdot 365$) e l'energia captata in un anno da 1 m^2 di pannello ($E = e \cdot 365$), assumendo nel calcolo di e il valore dell'insolazione media mensile del mese di marzo:

$$S = \frac{Q}{E}$$

approfondimento

Norme sulla temperatura dell'acqua calda sanitaria

La temperatura dell'acqua calda per usi sanitari non può, per legge, superare i 48°C .

Essa, come è già stato detto, si ottiene miscelando acqua calda e fredda in un serbatoio di accumulo (o boiler) entro il quale la temperatura non deve essere inferiore a 55°C per evitare il pericolo di formazione del batterio della legionella.

2.4 Sistemi ad alta temperatura

Si chiamano **sistemi ad alta temperatura** le tecniche per la trasformazione dell'energia solare in energia termica che consentono di riscaldare l'acqua, o un altro fluido, fino a temperature molto elevate. I sistemi ad alta temperatura sono utilizzati soprattutto per la produzione di energia elettrica, impiegando particolari tipi di collettori solari, detti *pannelli concentratori* (fig. 2.10).



Fig. 2.10 Collettori solari concentratori.

Pannelli concentratori

I **pannelli concentratori** sono collettori solari che consentono di far convergere i raggi solari verso un tubo percorso da un fluido che viene riscaldato fino alla temperatura di parecchie centinaia di gradi. I sistemi di concentrazione più diffusi utilizzano superfici riflettenti di forma cilindro-parabolica (figg. 2.10 e 2.11) che concentrano le radiazioni su un tubo (*collettore*) nel quale circola un fluido che viene riscaldato a 400-580 °C e pompato verso uno *scambiatore di calore* dove si produce vapore che aziona una turbina accoppiata a un generatore elettrico. Una caratteristica comune a tutti i pannelli concentratori è quella di utilizzare solo la radiazione solare diretta: per questa ragione tutti gli impianti ad alta temperatura devono essere dotati di dispositivi meccanici che orientano l'elemento captatore verso i raggi solari.

Il ciclo di trasformazione dell'energia solare in energia elettrica mediante un impianto costituito da una serie di collettori concentratori è schematizzato nella figura 2.12.

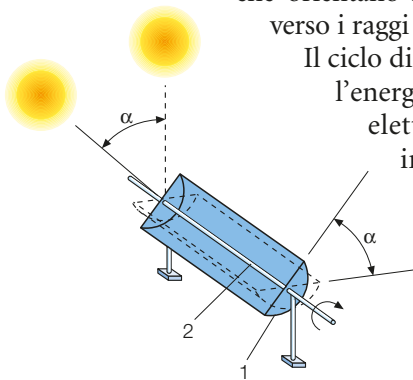


Fig. 2.11 Schema di concentratore solare cilindro-parabolico: 1) concentratore cilindrico a sezione parabolica; 2) tubo collettore con guaina protettiva. Il cilindro parabolico è collegato a un servomotore che ne permette la rotazione, in modo da orientarlo secondo l'inclinazione dei raggi solari.

approfondimento

Forni solari

Una tecnica di utilizzo dell'energia solare che consente di raggiungere elevatissime temperature è quella dei cosiddetti **forni solari** (figg. 2.13 e 2.14).

Essa richiede impianti complessi realizzati su aree estese e scarsamente abitate, in località a elevato soleggiamento. Gli impianti sono costituiti da batterie di specchi orientabili che dirigono le radiazioni solari verso un gigantesco specchio parabolico che, a sua volta, li concentra sulla *torre di captazione del calore* posta nel fuoco della parabola (fig. 2.13).

Malgrado i suoi eccellenti risultati, questa tecnica ha sinora avuto scarso seguito a causa degli elevati costi degli impianti e del trasporto dell'energia elettrica dal luogo di produzione a quello di utilizzo.

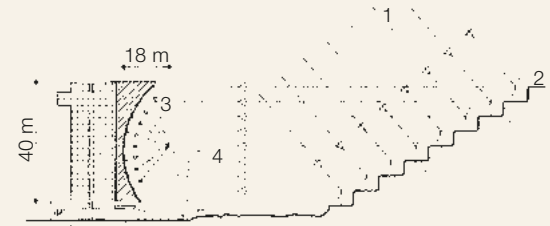


Fig. 2.13 Schema di forno solare: 1) raggi solari; 2) specchi orientabili; 3) specchio parabolico; 4) caldaia.

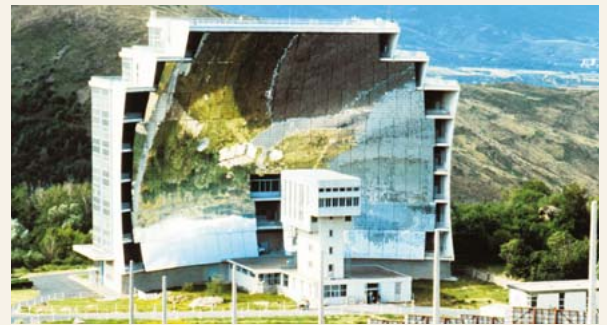


Fig. 2.14 Forno solare di Font Romeu, nei Pirenei.

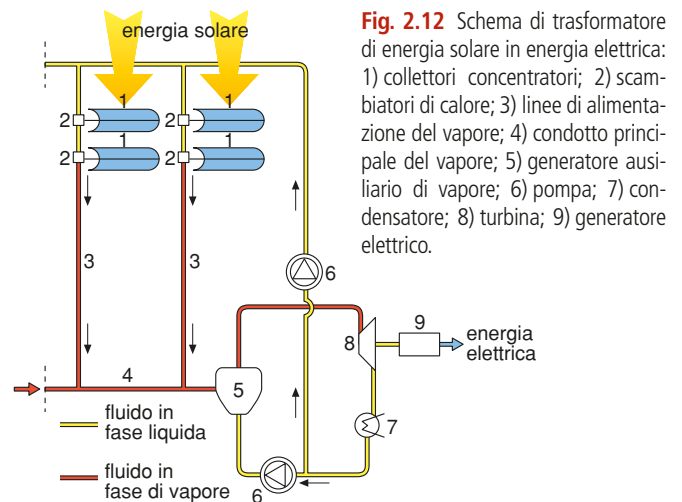


Fig. 2.12 Schema di trasformatore di energia solare in energia elettrica: 1) collettori concentratori; 2) scambiatori di calore; 3) linee di alimentazione del vapore; 4) condotto principale del vapore; 5) generatore ausiliario di vapore; 6) pompa; 7) condensatore; 8) turbina; 9) generatore elettrico.

2.5 Impianti solari fotovoltaici

2.5.1 La conversione fotovoltaica

La **conversione fotovoltaica** è una tecnica che consente di *trasformare l'energia solare in elettricità*, resa possibile dalla proprietà di alcuni materiali, detti **semiconduttori**, di generare energia elettrica quando sono colpiti dalla radiazione solare.

Questa trasformazione avviene all'interno di **celle fotovoltaiche** (*celle FV*) nelle quali l'energia solare si converte in corrente continua (fig. 2.15). L'energia elettrica ottenuta collegando opportunamente un numero sufficientemente grande di queste celle viene accumulata in una batteria e convogliata a un convertitore (*inverter*) che la trasforma in corrente alternata. Un *diodo* inserito sul circuito elettrico evita che la batteria si scarichi quando, in assenza di luce, la cella

FV si trasforma in un elemento passivo che assorbe energia anziché generarla.

Per ottenere quantità di energia elettrica apprezzabili è necessario disporre di un gran numero di celle, riunite in **moduli**, spesso racchiusi in **pannelli**.

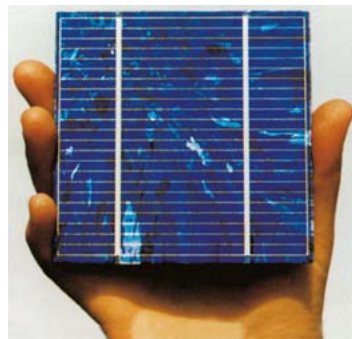


Fig. 2.15 Cellula captatrice di un pannello fotovoltaico.

approfondimento

I semiconduttori

I **semiconduttori** sono materiali che possono comportarsi sia da conduttori sia da isolanti.

I più noti di questi materiali sono il *silicio* e il *germanio*, i cui atomi sono dotati di quattro elettroni sull'ultima orbita.

Per aumentare la conducibilità di un semiconduttore si introducono al suo interno delle "impurità" (atomi di altri elementi): questa operazione prende il nome di *drogaggio del semiconduttore*.

Introducendo, per esempio, in un cristallo di silicio un certo numero di atomi di arsenico, ognuno di essi tende a stabilire cinque legami con gli atomi vicini, ma solo quattro elettroni si combinano con gli atomi di silicio; resta quindi libero un elettrone, che costituisce un portatore di *carica negativa*. Un cristallo così costituito prende il nome di **semiconduttore di tipo n** perché in esso la conduzione è dovuta principalmente alle cariche negative, cioè agli elettroni.

Se nel cristallo di silicio si introducono invece atomi di boro, questi tendono a stabilire solo tre legami con gli atomi vicini; resta quindi un *buco* o, come si dice, una *lacuna*, che gli elettroni degli atomi vicini tenderanno a riempire, spostandosi e lasciando a loro volta altre lacune, che verranno riempite da altri elettroni, e così via. In questo modo si determina una *corrente di lacune*, in senso opposto al movimento degli elettroni. Un cristallo così preparato viene detto **semiconduttore di tipo p** perché in esso la conduzione è dovuta prevalentemente al moto delle lacune (*cariche positive*).

Quando un semiconduttore di tipo n viene messo a contatto con uno di tipo p si ottiene una **giunzione p-n** attraverso la quale gli elettroni si diffondono dal semiconduttore di tipo n a quello di tipo p, mentre le lacune diffondono nel verso opposto e, in prossimità della giunzione, si forma un eccesso di cariche negative nel semiconduttore p e di cariche positive nel semiconduttore n. Tra i due semiconduttori si crea così un intenso *campo elettrico* che impedisce la successiva diffusione di elettroni e lacune.

In conclusione, la produzione di energia elettrica nelle celle fotovoltaiche avviene sfruttando l'*effetto fotoelettrico* che si produce in una **giunzione p-n** adeguatamente illuminata. L'energia luminosa induce gli elettroni a staccarsi dagli atomi creando la migrazione di elettroni e lacune, rispetti-

vamente, verso i semiconduttori n e p provocando il passaggio di corrente se la giunzione p-n è collegata a un circuito (fig. 2.16).

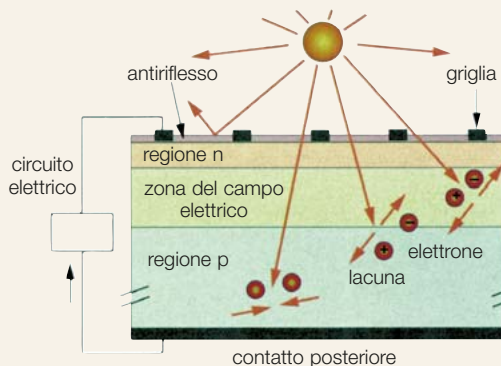


Fig. 2.16 Cella fotovoltaica al silicio. Dal basso verso l'alto troviamo uno strato metallico che fa da contatto con il circuito elettrico esterno, un semiconduttore di tipo p, uno di tipo n, un rivestimento antiriflesso e una griglia che costituisce il contatto elettrico superiore.

Un'applicazione importante dei semiconduttori è il **diodo a semiconduttore**, formato da una giunzione p-n che permette o impedisce il passaggio della corrente a seconda della disposizione delle polarità (fig. 2.17).

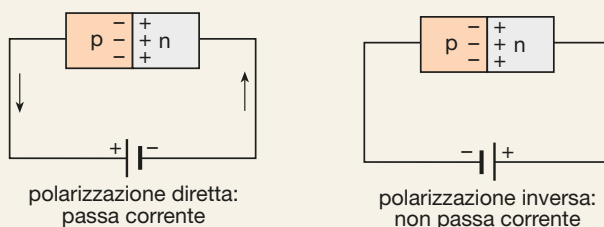


Fig. 2.17 Se il diodo è polarizzato direttamente (polo positivo del generatore collegato al semiconduttore p) nel circuito si ha passaggio di corrente; se è polarizzato inversamente (polo positivo collegato al semiconduttore n) nel circuito non passa corrente.

2.5 Impianti solari fotovoltaici

2.5.2 Celle, moduli, pannelli e stringhe

Le celle fotovoltaiche

Le **celle fotovoltaiche** sono costituite da strati di spessore estremamente ridotto, di forma e dimensioni variabili, le cui superfici interne sono trattate in modo da consentire il collegamento elettrico.

Il materiale più utilizzato per la realizzazione delle celle fotovoltaiche è il **silicio**, che può essere monocristallino, policristallino o amorfo; è però continua e fruttuosa la sperimentazione di altri materiali più economici.

Per ottimizzare la captazione delle radiazioni solari, la parte esposta al Sole delle celle FV è di solito rivestita con uno strato riflettente (*ossido di titanio*), che conferisce alla superficie un colore bluastrò.

Il **rendimento** di una cella fotovoltaica, cioè il rapporto tra l'energia elettrica prodotta e l'energia luminosa incidente, varia secondo i tipi dal 5% al 20%. Le cause principali di questo "basso" rendimento sono:

- la sensibilità delle celle solo a determinate lunghezze d'onda dello spettro solare;
- la dispersione sotto forma di calore di parte dell'energia solare che, oltre a ridurre il rendimento, danneggia la cella;
- la riflessione di parte della radiazione;
- la dissipazione di energia attraverso i collegamenti elettrici tra le celle.

Moduli, pannelli e stringhe

Poiché l'energia prodotta da una singola cella è minore di quella necessaria per il funzionamento della maggior parte delle apparecchiature elettriche, le celle vengono collegate in serie tra loro, in modo da formare **moduli** che costituiscono l'elemento base dell'impianto fotovoltaico.

approfondimento

Energia prodotta da una cella fotovoltaica

Una cella fotovoltaica esposta alla radiazione solare si comporta come un generatore di corrente con una *curva caratteristica tensione/corrente* che dipende fondamentalmente dall'intensità della radiazione solare, dalla temperatura e dalla superficie.

Essa è generalmente di forma quadrata con superficie di circa 100 cm² (vedi fig. 2.15 pagina precedente) e si comporta come una minuscola batteria producendo, nelle condizioni di soleggiamento tipiche delle regioni italiane, una corrente di 3 A con una tensione di 0,5 V, con una potenza che può variare da 0,8 W a 1,5 W.

A titolo di esempio si consideri che, per produrre per via fotovoltaica l'energia elettrica necessaria a servire una casa unifamiliare (esclusa la produzione di acqua calda e il riscaldamento), alla latitudine di Roma, si dovrebbe disporre di un sistema di accumulatori e di una superficie di 50 m² di celle solari.

Un modulo ha generalmente una superficie di circa mezzo metro quadrato ed eroga, in condizioni ottimali, da 40 a 60 W. La potenza massima ipoteticamente raggiungibile non ha limiti ed è strettamente connessa al numero di moduli collegabili tra loro.

I moduli possono avere forme e dimensioni diverse, assumendo anche la forma di vere e proprie *tegole solari*. Essi vengono molto spesso utilizzati sotto forma di **pannelli** costituiti da telai metallici e protetti da lastre di vetro e da materiali sigillanti, che hanno il compito di preservare le celle e i contatti elettrici da possibili danneggiamenti. I pannelli sono a loro volta spesso collegati in serie formando le cosiddette **stringhe** (fig. 2.18). In questo modo si possono realizzare superfici fotovoltaiche di dimensioni tali da costituire (con l'ovvia integrazione di materiali impermeabilizzanti) interi manti di copertura di edifici (fig. 2.19).



Fig. 2.18 Pannelli fotovoltaici sul tetto di un edificio.

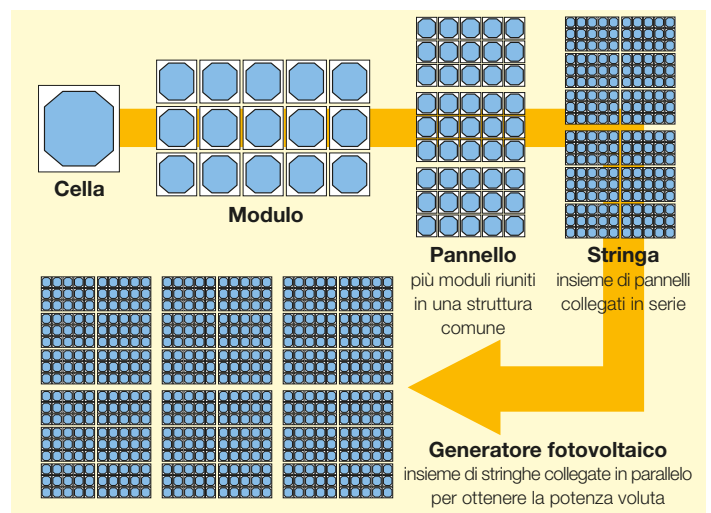


Fig. 2.19 Dalla cella al generatore fotovoltaico.

2.5 Impianti solari fotovoltaici

2.5.3 Impiego del fotovoltaico in edilizia

L'impiego dei pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica a servizio di edifici si è molto diffuso in questi anni, soprattutto negli Stati nei quali è stato sostenuto da un'adeguata politica energetica.

Impianti autonomi e impianti connessi alla rete elettrica

I sistemi fotovoltaici possono essere impiegati in forma autonoma, per fornire energia elettrica a luoghi non raggiunti dalla rete elettrica, come rifugi alpini, fari, piccole isole ecc. (fig. 2.20), o semplicemente per integrare la fornitura di energia in normali edifici (fig. 2.21).



Fig. 2.20 Pannello fotovoltaico di alimentazione della rete radiotelefonica di emergenza lungo una strada alpina.

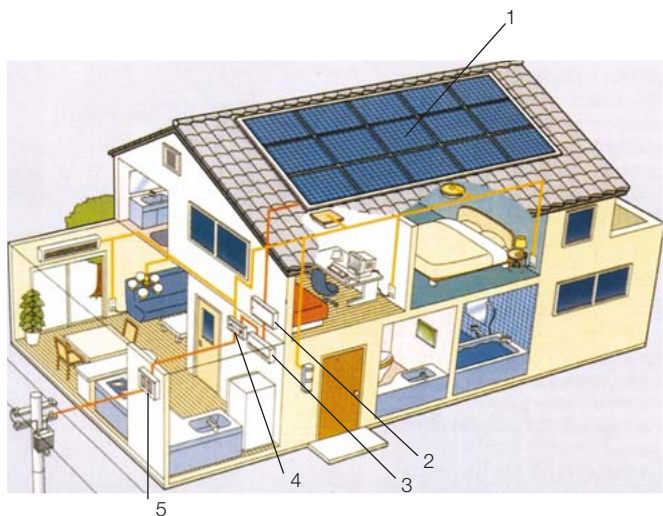
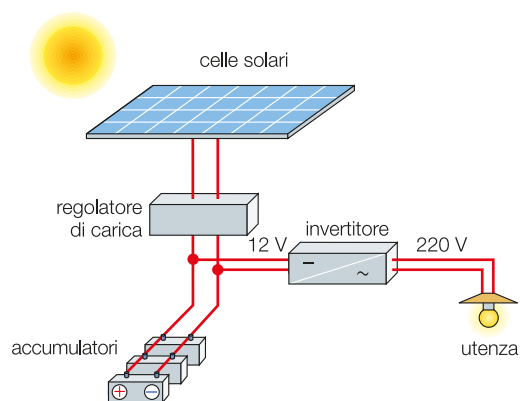


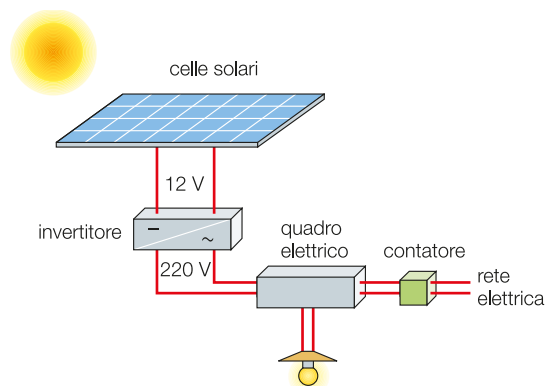
Fig. 2.21 Impianto fotovoltaico installato sul tetto di una villetta: 1) pannelli fotovoltaici; 2) inverter immissione in rete; 3) contabilizzazione energia; 4) protezioni; 5) rete elettrica pubblica.

In questo secondo caso, la produzione di energia fotovoltaica può essere totalmente utilizzata in modo autonomo (fig. 2.22 a) oppure essere ceduta in parte (fig. 2.22 b) attraverso un vero e proprio scambio di energia con l'Ente erogatore di energia elettrica che utilizza quella eventualmente prodotta in eccesso oppure integra quella eventualmente carente, sulla base di uno specifico contratto (vedi [scheda 2.5.4](#)).

La conversione fotovoltaica costituisce anche una grande risorsa per le regioni dei Paesi in via di sviluppo non ancora provvisti di un'adeguata rete di distribuzione elettrica.



a) Impianto per l'alimentazione elettrica di un edificio isolato.



b) Impianto allacciato alla rete elettrica.

Fig. 2.22 Impianti fotovoltaici per l'alimentazione elettrica autonoma di un edificio isolato (a) e con allacciamento alla rete elettrica esterna (b).

Vantaggi e svantaggi dei sistemi fotovoltaici

I vantaggi più significativi del sistema fotovoltaico sono: buone caratteristiche di semplicità e affidabilità, assenza di inquinamento o rumore, discreta facilità di manutenzione, autogestione. Per contro, i pannelli fotovoltaici sono costosi e la loro installazione richiede ampie aree, distanti da alberi o altri ostacoli alla radiazione solare: a ciò si pone rimedio installando i pannelli sui tetti o anche lungo le facciate degli edifici.

2.5 Impianti solari fotovoltaici

2.5.4 La facciata fotovoltaica

I pannelli fotovoltaici disposti sulle coperture degli edifici possono essere installati con facilità e, in genere, non influiscono in modo significativo sull'aspetto dell'edificio e non comportano particolari problemi sia in fase di installazione sia durante gli interventi manutentivi.

Questa soluzione costituisce, dunque, allo stato attuale delle tecnologie, la più interessante in vista di una sempre maggiore diffusione dell'utilizzo del fotovoltaico in edilizia, tanto più che la disponibilità di tetti con orientamento e caratteristiche adatte a ricevere quantità significative di radiazioni solari è, in Italia, elevatissima.

L'uso del fotovoltaico in edilizia non è tuttavia limitato ai soli pannelli disposti sulle coperture degli edifici e nuove soluzioni si stanno facendo sempre più strada. Particolarmente interessante in questo senso sono gli impieghi del fotovoltaico nelle facciate degli edifici. Già da molti anni in vari Paesi (soprattutto in Germa-

nia) è diffusa la pratica di rivestire con pannelli fotovoltaici le parti opache delle facciate meglio esposte: una soluzione che, specie se abbinata a tecniche di *rivestimento a cappotto* della facciata (vedi volume *Tecniche*) può dare risultati eccellenti sul piano del risparmio energetico. Più di recente però sono state messe a punto tecniche che rendono possibile ricavare energia fotovoltaica anche dalle vetrature isolanti (vedi volume *Materiali*) senza influire in misura significativa sulla loro trasparenza.

In questo modo è dunque possibile rivestire con elementi fotovoltaici intere facciate, specie se realizzate con la tecnica delle *facciate vetrate strutturali* (vedi volume *Tecniche*), oppure limitarsi a sostituire, durante gli interventi manutentivi, i serramenti esterni con altri dotati di **vetrate isolanti fotovoltaiche**.

È evidente che soluzioni di questo tipo consentono di aumentare in misura notevole l'apporto energetico derivante dal fotovoltaico in edilizia (fig. 2.23).

approfondimento

Norme per favorire l'uso del fotovoltaico

Tra i vari provvedimenti per favorire lo sviluppo del fotovoltaico in Italia sono particolarmente importanti:

■ **D.M. 28-7-2005** (e successive modificazioni che definisce i criteri per incentivare la produzione di energia elettrica da impianti fotovoltaici distinguendo tra impianti piccoli (meno di 20 kW), medi (da 20 a 50 kW) e grandi (oltre 50 kW) e stabilendo che il 60% degli incentivi è destinato ai piccoli e medi impianti. Le forme di incentivazione sono così distinte:

- fino a 20 kW avviene il cosiddetto *scambio sul posto*; ossia l'energia immessa in rete e misurata con un *contatore bidirezionale* viene detratta dalla bolletta;
- oltre 20 kW l'utente diventa autoproduttore e può vende-

re l'energia all'Ente erogatore sulla base di tre tariffe differenziate:

- la tariffa più bassa riservata agli impianti non integrati nella struttura edilizia;
- la tariffa intermedia riservata agli impianti definiti semintegrati;
- la tariffa più alta (cioè la più conveniente per l'utente) riservata agli impianti integrati nella struttura edilizia.

■ **D.Lgs. 311/06 e varie Leggi Regionali** che promuovono iniziative a sostegno del fotovoltaico stabilendo, tra l'altro, che nei nuovi edifici devono essere costruiti opportuni cavei per il collegamento tra i pannelli fotovoltaici e gli ambienti nei quali sono installate le apparecchiature che forniscono l'energia elettrica alle singole utenze.



Fig. 2.23 Edificio con facciata con pannelli di celle captatrici fotovoltaiche.

2.6 Sistemi passivi a guadagno diretto e isolato

Per **sistemi passivi** si intendono le tecniche costruttive che consentono di ottenere un *guadagno termico* rendendo gli edifici idonei a generare e a conservare l'energia solare sotto forma di energia termica. A seconda delle modalità attraverso le quali si ottiene il guadagno termico essi possono essere a *guadagno diretto*, a *guadagno isolato* o a *guadagno indiretto*.

Sistemi passivi a guadagno diretto

I **sistemi passivi a guadagno diretto** sono quelli che consentono di riscaldare direttamente un locale con l'energia solare convogliando nel locale stesso le radiazioni solari attraverso finestre opportunamente orientate in modo da riscaldare delle *masse termiche* (cioè elementi dotati di rilevante inerzia termica) (fig. 2.24) che poi restituiscono gradatamente all'ambiente il calore accumulato.

Sistemi passivi a guadagno isolato

I **sistemi passivi a guadagno isolato**, nella loro forma più tipica, non sono altro che impianti a pannelli solari privi di pompe, nei quali il moto nel circuito convettivo avviene esclusivamente per effetto della differenza di temperatura del fluido riscaldato. Essi sono dunque costituiti da un **circuito convettivo** attraverso il quale l'acqua scaldata da un *collettore solare* è trasferita a uno *scambiatore di calore* posto a

quota più alta, dove cede il proprio calore prima di ritornare al collettore (fig. 2.25).

L'assenza di pompe rende questi semplici impianti adatti per la produzione di acqua calda sanitaria anche in località del tutto sprovviste di energia elettrica.

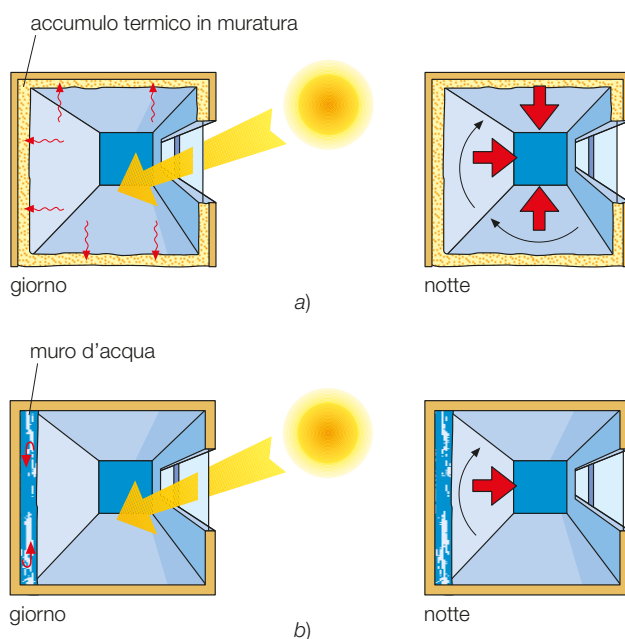


Fig. 2.24 Schema di funzionamento di sistema a guadagno diretto. Il calore accumulato durante il giorno nella muratura (a) o nel cosiddetto *muro d'acqua* (b) viene restituito all'ambiente durante la notte.

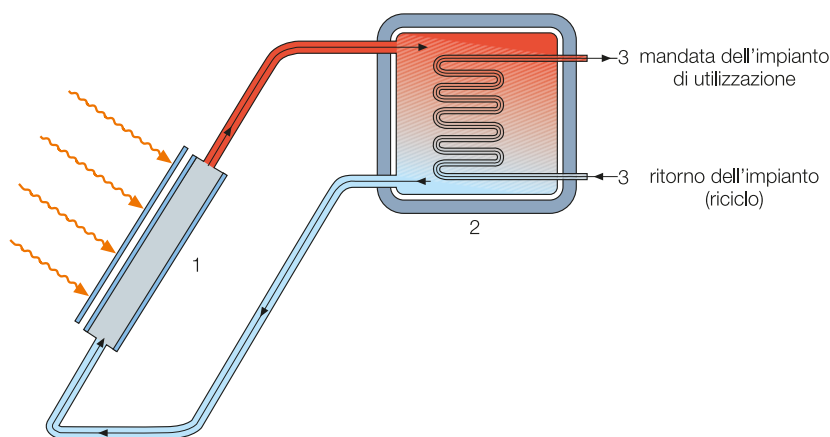


Fig. 2.25 Schema di funzionamento di sistema a guadagno isolato:
1) collettore solare;
2) accumulatore termico (scambiatore di calore);
3) tubi di andata e ritorno del circuito di distribuzione dell'acqua calda.

2.7 Sistemi passivi a guadagno indiretto

I **sistemi passivi a guadagno indiretto** consistono nell'interporre tra i raggi solari e l'ambiente da riscaldare una parete dotata di rilevante inerzia termica, detta **muro solare** o **muro Trombe** (vedi [approfondimento](#)), con funzione di *massa termica*.

La trasmissione di calore all'interno dell'ambiente da riscaldare avviene principalmente per *conduzione*, attraverso il muro solare, ma spesso è integrata da moti convettivi di aria attraverso bocchette poste in prossimità del soffitto e del pavimento (fig. 2.26).

Intorno al 1970 furono realizzate in vari Paesi, soprattutto nella regione pirenaica e nel meridione della Francia, molte case riscaldate con tecniche che ricorrevano a questo principio.

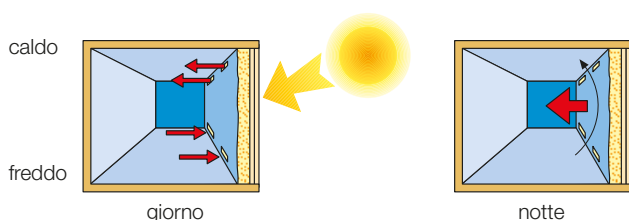


Fig. 2.26 Schema di funzionamento di sistema a guadagno indiretto.

Sistemi passivi a guadagno indiretto integrati da effetto serra

Il rendimento termico del sistema passivo a guadagno indiretto può essere migliorato addossando al muro solare una serra, in modo da integrare il guadagno indiretto con quello diretto prodotto dall'*effetto serra* (figg. 2.27 e 2.28).

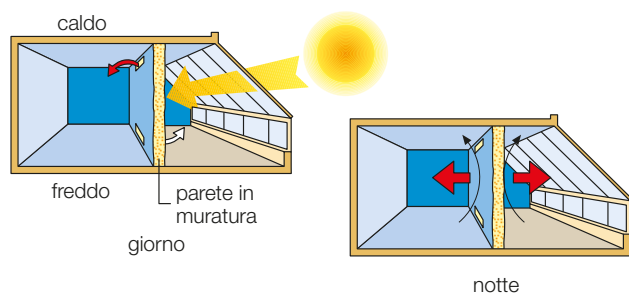


Fig. 2.27 Schema di funzionamento di sistema a guadagno indiretto integrato da effetto serra.



approfondimento

La casa solare

La **casa solare** è un'applicazione della combinazione tra *collettore solare* e *accumulatore di calore* in un unico elemento strutturale dell'edificio (normalmente la parete esposta a Sud) (fig. 2.29).

Il sistema è costituito, in estrema sintesi, da una *parete vetrata*, rivolta appunto a Sud nell'emisfero Nord e rivolta a Nord nell'emisfero Sud, in modo da captare la massima quantità possibile di energia termica, grazie all'irraggiamento solare, e da una *massa termica* che assorbe, accumula e distribuisce il calore.

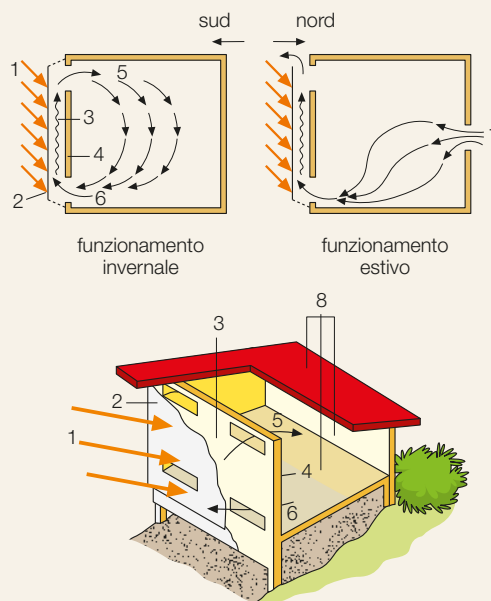


Fig. 2.29 Principio di funzionamento della casa Trombe:

- | | |
|---|---|
| 1) raggi solari; | 5) aria calda in entrata; |
| 2) doppia vetrata; | 6) aria fredda in uscita; |
| 3) intercapedine d'aria; | 7) aria fresca; |
| 4) parete assorbente di cemento da 30 cm; | 8) tetto, muro e pavimento ben isolati. |

Le numerosissime soluzioni di casa solare proposte sono sostanzialmente riconducibili a pochi modelli fondamentali, molti dei quali utilizzano le tecnologie messe a punto dal francese Felix Trombe.

Le case Trombe utilizzano il sistema a guadagno indiretto. Esse hanno la parete verso Sud costituita da un muro spesso 30 ÷ 40 cm, dipinto di colore scuro e protetto esternamente da un doppio vetro distante dal muro circa 30 cm. Gli ambienti interni sono posti in comunicazione con l'intercapedine tra la vetrata e il muro attraverso feritoie in alto e in basso. L'intercapedine può anche comunicare con l'esterno attraverso un'apertura posta in alto, tenuta chiusa d'inverno e aperta nel periodo estivo.

I moti ascensionali dell'aria riscaldata nell'intercapedine per effetto serra possono così creare nell'ambiente circolazioni di aria calda durante l'inverno e di aria fresca, proveniente dalla parete a Nord, durante l'estate.

Fig. 2.28 Esempio di architettura bioclimatica, basato sullo sfruttamento dell'effetto serra per il riscaldamento invernale (Villefontaine, Lione).

2.8. La pompa di calore

2.8.1 Funzionamento ed efficienza della pompa di calore

La **pompa di calore** è un dispositivo che consente di estrarre calore da una sorgente a bassa temperatura (*sorgente fredda*) e di “pomparlo” in un circuito chiuso percorso da uno speciale fluido (*frigogeno*) che lo trasferisce in un ambiente a temperatura più alta (*pozzo caldo*) con un consumo ridotto di energia elettrica.

La pompa di calore consente cioè di produrre una quantità di energia superiore alla somma del calore prelevato all'esterno e dell'energia elettrica impiegata per il suo funzionamento.

Funzionamento della pompa di calore

Il funzionamento della pompa di calore è comparabile a quello di un frigorifero che, invece di essere utilizzato per sottrarre calore (cioè per raffreddare ciò che viene posto al suo interno), venga utilizzato per erogare calore, cioè per riscaldare un ambiente.

Il fluido frigogeno che circola nella pompa di calore durante il ciclo passa continuamente dallo stato liquido a quello gassoso in un **evaporatore** e da quello gassoso a quello liquido in un **condensatore** (fig. 2.30).

A seconda della sorgente fredda dalla quale viene attinta l'energia e del fluido al quale essa viene trasferita, la pompa di calore può essere di uno dei seguenti tipi: **aria-aria**, **aria-acqua**, **acqua-aria**, **acqua-acqua** (il primo termine indica la sorgente fredda e il secondo il pozzo caldo) (vedi [scheda 2.8.3](#)).

Il calore prodotto può essere ceduto all'ambiente attraverso ventilconvettori, serpentine o canalizzazioni (vedi [unità 13](#)).

In un *ciclo ideale* (privo cioè di perdite energetiche) la pompa assorbe una quantità di calore Q_1 dalla sor-

gente fredda T_1 e, utilizzando una quantità di energia E fornita da un compressore (generalmente azionato da un motore elettrico), trasferisce al pozzo caldo T_2 una quantità di calore Q_2 equivalente alla somma di Q_1 ed E . Se il calore Q_1 è disponibile “gratuitamente” (perché è prelevato da aria o acqua dell'ambiente o “di recupero”), allora il calore “utile” Q_2 si ottiene con la sola spesa di energia E .

Efficienza della pompa di calore

La “convenienza” della pompa di calore viene valutata attraverso il **coefficiente di prestazione (COP)**, dato dal rapporto fra l'energia ottenuta, cioè il calore utile (calore ceduto al pozzo caldo) e l'energia elettrica spesa:

$$\frac{\text{calore utile}}{\text{energia spesa}} = \frac{Q_2}{E}$$

Il COP varia a seconda del tipo di pompa e delle condizioni di funzionamento e ha, in genere, valori prossimi a 3. Questo significa che per ogni kWh di energia elettrica consumato, la pompa fornisce 3 kWh (10 800 J) di calore al mezzo da riscaldare.

approfondimento

COP_{effettivo} e COP_{ideale}

In termodinamica si dimostra che per un ciclo “ideale” il coefficiente di prestazione raggiunge il valore:

$$\text{COP} = \frac{Q_2}{E} = \frac{Q_2}{(Q_2 - Q_1)} = \frac{T_2}{(T_2 - T_1)}$$

Nei calcoli di questo tipo la temperatura non va espressa in gradi Celsius °C, ma in kelvin K, ricordando che 1 K = -273 °C. Per trasformare in kelvin una temperatura espressa in gradi Celsius occorre dunque aggiungere 273. Per esempio, nel caso di una pompa operante in ciclo ideale tra 5 e 50 °C si avrebbe:

$$\text{COP}_{\text{ideale}} = \frac{273 + 50}{(273 + 50) - (273 + 5)} = \frac{323}{45} = 7,2$$

In pratica però le perdite energetiche e le condizioni operative che inevitabilmente caratterizzano un ciclo reale riducono di molto il valore del COP_{effettivo}.

approfondimento

Definizione di pompa di calore

Il **D.Lgs. 192/05** (vedi [scheda 1.3.4](#)) definisce la **pompa di calore** come *dispositivo o impianto che sottrae calore dall'ambiente esterno o da una sorgente di calore a bassa temperatura e lo trasferisce all'ambiente a temperatura controllata*.

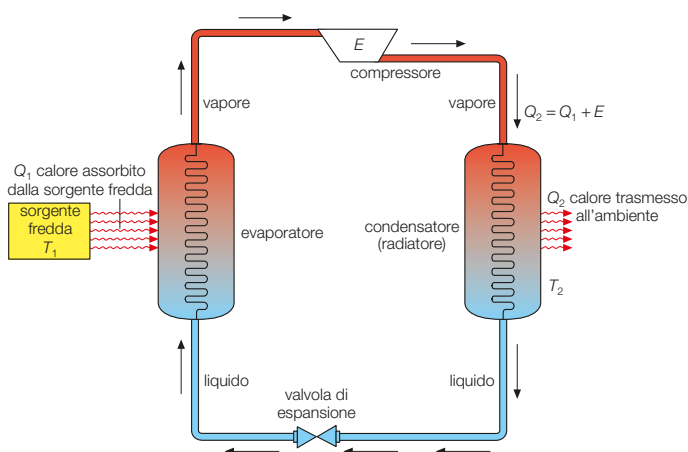


Fig. 2.30 Schema di funzionamento della pompa di calore.

2.8 La pompa di calore

2.8.2 Il ciclo termico della pompa di calore

Analizziamo, attraverso un esempio, la sequenza dei processi di trasformazione che avvengono durante un ciclo termico della pompa di calore.

Riferendoci alla figura 2.31, supponiamo che la pompa debba scaldare acqua a 50 °C prelevando calore dall'aria esterna, la cui temperatura varia tra +25 °C d'estate e +5 °C d'inverno, e consideriamo la condizione d'esercizio più gravosa (quella invernale).

Supponiamo inoltre che il fluido utilizzato sia quello commercialmente designato con la sigla R 12 che bolle o condensa a 53 °C quando la sua pressione è di 13 bar e a -1 °C quando la sua pressione è di 3 bar (ricordando che il bar è l'unità di misura della pressione del sistema SI, equivalente a circa a 1 atmosfera e quindi anche a 1 kg/cm²). Questi valori della pressione si prestano bene all'uso dei normali compressori di serie, che forniscono buoni rendimenti.

Le caratteristiche iniziali del fluido nel punto A siano: pressione 3 bar, temperatura -1 °C, entalpia specifica 353 kJ/kg.

Le varie fasi del ciclo sono evidenti nella figura 2.31. I punti A-B-C-D corrispondono, sull'asse delle ordinate, a varie fasi della compressione, mentre sull'asse delle ascisse si leggono i corrispondenti valori dell'entalpia.

Compressione (da A a B)

Il gas compresso si scalda con aumento dell'entalpia di una quantità di poco inferiore all'energia assorbita dal compressore. All'uscita del compressore (punto B), le caratteristiche del gas saranno: pressione 13 bar, temperatura 100 °C, entalpia $(353 + 57) = 410$ kJ/kg.

Condensazione (da B a C)

Il gas entra nel condensatore posto nell'ambiente da riscaldare (acqua a 50 °C). Poiché il gas è più caldo, si raffredda cedendo calore e, quando la sua temperatura è scesa fino a 53 °C, comincia a condensare e all'uscita del condensatore (punto C) è completamente liquido con le seguenti caratteristiche: pressio-

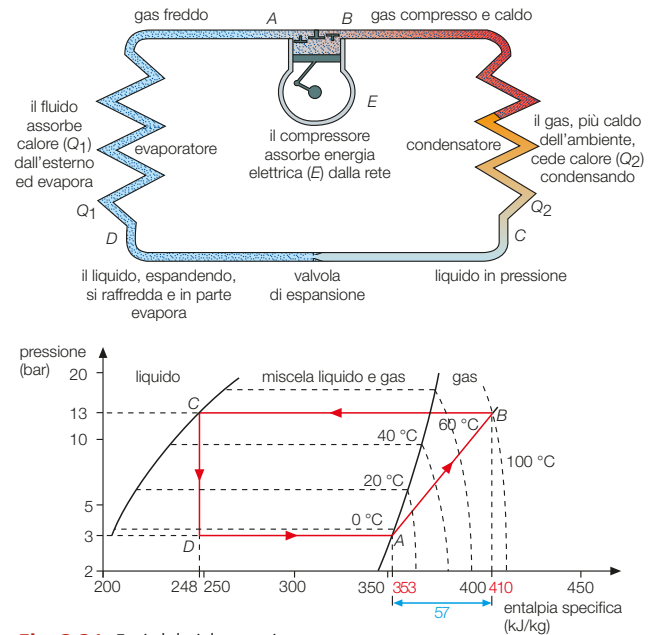


Fig. 2.31 Fasi del ciclo termico.

ne ancora di 13 bar, temperatura uguale a quella del condensatore, 50 °C, entalpia scesa a 248 kJ/kg. Il fluido ha dunque ceduto all'ambiente che deve scaldare $(410 - 248) = 162$ kJ/kg.

Espansione (da C a D)

Il liquido passa attraverso una valvola in un ambiente dove la pressione è di nuovo di soli 3 bar. Espandendosi esso si raffredda e in parte evapora. All'ingresso dell'evaporatore (punto D), esso è una miscela di liquido e gas con queste caratteristiche: pressione ridotta a 3 bar, temperatura -1 °C.

Evaporazione (da D ad A)

Ora il fluido entra nell'evaporatore posto nell'ambiente freddo, che ha comunque una temperatura (5 °C) superiore a quella del fluido. Perciò quest'ultimo assorbe calore e completa la sua evaporazione. L'assorbimento di calore, che è di circa 105 kJ/kg, avviene senza alcuna spesa di energia ed è proprio questa la fase che giustifica il vantaggio economico di tutta l'operazione.

approfondimento

COP_{effettivo} e COP_{ideale} del ciclo

Come risulta dall'esempio, si spende energia solo nella fase di compressione e si ricava calore utile nella fase di condensazione. Ogni kilogrammo di fluido assorbe dal compressore 54 kJ e cede all'ambiente caldo 159 W. Il COP_{effettivo} è dunque $159 : 54 = 2,9$ mentre il COP_{ideale} è $\frac{273 + 50}{50 - 5} = 7,2$

Come si vede, la differenza fra i due valori è molto rilevante, ed è dovuta alle perdite energetiche e alle differenti condizioni che si verificano nel ciclo reale, diverso da quello ideale (ciclo di Carnot).

richiami di fisica

L'entalpia

L'**entalpia** è una grandezza termodinamica che corrisponde al **contenuto di calore a pressione costante** di un fluido; la sua unità di misura è quindi la stessa del calore, cioè, nel Sistema Internazionale, il joule (J) e i suoi multipli (kJ = kilojoule = 1000 joule).

Ricordiamo che 1 kJ = 0,24 kcal.

Nel diagramma di figura 2.31 è indicata l'**entalpia specifica** ossia "per unità di massa" del fluido, espressa in kJ/kg.

2.8 La pompa di calore

2.8.3 La pompa di calore a ciclo reversibile

Il grande pregio della pompa di calore è quello di poter essere costruita in versione **reversibile**, in modo tale cioè che la stessa pompa che d'inverno fa passare calore dall'esterno a temperatura fredda all'interno caldo può, d'estate, trasferire calore dall'interno all'esterno per deumidificare e mantenere più fresca la temperatura dei locali, realizzando così la climatizzazione integrale dell'ambiente nell'arco dell'anno (fig. 2.32).

Questo duplice impiego, invernale ed estivo, rappresenta il criterio di sfruttamento della pompa più conveniente per le seguenti ragioni:

- si provvede al riscaldamento e al rinfrescamento con un solo impianto, con notevole risparmio nella spesa iniziale e in quella per le manutenzioni;
- lo stesso impianto funziona tutto l'anno (sia d'inverno sia d'estate) e in questo modo i costi di acquisto e di installazione risultano meglio ammortizzati, perché sono ripartiti su un periodo di funzionamento doppio. La pompa di calore reversibile già nelle condizioni attuali risulta sicuramente conveniente per le abitazioni ma, soprattutto, per i locali commerciali e industriali e lo sarà ancor di più quando una più larga diffusione consentirà di abbassarne i costi di produzione.

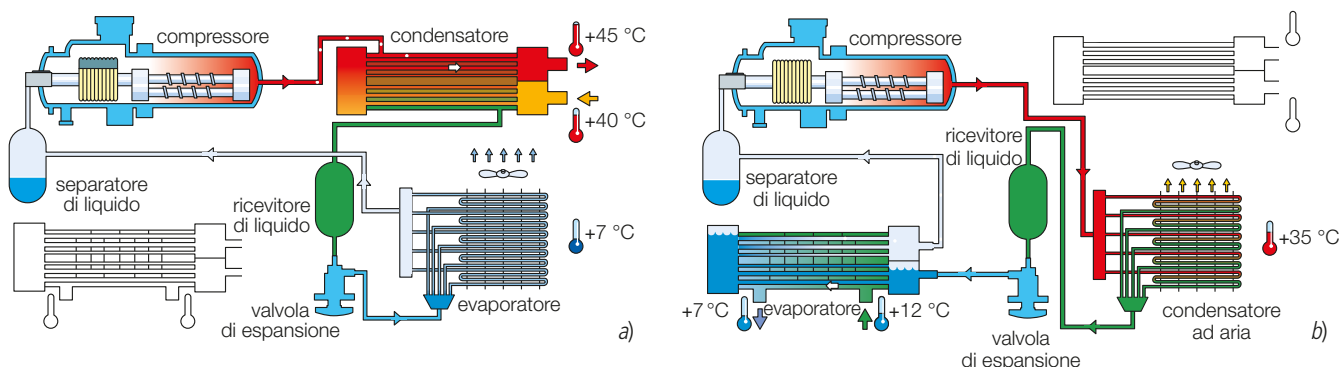


Fig. 2.32 Duplice impiego della pompa di calore in un unico impianto. **a) Funzionamento invernale.** L'ambiente cede calore al liquido nell'evaporatore che, trovandosi a una temperatura più bassa, acquistando calore evapora; il liquido passa quindi nel compressore, che ne aumenta la pressione e la temperatura; nel condensatore il gas "caldo" cede calore e riscalda l'acqua di utilizzo da 40 a 45 °C; il gas trasformato in liquido a causa della condensazione viene fatto espandere nella valvola di espansione (che funge anche da valvola di inversione di ciclo). A causa dell'espansione il liquido si raffredda e torna all'evaporatore. **b) Funzionamento estivo.** Il fluido frigorifero compresso in fase liquida passa nel condensatore dove cede il calore all'esterno; il liquido così raffreddato viene fatto espandere nella valvola di espansione dove, trasformandosi in gas, si raffredda ulteriormente e nell'evaporatore assorbe calore dall'acqua dell'utilizzatore portandola da 12 a 7 °C; il gas viene nuovamente immesso nel compressore per ricominciare il ciclo.

approfondimento

Caratteristiche della sorgente fredda di una pompa di calore

Per il funzionamento della pompa di calore è essenziale che la sorgente fredda sia *illimitata*, a *temperatura costante* e *quanto più possibile economica*.

Le principali sorgenti fredde sono:

■ **l'aria**, che ha il vantaggio di essere disponibile ovunque; si può utilizzare l'*aria esterna* al locale dov'è installata la pompa di calore, e in questo caso è necessario un *sistema di sbrinamento* che comporta un ulteriore consumo di energia, oppure l'*aria interna* di recupero da locali *riscaldati*;

■ **l'acqua** di falda (che si trova normalmente a temperature intorno ai 10 °C), di fiume o di lago; l'acqua garantisce le

prestazioni della pompa di calore senza risentire delle condizioni climatiche interne, ma richiede un impianto di adduzione che comporta un costo aggiuntivo.

In condizioni particolari vengono utilizzate come sorgente fredda anche l'*acqua riscaldata* impiegando collettori solari e un idoneo sistema di accumulo e il *terreno* che, a una profondità di 2-3 metri, mantiene una temperatura costante; quest'ultima soluzione è però molto costosa, sia per l'estensione di terreno necessaria sia per la complessità dell'impianto.

Le pompe di calore possono essere impiegate per ottenere acqua calda per usi sanitari o per riscaldamento di ambienti utilizzando apparecchi funzionanti a media temperatura, oppure aria calda per il riscaldamento ambientale e l'essiccazione.

2.9 Processi di trasformazione energetica a energia totale

2.9.1 La cogenerazione

Durante qualsiasi processo di conversione energetica una parte dell'energia iniziale viene dissipata; in altre parole, in ogni trasformazione di energia il rendimento, cioè il rapporto tra l'energia prodotta e quella assorbita, è sempre inferiore a 1.

Si chiamano **processi a energia totale** quelli condotti con criteri che consentono di recuperare una parte più o meno grande dell'energia che altrimenti andrebbe dissipata.

Il più tipico esempio di processo a energia totale è quello che avviene recuperando, attraverso una tecnica chiamata **cogenerazione**, il calore generato durante la produzione di energia elettrica nelle centrali termoelettriche che impiegano turbine a gas (che sono motori endotermici, vedi [unità 3](#)), nelle quali il 65% circa dell'energia viene dissipato sotto forma di calore. Con la cogenerazione si ottiene energia elettrica ed energia termica con un consumo di combustibile (*energia primaria*) inferiore a quello che sarebbe necessario per ottenere le stesse energie (elettrica e termica) attraverso processi separati (fig. 2.33). Con la cogenerazione si aumenta il *grado di efficienza* (cioè il rapporto tra energia conservata al termine del processo ed energia immessa) perché l'efficienza totale derivante dalla produzione contemporanea di elettricità e calore è uguale alla somma delle efficienze del processo termico e di quello elettrico. Per esempio, un impianto che utilizza 100 MWh di metano per produrre 40 MWh di energia elettrica e 40 MWh di energia termica ha dunque un'efficienza elettrica e termica del 40% e un'efficienza globale dell'80%.

In questo modo si possono ottenere economie fino al 32-34% a seconda degli impianti, se il combustibile è metano, e fino al 44-46% se il combustibile è gasolio. Il recupero dell'energia termica può avvenire in vari modi: trasformandola, per esempio, in vapore utilizzato per produrre altra energia elettrica attraverso quello che viene chiamato il *ciclo combinato*, o destinandola a usi industriali, come negli impianti di essiccazione, oppure ancora utilizzandola per il riscaldamento.

Naturalmente sull'economicità del recupero di energia influiscono fortemente vari fattori, quali la distanza dei centri di utilizzo del calore recuperato, il costo delle operazioni di trasporto dell'energia termica e altri ancora.

approfondimento

Norme di legge riguardanti la cogenerazione

La **Legge 10/1991** assimila la cogenerazione, che il **D.Lgs. 192/05** (vedi [scheda 1.3.4](#)) definisce "produzione e utilizzo simultanei di energia meccanica o elettrica e di energia termica a partire dai combustibili primari, nel rispetto di determinati criteri qualitativi di efficienza energetica", alle fonti di energia rinnovabili (vedi [scheda 1.3.1](#)).

Una successiva norma (Provvedimento CIP n. 6/92 aggiornato con D.M. 4-8-1994) stabilisce che la cogenerazione può essere assimilata alle fonti di energia rinnovabili se risulta maggiore o uguale a 0,51 l'**indice energetico** I_e , ricavato secondo la formula:

$$I_e = \frac{E_e}{E_c} + \frac{1}{0,9} \cdot \frac{E_t}{E_c} - a$$

dove:

E_c è l'energia immessa annualmente nell'impianto attraverso il combustibile;

E_e è l'energia elettrica utile prodotta annualmente dall'impianto, al netto dell'energia assorbita dai servizi ausiliari;

E_t è l'energia termica utile prodotta annualmente dall'impianto.

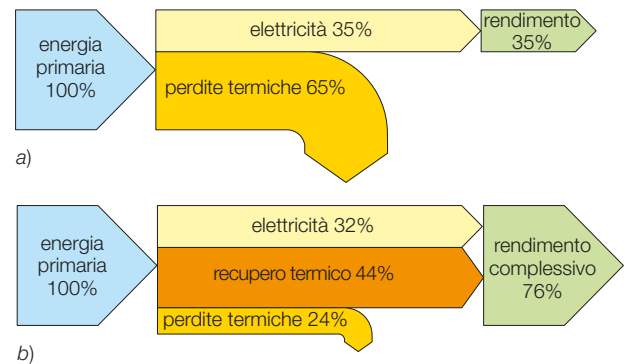


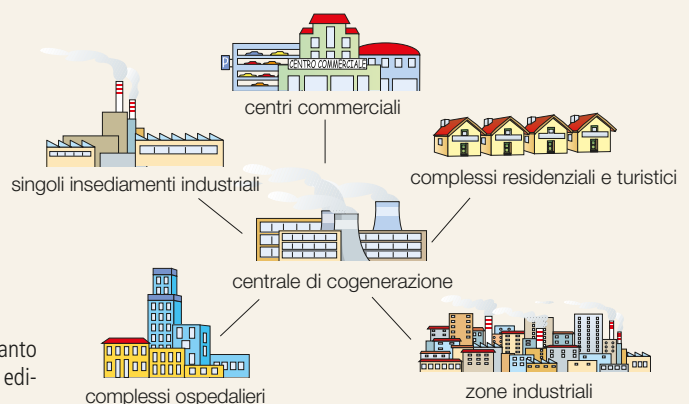
Fig. 2.33 Rendimento elettrico di un generatore tradizionale operante senza alcun recupero termico (a) e cogeneratore in cui è previsto il recupero del calore per il riscaldamento e la produzione di acqua sanitaria (b).

approfondimento

Ubicazione della centrale di cogenerazione

Il recupero del calore prodotto per cogenerazione è tanto più vantaggioso quanto più la centrale è in posizione baricentrica rispetto ai vari tipi di utenza (fig. 2.34).

Fig. 2.34 Posizione dell'impianto di cogenerazione rispetto agli edifici utenti.



2.10 Il teleriscaldamento

Il **teleriscaldamento** è un sistema di distribuzione urbana di acqua calda per l'alimentazione degli impianti di riscaldamento.

L'acqua calda è generalmente ottenuta recuperando il calore prodotto per *cogenerazione* dalle centrali termoelettriche, anche se all'estero non mancano esempi di reti di teleriscaldamento alimentate da acqua calda prodotta da impianti di incenerimento o da grossi stabilimenti industriali.

L'acqua viene immessa sotto pressione e a temperatura normalmente superiore a 100 °C in una rete di distribuzione urbana costituita da tubazioni di grande diametro adeguatamente coibentate.

L'acqua calda per gli impianti di riscaldamento degli edifici viene derivata da quella della rete di teleriscaldamento attraverso sistemi di scambiatori di calore. Questi impianti sono adatti soprattutto in presenza di un'elevata costanza dei consumi energetici lungo tutto l'arco dell'anno e dove è possibile installare la centrale di produzione in posizione baricentrica rispetto alle utenze.

I vantaggi derivanti dall'impianto di teleriscaldamento, che in ogni caso sono tanto maggiori quanto più densamente abitate e vicine alla centrale termoelettrica sono le zone da riscaldare, sono:

- minor costo di produzione dell'energia (grazie alla possibilità di utilizzare combustibile con costo unitario inferiore, di recuperare calore altrimenti disperso e di utilizzare generatori di grande potenza ed elevata efficienza);
- riduzione dell'inquinamento atmosferico, grazie all'uso di bruciatori più grandi ed efficienti e di depuratori dei gas di scarico;
- assenza di apparecchi di riscaldamento negli edifici, con risparmio di spazio e maggiore sicurezza.

Gli svantaggi sono costituiti principalmente dai lavori necessari per la posa delle tubazioni, che possono provocare disagi nelle aree urbane, ma anche dalla necessità di un'accurata pianificazione dello sviluppo del territorio e dell'applicazione di un complesso sistema di contabilizzazione e di fatturazione dell'energia termica.

Componenti dell'impianto

Un impianto di teleriscaldamento è composto da:

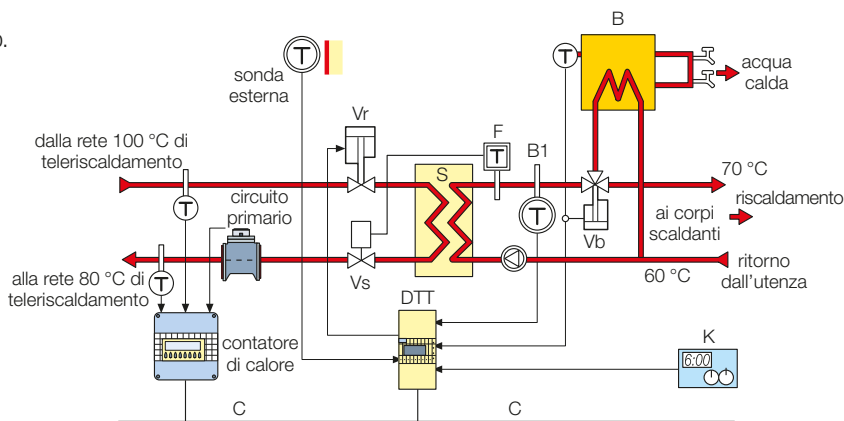
- *sistema per la produzione di calore*, costituito da un complesso di generatori di calore, solitamente alimentati da un combustibile a basso costo (nafta, carbone, gas, energia geotermica, calore di recupero da vapore o gas di scarico delle turbine di produzione di energia elettrica ecc.);
- *rete di distribuzione del calore* (sotto forma di acqua calda, acqua surriscaldata o vapore), interrata o in tunnel ispezionabili;
- *utenze* che, a seconda del *vettore termico* impiegato, utilizzano l'energia direttamente o mediante scambiatori di calore.

Lo schema di figura 2.35 rappresenta l'impianto per la produzione di acqua calda per il riscaldamento e per usi sanitari in un edificio residenziale alimentato dalla rete di teleriscaldamento. Le prestazioni fornite dall'impianto sono analoghe a quelle di un normale impianto di riscaldamento centralizzato (vedi [scheda 13.2](#)). Una sonda esterna consente la regolazione automatica della temperatura dell'acqua in funzione della temperatura esterna, mentre altre sonde collegate al regolatore scambiatore DTT consentono di alimentare il bollitore (vedi [scheda 9.7.3](#)) con acqua per usi domestici alla temperatura voluta.

L'acqua, prelevata dalla rete del teleriscaldamento a una temperatura di 100 °C, viene trasferita allo scambiatore di calore S e ritorna alla rete esterna alla temperatura di circa 80 °C. Dallo scambiatore l'acqua giunge al tubo di mandata dell'acqua per il riscaldamento alla temperatura di circa 70 °C e, dopo aver alimentato i radiatori, ritorna allo scambiatore alla temperatura di 60 °C circa. Il bollitore preleva l'acqua destinata agli usi domestici attraverso una valvola particolare (valvola a tre vie: vedi [scheda 13.3.3](#)) e la restituisce allo scambiatore attraverso il tubo di ritorno. Naturalmente l'impianto è corredato di tutte le valvole e i dispositivi di sicurezza necessari (vedi [scheda 13.3.5](#)).

Fig. 2.35 Impianto di teleriscaldamento in un edificio.

S scambiatore di calore a piastre (vedi [scheda 9.7.5](#)); Vr valvola di regolazione e attuatore; B1 sonda di mandata secondario; F termostato di sicurezza; Vb valvola a 3 vie che dà la precedenza all'acqua sanitaria, quando il termostato del bollitore scatta; Vs elettrovalvola di sicurezza; DTT regolatore scambiatore; B bollitore con termostato per deviazione valvola a 3 vie Vb e comando temperatura fissa al regolatore; K telecomando per temperatura che consente all'utente di scegliere la temperatura ambiente; è dotato di orologio giornaliero o settimanale; C linea di comunicazione per telegestione.



2.11 Energia eolica, da biomasse e geotermica

Tra le fonti energetiche integrative ricordiamo l'*energia eolica*, l'*energia da biomasse* e l'*energia geotermica*.

Energia eolica

L'uso dell'**energia eolica**, cioè quella prodotta dal vento attraverso dispositivi detti **aerogeneratori** (fig. 2.36), interessa soltanto zone battute da vento sufficientemente intenso e costante. La caratteristica orografia del territorio italiano non rende particolarmente conveniente lo sfruttamento su larga scala di questa fonte energetica nel nostro Paese, mentre essa è invece ampiamente utilizzata nei Paesi dell'Europa settentrionale e soprattutto in California, dove esistono sterminate distese di aerogeneratori in grado di produrre enormi quantità di energia elettrica. Una delle regioni italiane dove lo sfruttamento intensivo di questa fonte energetica è risultato conveniente è la Sardegna, dove sono state installate importanti centrali eoliche.

Lo sfruttamento del vento con piccoli impianti, adatti per la produzione di modeste quantità di energia, è invece possibile in ogni località ventosa, come sulle alture in prossimità del mare o in molte valli alpine, ed è frequentemente utilizzato per integrare l'alimentazione elettrica di altre fonti rinnovabili in case per vacanze, baite, rifugi ecc.

Energia da biomasse

Per **biomassa** utilizzabile ai fini energetici si intende la parte organica risultante da rifiuti, scarti delle industrie zootecniche o residui di altre lavorazioni che può essere trasformata in combustibili solidi, liquidi o gassosi o in sostanze chimiche adatte a sostituire altri prodotti derivanti dal petrolio.

I più comuni materiali organici generatori di biomassa sono i residui delle coltivazioni agricole, come paglia di cereali, resti di potature ecc., i rifiuti solidi urbani e gli scarti delle aziende zootecniche. In determinate condizioni la coltivazione di alcuni tipi di vegetali ricchi di sostanze zuccherine o di amidi diventa conveniente proprio per la possibilità di impiegarne i residui, oltre che le parti alimentari.

A seconda della loro composizione, le biomasse possono essere trasformate in combustibili solidi o in metano o biogas, oppure ancora in combustibili oleosi o prodotti carboniosi.

Nei Paesi più industrializzati le biomasse forniscono circa il 3% del fabbisogno globale di energia, mentre nei Paesi in via di sviluppo esse arrivano in qualche caso a coprirne quasi la metà. L'interesse per questa forma di produzione di energia è anche dovuto al contributo che è possibile ricavarne nello smaltimento dei rifiuti solidi urbani (vedi [unità 11](#)).

Energia geotermica

L'**energia geotermica** è l'energia termica accumulata nel sottosuolo. Questa fonte energetica può essere sfruttata solo in minima parte nelle zone vulcaniche, utilizzando i getti di vapore e le sorgenti calde.

L'energia geotermica è impiegata per la produzione di energia elettrica (vapore e acqua bollente che azionano direttamente le turbine) e per il riscaldamento. Il Paese all'avanguardia in questo settore è l'Islanda, ma anche l'Italia è particolarmente ricca di possibilità: da decenni, per esempio, sono sfruttati i soffioni boraciferi di Larderello, in Toscana. Attualmente sono allo studio tecniche per l'utilizzo a fini energetici di acque sotterranee anche a temperature relativamente basse e di acque inquinate non diversamente utilizzabili.



Fig. 2.36 Centrale eolica: gli aerogeneratori alimentati dal vento permettono la produzione di energia elettrica.

2.12 L'architettura sostenibile

Nelle pagine precedenti abbiamo esaminato le tecniche che consentono di raggiungere gli obiettivi e di ridurre al minimo i consumi di energia convenzionale di un edificio contribuendo nello stesso tempo ad abbattere l'inquinamento prodotto dagli impianti di riscaldamento tradizionali.

Questi obiettivi non sono però apparsi sufficienti per soddisfare la sempre crescente tendenza delle giovani generazioni verso un'evoluzione più compiutamente ecologica del modo di concepire la costruzione. Negli scorsi decenni si sono così affacciati alla ribalta della cultura architettonica nuovi filoni di ricerca, talvolta anche con proposte provocatorie ed eccessi polemici. La maggior parte delle nuove proposte è accomunata dalla ricerca di tecniche di impiego di materiali dotati del *minimo impatto possibile sull'ambiente*, sia in fase di produzione sia in fase di impiego e di smaltimento finale, della creazione di spazi abitativi privi dei caratteri di nocività attribuita al cosiddetto *ambiente confinato* e della protezione contro le cause di inquinamento esterno.

Alcune tra le caratteristiche più ricorrenti sono il *recupero dell'acqua piovana*, raccolta e conservata per essere poi utilizzata in vario modo, la scelta dei materiali effettuata con criteri che tengono conto del loro *contenuto energetico* (cioè della quantità di energia necessaria per la loro produzione, posa in opera e smaltimento finale), l'uso di *materiali riciclati o riciclabili*, l'elevato livello di isolamento termico e acustico, il ricorso a *fonti energetiche alternative*.

Elemento sempre presente in queste nuove architetture è il vivo interesse per l'uomo, considerato come parte integrante dell'ambiente, sia pure con accentrazioni diverse a seconda delle differenti impostazioni filosofiche e religiose che spesso marcano questi movimenti. Altri elementi spesso presenti sono l'interesse per le *caratteristiche geobiologiche* del sito destinato agli insediamenti (come la natura del microclima e il tipo di habitat vegetale), in modo da rispettarne l'equilibrio dei sistemi in tutte le loro forme, e l'attenzione posta alla ricerca di elementi perturbatori influenti sull'uomo (come la presenza di fonti di inquinamento, compresi l'inquinamento da rumore e quello prodotto da sorgenti di elettromagnetismo, le caratteristiche e la natura delle falde sotterranee e delle acque superficiali ecc.).

L'analisi di tutti questi fattori, che peraltro non costituisce una novità e che, anzi, è sempre stata al centro dell'interesse dell'architettura di qualità di tutte le epoche, è spesso condotta in modo estremamente meticoloso e con criteri fortemente selettivi. Non è difficile intravedere in certi atteggiamenti "estremi" di queste avanguardie una sorta di reazione alla superficialità che ha caratterizzato l'edilizia speculativa e di bassa qualità dei decenni passati, soprattutto in Italia.

La maggior parte delle proposte di queste architetture d'avanguardia è confluita in quella che oggi è chiamata **architettura sostenibile** (vedi volume *Materiali*) (fig. 2.37).



Fig. 2.37 Casa progettata dall'architetto spagnolo Luis de Garrido (R4 House, 2007) utilizzando tutti gli elementi tipici dell'*architettura sostenibile* della quale de Garrido è esponente di primo piano. Oltre a essere totalmente ecologica e a non prevedere alcun utilizzo di energie convenzionali, la casa è risultata molto economica anche in fase di costruzione.

SINTESI

Le principali **fonti energetiche integrative** sono il *Sole*, il *vento*, le *biomasse*, i *rifiuti solidi* e la *geotermia*.

L'energia solare può essere trasformata in calore a bassa o alta temperatura mediante **pannelli** o **concentratori solari**, o in energia elettrica mediante **celle fotovoltaiche**.

I **pannelli solari**, o collettori piani, per quanto nei nostri climi non sono idonei a sostituire i tradizionali impianti di riscaldamento, ma sono utilissimi per produrre acqua calda per usi domestici.



I **collettori solari** consentono di ottenere *temperature molto elevate* e sono utilizzati per la produzione di energia elettrica.

La **conversione fotovoltaica** è una tecnica che consente di trasformare l'energia solare in elettricità all'interno di celle fotovoltaiche, che vengono riunite in moduli, pannelli e stringhe. Il processo è reso possibile dalle proprietà dei **materiali semiconduttori**, come il *silicio* e il *germanio*. Con i pannelli fotovoltaici è possibile produrre energia elettrica a servizio degli edifici direttamente o attraverso l'allacciamento alla rete elettrica urbana.

Nuove recenti norme favoriscono l'installazione di impianti fotovoltaici fissando prezzi convenienti per la cessione all'Ente erogatore dell'energia elettrica prodotta per via fotovoltaica e rendono obbligatoria la predisposizione di impianti fotovoltaici in edifici di nuova costruzione.

Accanto ai sistemi attivi per lo sfruttamento dell'energia solare (pannelli concentratori ecc.) esistono altri sistemi detti **sistemi passivi**, che mirano a rendere l'edificio in grado di produrre o conservare l'energia termica. Questi sistemi possono essere a *guadagno diretto*, quando sono costituiti da elementi che consentono di conservare a lungo il calore entrato nell'edificio attraverso le finestre, a *guadagno isolato*, quando utilizzano l'acqua riscaldata dal Sole, o a *guadagno indiretto*, quando utilizzano il riscaldamento di pareti esterne esposte al Sole, potenziandone eventualmente gli effetti mediante l'effetto serra. Esempio tipico di sistemi passivi a guadagno indiretto sono le **case solari**.



La **pompa di calore** è una macchina che consente di trasferire, per mezzo di un fluido, in un ambiente a temperatura controllata, il calore sottratto a una fonte a temperatura inferiore (sorgente fredda). Il principio di funzionamento è analogo a quello del frigorifero nel quale, però, si utilizza il freddo del suo vano interno per riscaldare l'ambiente esterno. La pompa di calore è sostanzialmente costituita da un circuito stagno percorso da un fluido che attraversa una *valvola di espansione* e un *evaporatore*, espandendosi e passando dallo stato liquido a quello gassoso, e un *condensatore* e un *compressore* dove il fluido cede calore tornando allo stato liquido.

L'efficienza della pompa di calore si misura attraverso il **coefficiente di prestazione** (COP), dato dal rapporto tra l'energia ottenuta (cioè il calore ottenuto) e l'energia elettrica spesa.

Si va diffondendo l'utilizzo della **pompa di calore a ciclo reversibile**, che consente di ottenere, con un solo impianto, sia la produzione di calore nel periodo invernale, sia il rinfrescamento nella stagione estiva.

Per aumentare il rendimento degli impianti che trasformano energia, come le centrali termoelettriche, si ricorre alla tecnica detta di **cogenerazione**, consistente nel recuperare il calore che altrimenti andrebbe dissipato nella produzione di energia elettrica. L'impiego attualmente più promettente del calore recuperato è quello dell'alimentazione degli impianti di riscaldamento urbani attraverso il **teleriscaldamento**.

VERIFICA

- 1** Quali sono le principali fonti energetiche integrate?
- 2** Che cosa si intende per *costante solare*?
- 3** Per *insolazione* si intende:
 - A** la quantità di energia emessa dal Sole nell'unità di tempo
 - B** l'entità del surriscaldamento prodotto dalle radiazioni solari
 - C** la quantità di energia solare che colpisce una superficie orizzontale nell'unità di tempo
 - D** l'aumento di temperatura, misurato in gradi Celsius, che le radiazioni solari sviluppano nei pannelli solari
- 4** Come può essere trasformata l'energia solare per sfruttarla come fonte energetica integrativa?
- 5** I *pannelli solari* possono essere definiti:
 - A** sistemi per lo sfruttamento dell'energia solare ad alta temperatura
 - B** celle solari
 - C** forni solari
 - D** sistemi per lo sfruttamento dell'energia solare a bassa temperatura
- 6** Quali elementi compongono un pannello solare?
- 7** I *pannelli concentratori* per lo sfruttamento dell'energia solare:
 - A** utilizzano sia le radiazioni solari dirette sia quelle indirette
 - B** dispongono di ampie superfici piane costituite da un gran numero di celle fotovoltaiche
 - C** utilizzano solo le radiazioni solari dirette
 - D** ricevono le radiazioni attraverso batterie di specchi orientabili e le concentrano sulla "torre di captazione"
- 8** I *pannelli fotovoltaici* sono:
 - A** pannelli di forma cilindro-parabolica che concentrano le radiazioni solari su di un "tubo assorbitore"
 - B** sistemi di captazione costituiti da batterie di specchi orientabili che dirigono i raggi solari verso una "torre di captazione"
 - C** pannelli solari costituiti da piastre captanti entro le quali circola un "fluido termovettore"
 - D** insiemi di "celle" in grado di produrre energia sotto forma di corrente continua
- 9** Per *rendimento di una cella solare* si intende:
 - A** il rapporto tra l'energia elettrica prodotta e l'energia luminosa incidente
 - B** il rapporto tra la temperatura di uscita e quella di entrata della cella
 - C** un coefficiente proporzionale alle dimensioni della cella e al suo orientamento rispetto ai raggi solari
 - D** un coefficiente sempre minore dell'unità, dipendente dai materiali costituenti la cella, le sue dimensioni e la sua esposizione
- 10** Descrivi che cosa sono i *semiconduttori*.
- 11** Per *drogaggio* di un semiconduttore si intende:
 - A** l'aumento del suo potere isolante attraverso trattamenti chimici
 - B** l'introduzione di atomi di altri elementi per aumentare la conducibilità
 - C** l'effetto di instabilità che si produce nel semiconduttore quando è sollecitato da intense cariche elettriche
 - D** l'effetto di instabilità che si produce nel semiconduttore in presenza di silicio che è venuto a contatto con sostanze dopanti
- 12** A seconda delle modalità per ottenere il guadagno termico, come possono essere classificati i sistemi passivi?
- 13** Che cosa sono e a quali principi fisici e costruttivi si ispirano le *case solari*?
- 14** Descrivi il principio fisico di funzionamento e le principali applicazioni della *pompa di calore*.
- 15** Calcola il COP ideale di una pompa di calore che opera tra 0 e 45 °C.
- 16** Che cosa si intende per pompa di calore a ciclo reversibile?
- 17** Che cos'è la *cogenerazione*?
- 18** Che cos'è il *teleriscaldamento*?
- 19** Si chiamano *impianti a energia totale* quelli:
 - A** alimentati esclusivamente da fonti energetiche alternative, come l'energia solare, eolica ecc.
 - B** alimentati mediante pompa di calore
 - C** realizzati in modo da recuperare la parte di energia che altrimenti risulterebbe dissipata
 - D** che sono in grado di garantire rendimenti non inferiori al 90%

ESERCIZI GUIDATI

► ESERCIZIO 1

Sul tetto di una casa unifamiliare alla periferia di Roma si vuole installare un impianto a pannelli solari in grado di fornire il quantitativo di acqua calda necessario per soddisfare il fabbisogno di una famiglia di quattro persone.

Si chiede di calcolare la superficie dei pannelli.

Valutazione del fabbisogno

Il consumo medio giornaliero pro capite di acqua calda è stimabile intorno a 80 litri di acqua alla temperatura di 36 °C, largamente inferiore alla temperatura media dell'acqua fornita dai pannelli solari, che possiamo considerare, in modo ampiamente prudenziale, di 50 °C.

Si può dunque dimensionare l'impianto in modo da produrre solo 60 litri/giorno pro capite di acqua alla temperatura di 50 °C, che l'utente potrà miscelare con acqua fredda (mediamente alla temperatura di 15-20 °C, che possiamo considerare in via prudenziale, di 15 °C), in modo da ottenere l'acqua nella quantità e alla temperatura voluta.

Per soddisfare il fabbisogno di acqua calda di quattro persone occorrerà dunque disporre di 240 litri/giorno, che potremo arrotondare per eccesso a 250 l/giorno, alla temperatura di 50 °C.

Determinazione dei parametri di calcolo

Per procedere al calcolo occorre prima di tutto determinare i seguenti parametri:

■ rendimento η del pannello solare, il cui valore varia tra 0,5 e 0,75;

■ calore specifico c_s dell'acqua = 4186 J/(dm³ · °C);

■ coefficiente k di efficienza di captazione in funzione dell'inclinazione del pannello rispetto all'orizzontale;

■ valore medio giornaliero A dell'insolazione sul piano orizzontale di superficie.

Nel nostro caso questi parametri potranno essere assunti con i seguenti valori:

■ rendimento di un pannello solare di medie caratteristiche $\eta = 0,6$;

■ coefficiente di efficienza in funzione dell'inclinazione $k = 1,12$;

■ valore medio giornaliero di insolazione, ricavato da apposite tabelle (vedi **scheda 3.2.2**), che nel caso di Roma è $A = 15,14$ MJ/(m² · giorno)

Calcolo del fabbisogno termico annuo

Una volta determinati i parametri di calcolo, si ricava facilmente il **fabbisogno termico giornaliero** q :

$$q = c_s \cdot V \cdot (t - t_a) = 4186 \times 10^{-6} \times 250 \times (50 - 15) = 36,62 \text{ MJ/giorno}$$

Il **fabbisogno termico annuo** sarà:

$$Q = q \cdot 365 = 13\,366 \text{ MJ/anno}$$

Calcolo della superficie di pannelli solari occorrente

L'energia solare e (J/(m² · giorno)) fornita da 1 m² di pannello in un giorno viene data dalla formula:

$$e = A \cdot \eta \cdot k$$

che nel nostro caso diventa:

$$e = 15,14 \times 0,6 \times 1,12 = 10,17 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{giorno)}$$

L'energia annua è dunque:

$$E = e \cdot 365 \approx 3714 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{anno)}$$

La superficie dei pannelli occorrente è quindi:

$$S = \frac{Q}{E} = \frac{13\,366}{3714} = 3,59 \text{ m}^2$$

che arrotonderemo per eccesso a 4 m².

► ESERCIZIO 2

Dimensionare un impianto fotovoltaico per soddisfare il fabbisogno di una casa unifamiliare sita in una località nella quale l'irraggiamento medio annuo risulta di 1000 W/m².

Valutazione del fabbisogno

Supponiamo che l'impianto debba essere in grado di fornire 3 kW alla tensione di 220 V (corrispondente alla potenza normalmente fornita dalle reti di distribuzione elettrica per il normale fabbisogno domestico).

Dimensionamento dell'impianto

Dai dati forniti dai costruttori dei pannelli fotovoltaici si deduce che la potenza fornita da un pannello fotovoltaico di 1 m² di superficie è di 60 W con una tensione di 20 V. Per ottenere una tensione di 220 V bisognerà dunque prevedere:

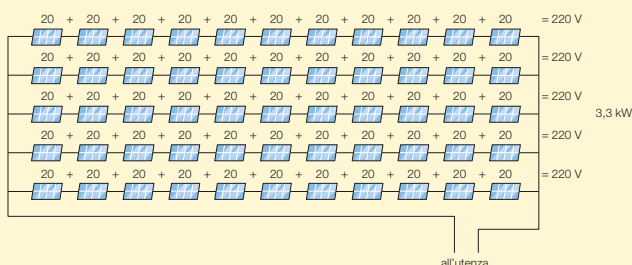
$$220 : 20 = 11 \text{ pannelli disposti in serie}$$

in questo modo si otterrà da ogni serie di 11 pannelli una potenza elettrica di $11 \times 60 = 660$ W alla tensione voluta.

Per ottenere una potenza di 3 kW occorreranno perciò:

$$\frac{3000}{660} = 4,5 \text{ file di 11 pannelli di 1 m}^2 \text{ di superficie}$$

per complessivi $11 \times 4,5 = 49,5 = 50$ pannelli disposti come in figura.



► ESERCIZIO 3

Calcolare il coefficiente di prestazione del ciclo (COP) di una pompa di calore sapendo che il motore elettrico che la alimenta assorbe 1,5 kW e che nella fase di compressione la pompa fornisce un calore utile di 4150 kJ/h in condizioni standard di funzionamento.

Preliminari

Il COP non è altro che un valore che esprime il grado di "convenienza" di un impianto a pompa di calore in determinate condizioni di funzionamento, che in questo esercizio sono state assunte nei loro valori standard (temperatura dell'aria esterna di 7 °C e temperatura dell'acqua prodotta di 45 °C).

In queste condizioni di funzionamento l'operazione di ridurre al calcolo del rapporto tra il calore utile Q_2 e l'energia elettrica E assorbita:

$$\text{COP} = \frac{Q_2}{E}$$

Si tratta dunque di un calcolo molto semplice quando sono noti, come nel nostro caso, il calore utile e l'energia elettrica assorbita; occorre però avere l'avvertenza di rendere omogenee le due unità di misura.

Ricordiamo che il COP così calcolato esprime un valore teorico (*COP ideale*) che è considerevolmente superiore al *COP effettivo*.

Trasformazione in kW del calore utile

Per rendere omogenee le grandezze che esprimono il calore utile e l'energia elettrica assorbita occorre trasformare in kW il calore utile, che è espresso in kcal/h, ricordando che il coefficiente di trasformazione è 0,860:

$$4150 \text{ kcal/h} : 0,860 = 4826 \text{ W} \approx 4,826 \text{ kW}$$

Calcolo del COP

Una volta rese omogenee le due grandezze si ricava immediatamente il COP dal loro rapporto:

$$\text{COP} = \frac{4,826}{1,5} = 3,22$$

► ESERCIZIO 4

Calcolare il coefficiente di prestazione del ciclo (COP) di una pompa di calore azionata da un motore endotermico a gas che consuma $3 \text{ m}^3/\text{h}$ di metano e fornisce una potenza termica $P_r = 77 \text{ kW}$ in condizioni standard di funzionamento.

Preliminari

In questo esercizio, diversamente da quello precedente, sostituiamo all'espressione calore utile (Q_2) quella di potenza termica (P_r) e indichiamo con P_f la potenza fornita: ciò non comporta ovviamente alcuna differenza sostanziale e ha l'unico scopo di evidenziare due diversi criteri di uso comune per indicare le stesse grandezze.

L'esercizio è dunque concettualmente analogo al precedente, ma in questo caso P_r è già espressa in kW, mentre P_f non è fornita da un motore elettrico, ma da uno alimentato a metano, del quale si conosce il consumo in m^3/h . Si tratta dunque di rendere omogenee le due grandezze determinando il valore di P_f espresso in kW.

Determinazione dell'energia fornita P_f

Occorre prima di tutto ricavare il valore di P_f in kcal/h moltiplicando il consumo di metano (in m^3/h) per il potere calorifico del metano espresso in kcal/m^3 , il cui valore è $8500 \text{ kcal}/\text{m}^3$.

Si ottiene così:

$$P_f = 3 \times 8500 = 25\,500 \text{ kcal/h}$$

Con il criterio visto nell'esercizio precedente, con una semplice moltiplicazione si trasforma ora in kW il valore espresso in kcal/h:

$$P_f = 25\,500 \text{ kcal/h} \times 0,860 = 21\,930 \text{ W} = 21,93 \text{ kW}$$

Calcolo del COP

Il coefficiente di prestazione del ciclo sarà:

$$\text{COP} = \frac{77}{21,93} = 3,51$$

► ESERCIZIO 5

Calcolare il COP di una pompa di calore del tipo aria-acqua che deve produrre acqua a 48°C in presenza di una temperatura esterna di 4°C .

Preliminari

Questo esercizio propone condizioni diverse da quelle standard descritte nell'esercizio 3 e fa riferimento a una sorgente fredda costituita da aria alla temperatura di 4°C . Nulla cambierebbe nei calcoli, a parità delle temperature della sorgente fredda e di quella calda, se la pompa di calore fosse del tipo acqua-acqua.

In questo caso il COP deve essere ricavato dal rapporto tra le temperature dell'acqua prodotta e la differenza tra la temperatura dell'acqua prodotta e quella dell'aria (sorgente), esprimendo le temperature in kelvin.

Calcolo del COP

Con i dati proposti dall'esercizio il valore del COP sarà:

$$\text{COP} = \frac{273 + 48}{(273 + 48) - (273 + 4)} = \frac{321}{321 - 277} = 7,29$$

ORA PROVA TU

1. Si vuole installare un impianto di pannelli solari in una casetta unifamiliare attigua a quella descritta nell'esercizio guidato 1, abitata da 6 persone. Calcola la superficie di pannelli solari occorrente.

2. Calcola la superficie di pannelli solari necessaria per produrre 1000 litri di acqua alla temperatura di 40°C a servizio di una residenza plurifamiliare in una città della Lombardia.

3. In quanti anni verrà ammortizzata la spesa sostenuta per l'installazione dell'impianto a pannelli solari descritto nell'esercizio guidato 1, supponendo che essa sia stata di 9000,00 € e che l'impianto comporti un costo annuo di manutenzione di 350,00 €, mentre il costo per produrre acqua alla temperatura di 50°C con un boiler elettrico è di $2,50 \text{ €/m}^3$.

4. Dimensiona un impianto fotovoltaico di caratteristi-

che analoghe a quelle dell'esercizio guidato 2, in grado di soddisfare un fabbisogno di 5 kW.

5. Dimensiona un impianto fotovoltaico di caratteristiche analoghe a quelle dell'esercizio guidato 2, in grado di soddisfare un fabbisogno di 20 kW con una tensione di 380 V.

6. Nell'esercizio guidato 3 le due grandezze sono state rese omogenee trasformando i kcal/h in kW. Calcola ora il COP trasformando i kW in kcal/h.

7. Calcola il COP sapendo che la pompa dell'esercizio guidato 4 è azionata da un motore a gas a GPL che consuma $2,85 \text{ m}^3/\text{h}$ (il potere calorifico del GPL è $8500 \text{ kcal}/\text{m}^3$ in fase gassosa).

8. Calcola il COP di una pompa di calore del tipo acqua-acqua sapendo che la temperatura della sorgente fredda è di 10°C e quella dell'acqua prodotta è di 48°C .