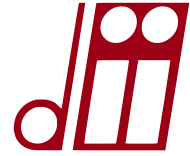


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**  
Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

Tesi di Laurea Magistrale

**APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO  
RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN  
ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI**

Relatore: *Prof. Michele De Carli*

*Dipartimento di Ingegneria Industriale*

Correlatrice: *Ing. Samantha Graci*

*Dipartimento di Ingegneria Industriale*

Laureando: *Enrico Guidolin*

Anno Accademico 2014/2015



## SOMMARIO

Il presente elaborato di tesi mira ad analizzare l'applicazione di sistemi di riscaldamento TABS (*Thermally Activated Building Structures*) in edifici di tipo residenziale.

Generalmente nelle applicazioni residenziali i sistemi TABS non sono soluzioni particolarmente diffuse, infatti è di pensiero comune che un sistema a elevata inerzia termica non sia adatto a sopperire a continue variazioni dei carichi interni presenti nelle unità abitative e che, quindi, non sia in grado di garantire l'adeguato livello di confort interno. Lo scopo dell'attività svolta è di smentire queste convinzioni e di dimostrare le molteplici potenzialità che derivano dall'utilizzo dei sistemi TABS in ambito residenziale.

Per valutare un vasto campo d'applicabilità sono state esaminate un'utenza multifamiliare e una monofamiliare, entrambe caratterizzate da involucri edilizi di elevata classe energetica.

Per verificare le prestazioni dei sistemi TABS è stato scelto di operare un'analisi comparativa a parità di condizioni con una soluzione impiantistica più comune e molto diffusa sia nella riqualificazione energetica degli edifici esistenti sia negli edifici di nuova costruzione: il ventilconvettore.

Infine è stato valutato l'accoppiamento dei sistemi descritti ad impianti fotovoltaici muniti di sistema di stoccaggio ausiliario per mezzo di batterie al piombo acido.



## INDICE

INTRODUZIONE.....	1
Capitolo 1 PRINCIPALI COMPONENTI E SOLUZIONI IMPIANTISTICHE .....	1
1.1 Descrizione impianto .....	1
1.2 Sistemi TABS .....	1
1.2.1 Comfort interno.....	7
1.3 Pompa di calore.....	11
1.3.1 Prestazioni energetiche.....	14
1.3.2 Classificazione delle sorgenti termiche.....	16
1.3.3 Fluidi frigoriferi .....	19
1.4 Ventilazione negli edifici residenziali.....	22
1.4.1 Ventilazione Meccanica Controllata (V.M.C.) .....	23
1.5 Sistema fotovoltaico.....	28
1.5.1 Materiali .....	28
1.5.2 Funzionamento celle fotovoltaiche .....	30
1.5.3 Elementi impianto fotovoltaico .....	34
1.5.4 Configurazioni impiantistiche .....	38
Capitolo 2 CASO STUDIO .....	41
2.1 Descrizione edifici analizzati .....	41
2.2 Analisi dei fabbisogni termici ed elettrici .....	48
2.2.1 Fabbisogno termico di progetto.....	48
2.2.2 Fabbisogno elettrico .....	57
2.3 Dimensionamento sistema TABS .....	64
Capitolo 3 SIMULAZIONE DINAMICA DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO .....	71
3.1 TRNSYS 16.1 .....	71
3.2 Modellazione dell'edificio con <i>TRNBUILD</i> .....	75
3.2.1 Modellazione del sistema TABS tramite <i>Active layer</i> .....	78
3.3 Modellazione dell'impianto con <i>SIMULATION STUDIO</i> .....	81
3.3.1 Fogli di calcolo Excel richiamati da <i>Type 62</i> .....	86
3.4 Discussione risultati .....	94

3.4.1 Utenza multifamiliare .....	94
3.4.2 Utenza monofamiliare .....	110
3.5 Caso confronto: ventilconvettori .....	115
3.6 Confronto prestazionale tra le due tipologie di terminale d'impianto .....	123
Capitolo 4 IMPIANTO ELETTRICO .....	129
4.1 Profili elettrici .....	129
4.2 Modello elettrico .....	138
4.2.1 Modellazione del sistema fotovoltaico con SIMULATION STUDIO .....	138
4.2.2 Modellazione del sistema fotovoltaico con sistema di stoccaggio .....	142
4.2.3 Analisi e discussione dei risultati .....	144
4.3 Confronto delle prestazioni elettriche .....	150
4.3.1 Sistema fotovoltaico .....	150
4.3.2 Impianto fotovoltaico con sistema di stoccaggio.....	154
CONCLUSIONI.....	159
BIBLIOGRAFIA.....	163

## Lista delle figure

Figura 1.1 esempio di sezione verticale del sistema TABS. [1] .....	2
Figura 1.2 flusso di energia termica. [2] .....	3
Figura 1.3 Fenomeno peak shaving. [3].....	5
Figura 1.4 Funzionamento TABS. [4] .....	5
Figura 1.5 Scala termica e variazione di PMV in 24 ore. [7].....	8
Figura 1.6 Asimmetria radiante. [8].....	9
Figura 1.7 Variazione velocità istantanea dell'aria per non incorrere in discomfort. [8] .....	10
Figura 1.8 Schematizzazione pompa di calore. [10] .....	11
Figura 1.9 Ciclo ideale di Carnot. [9] .....	12
Figura 1.10 Ciclo reale a compressione di vapore. [11] .....	14
Figura 1.11 Variazione della temperatura del terreno in funzione della profondità. [12].....	17
Figura 1.12 Capacità della pompa di calore in funzione di differenti sorgenti di calore. [11]	
.....	18
Figura 1.13 Sistema di ventilazione unifamiliare a semplice flusso. ....	25
Figura 1.14 Diagramma di funzionamento di bocchetta autoregolabile e igroregolabile. ....	25
Figura 1.15 Ventilazione unifamiliare a doppio flusso con recuperatore di calore. [13].....	26
Figura 1.16 Ventilazione meccanica condominiale a semplice flusso. [8] .....	27
Figura 1.17 Ventilazione meccanica condominiale a doppio flusso con recupero di calore. [8]	
.....	27
Figura 1.18 Esempi di moduli fotovoltaici. [15].....	28
Figura 1.19 Tecnologie celle fotovoltaiche. [14].....	29
Figura 1.20 Sezione di un modulo fotovoltaico. [15] .....	30
Figura 1.21 Circuito equivalente di una cella fotovoltaica. [16].....	31
Figura 1.22 Curva caratteristica I-V di una cella solare e punto di massima potenza. [16]... 31	
Figura 1.23 Variazione della curva caratteristica in funzione della radiazione incidente. [16]	
.....	32
Figura 1.24 Variazione della curva caratteristica in funzione della temperatura. [16] .....	32
Figura 1.25 Rendimento limite di conversione in funzione della banda proibita $E_{gap}$ . [16] 33	
Figura 1.26 Schema campo fotovoltaico. [15].....	34
Figura 1.27 Rendimento di un inverter PWM in funzione del carico. [15] .....	36
Figura 1.28 Schema di impianto fotovoltaico connesso alla rete. [17].....	39
Figura 1.29 Schema di impianto fotovoltaico con batterie connesso alla rete. [18] .....	39
Figura 2.1 Planimetria del secondo piano dell'utenza multifamiliare. ....	41
Figura 2.2 Prospetto verticale dell'utenza multifamiliare. ....	42
Figura 2.3 Planimetria del piano terra e del primo piano.....	44
Figura 2.4 Prospetto verticale dell'utenza monofamiliare.....	44
Figura 2.5 Andamento orario del $\Delta\theta_{eq}$ medio.....	54
Figura 2.6 Andamento della temperatura esterna oraria. ....	54
Figura 2.7 Profilo orario dei fattori di accumulo per un carico interno della durata di 14 ore.	
.....	55
Figura 2.8 Andamento orario dei fattori di accumulo per un carico interno di 14 ore.....	55
Figura 2.9 Profilo orario del fabbisogno di acqua calda sanitaria.....	60
Figura 2.10 Modello utilizzato per la simulazione del funzionamento dello scaldabagno a pompa di calore.....	62

Figura 2.11 Andamento della temperatura uscente dallo scaldabagno. ....	62
Figura 2.12 Andamento della potenza termica erogata dal condensatore del circuito a pompa di calore. ....	62
Figura 2.13 Potenza elettrica assorbita dallo scaldabagno a pompa di calore. ....	63
Figura 2.14 Profilo orario della portata per VMC. ....	63
Figura 2.15 Modello di resistenze sistema TABS. [7] .....	67
Figura 2.16 Dimensioni della struttura di un sistema TABS. [20] .....	68
Figura 3.1 Schermata iniziale di TRNBUILD. ....	71
Figura 3.2 Finestra per la scelta degli output. ....	72
Figura 3.3 Schermata per la definizione della zona termica. ....	73
Figura 3.4 Interfaccia Simulation Studio. ....	74
Figura 3.5 Particolare della sezione <i>Infiltration</i> . ....	76
Figura 3.6 Particolare della sezione <i>Ventilation</i> . ....	76
Figura 3.7 Particolare della sezione <i>Gains</i> . ....	78
Figura 3.8 Modello <i>Active layer</i> per implementazione di un sistema TABS. ....	78
Figura 3.9 Schermata di <i>TRNBUILD</i> per l'inserimento dei dati relativi a un <i>Active layer</i> . ....	79
Figura 3.10 Schermata utile all'inserimento dello strato attivo nella struttura muraria. ....	79
Figura 3.11 Finestra necessaria per l'inserimento di dati specifici del sistema TABS. ....	80
Figura 3.12 Modello dell'impianto per un piano dell'utenza multifamiliare con <i>SIMULATION STUDIO</i> . ....	82
Figura 3.13 Particolari delle macro: a) appartamenti e piani della villetta, b) generazione vapore e VMC. ....	83
Figura 3.14 Modello dell'impianto per l'utenza monofamiliare con <i>SIMULATION STUDIO</i> . ....	83
Figura 3.15: a) unità di recupero di calore TRS con recuperatore entalpico; b) scheda tecnica. [22] .....	87
Figura 3.16 Pompa di calore Mirai Split. [23]. ....	91
Figura 3.17 Scheda tecnica della pompa di calore Mirai Split da 24 kW utilizzata per l'impianto dell'utenza multifamiliare. [24] .....	91
Figura 3.18 Scheda tecnica della pompa di calore Mirai Split da 8 kW utilizzata per l'impianto dell'utenza monofamiliare. [24] .....	92
Figura 3.19 Curva della potenza termica e del COP per la pompa di calore da 24 kW .....	92
Figura 3.20 Curva della potenza termica e del COP per la pompa di calore da 8 kW .....	92
Figura 3.21 Schema impiantistico per l'utenza multifamiliare. ....	93
Figura 3.22 Schema impiantistico per l'utenza monofamiliare. ....	93
Figura 3.23 Andamento della temperatura di mandata al sistema TABS. ....	95
Figura 3.24 Andamento della temperatura di ritorno dal sistema TABS. ....	95
Figura 3.25 Numerazione appartamenti del secondo piano del condominio. ....	96
Figura 3.26 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 1. ....	97
Figura 3.27 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 2. ....	97
Figura 3.28 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 3. ....	98
Figura 3.29 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 4. ....	98



Figura 3.30 Andamento dell'umidità relativa percentuale di tutti e quattro gli appartamenti analizzati. ....	99
Figura 3.31 Andamento della portata circolante nel sistema TABS dei quattro appartamenti. ....	100
Figura 3.32 Andamento della temperatura di mandata al sistema TABS nel caso con ombreggiamento esterno. ....	103
Figura 3.33 Andamento della temperatura di ritorno al sistema TABS nel caso con ombreggiamento esterno. ....	104
Figura 3.34 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 1 con ombreggiamento esterno. ....	105
Figura 3.35 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 2 con ombreggiamento esterno. ....	105
Figura 3.36 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 3 con ombreggiamento esterno. ....	106
Figura 3.37 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 4 con ombreggiamento esterno. ....	106
Figura 3.38 Andamento dell'umidità relativa percentuale di tutti e quattro gli appartamenti analizzati nel caso di ombreggiamento esterno. ....	107
Figura 3.39 Andamento della portata circolante nel sistema TABS dei quattro appartamenti nel caso di ombreggiamento esterno. ....	108
Figura 3.40 Andamento della temperatura di mandata al sistema TABS nell'utenza monofamiliare. ....	110
Figura 3.41 Andamento della temperatura di ritorno al sistema TABS nell'utenza monofamiliare. ....	110
Figura 3.42 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per il piano terra. ....	111
Figura 3.43 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per il primo piano. ....	112
Figura 3.44 Andamento dell'umidità relativa nei due piani dell'utenza monofamiliare. ....	112
Figura 3.45 Andamento della portata circolante nel sistema TABS installato nell'utenza monofamiliare. ....	113
Figura 3.46 Sezione <i>Heating</i> e <i>Cooling</i> del programma <i>TRNBUILD</i> . ....	116
Figura 3.47 Modello in SIMULATION STUDIO dell'utenza multifamiliare per ricavare la potenza sensibile in regime dinamico. ....	116
Figura 3.48 Modello in SIMULATION STUDIO dell'utenza monofamiliare per ricavare la potenza sensibile in regime dinamico. ....	116
Figura 3.49 Modello in SIMULATION STUDIO per impianto a ventilconvettori dell'utenza multifamiliare. ....	118
Figura 3.50 Modello in SIMULATION STUDIO per impianto a ventilconvettori dell'utenza monofamiliare. ....	119
Figura 3.51 Ventilconvettore FCX della AERMEC. [24]. ....	120
Figura 3.52 Andamento della temperatura interna nei 4 appartamenti: a) caso senza ombreggiamento ,b) caso con ombreggiamento ....	122
Figura 3.53 Andamento della temperatura interna nei due piani dell'utenza monofamiliare. ....	122
Figura 4.1 Pompa di circolazione YONOS MAXO 25/0,5-10. [25]. ....	132
Figura 4.2 Pompa di circolazione YONOS PICO 25/1-8. [25]. ....	132

Figura 4.3: a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a sistema TABS per un appartamento senza ombreggiamento, b) Percentuale energia ausiliari e PDC. ....	133
Figura 4.4 a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a sistema TABS per un appartamento con ombreggiamento, b) Percentuale energia ausiliari e PDC. ....	133
Figura 4.5 a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a ventilconvettori per un appartamento senza ombreggiamento, b) Percentuale energia ausiliari e PDC. ....	134
Figura 4.6 a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a ventilconvettori per un appartamento con ombreggiamento, b) Percentuale energia ausiliari e PDC. ....	134
Figura 4.7 a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a sistema TABS per utenza monofamiliare, b) Percentuale energia ausiliari e PDC. ....	134
Figura 4.8 a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a ventilconvettori per utenza monofamiliare, b) Percentuale energia ausiliari e PDC. ....	135
Figura 4.9 Scheda tecnica del modulo fotovoltaico serie ND della SHARP. [26].....	138
Figura 4.10 a) modello del sistema fotovoltaico per un appartamento. b) modello del sistema fotovoltaico per utenza monofamiliare.....	140
Figura 4.11 Modelli del sistema fotovoltaico con sistema di stoccaggio: a) per utenza multifamiliare, b) per utenza monofamiliare.....	144
Figura 4.12:a) profilo di energia elettrica nel caso di utenza multifamiliare con ombreggiamento e sistema TABS. b) profilo di energia elettrica nel caso di utenza multifamiliare con ombreggiamento e ventilconvettori. ....	145
Figura 4.13: a) profilo di energia elettrica nel caso di utenza monofamiliare e sistema TABS. b) profilo di energia elettrica nel caso di utenza monofamiliare e ventilconvettori. ....	145
Figura 4.14 Profili di energia elettrica nel caso di un appartamento con ombreggiamento e sistema TABS: a)energia dalla rete, verso la rete e da impianto fotovoltaico, b) energia da batteria, energia verso il carico da PV e batteria, e stato della carica. ....	147
Figura 4.15 Profili di energia elettrica nel caso di un appartamento con ombreggiamento e ventilconvettori: a)energia dalla rete, verso la rete e da impianto fotovoltaico, b) energia da batteria, energia verso il carico da PV e batteria, e stato della carica. ....	147
Figura 4.16 Profili di energia elettrica nel caso di utenza monofamiliare e sistema TABS: a)energia dalla rete, verso la rete e da impianto fotovoltaico, b) energia da batteria, energia verso il carico da PV e batteria, e stato della carica. ....	148
Figura 4.17 Profili di energia elettrica nel caso di utenza monofamiliare e ventilconvettori: a)energia dalla rete, verso la rete e da impianto fotovoltaico, b) energia da batteria, energia verso il carico da PV e batteria, e stato della carica. ....	149

## Lista delle tabelle

Tabella 2-1 Stratigrafia dei muri esterni dell'utenza multifamiliare .....	42
Tabella 2-2 Stratigrafia del pavimento interpiano dell'utenza multifamiliare. ....	42
Tabella 2-3 Stratigrafia dei muri interni del piano dell'utenza multifamiliare.....	43
Tabella 2-4 Stratigrafia muri esterni dell'utenza monofamiliare. ....	45
Tabella 2-5 Stratigrafia del pavimento a terra. ....	45
Tabella 2-6 Stratigrafia solaio interpiano. ....	46
Tabella 2-7 Stratigrafia del solaio verso l'esterno. ....	46
Tabella 2-8 Stratigrafia solaio superiore. ....	47

Tabella 2-9 Stratigrafia copertura.....	47
Tabella 2-10 Stratigrafia muri interni.....	47
Tabella 2-11 Valori di potenza di progetto e fabbisogno energetico netto di un piano dell'utenza multifamiliare.....	52
Tabella 2-12 Valori di potenza di progetto e fabbisogno energetico netto dell'utenza monofamiliare.....	52
Tabella 2-13 Valore massimo e andamento orario della potenza frigorifera nella palazzina.....	56
Tabella 2-14 Valore massimo e andamento orario della potenza frigorifera nella villetta.....	56
Tabella 2-15 Valori dei consumi degli apparecchi per il freddo.....	57
Tabella 2-16 Valori di efficienza luminosa per l'impianto di illuminazione.....	58
Tabella 2-17 Valori dei consumi energetici degli elettrodomestici riadattati partendo da quelli del progetto MICENE.....	59
Tabella 2-18 Valori dei consumi energetici per gli elettrodomestici non catalogati dal progetto MICENE.....	59
Tabella 2-19 Scheda tecnica scaldabagno Air Combo 100 della Rossato Group s.r.l. [19].....	60
Tabella 2-20 Caratteristiche tecniche del sistema TABS.....	64
Tabella 2-21 Valori di $\alpha$ in funzione dell'applicazione richiesta. [20].....	65
Tabella 2-22 Valori del fattore $aW$ . [20].....	65
Tabella 2-23 Valori del fattore $aU$ . [20].....	66
Tabella 2-24 Valori del fattore $aD$ . [20].....	66
Tabella 2-25 Risultati del dimensionamento del sistema TABS per l'utenza multifamiliare.....	69
Tabella 2-26 Risultati del dimensionamento del sistema TABS per l'utenza monofamiliare.....	69
Tabella 3-1 Tassi di generazione di umidità. [21].....	77
Tabella 3-2 Profili di generazione di vapore per utenza multifamiliare e utenza monofamiliare.....	77
Tabella 3-3 Valori di temperatura interna medi, massimi e minimi degli appartamenti.....	101
Tabella 3-4 Flusso di potenza attraverso il sistema TABS nei quattro appartamenti.....	102
Tabella 3-5 Valori di temperatura interna media, massima e minima degli appartamenti con ombreggiamento esterno.....	109
Tabella 3-6 Flusso di potenza attraverso il sistema TABS nei quattro appartamenti con ombreggiamento esterno.....	109
Tabella 3-7 Valori di temperatura interna media, massima e minima del piano terra e del primo piano della villetta.....	114
Tabella 3-8 Flusso di potenza attraverso il sistema TABS nel piano terra e primo piano della villetta.....	114
Tabella 3-9 Confronto tra sistema TABS e ventilconvettori per l'utenza multifamiliare senza ombreggiamento.....	125
Tabella 3-10 Confronto tra sistema TABS e ventilconvettori per l'utenza multifamiliare con ombreggiamento.....	126
Tabella 3-11 Confronto tra sistema TABS e ventilconvettori per l'utenza monofamiliare.....	127
Tabella 4-1 a)Fabbisogno elettrico dei dispositivi domestici in un appartamento. b) Percentuale di energia elettrica per ogni dispositivo installato.....	130
Tabella 4-2 a)Fabbisogno elettrico dei dispositivi domestici nell'utenza monofamiliare. b) Percentuale di energia elettrica per ogni dispositivo installato.....	131

Tabella 4-3 Valori di fabbisogno elettrico e energia primaria per utenza multifamiliare e monofamiliare in relazione a sistema TABS e ventilconvettori.....	135
Tabella 4-4 Fabbisogno di energia elettrica totale per le diverse configurazione di impianto. ....	136
Tabella 4-5 Quote percentuali di energia elettrica relative alla pompa di calore e agli apparecchi elettrici. ....	136
Tabella 4-6. Batterie al piombo acido OPzV solar.power della HOPPECKE. [27].....	142
Tabella 4-7 Confronto delle prestazioni elettriche del sistema fotovoltaico tra impianto con sistema TABS e con ventilconvettori per l'utenza multifamiliare. ....	151
Tabella 4-8 Parametri per il calcolo del costo di un kWh <sub>e</sub> in base alla tariffa D1 senza incentivazioni per la pompa di calore.....	152
Tabella 4-9 Parametri per il calcolo del costo di un kWh <sub>e</sub> in base alla tariffa D1 per la pompa di calore. ....	152
Tabella 4-10 Confronto delle prestazioni elettriche del sistema fotovoltaico tra impianto con sistema TABS e con ventilconvettori per l'utenza monofamiliare.....	153
Tabella 4-11 Tabella per il calcolo del costo di un kWh <sub>e</sub> in base alla tariffa D1 con incentivazione per l'uso esclusivo di pompa di calore.....	153
Tabella 4-12 Confronto economico e delle prestazioni elettriche dell'impianto fotovoltaico con sistema di stoccaggio per un appartamento dell'utenza multifamiliare.....	154
Tabella 4-13 Confronto economico e delle prestazioni elettriche dell'impianto fotovoltaico con sistema di stoccaggio per l'utenza monofamiliare.....	157
Tabella 1 Riepilogo dei fabbisogni di energia primaria.....	162

## INTRODUZIONE

Il presente elaborato di tesi mira ad analizzare l'applicazione di sistemi di riscaldamento TABS (*Thermally Activated Building Structures*) in edifici di tipo residenziale.

Generalmente i solai termoattivi, come sono più comunemente chiamati nel nostro Paese, sono impiegati in applicazioni di carattere terziario, dove i carichi interni non presentano elevate fluttuazioni e la presenza di persone e gli apporti gratuiti derivanti dai sistemi di illuminazione e dagli apparecchi di lavoro sono limitati ad uno specifico arco di tempo della giornata, specificamente nelle ore lavorative. L'uniformità delle sollecitazioni termiche comporta che non sia necessaria una regolazione personalizzata per ogni zona dell'edificio, ciò permette di ridurre i sistemi di controllo, la complessità dell'impianto e quindi gli assorbimenti energetici del sistema. Al contrario, nelle applicazioni residenziali i sistemi TABS non sono soluzioni particolarmente diffuse, infatti è di pensiero comune che un sistema a elevata inerzia termica non sia adatto a sopperire a continue variazioni dei carichi interni presenti nelle unità abitative che, quindi, non sia in grado di garantire l'adeguato livello di confort interno.

Lo scopo dell'attività svolta è di smentire queste convinzioni e di dimostrare le molteplici potenzialità che derivano dall'utilizzo dei sistemi TABS in ambito residenziale.

Per valutare un vasto campo d'applicabilità sono state esaminate un'utenza multifamiliare e una monofamiliare, entrambe caratterizzate da involucri edilizi di elevata classe energetica.

I vantaggi riscontrati nell'adozione di solai termoattivi, per il riscaldamento e il raffrescamento di abitazioni, sono stati:

- la possibilità di utilizzo di sorgenti energetiche alternative e rinnovabili;
- la riduzione, rispetto ad altri terminali d'impianto in regime estivo, dei fenomeni di discomfort legati alla formazione di correnti d'aria fredde dal momento che lo scambio termico avviene per radiazione dal pavimento/soffitto verso l'ambiente, senza coinvolgere moti convettivi dell'aria interna.;
- la possibilità di operare con temperature di lavoro del fluido vettore moderate che permettono l'installazione di impianti a pompa di calore ad alta efficienza energetica e quindi un utilizzo energeticamente conveniente delle sorgenti termiche disponibili;
- investimento iniziale e costi operativi e di manutenzione ridotti rispetto a soluzioni impiantistiche più convenzionali.

Per verificare le prestazioni dei sistemi TABS è stato scelto di operare un'analisi comparativa a parità di condizioni con una soluzione impiantistica più comune e molto

diffusa sia nella riqualificazione energetica degli edifici esistenti sia negli edifici di nuova costruzione: il ventilconvettore. Le motivazioni di tale scelta risiedono nel fatto che si tratta di sue soluzioni diametralmente opposte da un punto di vista operativo. Infatti, i ventilconvettori necessitano di un'elevata temperatura di lavoro e operano principalmente per scambio termico convettivo comportando, in particolare nel periodo estivo, alcune situazioni di discomfort, correnti d'aria in primis.

Negli ultimi anni il tema della generazione dell'energia termica ed elettrica e il problema di una spesa energetica crescente, hanno assunto negli utenti finali una particolare rilevanza. La possibilità di impiegare sistemi che possano contribuire alla generazione autonoma di energia elettrica, integrando l'assorbimento dalla rete per mezzo di una quota crescente di energia autoprodotta e autoconsumata è particolarmente rilevante, in quanto permette di ridurre il fabbisogno energetico del comparto edilizio e allo stesso tempo di diminuire i costi di gestione degli utenti finali. Per esaminarne la reale convenienza, sia da un punto di vista energetico sia economico, di un sistema di generazione fotovoltaica applicato a utenze residenziali, completamente alimentate ad energia elettrica, nella sezione conclusiva del lavoro, è stato valutato l'accoppiamento dei sistemi descritti ad impianti fotovoltaici muniti di sistema di stoccaggio ausiliario per mezzo di batterie al piombo acido.

## Capitolo 1

# PRINCIPALI COMPONENTI E SOLUZIONI IMPIANTISTICHE

### 1.1 Descrizione impianto

L'impianto esaminato in questa sede è costituito da:

- sistema TABS (*Thermo-Active Building System*) per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti interni;
- una pompa di calore aria-acqua: per l'utenza multifamiliare la macchina è installata in un impianto centralizzato, mentre nel caso della villetta l'impianto è autonomo;
- scaldabagno a pompa di calore per la produzione di acqua calda sanitaria;
- sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC): per il controllo della qualità dell'aria nell'ambiente interno e per mantenere un certo livello di confort in termini di temperatura e di umidità. In particolare è stato scelto di adottare un sistema a ventilazione meccanica a doppio flusso dotato di un recuperatore di calore entalpico;
- sistema fotovoltaico di cui sono stati valutati due configurazioni impiantistiche: una di tipo tradizionale con allacciamento alla rete e l'altra con l'introduzione di batterie per valutare la convenienza dell'autoconsumo.

Nei seguenti paragrafi si fornisce una descrizione degli elementi principali che compongono l'impianto concepito per la palazzina e la villetta.

### 1.2 Sistemi TABS

I sistemi con solai ad attivazione termica di massa, generalmente chiamati con l'acronimo TABS (*Thermo-Active Building System*), sono molto diffusi in Europa centrale e soprattutto in Germania, Austria, Olanda e Svizzera dove ormai rappresentano uno standard per il riscaldamento e il raffrescamento di ambienti confinanti, ma faticano ad entrare nel mercato italiano per colpa della disinformazione e della poca diffusione mediatica. Le prime applicazioni di tali sistemi risalgono ai primi anni '90 in Svizzera, sfruttando la capacità

termica che caratterizzano i solaio in calcestruzzo interposti tra i vari piani, al fine di provvedere sia al raffreddamento sia la riscaldamento di edifici multipiano nel settore del terziario.

Essi sono dei sistemi radianti in cui circola acqua come fluido termovettore e, come si evince anche dal loro nome, sfruttano l'inerzia termica delle strutture orizzontali (pavimento e solaio) dell'edificio sia per il riscaldamento, sia per il raffreddamento.

Come mostrato in figura 1.1, il circuito (*Pipes*) viene installato al centro della struttura edilizia, nel cuore del solaio, annegato nel cemento armato (*Concrete*). Il solaio è di tipo massivo, e i consueti blocchi in laterocemento, più leggeri e caratterizzati da una minore densità, non sono impiegati in questa applicazione, così da sfruttare l'intera massa volumica per poter stoccare energia.

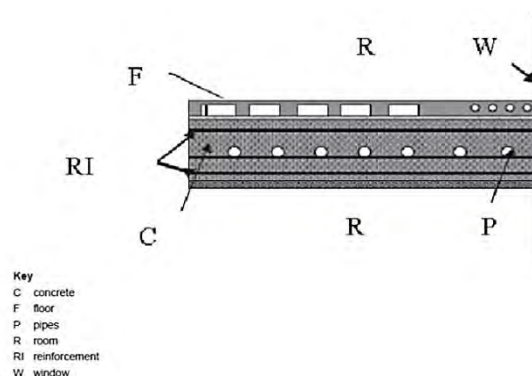


Figura 1.1 esempio di sezione verticale del sistema TABS. [1]

In tal modo, l'intera struttura del solaio/pavimento diventa un terminale d'impianto caratterizzato da elevata capacità termica, e conseguente grande tempo di risposta da parte dello stesso, in grado di accumulare energia termica in regime di funzionamento invernale ed energia frigorifera in regime di funzionamento estivo, per poi rilasciarla in modo graduale durante la giornata.

Il trasferimento del calore è fortemente influenzato:

- dallo spessore del solaio posto al di sopra e al di sotto delle tubazioni;
- dalla conducibilità termica e dalla densità dei materiali usati per la costruzione del solaio/pavimento;
- dalla presenza o meno di materiali isolanti o materassini anticalpestio che riducono il flusso termico trasmesso.



Si può considerare che il flusso di energia termica interessi dapprima la regione circostante ai tubi, per poi estendersi alla struttura in cemento in cui sono immerse le tubazioni, raggiungere la superficie del solaio (soffitto o pavimento o entrambe) e da qui all'ambiente da riscaldare o raffreddare. Tale andamento è illustrato in figura 1.2.

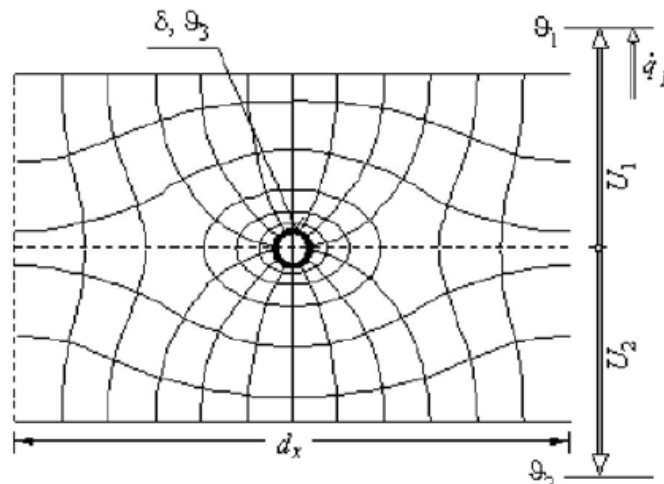


Figura 1.2 flusso di energia termica. [2]

In generale trasferire energia per mezzo di sistemi idronici comporta impianti meno ingombranti e una minore spesa di energia rispetto a impianti che utilizzano l'aria come fluido termovettore. Inoltre, data l'elevata superficie di scambio, l'acqua può essere elaborata ad una temperatura di mandata più vicina a quella dell'ambiente da condizionare, per questo si parla di impianti a bassa differenza di temperatura.

La differenza di temperatura tra l'ambiente e l'acqua del sistema può essere ulteriormente ridotta agendo sul differenziale termico di progetto tra temperatura dell'acqua di mandata e di ritorno o riducendo il passo tra le tubazioni annegate nel solaio. La procedura descritta comporta, tuttavia, un aumento della lunghezza dei tubi e della portata d'acqua circolante, e di conseguenza un incremento delle perdite di pressione e anche dei consumi energetici di pompaggio, a meno di non aumentare il diametro dei tubi oppure di suddividere il circuito radiante in più sottocircuiti connessi in parallelo.

Generalmente i sistemi TABS permettono di operare in condizioni di riscaldamento con temperature di mandata dell'acqua pari a  $27^{\circ}\text{C}$ - $33^{\circ}\text{C}$  e pari a  $18^{\circ}\text{C}$ - $22^{\circ}\text{C}$  in condizioni di raffrescamento. Questo implica maggiori vantaggi nello sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili e altamente efficienti, come il solare termico, gli acquiferi e le pompe di calore geotermiche perché le temperature descritte sono più facilmente raggiungibili, realizzando elevati rendimenti rispetto ai valori di temperatura pari a  $70^{\circ}\text{C}$  richiesti da altri sistemi convenzionali come radiatori o alcuni ventilconvettori.

Tutto ciò comporta:

- una riduzione della potenza installata del generatore di calore, sia esso una caldaia, una pompa di calore o altro, e quindi minori costi iniziali e minor ingombro dell'impianto;
- una incentivazione all'uso di risorse rinnovabili;
- una diminuzione dei costi elettrici, specialmente in abbinamento a sistemi fotovoltaici, la cui produzione può essere impiegata per alimentare il compressore presente nella pompa di calore e per soddisfare i carichi elettrici dell'utenza.

Un esempio applicativo tipico dei sistemi TABS riguarda il settore terziario, dove essi sono impiegati sia in abbinamento a sistemi di ventilazione meccanica, sia alla ventilazione naturale in base alle condizioni climatiche del sito e della destinazione d'uso dell'edificio. Nel caso in cui il progetto richieda l'installazione di un sistema VMC è possibile provvedere alla deumidificazione dell'aria immessa utilizzando la stessa macchina refrigerante impiegata per il sistema radiante. Il solaio termoattivo consente di accumulare energia frigorifera nella notte, lasciando disponibile, nel corso della giornata, la macchina refrigerante per il trattamento dell'aria di rinnovo durante i periodi di occupazione, come mostrato dalla figura 1.3. Il sistema descritto TABS e VMC grazie alla propria elevata inerzia termica, lavora in modo asincrono rispetto l'andamento dei carichi interni ed esterni e si verifica il fenomeno dello *peak shaving*, ovvero il picco di richiesta termica non si verifica nel momento della giornata in cui si manifesta la maggiore sollecitazione termica sull'involucro, ma esso viene attenuato e traslato, in un certo qual modo è ridistribuito nelle ore successive della giornata. L'energia generata dall'impianto durante le ore notturne e stoccata nel solaio per effetto dell'inerzia termica della struttura è resa disponibile durante le ore diurne per coadiuvare l'impianto di VMC e limitarne la potenza termica richiesta. Il sistema TABS risponde alle esigenze dell'edificio in base alla risposta dell'impianto VMC ed in funzione della propria inerzia termica: maggiore è l'inerzia termica della struttura, maggiore è il suo tempo di risposta e maggiore è il tempo durante il quale il solaio mantiene il proprio livello termico e riesce ad erogare per il raffrescamento. Analogo discorso può essere effettuato per il funzionamento in regime invernale.

Il comportamento descritto consente di utilizzare macchine refrigeranti di dimensioni inferiori e di ottenere un miglioramento delle performance: infatti, la temperatura di evaporazione, richiesta per il funzionamento dei sistemi TABS, può essere maggiore di quella diurna richiesta dal sistema VMC, si conclude che il sistema ad elevata inerzia termica non solo riduce il lavoro del sistema di ventilazione, ma richiede alla pompa di calore di

lavorare quando le condizioni termodinamiche sono più favorevoli. Il funzionamento notturno, inoltre, può permettere di sfruttare una più conveniente tariffazione elettrica.

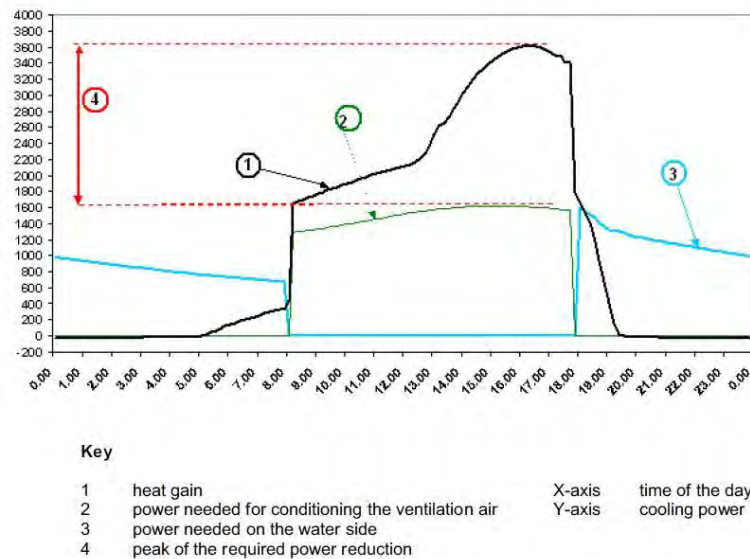


Figura 1.3 Fenomeno peak shaving. [3]

Un altro esempio del principio di funzionamento dei TABS è raffigurato in figura 1.4, la quale evidenzia come il sistema sia caratterizzato essenzialmente da due fasi: una fase di carico che avviene durante le ore notturne, convenzionalmente dalle 18:00 alle 06:00, oppure dalle 20:00 alle 08:00; una fase di scarico, che si svolge nella restante parte di giornata, in contemporaneità alla curva di carico dell'ambiente interno.

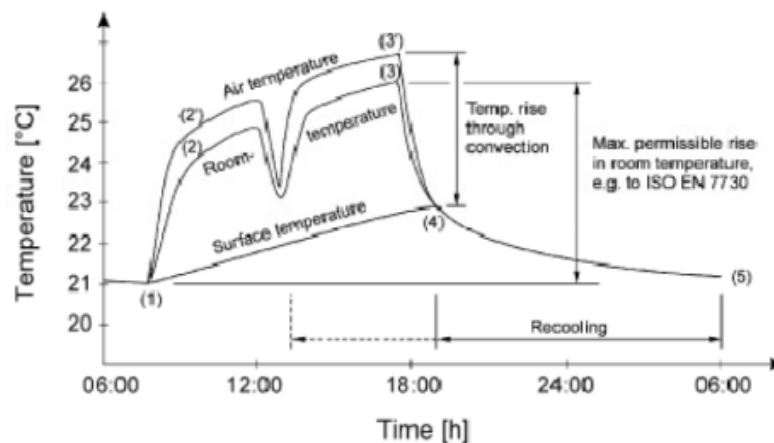


Figura 1.4 Funzionamento TABS. [4]

In riferimento alla figura 1.4, è possibile analizzare il comportamento dinamico dei sistemi TABS in termini di temperatura superficiale e le oscillazioni della temperatura interna e della temperatura media radiante, tipiche di una applicazione per il terziario in regime estivo nella

quale siano considerati un indice di occupazione medio e i carichi solari di mediocre intensità.

Il sistema si trova allo stato iniziale, punto (1), in una condizione caratterizzata da temperatura dell'aria e delle varie superfici, pari a circa 21 °C, in perfetto equilibrio; successivamente, al comparire del carico solare e dei carichi interni, dovuti alla presenza di persone, computer e apparecchi per l'illuminazione, l'ambiente incrementa repentinamente la propria energia interna e aumentano di conseguenza anche la temperatura dell'aria e la temperatura delle superfici, ad esclusione delle superfici delle strutture TABS.

I sistemi TABS sono caratterizzati da un funzionamento peculiare caratterizzato dalla propria inerzia termica: la differenza tra la temperatura operante dell'ambiente e la propria temperatura superficiale rappresenta la forzante dello scambio termico, mentre l'inerzia termica rappresenta il serbatoio da cui l'energia viene estratta, secondo una legge di "autoregolazione" in modo inversamente proporzionale alla temperatura superficiale della struttura, e direttamente proporzionale al gradiente tra superficie e ambiente. La temperatura superficiale delle strutture TABS, infatti, aumenta con il trascorrere delle ore, fino al punto (4), mentre la temperatura dell'aria e la media radiante aumentano fino al punto (3).

Infine, nel tratto (3) - (4), a fronte di un decremento repentino dei carichi interni, causato dalla fine dell'orario di lavoro, si assiste ad una relativa drastica riduzione dell'energia interna dell'aria e della temperatura superficiale di tutte le strutture e dell'aria interna ad esclusione dei TABS la cui diminuzione inizia dal punto (4) per giungere fino al (5), ovvero fino al punto caratterizzato dalle stesse proprietà del punto (1) [4].

Nonostante i vantaggi delle soluzioni TABS, tali sistemi sono maggiormente impiegati a livello europeo negli edifici adibiti a uffici perché il carico termico degli edifici residenziali convenzionali è fortemente influenzato dai carichi termici interni e cambia rapidamente in funzione delle condizioni climatiche. Negli ultimi anni, con l'aumentare dell'interesse per la riduzione dei consumi energetici e grazie all'introduzione di nuove tecnologie nel settore delle costruzioni civili, il range di variazione giornaliera e il valore di picco del carico termico negli ambienti residenziali si è ridotto. Da un punto di vista impiantistico questo significa che è possibile pensare di allargare il campo di applicazione dei sistemi TABS, e si prevede sia possibile ottenere una significativa riduzione dei consumi rispetto sistemi più tradizionali soddisfacendo, comunque, le richieste di comfort termico dell'utenza. In ogni caso è bene ricordare che il prerequisito fondamentale per l'impiego dei sistemi TABS è un involucro efficiente dal punto di vista energetico sia rispetto l'aspetto invernale, quindi ben isolato per ridurre le dispersioni termiche verso l'esterno, sia per quanto riguarda il

comportamento durante la stagione estiva, quindi opportunamente schermato dalla radiazione solare, se necessario.

### **1.2.1 Comfort interno**

Un aspetto fondamentale da considerare nell'analisi del comportamento energetico di un edificio è che sia sempre garantito il comfort ambientale agli utenti.

Il comfort negli ambienti interni può essere definito non solo come l'assenza di disagio nei confronti della struttura che ci circonda, ma come un totale senso di benessere psicofisico. Ovviamente questa sensazione di benessere è soggettiva e risente dell'influenza di un notevole numero di parametri, ma è stato dimostrato che la salute e la produttività degli occupanti di un edificio crescono al migliorare delle condizioni di comfort interno dell'ambiente interno.

Gli aspetti che influenzano il comfort interno sono suddivisi in letteratura nelle seguenti categorie:

- comfort termico;
- qualità dell'aria interna e ventilazione;
- acustica e rumorosità dell'ambiente;
- illuminazione interna per mezzo di luce naturale o artificiale.

Le norme di riferimento per tutti questi aspetti sono: UNI EN 7733 e UNI EN 15251.

Nei sistemi TABS il principio di funzionamento è basato sulla massa e sull'inerzia termica della struttura. Tali sistemi rispondono pertanto in maniera molto lenta alle sollecitazioni esterne, siano esse variazioni delle condizioni dell'ambiente interno o variazioni nei valori di portata e temperatura del proprio fluido vettore. In presenza di carichi variabili e oscillazioni del fabbisogno di energia richiesto dall'edificio, i sistemi spesso non riescono a mantenere una temperatura costante all'interno dell'ambiente, le temperature oscilleranno attorno al valore richiesto, e tuttavia il sistema è in grado di mantenerle all'interno di un certo range di comfort. Secondo la letteratura [5] [6] è dimostrato che le persone ritengono accettabile una variazione di temperatura all'interno dell'ambiente di 4 K/h. Negli edifici controllati tramite sistemi TABS la variazione massima riscontrata varia da 0.5 a 1 K/h, e quindi si è sicuramente all'interno dell'intervallo di comfort descritto.

Pertanto nelle applicazioni di sistemi TABS le grandezze interne che influenzano lo stato di comfort termico (la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria) fluttuano moderatamente durante l'arco della giornata, e lo scopo di una buona progettazione è di mantenere le condizioni interne all'interno di un range di comfort definito come compreso tra

$-0.5 < PMV < 0.5$ , dove PMV è l'acronimo per *Predicted Mean Vote* (definito da Fanger (1970) ed adottato dalla norma UNI EN ISO 7730) che è funzione delle sei variabili indipendenti che costituiscono il bilancio termico (temperatura dell'aria ( $t_a$ ), velocità dell'aria ( $v_a$ ), temperatura media radiante ( $t_{mr}$ ), grado igrometrico o umidità relativa (UR), il metabolismo energetico (M), resistenza termica dell'abbigliamento ( $I_{cl}$ )) del bilancio termico ed è definito sulla scala della sensazione termica.

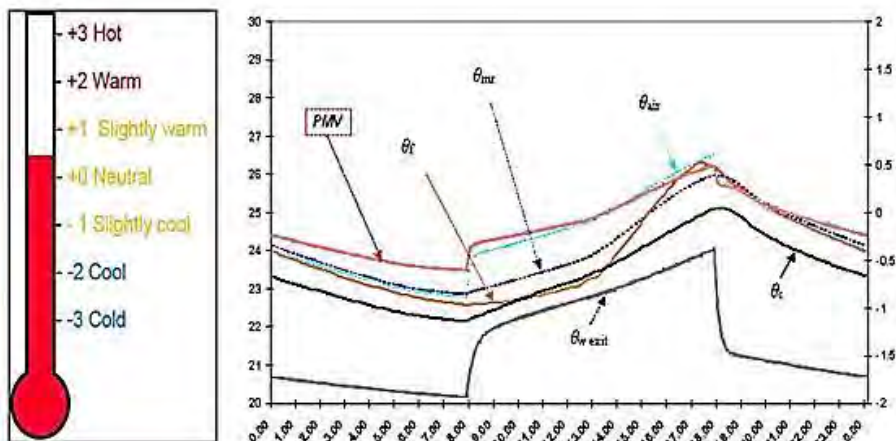


Figura 1.5 Scala termica e variazione di PMV in 24 ore. [7]

Particolare attenzione bisogna porre al problema della condensazione superficiale: molti dei primi impianti fallivano proprio a causa di questa problematica che incorreva soprattutto durante il regime estivo. Questo problema è stato studiato lungamente e i risultati indicano che la condensazione può essere evitata se il sistema radiante è accoppiato ad un controllo che mantenga la temperatura di alimentazione superiore alla temperatura di rugiada o in abbinamento ad un sistema di ventilazione meccanica che deumidifichi l'aria interna mantenendo una bassa umidità specifica.

L'acustica è un elemento importante del comfort negli ambienti interni ed è anche uno degli aspetti più critici dell'applicazione dei sistemi TABS. Ridurre la rumorosità tra livelli diversi di un edificio è molto importante, tuttavia i sistemi TABS richiedono applicazioni a solaio e per essere in grado di garantire un adeguato comfort termico sono costituiti da materiali resistenti ed a elevata densità, come il cemento, che però non sono efficienti dal punto di vista acustico perché non riescono ad assorbire in modo opportuno i suoni. Al contrario, a causa della propria rigidità strutturale trasmettono la vibrazione causata dai passi delle persone alle strutture verticali dell'edificio causando un discomfort per gli occupanti (il discorso quanto detto è maggiormente critico in relazione ad edifici di tipo condominiale, mentre per edifici monofamiliari o bifamiliari questo tipo di problema può passare in secondo piano). La soluzione di dotare le strutture dei sistemi TABS di materiali

fonoassorbenti non è praticabile in quanto svantaggiosa per la trasmissione del calore e per lo stesso comfort termico. Avendo i materiali fonoassorbenti una bassa conduttività termica, contribuiscono ad aumentare la resistenza complessiva della struttura. Per compensare il loro effetto sarebbe necessario variare la temperatura di alimentazione dell'acqua nelle tubazioni e quindi incrementare il gradiente termico tra il fluido termovettore e l'ambiente da condizionare, aumentando l'energia richiesta dall'impianto per la produzione di acqua calda o refrigerata.

Per quanto riguarda i fenomeni di discomfort localizzati, che sono ampiamente trattati e regolati dalla normativa UNI EN 7730, essi possono essere di quattro tipi:

- asimmetrie radianti;
- differenze verticali di temperatura dell'aria;
- temperatura del pavimento;
- correnti d'aria.

L'asimmetria radiante è legata a un differente scambio termico per radiazione percepito da una parte del corpo rispetto ad un'altra. Si consideri un corpo che intersechi un piano verticale, è possibile incorrere in una asimmetria orizzontale quando la temperatura percepita sulla faccia destra è differente rispetto alla temperatura percepita sulla faccia esposta a sinistra, mentre se si considera un piano orizzontale è possibile individuare una asimmetria verticale quando si manifesta differenza nella temperatura percepita dalle due facce superiore e inferiore.

In questo caso si parlerà di temperatura piana radiante  $t_{pr}$  intesa come la temperatura equivalente di una superficie piana che assicura il medesimo scambio termico realizzato tra il corpo e il semispazio considerati. Il discomfort per asimmetria radiante è identificato con una differenza di temperatura  $\Delta T_{pr}$ .

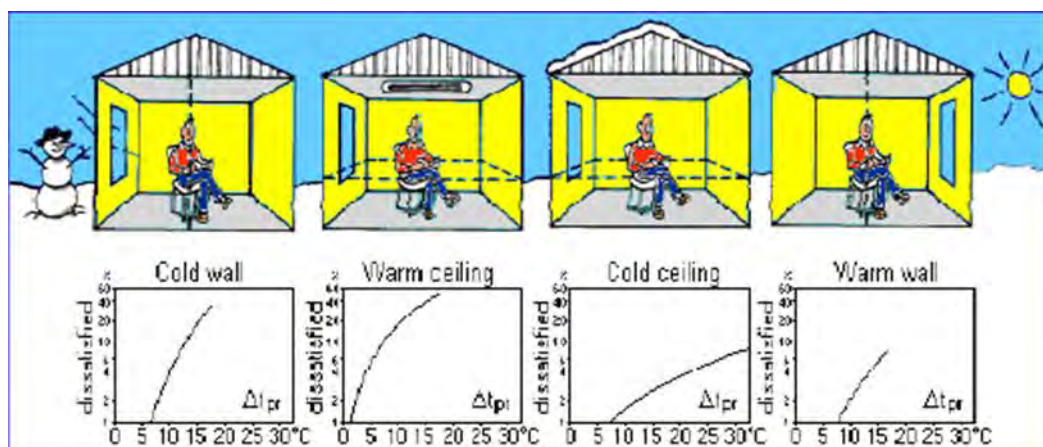


Figura 1.6 Asimmetria radiante. [8]

La norma definisce gli andamenti del parametro PPD (*Percentage of Person Dissatisfied*) in funzione della superficie attiva considerata e impone che tale valore debba essere inferiore al 5%, in funzione del  $\Delta T_{pr}$  massimo che si riscontra all'interno dell'ambiente.

Come mostrato nei diagrammi di figura 1.6 relativi alle situazioni di: parete fredda, soffitto caldo, soffitto freddo e parete fredda; la condizione più a rischio per l'insorgere dei fenomeni di discomfort per asimmetria è l'applicazione di soffitti caldi ( $PPD=5\%; \Delta t_{pr,max}=5^{\circ}C$ ). In via cautelativa, nel caso di ambienti interni con soffitti aventi un'altezza inferiore a 3 metri (si osservi che negli edifici residenziali generalmente l'altezza di interpiano è pari a 2.7-2.8 m), la temperatura superficiale non deve in nessun caso superare il valore di  $30^{\circ}C$ , altrimenti gli utenti potrebbero manifestare disturbi di vario genere quali ad esempio cefalea e nausea.

La temperatura superficiale minima del pavimento è di  $19^{\circ}C$ , mentre il valore massimo è di  $29^{\circ}C$ . Se si esce da questo range di accettabilità si riscontrano dei problemi, soprattutto nel caso in cui si superi il valore massimo perché gli utenti potrebbero incorrere in problemi di vasodilatazione agli arti inferiori.

Per quanto riguarda i sistemi TABS, quando le temperature superficiali non superano i valori imposti dalla normativa, riescono a garantire buone condizioni di comfort, infatti garantiscono differenze di temperature verticali entro il range di ammissibilità, secondo quanto imposto dalla norma ISO 11855 che regola le temperature ammissibili per le superfici radianti sia in condizioni di riscaldamento che di raffreddamento, con particolare attenzione ai casi in cui è possibile il diretto contatto tra gli occupanti e la superficie stessa.

Le correnti d'aria sono le più comuni cause di lamentela dell'ambiente indoor e si è più sensibili a tale disagio quando il MET (tasso metabolico) è basso. Di solito sono provocate dalle turbolenze dell'aria e per questo nell'ambiente si compiono delle misure di due minuti dalle quali si trovano il valore medio ( $v_a$ ) la deviazione standard ( $SD$ ) e da queste si ricava la turbolenza ( $Tu$ ).

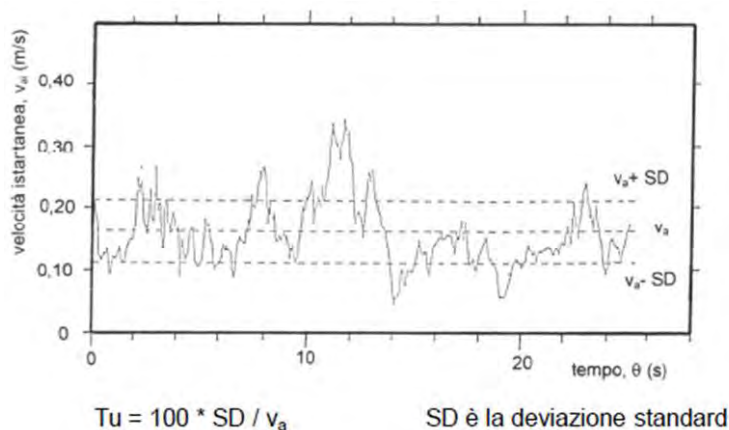


Figura 1.7 Variazione velocità istantanea dell'aria per non incorrere in discomfort. [8]



Per evitare discomfort di correnti d'aria, indipendentemente dalle turbolenze, la norma impone un valore di velocità media ( $v_a$ ) compreso tra 0.15-0.2 m/s e che le misure di tale parametro devono essere realizzate all'altezza dei punti più sensibili del corpo: la nuca e le caviglie.

Con l'impiego di sistemi TABS una quota importante della potenza di raffrescamento è scambiata per radiazione, diminuendo la probabilità di incorrere nel problema di *Draft Risk* che si può verificare nel caso di utilizzo di terminali d'impianto funzionanti con scambio di calore per convezione.

I solai termoattivi non hanno un effetto diretto sulla qualità dell'aria interna e perciò è necessario l'accoppiamento con un sistema di ventilazione meccanica in modo da ottenere un buon ricambio di aria e mantenere, entro i limiti consentiti dalla legge, la percentuale di inquinanti che appartengono a varie categorie:

- inquinanti di origine esterna;
- inquinanti prodotti dagli occupanti;
- inquinanti generati dall'impianto e dalle macchine ;
- inquinanti prodotti dall'edificio.

### 1.3 Pompa di calore

Per pompa di calore s'intende un'installazione che, operando con continuità, preleva calore  $Q_2$  da una sorgente a bassa temperatura, e rende disponibile  $Q_1$ , pari a  $Q_2$  più l'equivalente termico del lavoro meccanico  $L$  svolto per compiere questa operazione, a una sorgente a più alta temperatura. Il nome pompe di calore deriva quindi dall'operazione di aumento del livello termico d'energia disponibile come calore, ed è un'operazione utile naturalmente quando l'energia termica è resa utilizzabile a temperatura superiore a quella dell'ambiente naturale esterno [9].

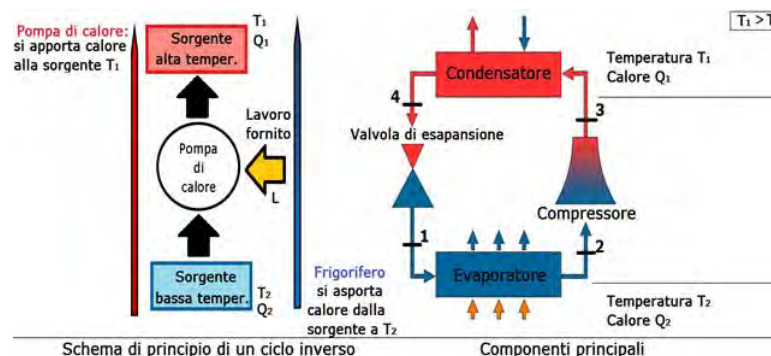


Figura 1.8 Schematizzazione pompa di calore. [10]

Come schematizzato in figura 1.8, il circuito chiuso di una pompa di calore a compressione è costituito da:

- un evaporatore;
- un compressore;
- un condensatore;
- un organo di laminazione (valvola di espansione);

Dal punto di vista operativo non vi sono differenze tra una pompa di calore e una macchina frigorifera, ma quello che li rende differenti sta in ciò che costituisce l'effetto utile: l'asporto di calore da un sistema a temperatura inferiore a quella ambiente per un impianto frigorifero (cioè  $Q_2$ ); la cessione di calore ad un sistema a temperatura superiore a quella ambiente per una pompa di calore (cioè  $Q_1$ ).

Il principio teorico su cui si basano questi dispositivi è il Ciclo ideale inverso di Carnot, il quale è composto dalle seguenti trasformazioni:

- 1-2: il fluido, dalle condizioni di liquido saturo, si espande isoentropicamente dalla pressione  $p_1$  alla pressione  $p_0$  in un espansore, riducendo la propria temperatura da  $T_1$  a  $T_0$ .
- 2-3: il fluido frigorifero evapora a temperatura e pressione costanti in uno scambiatore di calore, denominato *evaporatore*, assorbendo calore dalla sorgente a bassa temperatura.
- 3-4: il fluido è compresso in modo isoentropico dalla pressione  $p_0$  alla pressione  $p_1$  attraverso un compressore con un relativo aumento di temperatura da  $T_0$  a  $T_1$ .
- 4-1: il fluido condensa a temperatura e pressione costanti in uno scambiatore, denominato *condensatore*, cedendo calore alla sorgente ad alta temperatura e ritorna alle condizioni di liquido saturo iniziali, da cui riparte il ciclo.

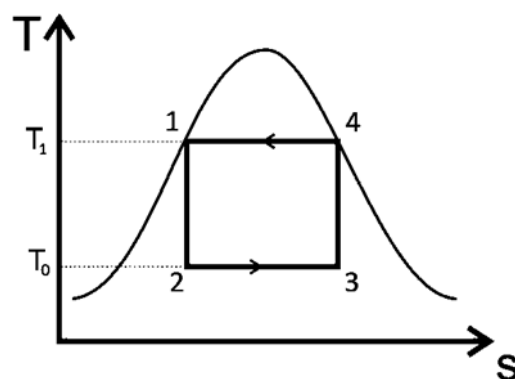


Figura 1.9 Ciclo ideale di Carnot. [9]

Tale ciclo è definito ideale perché la temperatura di evaporazione corrisponde alla temperatura della sorgente fredda, e la temperatura di condensazione corrisponde alla

temperatura della sorgente calda. Lo scambio termico risulta, perciò, ideale e non presenta irreversibilità.

Questo ciclo non può essere assunto come riferimento per la realizzazione pratica degli impianti. L'espansore, che idealmente recupererebbe una frazione modesta di lavoro necessario per il compressore, non trova possibilità di realizzazione perché dovrebbe lavorare con un fluido con alto contenuto di liquido. Pertanto si preferisce utilizzare un organo di laminazione (valvola manuale, tubo capillare, valvola di espansione automatica, valvola di espansione termostatica, valvola di espansione elettronica, valvola di bassa pressione, valvola di alta pressione, valvola regolatrice a livello costante), rinunciando alla possibilità di recupero esterno di lavoro. A causa di questo fatto si allunga la fase di condensazione, operando un sottoraffreddamento che consente di diminuire la fase di laminazione, che presenta delle irreversibilità, e di aumentare l'effetto utile frigorifero.

Il compressore è un organo che non conviene impiegare nella zona di vapor saturo umido poiché, in particolare in quelli di tipo volumetrici alternativi, può verificarsi la rottura della testata del compressore a causa del fenomeno detto "colpo di liquido" per l'incomprimibilità del fluido raccolti nel volume nocivo, in fase liquida. Di conseguenza è preferibile estendere la fase di evaporazione in modo da ottenere un titolo di vapore almeno pari a 1 (vapore saturo secco) all'uscita dall'evaporatore. La soluzione migliore sarebbe attuare un leggero surriscaldamento per evitare qualsiasi presenza di goccioline di liquido.

Nella realtà, lo scambio termico non è ideale e presenta delle irreversibilità a causa della differenza di temperatura tra la temperatura di evaporazione/condensazione e, corrispondentemente, la temperatura della sorgente da cui asporta e a cui cede calore. Nello specifico, la  $T_{evap}$  è minore della  $T_{sorgente\ fredda}$ , mentre la  $T_{cond}$  è maggiore della  $T_{sorgente\ calda}$ .

Da tali considerazioni, il ciclo di riferimento, per la realizzazione pratica della pompa di calore, risulta quello presentato in figura 1.10:

- a-a'': la fase di evaporazione giunge fino alle condizione di vapore saturo secco (titolo di vapore uguale a 1.
- a''-b: è la fase di surriscaldamento per evitare problemi di presenza di liquido in aspirazione al compressore e aumentare, conseguentemente, la fase di desurriscaldamento che rientra nell'effetto utile nel caso il dispositivo lavori durante il periodo invernale.
- b-c : la fase di compressione idealmente sarebbe una isoentropica (linea tratteggiata b-c<sub>is</sub>), ma in realtà non lo è a causa delle irreversibilità che comportano un aumento di entropia e di lavoro necessario al compressore per portare il fluido dal livello di pressione  $p_1$  al livello di pressione  $p_2$  con conseguente aumento di temperatura.

c-d : al di fuori della curva limite superiore avviene il desurriscaldamento del fluido con relativa diminuzione di temperatura, ma a pressione costante  $p_2$ . Nel momento in cui si giunge alla curva a titolo di vapore pari a 1, inizia la vera e propria condensazione a temperatura e pressione costanti, e infine si compie del sottoraffreddamento per diminuire la fase di espansione.

d-a : la fase di laminazione, essendo internamente irreversibile, presenta un aumento di entropia e recupera una parte del lavoro svolto al compressore perché è una trasformazione isoentalpica.

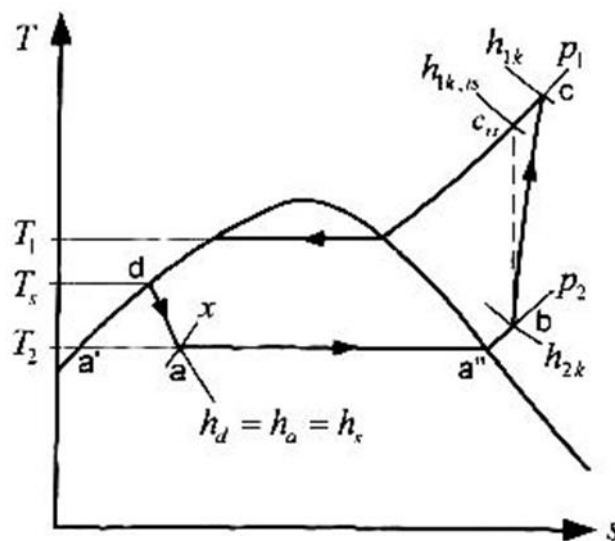


Figura 1.10 Ciclo reale a compressione di vapore. [11]

### 1.3.1 Prestazioni energetiche

Il parametro usato per descrivere le prestazioni energetiche di una pompa di calore è il coefficiente di effetto utile (in inglese C.O.P.=*Coefficient Of Performance*), il quale non rappresenta un rendimento poiché il suo valore può superare di molto l'unità ma serve a valutare le prestazioni di una macchina che lavora secondo un ciclo inverso operante fra due sorgenti a diversa temperatura.

Generalmente il coefficiente di effetto utile per una pompa di calore è espresso come:

$$COP = \frac{|Q_1|}{L} = \frac{|Q_1|}{|Q_1| - |Q_2|} \quad (1.1)$$

Nel caso in cui si consideri un ciclo inverso di Carnot ideale, tale parametro è esclusivamente in funzione delle temperature delle sorgenti fra le quali la macchina opera:

$$COP_{id} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (1.2)$$

Questo valore rappresenta il limite massimo di C.O.P in un qualsiasi ciclo inverso (ciclo per pompa di calore) operante fra le temperature  $T_2$  e  $T_1$ .

Dall'equazione 1.2 si nota che:

- l'asportazione di calore da un corpo necessita di molto più lavoro quanto maggiore è la differenza tra la temperatura  $T_1$  e la temperatura  $T_2$ , pertanto, per incrementare l'efficienza della pompa di calore, tale differenza deve essere ridotta;
- analogo discorso è valido per le temperature delle sorgenti di calore;
- per poter utilizzare sistemi economicamente convenienti, quali pompe di calore da acqua di falda o geotermiche (che tuttavia presentano maggiori costi iniziali per via degli scavi da effettuare), è preferibile avere una  $T_{\text{sorgente fredda}}$  più elevata possibile;
- per un aumento del coefficiente di effetto utile è opportuno disporre di una richiesta termica ad un livello di temperatura moderato e quindi sono consigliati terminali d'impianto come sistemi TABS, pannelli radianti e ventilconvettori e termosifoni che lavorino a temperature ridotte.
- è consigliata una utilizzazione per molte ore dell'anno per ammortizzare meglio i costi e si suggerisce, perciò, di utilizzare la pompa di calore anche durante il periodo estivo invertendo il ciclo per mezzo di una valvola a 4 vie (raccomandato in particolare per i climi mediterranei).

D'altro canto il COP non è molto soddisfacente per un confronto tra il funzionamento delle varie tipologie di pompe di calore, perché non si è a conoscenza delle condizioni per le quali sia stato valutato e di che parametri si tenga conto all'interno della voce lavoro  $L$ : in alcuni casi è conteggiato solo il lavoro del compressore mentre in altri viene aggiunto anche quello relativo agli ausiliari. Perciò dal punto di vista pratico è preferibile utilizzare l'indice SPF (*Season Performance Factor*), il quale si riferisce a una stagione di lavoro e non alle condizioni di lavoro:

$$SPF = \frac{\sum Q}{\sum E} \quad (1.3)$$

Dove  $\sum Q$ = la somma totale dell'energia termica fornita dalla pompa di calore durante l'intera stagione(di solito un anno) .

$\sum E$ = l'energia totale che sviluppa la pompa di calore per tutta la stagione di riferimento. Questa include l'energia di tutti gli accessori come ventilatore e

pompe di circolazione associati alla pompa di calore e nel caso la sorgente da cui asportare calore è l'aria esterna si dovrebbe includere il lavoro necessario per lo sbrinamento (*defrosting*).

Il valore di questo coefficiente è d'interesse primario per l'utente perché rivela il risultato netto di un anno di operatività ed è quindi un buon indicatore per la valutazione economica del sistema. Per ottenere l'indice SPF elevato è necessario:

- ridurre le perdite lato caldo;
- diminuire le perdite inutili come la spesa elettrica per i controlli;
- mantenere il consumo degli ausiliari a livello ottimale;
- minimizzare le perdite per *Defrosting*.

### 1.3.2 Classificazione delle sorgenti termiche

In questo paragrafo si vuole fornire una panoramica sui vari tipi di sorgenti che è possibile utilizzare con le pompe di calore, per poi trattare più specificamente il caso di utilizzo di aria esterna poiché è la sorgente termica impiegata dalla pompa di calore nel modello analizzato nei capitoli successivi.

Le sorgenti che si utilizzano comunemente con una pompa di calore per asportare o cedere calore (dipende dalla stagione che si sta considerando) sono:

- **terreno:** - buone prestazioni energetiche;
  - tecnologia poco diffusa, ma che si sta espandendo in quanto i vincoli normativi si stanno riducendo. Se nei tubi circola acqua non ci sono complicazioni, mentre se c'è acqua più glicole i vincoli diventano più stringenti per timore di inquinare le falde acquifere a causa di una rottura o una perdita;
  - i costi di realizzazione sono molto elevati a causa degli scavi da realizzare e della posa delle tubazioni, soprattutto nel caso di sonde verticali;
  - disponibilità limitata per la necessità di ampie superfici nel caso di utilizzo di sonde orizzontali;
  - il grande vantaggio che caratterizza tale sorgente è la ridotta variazione della temperatura del terreno durante l'anno che, ad una profondità maggiore di 10 m, è praticamente nulla. In tal modo la pompa di calore è in grado di lavorare con una temperatura costante e più vicina alla richiesta termica delle utenze con un conseguente aumento dell'indice COP.

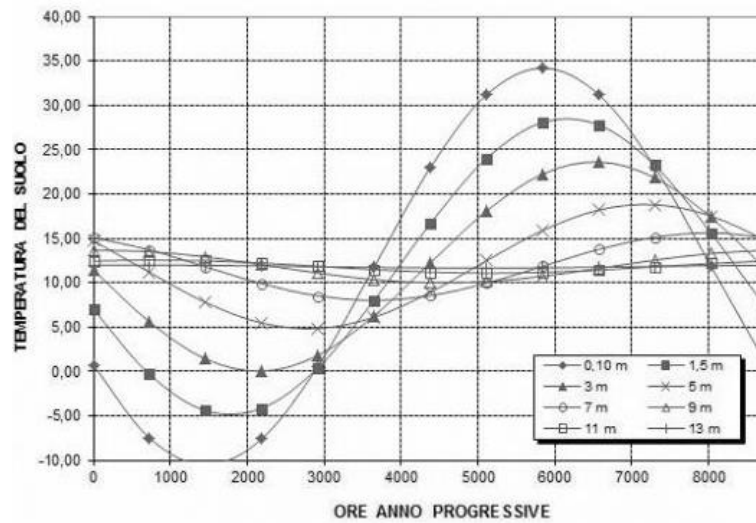


Figura 1.11 Variazione della temperatura del terreno in funzione della profondità. [12]

- **laghi/stagni:** - disponibilità variabile a seconda della fonte;
  - prestazioni costanti tutto l'anno senza risentire della variazione stagionale come l'aria esterna
  - necessita di opere di prelievo e di scarico con relativo aumento dei costi;
  - vincoli normativi di tipo ambientale molto stringenti.
- **aria esterna.**

In alternativa alle sorgenti termiche appena citate, possono essere utilizzate anche delle fonti di calore che sono definite di scarto quali: l'aria espulsa dall'edificio tramite ventilazione meccanica e l'acqua impiegata nei processi di produzione industriale. Tali soluzioni sono affascinanti dal punto di vista di recupero energetico, in particolare la seconda, ma di difficile attuazione per il costo elevato dell'installazione dei tubi e per la complicata progettazione iniziale.

### ***Aria esterna***

L'aria ambiente è disponibile ovunque ed è la soluzione più pratica dal punto di vista operativo, ma risente abbondantemente della variazione stagionale della temperatura. A causa di tale motivo la pompa di calore, nei giorni più freddi e più caldi dell'anno, opera in maniera meno efficiente rispetto ai restanti giorni perché aumenta la differenza di temperatura tra la sorgente e la richiesta. Pertanto le prestazioni energetiche sono molto variabili durante l'anno: nella stagione invernale il coefficiente COP aumenta all'aumentare della temperatura, mentre in estate diminuisce.

Come si può vedere in figura 1.12, la capacità di una pompa di calore che lavora con aria esterna come sorgente da cui asportare calore, rispetto a pompe di calore che operano con le altre fonti, è minore nei giorni in cui la temperatura è ridotta, mentre la richiesta di potenza è a livelli molto elevati. Quindi, soprattutto nei paesi nordici dove il clima è più rigido, è necessario l'accoppiamento con un boiler ausiliario che permetta di coprire il carico richiesto, a meno che la pompa di calore non sia stata dimensionata per il picco della richiesta. In tal caso risulterà sovradimensionata e sarà costretta a operare per l'intera stagione in parzializzazione e ciò comporta che il compressore deve essere in grado di lavorare a numero di giri variabili (compressore a inverter).

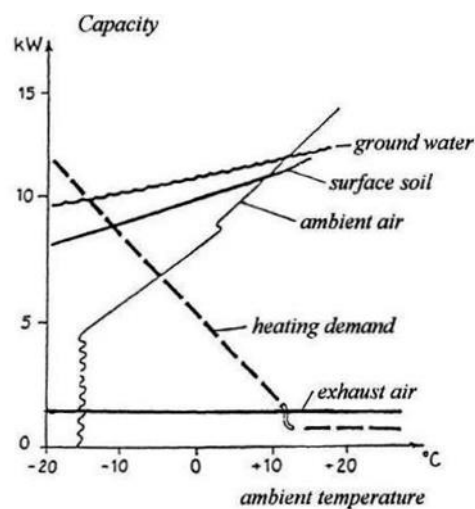


Figura 1.12 Capacità della pompa di calore in funzione di differenti sorgenti di calore. [11]

In merito alla figura 1.12, si nota che a temperature esterne molto basse ( $-10/-15^{\circ}\text{C}$ ) la curva di capacità relativa all'aria esterna precipita a zero perché in tal caso è consigliabile spegnere la macchina per evitare rotture e malfunzionamenti. Questo limite dipende dalle condizioni operative del lato caldo e dal fatto che un'elevata differenza tra le temperature di evaporazione e condensazione comporta l'aumento del rapporto di compressione, il che significa compromettere il corretto funzionamento del compressore.

Un altro aspetto di cui tener conto nella stagione invernale è la necessità di fare sbrinamento. Per temperature inferiori agli  $0^{\circ}\text{C}$  sulla superficie dell'evaporatore, si ha un deposito di brina che ostacola il normale funzionamento dell'evaporatore. E' necessario, quindi, compiere *defrosting* perché altrimenti aumenta lo spessore dello strato di ghiaccio, causando:

- una crescita della resistenza dello scambio termico;
- una diminuzione dell'area di passaggio dell'aria con conseguente aumento delle perdite di carico lato aria e della prevalenza del ventilatore che è costretto a lavorare a velocità più elevate.



I metodi per eseguire lo sbrinamento sono [11]:

- *Self defrosting*: attuabile quando la temperatura esterna è maggiore di 0°C, si blocca la macchina e si fa lavorare solo il ventilatore che mi permette la circolazione di aria e scioglie il ghiaccio.
- *Electric defrosting*: si compie con delle resistenze elettriche installate nell'evaporatore che sono in grado, con una botta di calore, di staccare il ghiaccio dalla batteria. Si deve fare attenzione che nemmeno nel gocciolatoio ci sia presenza di ghiaccio altrimenti la pompa di calore va in arresto.
- *Hot gas defrost by reversing operation*: si utilizza una valvola 4 vie che permette di invertire il ciclo inviando il gas caldo in uscita dal compressore all'evaporatore, e non al condensatore, consentendo lo scioglimento dello strato di ghiaccio. Operando in tal modo si compie lo stesso lavoro al compressore ma senza effetto utile, rischiando di raffreddare l'ambiente da riscaldare. Pertanto, durante questa fase, si devono limitare al massimo gli scambi termici tra la pompa di calore e l'ambiente interno.

Dal punto di vista del risparmio energetico la soluzione migliore è il *self defrosting* perché si ha solo la spesa elettrica del ventilatore che opera per un tempo maggiore, ma quando ciò non è sufficiente è indispensabile controllare le sequenze di sbrinamento in modo da ottenere una soluzione ottimale. Questo comporta che deve essere presente un controllo (sensori di temperatura, di pressione, di assorbimento di potenza del ventilatore, microprocessore) che individui il tempo corretto per terminare lo sbrinamento appena tutto il ghiaccio è stato rimosso e che gli intervalli di defrosting siano adeguati.

### 1.3.3 Fluidi frigorigeni

I fluidi di lavoro sono un argomento fondamentale per le pompe di calore e per qualsiasi macchina che lavori secondo ciclo inverso dato che essi percorrono gli organi che compongono ogni apparecchio e ne influenzano l'efficienza e l'impatto ambientale. Tradizionalmente questi tipi di fluidi sono suddivisi in due macro categorie:

- fluidi di sintesi: CFC, HCFC, HFC, miscele, HFO;
- fluidi naturali: ammoniaca(NH<sub>3</sub>), acqua, anidride carbonica(CO<sub>2</sub>).

#### ***Fluidi di sintesi***

Tale famiglia è composta da quattro sottoinsiemi che sono analizzati singolarmente:

- **CFC** (cloro-fluoro-carburi): composti chimici contenenti cloro, fluoro e carbonio, ottenuti dalla sintesi di idrocarburi nei quali sono stati sostituiti tutti gli atomi di idrogeno con atomi di cloro e fluoro. Furono inventati negli anni '30 da Thomas Midgley e sono molto performanti perché caratterizzati da: elevata stabilità chimica, non infiammabilità, basso punto di ebollizione alla pressione atmosferica e ridotta tossicità. Grazie alle loro formidabili qualità trovarono largo impiego come fluidi refrigeranti, propellenti per aerosol, agenti schiumogeni e per la preparazione di materie plastiche, visto anche il costo contenuto.
- **HCFC** (idro-cloro-fluoro-carburi): composti chimici contenenti idrogeno, cloro, fluoro, carbonio ottenuti, dalla sintesi di idrocarburi nei quali sono stati sostituiti solo una parte degli atomi di idrogeno con quelli di cloro e fluoro. Tali tipi di fluidi rappresentano il passo evolutivo dei CFC dato che è presente una parte di idrogeno per renderli più instabili nel momento in cui entrano a contatto con l'atmosfera terrestre, in modo che abbiano la capacità di non rimanere per lungo tempo in sospensione e si decompongano velocemente. Tale trasformazione, dai fluidi precedenti, non implica una diminuzione di stabilità chimica e fisica quando il fluido opera all'interno dell'impianto.
- **HFC** (idro-fluoro-carburi): composti chimici nei quali sono presenti idrogeno, fluoro e carbonio, ottenuti dalla completa eliminazione degli atomi di cloro dai fluidi precedentemente descritti. Questi composti sintetici purtroppo non sono performanti come i loro predecessori, infatti presentano una elevata instabilità chimica e fisica che da un lato è un vantaggio perché quando entrano a contatto con l'atmosfera si decompongono prima, dall'altro lato, invece, non possono essere comparati ai CFC e HCFC dal punto di vista dell'efficienza durante la fase operativa. Con questi fluidi di lavoro non è, comunque, stato risolto il problema dell'inquinamento ambientale visto sono uno dei principali protagonisti dell'aumento dell'effetto serra, anche se sono stati fatti passi in avanti per quanto riguarda la riduzione del buco dell'ozono.
- **Miscela**: si riconosce che un fluido è una miscela se nella denominazione (per esempio R410A) è presente una lettera maiuscola alla fine. Possono esserci miscele binarie (composta da due fluidi) o ternarie (composte da tre fluidi) e possono essere miscele azeotropiche o zeotropiche. Le prime si comportano come i fluidi puri e cioè ad un aumento della pressione corrisponde un aumento della temperatura e viceversa; le seconde, invece, presentano un certo *glide* di temperatura e pertanto il comportamento dipende dalla composizione e da quanto è solubile un fluido rispetto all'altro. Per tale famiglia di fluidi il ciclo di riferimento ideale non è più il ciclo di

Carnot, ma il ciclo di Lorenz il quale è un ciclo reversibile in cui variano le temperature di condensazione e di evaporazione, le quali dipendono dalla pressione e dalla composizione della miscela, e la formula generale dell'indice COP rimane inalterata, salvo sostituire le temperature con delle temperature medie logaritmiche. Tali fluidi sono stati introdotti per rientrare nei vincoli imposti dall'Unione Europea sui temi dell'effetto serra e buco dell'ozono.

- **HFO** (*idrofluoroolefine*): sono dei fluidi basati sul propilene al quale è stato rimosso il cloro ed è stato aggiunto il fluoro. A causa della alta presenza di idrogeno e fluoro sono più infiammabili rispetto a quelli descritti precedentemente, ma sono caratterizzati da un ridotto valore di GWP (*Global Warming Potential*).

### ***Fluidi naturali***

Prima dell'avvento delle sostanze ottenute per via sintetica e soprattutto in questi ultimi anni in cui è diventato sempre più importante l'aspetto ambientale, è sempre maggiore lo studio delle sostanze presenti in natura come fluidi termovettori, le quali sono perlopiù ancora in via sperimentale a parte qualche applicazione in particolari tecniche di raffreddamento (come la congelazione) o riscaldamento.

I principali fluidi presi in considerazione sono:

- acqua ( $H_2O$ );
- ammoniaca ( $NH_3$ );
- anidride carbonica ( $CO_2$ ).

L'acqua è una risorsa reperibile a basso costo, abbondantemente disponibile in natura, non è né esplosiva, né tossica, ed è un fluido di lavoro eccellente per le pompe di calore industriali per via delle sue proprietà termodinamiche poiché lavorano ad alte temperature. Presenta, però, molti svantaggi i quali sono: una temperatura di fusione molto bassa ( $0^\circ C$ ) e un elevato valore di volume specifico a vapor saturo. Quest'ultimo particolare comporta dimensioni dell'impianto molto grandi e perciò assolutamente non economiche.

L'ammoniaca fu il primo fluido frigorifero a essere utilizzato tra il 1870-1874 dallo scienziato tedesco Linde. Tale sostanza presenta un'ottima efficacia termodinamica perché caratterizzata da: un ridotto volume specifico, un elevato calore di evaporizzazione e buone proprietà di trasmissione del calore. Inoltre, dal punto di vista economico, ha un costo contenuto anche per quanto riguarda la costruzione dell'impianto e delle sue dimensioni. Queste proprietà ne fanno una delle migliori sostanze che si possano utilizzare, ma ha il problema di essere fortemente tossica e infiammabile, anche se possiede un odore talmente pungente il quale rende relativamente semplice la localizzazione del punto di fuga prima che

tale fluido raggiunga il punto di infiammabilità. A causa di tale inconveniente e per l'avvento delle sostanze di sintesi nel mercato dei fluidi frigoriferi, l'ammoniaca fu all'inizio abbandonata ma, ai giorni nostri, per merito dello sviluppo tecnologico, riguardo la sicurezza nella costruzione di sistemi di rilevamento di fughe di gas e il bloccaggio delle stesse, essa viene impiegata per grandi impianti di raffreddamento, come per esempio nei supermercati.

L'anidride carbonica è una sostanza presente in grande quantità in natura, ma ha il grave problema di essere caratterizzata da una temperatura critica molto bassa ( $31^{\circ}\text{C}$ ) che ne ostacola l'uso comune negli impianti per il raffreddamento civili e industriali. L'unico modo per far avvenire il ciclo è di renderlo trans-critico, comportando l'utilizzo di particolari materiali e sistemi di sicurezza che fanno lievitare il prezzo rendendolo, al giorno d'oggi, non vantaggioso.

## 1.4 Ventilazione negli edifici residenziali

La ventilazione è il processo di immissione e/o estrazione d'aria da e/o verso un ambiente confinato con il fine di mantenere entro il range di confort il livello di inquinanti, l'umidità e la temperatura e per evitare la formazione di muffe, condensazione superficiale e condensazione interstiziale.

L'obiettivo principale è di fornire aria pulita agli occupanti degli edifici e di estrarre l'aria viziata e inquinata nel modo più efficiente possibile.

Se l'aria immessa si miscela perfettamente con l'aria presente si avrà la stessa concentrazione di inquinanti in tutti i punti dell'ambiente, ma questa è una situazione rara e di difficile realizzazione nella pratica perché solitamente il livello di inquinanti non è uniforme: basti pensare alla maggior presenza di odori nella cucina e al maggior tasso di umidità nelle lavanderie dove si lasciano ad asciugare i vestiti o nei bagni dove le persone si fanno la doccia. Per tale motivo, di solito, si installano delle bocchette di estrazione in stanze come bagni e cucine, e di immissione nelle camere e in soggiorno nelle quali la gente trascorre la maggior parte del tempo quando risiede a casa.

La quantità d'aria da immettere o estrarre può essere definita in termini di:

- portata d'aria per persona [L/s per persona];
- portata d'aria per unità di superficie [L/s  $\text{m}^2$ ];
- volumi d'aria per unità di tempo o ricambi d'aria [ $\text{h}^{-1}$ ]: tale tasso si identifica con la lettera "n" ed è definito come il rapporto tra la portata d'aria entrante  $q_v$  e il volume dell'ambiente  $V$ :

$$n = \frac{q_v}{V} \quad (1.4)$$

Ipotizzando , in un alloggio di circa 100 m<sup>2</sup> la presenza simultanea di 4 persone, si ottiene che il valore dalla UNI 10339 di ricambi d'aria è pari a 0.5 h<sup>-1</sup>, coerentemente con il tasso di riferimento, ai fini delle valutazioni energetiche , del D.P.R. 412/93.

I sistemi di ventilazione per l'edilizia residenziale sono usualmente così classificati:

- *ventilazione naturale*: cioè attraverso le forze naturali dovute al vento e alla differenza di temperatura tra interno e esterno, che provocano l'ingresso di aria esterna negli ambienti a causa della permeabilità delle superfici di confine e cioè aperture specificamente previste durante la fase di progetto, ma anche porte, finestre, e fessure.
- *ventilazione meccanica*: immissione e/o estrazione dell'aria con l'ausilio dei ventilatori.
- *ventilazione ibrida*: è una tecnica di ventilazione che accoppia un sistema a ventilazione naturale e un sistema a ventilazione meccanica.

In Italia la ventilazione meccanica non è obbligatoria, e quindi nel panorama residenziale la quasi totalità delle abitazioni è priva di alcun sistema, tranne in pochi casi, e per ottenere la concessione edilizia è sufficiente prevedere una certa areazione dalle finestre.

### 1.4.1 Ventilazione Meccanica Controllata (V.M.C.)

Al giorno d'oggi, in un'ottica di risparmio energetico, le costruzioni sono molto impermeabili all'aria esterna in modo da ridurre al minimo le dispersioni di calore verso l'esterno per mezzo dell'installazione di cappotti. Perciò l'unica possibilità di assicurare un rinnovo d'aria adeguato con un perfetto controllo della portata è il sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC).

I sistemi di ventilazione meccanica controllata sono quindi tecnologie che permettono la ventilazione continuativa delle residenze regolando le portate d'aria di rinnovo secondo le esigenze determinate in fase di progetto. Essi si basano sostanzialmente sul concetto di ridurre quanto più possibile lo sviluppo delle reti aerauliche o di realizzarle con sistemi di economica installazione, quali i canali rigidi o flessibili di piccolo diametro.

Soddisfano le seguenti esigenze:

- garantiscono portate d'aria di immissione/estrazione, in quantità prestabilite;
- assicurano la possibilità di variare le portate dell'aria in funzione delle condizioni ambiente (aumento o diminuzione dell'umidità ambiente, presenza o meno delle persone, ecc.);

- permettono la filtrazione dell'aria nei sistemi a doppio flusso;
- garantiscono la possibilità di recuperare calore dall'aria espulsa (nei sistemi a doppio flusso).

Generalmente un impianto di ventilazione è costituito da tre componenti: i terminali di immissione e ripresa (bocchette d'aria), i canali per convogliare l'aria e i ventilatori.

Negli impianti più semplici l'apparato elettrico si limita a un piccolo ventilatore caratterizzato da una potenza elettrica di qualche decina di Watt. In quelli più complessi, invece, sono presenti due ventilatori in abbinamento a un recuperatore di calore ad alta efficienza, permettendo una maggiore regolarità delle portate e la riduzione dei consumi energetici.

Gli impianti di ventilazione meccanica, sono di semplice concezione e installazione, ma richiedono attenzione e manutenzione, altrimenti possono diventare essi stessi sorgenti di inquinanti e rumore.

Vi sono diverse tipologie di sistemi e nell'elenco sottostante sono citate quelle più comunemente utilizzate nell'ambito residenziale:

- sistema di ventilazione meccanica unifamiliare a semplice flusso a portata fissa;
- sistema di ventilazione meccanica unifamiliare a semplice flusso a portata variabile igroregolabile;
- sistema di ventilazione meccanica unifamiliare a doppio flusso con recupero di calore statico o termodinamico;
- sistema di ventilazione meccanica condominiale a semplice flusso;
- sistema di ventilazione meccanica condominiale a doppio flusso con recupero di calore statico o termodinamico.

Il sistema di ventilazione meccanica unifamiliare a semplice flusso a portata fissa è costituito da un ventilatore di estrazione dell'aria, installato solitamente nel sottotetto, collegato con dei condotti a delle griglie di estrazione collocate nelle stanze con maggior produzione di inquinanti e di vapore come i bagni e le cucine. Queste zone vengono messi in depressione per fare in modo che l'aria venga espulsa, mentre negli altri ambienti viene garantito l'afflusso di aria attraverso dei fori nei muri o nel telaio delle finestre in cui vengono installate delle bocchette autoregolabili con membrana in PVC. Tali dispositivi modificano la sezione di passaggio dell'aria in funzione delle condizioni esterne (se è una giornata ventosa o meno) in modo che la portata risulti sempre costante. Con questo espediente, il rinnovo dell'aria all'interno dell'abitazione è costante e controllato tutto l'anno indipendentemente dalle condizioni atmosferiche.

Il sistema di ventilazione meccanica unifamiliare a semplice flusso a portata variabile igroregolabile è un sistema che considera la richiesta dei singoli ambienti e rientra nella casistica della *Demand Control Ventilation*. Il principio di funzionamento è il medesimo di quello descritto precedentemente, cambia solo il tipo di bocchette, le quali sono munite di un cappello igroscopico che, in funzione dell'umidità relativa, mette in tensione o meno la membrana. Se l'umidità relativa aumenta, il dispositivo permette il passaggio di una portata d'aria maggiore, mentre se diminuisce, la portata è ridotta fino a mantenere un valore minimo necessario al mantenimento di una buona qualità dell'aria. C'è linearità tra l'apertura delle bocchette e l'umidità relativa interna e ciò rende necessaria l'installazione di un ventilatore a portata variabile, permettendo la riduzione della spesa energetica relativa alla ventilazione.

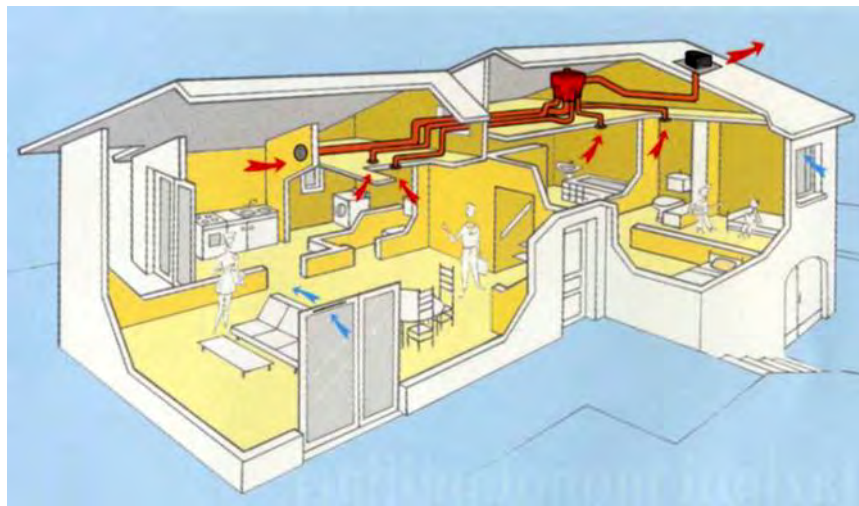


Figura 1.13 Sistema di ventilazione unifamiliare a semplice flusso.

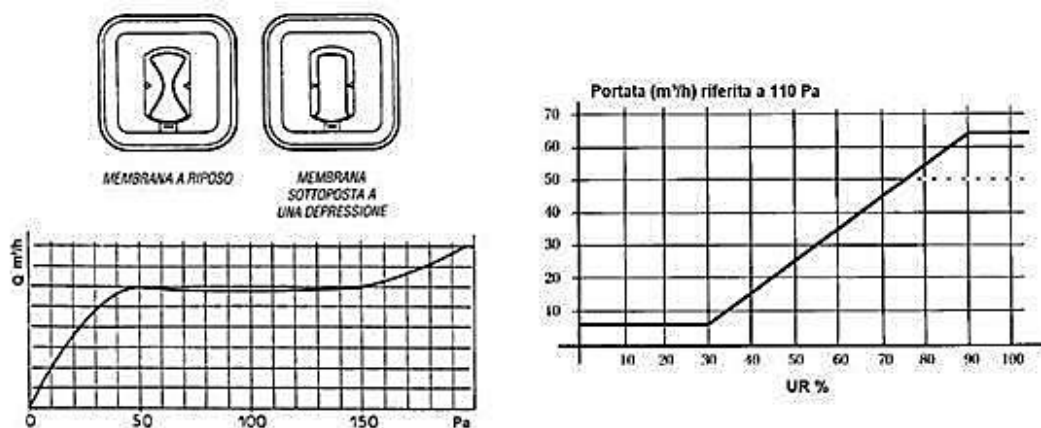


Figura 1.14 Diagramma di funzionamento di bocchetta autoregolabile e igroregolabile.

La problematica che affligge i sistemi appena descritti riguarda il fatto che negli ambienti in depressione si è sicuri che l'aria venga espulsa, ma non si è certi che l'aria entri dagli altri

ambienti perché c'è permeabilità dei muri e dei serramenti. E' ancora più evidente in edifici prefabbricati e in legno, pertanto per operare in sicurezza è necessario calcolare una quota parte per le infiltrazioni di 3-5% della potenza calcolata, perché esiste il rischio che l'ambiente non vada a temperatura, in particolare in inverno.

I sistemi di ventilazione meccanica unifamiliare a doppio flusso si differenziano da quelli a semplice a estrazione per la presenza di una doppia rete aeraulica: una è destinata alla mandata di aria di rinnovo nelle stanze adibite a soggiorno e camere da letto, mentre la seconda provvede a estrarre l'aria da cucine e bagni. Si necessita, quindi, di due ventilatori (uno per la ripresa e uno per la mandata) e di due reti, comportando un aumento dei costi di spesa elettrica, di investimento iniziale e di ingombro. Tale tipologia di sistema è definita anche "bilanciata" per la sostanziale equivalenza tra le portate di immisione e quella di estrazione. Tuttavia per la migliore riuscita dell'impianto si mantiene l'alloggio in leggera sovrappressione in modo da evitare l'ingresso di aria ed eventuali odori e inquinanti dall'esterno.

Questi impianti trovano la loro migliore utilizzazione in abbinamento a dispositivi di recupero di calore che appartengono a varie tipologie:

- recuperatore di calore statico: fatto in acciaio, alluminio o materiale plastico, permette di recuperare il calore sensibile dall'aria espulsa
- recuperatore di calore entalpico: costituito da speciale materiale cartaceo permeabile al vapor d'acqua, consente di recuperare sia una parte di calore sensibile, sia una parte di calore latente;
- recuperatore di calore termodinamico: sono dispositivi che lavorano secondo ciclo inverso come una pompa di calore.

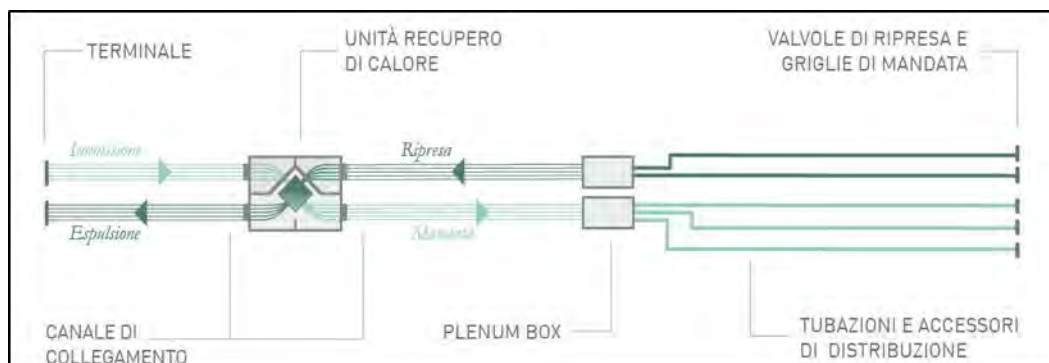
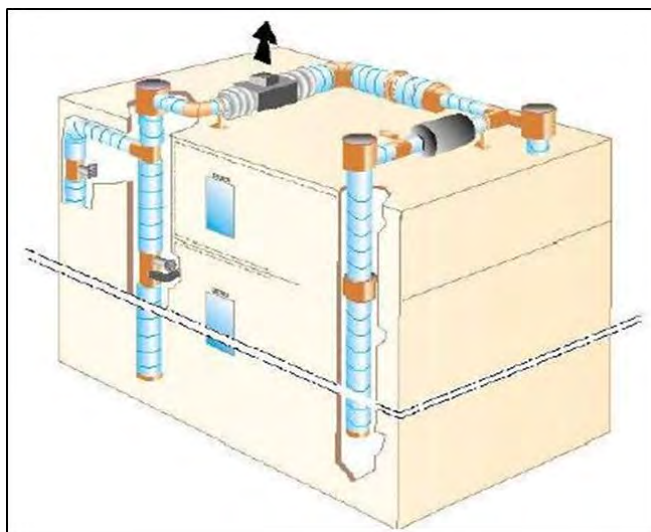


Figura 1.15 Ventilazione unifamiliare a doppio flusso con recuperatore di calore. [13]

Il sistema di ventilazione meccanica condominiale a semplice flusso funziona esattamente come quello unifamiliare, ma in tal caso si ha un ventilatore centralizzato e nel caso in cui la planimetria degli appartamenti sia la stessa (quindi i bagni e le cucine si trovino nelle stesse

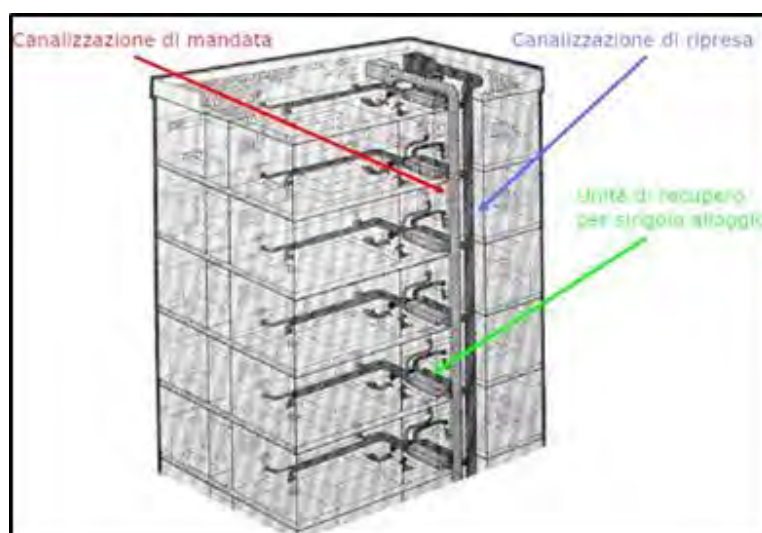


posizioni) è possibile realizzare un unico canale di ripresa in cui convergono tutti i bagni e cucine e così il costo procapite risulta inferiore rispetto al caso di un sistema individuale.



**Figura 1.16 Ventilazione meccanica condominiale a semplice flusso. [8]**

Nel sistema di ventilazione meccanica condominiale a doppio flusso con recuperatore di calore il principio di funzionamento è lo stesso di quello unifamiliare: si ha un ventilatore centralizzato, ma appare ottimale abbinare recuperatori di calore individuali, a livello di singolo alloggio, di cui oggi esistono molti modelli ad alta efficienza. Infatti, se il recuperatore fosse di tipo centralizzato, è possibile il verificarsi di “furti di calore” da parte di appartamenti non riscaldati. Tuttavia, in alcuni casi, si realizzano impianti completamente centralizzati per snellire al massimo le operazioni di installazione e di manutenzione riducendo i costi iniziali.



**Figura 1.17 Ventilazione meccanica condominiale a doppio flusso con recupero di calore. [8]**

## 1.5 Sistema fotovoltaico

Negli ultimi anni, in tutti i paesi sviluppati, si è assistito ad un aumento delle fonti energetiche rinnovabili. In particolare, a partire dal 2005, con l'arrivo del primo Conto Energia, in Italia c'è stato un rapido aumento di impianti fotovoltaici installati. Con questo tipo di contributo l'utente è remunerato per i kWh immessi in rete dal proprio impianto fotovoltaico e le tariffe sono tali da consentire l'ammortamento dell'impianto nel giro di circa 10 anni. Tale incentivazione ha fatto sì che ad oggi, in Italia, ci siano 480000 impianti attivi per un potenza totale lorda di circa 16,5 GW.

Parallelamente, l'evoluzione delle tecniche di conversione e dei dispositivi ha consentito di investigare sistemi di generazione con un differente approccio, ovvero quello di generare e accumulare energia per il consumo in loco, con lo scopo di permettere la massimizzazione della quota di energia auto consumata e quindi di ridurre notevolmente l'impatto sulla rete, nonché favorire l'auto sostenibilità dell'impianto a livello finanziario. Si evitano, così, speculazioni e tariffe incentivanti non più sostenibili dalla Pubblica Amministrazione, favorendo, al contempo, una crescita naturale e coerente del mercato delle energie rinnovabili.

### 1.5.1 Materiali

L'elemento fondamentale per la conversione della radiazione solare in energia elettrica è la cella fotovoltaica, la quale viene costruita utilizzando principalmente il *silicio*, materiale presente in abbondanza nella crosta terrestre, non tossico e facilmente lavorabile. Le celle fotovoltaiche oggi prodotte si basano su due tecnologie:

- celle a silicio cristallino (mono-cristallino o poli-cristallino);
- celle a film sottile (al silicio amorfo o cristallino o con materiali alternativi).

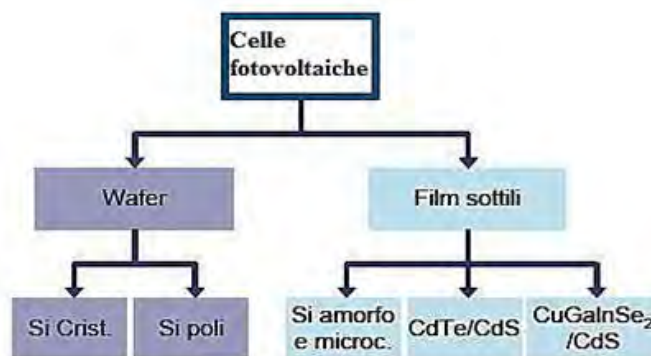


Figura 1.18 Esempi di moduli fotovoltaici. [15]



Figura 1.19 Tecnologie celle fotovoltaiche. [14]

I moduli con celle in silicio cristallino:

- rappresentano una tecnologia matura ed affidabile con un’immagine verso il mercato di prodotto sicuro;
- hanno un degrado delle prestazioni elettriche molto contenuto nel tempo (molti costruttori garantiscono 80% delle prestazioni nei 25 anni di vita utile);
- presentano una efficienza di conversione del 13-15%;
- hanno un aspetto estetico non del tutto soddisfacente e sono generalmente rigidi o semi flessibili con peso non sempre contenuto.

I moduli con celle in silicio amorfo:

- sono caratterizzati da un basso rendimento come evidenziato in figura 1.19;
- hanno un degrado delle prestazioni elettriche del 10-15% nelle prime 100 ore di esposizione;
- presentano un aspetto estetico adatto a uso architettonico visto che esiste la possibilità di creare elementi fotovoltaici sostitutivi di elementi tipici del settore edile;
- hanno una vita utile di 20-25 anni;
- necessitano di una superficie doppia rispetto ai moduli a silicio cristallino per ottenere la stessa potenza.

In figura 1.20 è possibile osservare il particolare della sezione di un modulo fotovoltaico, il quale è costituito da:

- uno strato di Tedlar che fa da supporto rigido su cui viene installato il pannello, è resistente ai raggi UV, ha una bassa resistenza termica ed è impermeabile all’umidità;
- uno strato di EVA, ovvero un foglio plastico di vinilacetato di etilene, che serve a isolare elettricamente le celle fotovoltaiche dalle strutture ed è caratterizzato da una grande trasparenza ai raggi solari;

- le celle fotovoltaiche;
- uno strato di EVA;
- vetro robusto caratterizzato da una elevata trasparenza e quindi bassa riflettanza per il minor contenuto di ossidi di ferro;
- la cornice di alluminio.

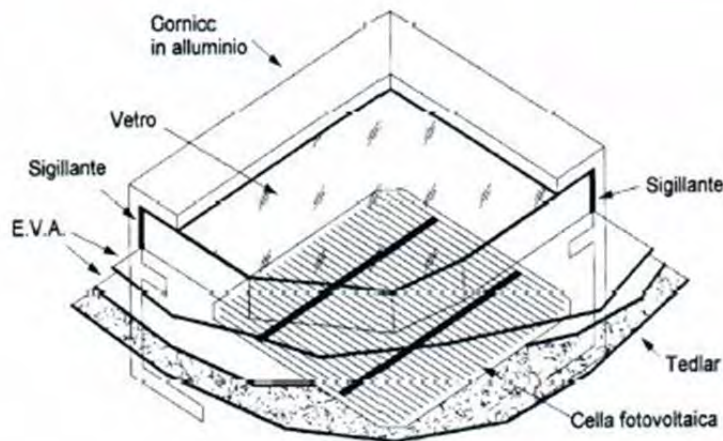


Figura 1.20 Sezione di un modulo fotovoltaico. [15]

## 1.5.2 Funzionamento celle fotovoltaiche

Una cella fotovoltaica a cui è applicato un carico esterno può assumere due comportamenti: in condizione di non illuminazione è comparabile a un diodo, se esposta alla luce si comporta come un generatore di corrente.

Generalmente può essere paragonata a un parallelo tra un generatore di corrente  $I_L$  e un diodo attraversato da una corrente  $I_d$  di segno opposto. Si ha:

$$I = I_L - I_d \rightarrow I = I_L - I_o(e^{qV/kT} - 1) \quad (1.5)$$

Con:  $I_o$  corrente inversa di saturazione

$V$  tensione ai capi del diodo

$k$  costante di Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K)

$T$  temperatura assoluta

$q$  carica di un elettrone ( $-1,6 \cdot 10^{-19}$  C)

Si utilizzi una resistenza  $R_s$  per riprodurre le perdite dovute alle connessioni elettriche dei contatti metallici e poi si potrebbe valutare la non idealità del diodo per mezzo della

resistenza  $R_{SHUNT}$  posta in parallelo allo stesso, ma nell'analisi quest'ultima è possibile anche trascurarla.

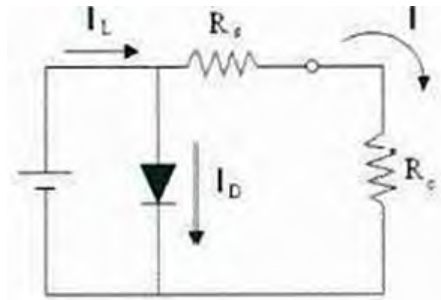


Figura 1.21 Circuito equivalente di una cella fotovoltaica. [16]

Per il circuito equivalente rappresentato in figura 1.21 è possibile tracciare, su un piano cartesiano, una curva caratteristica I-V (Figura 1.22) in cui è possibile individuare tre tratti principali:

- **tratto AB:** la cella si comporta come un generatore ideale di corrente e in questa situazione la corrente è indipendente dal carico e la tensione rimane praticamente costante. Trascurando le perdite, la  $I_L$  può essere espressa con l'equazione:  $I_L = qNA$  dove  $q$  è la carica del singolo fotone,  $N$  è il numero di fotoni con energia superiore a  $E_{gap}$  e  $A$  è l'area del semiconduttore esposto alla luce;
- **tratto CD:** la cella si comporta come un generatore ideale di tensione, in questo caso la tensione è indipendente dal carico e la corrente rimane pressoché costante;
- **tratto BC:** è la zona tipica di funzionamento della cella fotovoltaica ed è spesso chiamata "ginocchio della curva". Lungo questo tratto si può individuare un punto di funzionamento per il quale è massimizzato il prodotto tra la tensione e la corrente, ovvero è massimizzata la potenza trasferita al carico:  $P_M = V_M * I_M$ .

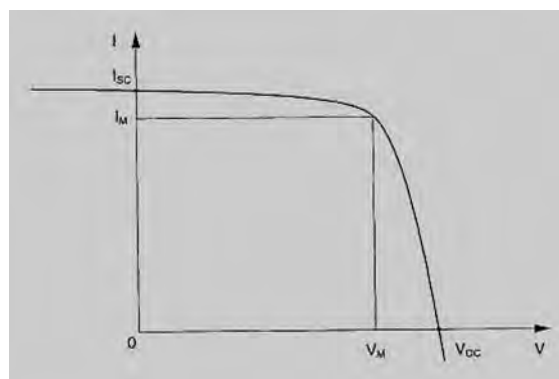


Figura 1.22 Curva caratteristica I-V di una cella solare e punto di massima potenza. [16]

Le prestazioni delle celle fotovoltaiche variano in funzione dell'irraggiamento, della temperatura e dal materiale utilizzato per la loro costruzione.

In figura 1.23 si può notare che la curva di I-V aumenta all'aumentare della radiazione solare incidente, e in ogni condizione di esposizione il dispositivo cerca di portarsi al punto di massima potenza. Al diminuire dell'irraggiamento la potenza cala e di conseguenza anche la corrente di cortocircuito  $I_{CC}$ , mentre la tensione a vuoto  $V_{OC}$  si riduce in maniera marginale. Solitamente un modulo è costituito da 36 celle in serie e, a parità di corrente, si sommano le tensioni, penalizzando molto l'efficienza dell'intero modulo a causa dell'importante variazione della corrente in funzione delle condizioni atmosferiche.

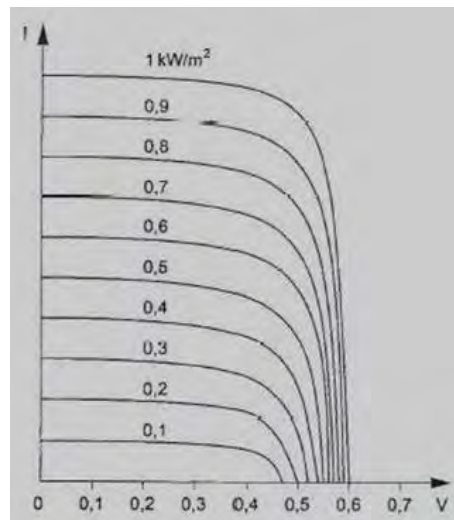


Figura 1.23 Variazione della curva caratteristica in funzione della radiazione incidente. [16]

All'aumentare della temperatura (figura 1.24) si ha un incremento della corrente di cortocircuito di circa  $0,07\%/^{\circ}\text{C}$  e una diminuzione della tensione a vuoto di circa  $2.3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ . Questi due fenomeni, anche se di segno opposto, si traducono in una diminuzione dell'area sottostante la curva caratteristica intorno al 6-7% per ogni aumento di 10 gradi della temperatura delle celle. Ciò comporta una diminuzione sia del rendimento di conversione di  $0,4\%$  per ogni grado di aumento, sia della potenza massima ottenibile.

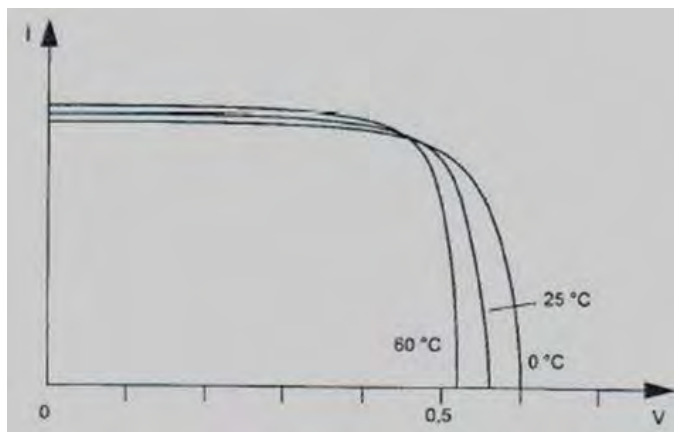


Figura 1.24 Variazione della curva caratteristica in funzione della temperatura. [16]

La scelta del materiale utilizzato nella fase di costruzione caratterizza direttamente l'ampiezza di  $E_{gap}$  e quindi anche il rendimento. Se  $E_{gap}$  è elevato, si ha un minor numero di fotoni con un'energia tale da rompere i legami e una diminuzione della corrente di cortocircuito. Nel caso in cui  $E_{gap}$  sia ridotto, si ha un maggior numero di fotoni con l'energia necessaria per effettuare la conversione fotovoltaica, ma diminuisce la tensione a vuoto. Da figura 1.25 si evince che il rendimento massimo è per valori di  $E_{gap}$  pari a 1.4-1.8 eV e i migliori materiali sono Arseniuro di Gallio e Tellurio di Cadmio.

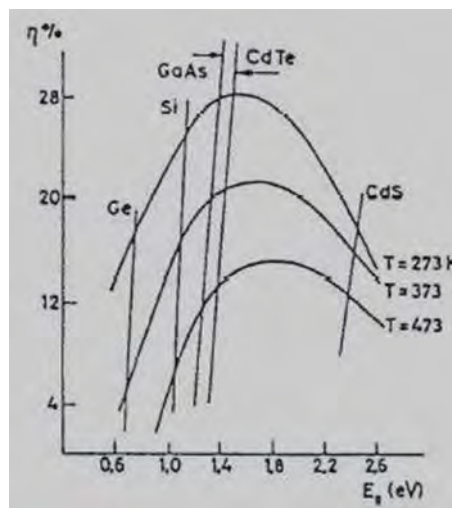


Figura 1.25 Rendimento limite di conversione in funzione della banda proibita  $E_{gap}$ . [16]

Per rendimento di conversione s'intende il rapporto tra la potenza elettrica massima ottenuta e la potenza radiante che colpisce il pannello:

$$\eta = \frac{P_M}{P_i} \rightarrow \eta = \frac{V_M * I_M}{I_G * A} \quad (1.6)$$

Dove:  $I_G$  è la irradiazione solare incidente

$A$  è l'area della cella

$V_M$  è la tensione nelle condizioni di massima potenza

$I_M$  è la corrente nelle condizioni di massima potenza

Per rendimento standard (detto "di picco") s'intende il  $\eta$  misurato in condizioni standard:

- radiazione di  $1000 \text{ W/m}^2$ ;
- spettro di riferimento con AM (*Air Mass*) pari a 1.5;
- temperatura ambiente uguale a  $25^\circ\text{C}$ .

$$\eta = \frac{P_{STC}}{I_{STC} * A} \quad (1.7)$$

Dove:  $P_{STC}$  è la massima producibilità in condizioni standard

$A$  è l'area della cella

$I_{STC}$  è l'irraggiamento in condizioni standard

Tale rendimento è utile per confrontare varie tipologie di celle fra loro.

### 1.5.3 Elementi impianto fotovoltaico

#### *Generatore fotovoltaico*

La tensione generata da una singola cella risulta troppo bassa per poter essere sfruttata e si rende quindi necessario collegare insieme più celle per formare dei moduli fotovoltaici. Le celle fotovoltaiche all'interno di un modulo possono essere collegate in serie, avendo così una tensione complessiva pari alla somma delle tensioni delle singole celle, o in parallelo, ottenendo, in tal caso, una corrente complessiva pari alla somma delle correnti uscenti dalle singole celle. Collegando meccanicamente tra loro più moduli fotovoltaici si ottiene il pannello fotovoltaico, ovvero l'insieme dei moduli in grado di produrre la potenza richiesta alla tensione prestabilita. Si dice stringa il collegamento in serie di più pannelli fotovoltaici ed è caratterizzata da una corrente pari alla corrente fornita dal singolo pannello e da una tensione, somma delle tensioni presenti ai capi della totalità dei pannelli. Più stringhe collegate in parallelo danno forma al campo o generatore fotovoltaico.

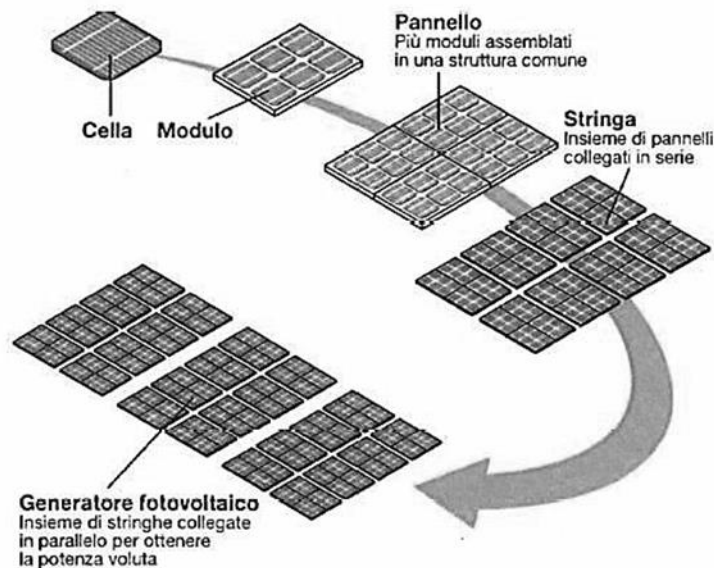


Figura 1.26 Schema campo fotovoltaico. [15]

L'individuazione del corretto numero di stringhe è alla base di una esatta progettazione di un impianto che ha come scopo l'ottenimento della potenza richiesta. A parità di potenza fornita è preferibile un impianto che garantisca una maggiore tensione nominale rispetto ad elevati



valori di corrente, con conseguente utilizzo di cavi di minor sezione soggetti a ridotte perdite nei cablaggi. Tuttavia tensioni elevate comportano maggiori problemi di sicurezza e d'isolamento dell'impianto.

Se le celle presentano la stessa curva caratteristica, lavorano alla stessa temperatura e insolazione e operano alla stessa corrente e tensione, allora la curva caratteristica del modulo avrà lo stesso andamento della curva delle singole celle. Questa, però, è una condizione ideale di difficile attuazione. Nella realtà, l'effetto di non perfetta corrispondenza delle curve I-V delle celle o le differenti condizioni di operatività a cui sono sottoposte portano a *mismatch*. I mismatch nei moduli fotovoltaici avvengono quando i parametri elettrici di una singola cella sono molto alterati rispetto a quelli delle altre celle, e le perdite e l'impatto sulla riduzione di efficienza dipendono da:

- punto in cui opera il modulo;
- la configurazione del circuito;
- i parametri elettrici che sono diversi da quelli delle altre celle.

Per far fronte al problema della circolazione di correnti inverse tra le stringhe, si utilizzano i diodi di blocco: tali dispositivi entrano in funzione, escludendo l'intera stringa di competenza, anche quando un solo modulo è ombreggiato. Questo comporta che la progettazione richiede di ridurre al minimo le zone soggette a oscuramenti o, almeno, di raggruppare i moduli soggetti a ombreggiamento in modo che siano presenti nella medesima stringa.

### ***Inverter***

L'inverter è il cuore di ogni impianto fotovoltaico: la funzione principale è di trasformare la corrente proveniente dai moduli fotovoltaici o dalle batterie in corrente alternata, ovvero quella normalmente utilizzata negli edifici in ambito residenziale. Contemporaneamente a questa funzione deve svolgere altri compiti:

- trasformare la corrente con basse perdite: una delle caratteristiche principali è il suo grado di rendimento, il quale indica quale percentuale di energia prodotta dal fotovoltaico viene convertita in corrente alternata. Il rendimento di un inverter è nell'ordine del 94-96% (ad oggi anche 98%) fino a un carico del 10% e poi precipita. Oltre che dal carico, l'efficienza dipende anche dalla temperatura: se troppo elevata costringe l'inverter a ridurre la potenza che può erogare e quindi, in alcune circostanze, non è possibile sfruttare a pieno le potenzialità dei moduli.

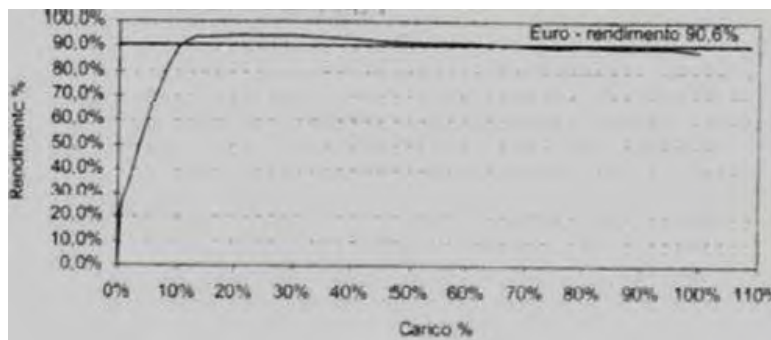


Figura 1.27 Rendimento di un inverter PWM in funzione del carico. [15]

- la curva caratteristica dei moduli dipende molto da irraggiamento e temperatura, e perciò i punti di funzionamento variano durante tutta la giornata. L'inverter deve trovare e mantenere costantemente il punto di funzionamento ideale della curva caratteristica, in modo da ottenere il massimo della potenza in ogni situazione .
- monitorare da un lato il rendimento dell'impianto fotovoltaico e segnalare eventuali anomalie, dall'altro il comportamento della rete di alimentazione alla quale è collegato, perché per motivi di sicurezza deve staccare l'impianto in caso di malfunzionamento della rete pubblica. Per disinserire il generatore fotovoltaico deve possedere un dispositivo in grado di interrompere in modo sicuro il flusso di corrente in modo tale da evitare archi elettrici che, a causa della corrente continua, non scompaiono.
- adeguare la frequenza della tensione prodotta dal sistema fotovoltaico a quella della rete in modo da poter collegare l'impianto alla rete stessa per poter effettuare lo scambio sul posto. Esistono dei convertitori che presentano la tensione in uscita con onda sinusoidale pura, quindi simile a quella fornita dalla rete elettrica, ma ovviamente tali dispositivi sono molto più costosi.

### **Batterie**

Per un sistema solare semi-autonomo è necessario utilizzare batterie solari (accumulatori) per lo stoccaggio di energia elettrica, la quale è resa disponibile, in seguito, nel momento in cui la radiazione solare è bassa o durante la notte. Le batterie per un impianto fotovoltaico differiscono da quelle che si utilizzano nelle macchine, perché le prime possono funzionare con corrente di scarica bassa e sono in grado di sopportare un tasso elevato di cicli di scarica profonda senza danni, anche se è consigliato di evitare la scarica totale perché gli elettroliti iniziano a solfatarsi e cala la resa generale.

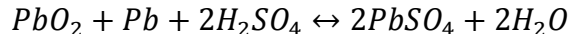
Attualmente sono disponibili sul mercato diversi tipi di batterie per impianto fotovoltaico, quali :

- batterie di accumulo al piombo-acido (vaso aperto, ermetici e con elettrolita in gel);
- batterie di accumulo agli ioni di litio (li-ion) tra cui: ossido di litio-cobalto, litio-fosforo, litio-manganese, litio-ossido di nichel, litio-ferro-fosfato;
- batterie di accumulo al Nichel-metallo-idruro (NiMH);
- batterie di accumulo al Nichel-Cadmio (NiCd);
- batterie di accumulo con tecnologie ad alta temperatura.

Le più diffuse sono le batterie al piombo acido perché sono le più economiche, le più robuste e sono caratterizzate da un buon rendimento di carica/scarica e un ottimo rapporto prestazioni/prezzo, mentre gli svantaggi sono di essere pesanti e ingombranti, per cui occorre adibire un locale per la loro posa. Tali batterie sono suddivise in due tipologie in base allo stato della soluzione acida:

- la prima è chiamata batteria tubolare a gel e non necessita di ricarica di acqua, perché caratterizzata da una circolazione chiusa eseguita da una soluzione acida gelatinosa;
- la seconda è chiamata batteria solare a acqua la quale ha bisogno periodicamente del reintegro di acqua distillata per mantenere una buona durata di vita.

La reazione chimica che governa questo tipo di batterie è la seguente:



Durante la carica gli elettrodi emettono acido e durante la scarica si produce il processo inverso.

La capacità di una batteria è definita secondo la seguente formula:

$$C_n = I_n * t_n [Ah] \quad (1.8)$$

Dove  $I_n$  è la corrente nominale e  $t_n$  è il tempo di scarica nominale.

Solitamente è sempre definita in funzione del tempo di scarica e della temperatura di funzionamento. La temperatura di esercizio ideale per le batterie al piombo è tra i 15-25°C e, se diminuisce, la capacità si riduce, mentre se aumenta si velocizzano le reazioni chimiche e si verifica una maggior autoscarica (3-5%/mese a 20°C).

Le principali caratteristiche che devono possedere i sistemi di accumulo per gli impianti fotovoltaici sono i seguenti:

- funzionamento continuo per garantire una costante capacità di accumulare o erogare energia elettrica in grandi e piccole quantità;
- erogazione di corrente sufficientemente grande;
- bassa autoscarica (riduzione contenuta della carica nella batteria nel tempo);
- rendimenti elevati (rapporto tra energia fornita e energia accumulata dalla batteria);

- lunga durata di vita nel funzionamento ciclico;
- bassa manutenzione in esercizio;
- elevata densità energetica;
- resistenza alle temperature estreme;
- costi ridotti.

Le batterie possono essere collegate sia in serie che in parallelo: nel primo caso si collega il polo positivo e il polo negativo e si sommano le tensioni e le capacità in Wh e non cambia la capacità in Ah, mentre nel secondo caso si collegano poli della stessa polarità e si sommano le capacità in Wh e in Ah e la tensione rimane costante.

Generalmente si privilegia il collegamento in serie, tale da ottenere la tensione richiesta dal sistema e si evita il collegamento in parallelo, perché la carica risulterebbe disuniforme e la durata di vita delle batterie sarebbe penalizzata.

Un dispositivo fondamentale per il corretto funzionamento delle batterie è il regolatore di carica che non permette il sovraccarico delle batterie per evitare il fenomeno di elettrolisi dell'acqua, bloccando il processo di carica quando si raggiunge una tensione finale di carica di 2.35 V per cella. E inoltre previene da profonda scarica interrompendo l'erogazione di corrente nel caso in cui la tensione dell'elemento scenda sotto un certo livello (1.75V).

## **1.5.4 Configurazioni impiantistiche**

### ***Impianto fotovoltaico connesso alla rete***

L'impianto fotovoltaico connesso alla rete è composto da:

- pannelli fotovoltaici;
- inverter;
- contatore di energia prodotta;
- contatore bidirezionale di scambio.

Quando l'impianto fotovoltaico produce più energia di quella che serve all'utenza in quel momento, il surplus è riversato nella rete elettrica del distributore di energia elettrica locale ed è misurato da un secondo contatore dedicato (contatore di bidirezionale di scambio). Nel caso in cui non ci sia radiazione solare o la produzione sia ridotta a causa del brutto tempo o la richiesta di potenza dell'utenza sia superiore a quella che può essere fornita dai pannelli, si utilizza la corrente proveniente dalla rete, conteggiata sempre dal contatore bidirezionale.



Figura 1.28 Schema di impianto fotovoltaico connesso alla rete. [17]

### *Impianto fotovoltaico con batterie connesso alla rete*

L'impianto fotovoltaico con batterie connesso alla rete è costituito da:

- pannelli fotovoltaici;
- regolatore di carica;
- batterie di accumulo;
- inverter;
- contatore energia prodotta;
- contatore di scambio bidirezionale.



Figura 1.29 Schema di impianto fotovoltaico con batterie connesso alla rete. [18]

Quando la produzione di energia elettrica è superiore a quella che necessaria all'utenza in quel momento, il surplus è rilevato dal regolatore di carica che determina se destinare tale energia alle batterie al fine di caricarle, o se inviarla alla rete elettrica del distributore di energia elettrica locale per evitare una sovra caricamento delle stesse. L'energia destinata alla rete è misurata dal contatore bidirezionale.

Quando l'impianto fotovoltaico non è in grado di produrre energia a causa della ridotta irradiazione solare o la richiesta di potenza dell'utenza è superiore a quella erogabile dai moduli, le situazioni che si possono verificare sono due:

- Se le batterie sono cariche forniscono energia, ma quando lo stato di carica risulta inferiore a una certa soglia interviene il regolatore di carica che disinserisce le batterie e per soddisfare il carico si preleva corrente da rete nazionale.
- Se la percentuale di carica delle batterie non supera un certo limite, l'energia elettrica richiesta dall'utenza è prelevata dalla rete per evitare il fenomeno di profonda scarica del sistema di stoccaggio, e in tal caso il sistema fotovoltaico funziona esattamente come la configurazione d'impianto descritta in precedenza.

## Capitolo 2

# CASO STUDIO

### 2.1 Descrizione edifici analizzati

I sistemi TABS sono solitamente usati in edifici del settore terziario, ma in questo elaborato si è voluto analizzare il loro comportamento in edifici in ambito residenziale. I casi analizzati sono due tipologie tipiche di abitazioni presenti all'interno del parco residenziale italiano: un'utenza multifamiliare e un'utenza monofamiliare.

#### *Utenza multifamiliare*

L'utenza multifamiliare è composta da:

- piano interrato (funge da autorimessa, cantine e locale termico);
- piano terra;
- quattro piani rialzati.

Ogni piano è diviso in quattro appartamenti: due bicamere con superficie utile di  $65 \text{ m}^2$  e due tricamere con superficie utile di  $68.5 \text{ m}^2$ , ognuno dimensionato per quattro persone, per un totale di venti unità abitative. Il vanoscale che intercorre per tutta l'altezza della palazzina è un vano non riscaldato.

Di seguito si propone la planimetria di un piano (uguale a tutti gli altri) e del prospetto verticale del condominio:

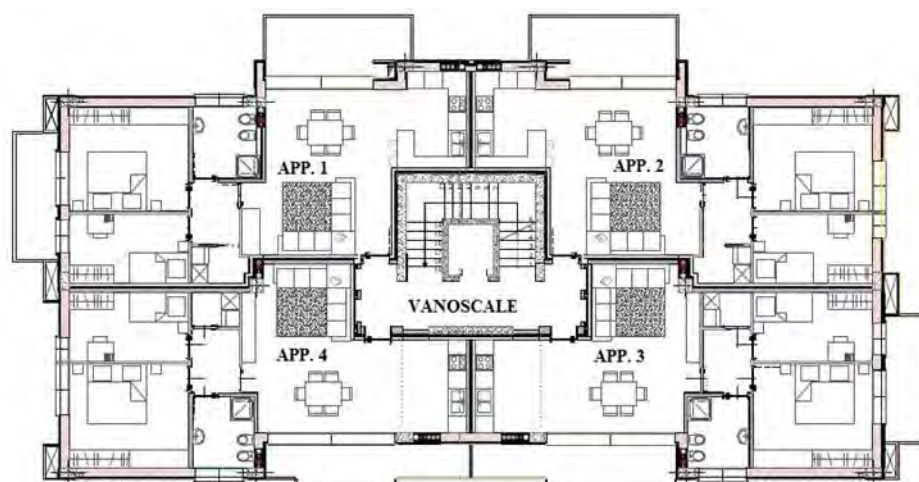


Figura 2.1 Planimetria del secondo piano dell'utenza multifamiliare.

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

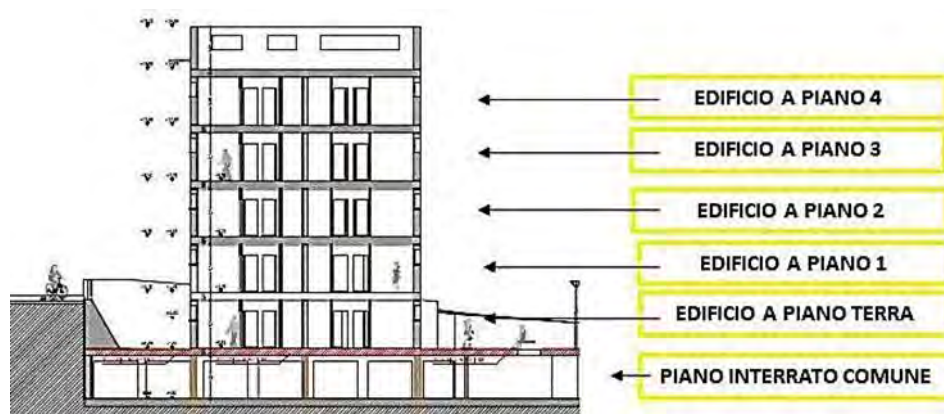


Figura 2.2 Prospetto verticale dell'utenza multifamiliare.

La stratigrafia dei muri esterni è:

Tabella 2-1 Stratigrafia dei muri esterni dell'utenza multifamiliare

	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Malta	1,5	0,9	1800
Poroton	30	0,276	800
Polistirene	6	0,036	30
Intonaco plastico	0,5	0,233	1300
<b>U (trasmissione)</b>	0,3382	[W/m <sup>2</sup> K]	

La stratigrafia del pavimento interpiano è:

Tabella 2-2 Stratigrafia del pavimento interpiano dell'utenza multifamiliare.

	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Piastrelle	1,5	1	2300
Massetto	5	1,4	2200
Materassino anticalpestio	5	0,0372	30
lana di roccia	3	0,037	40
Cemento	10	1,6	2100
<b>Sistema TABS</b>			
Cemento	10	1,6	2100
Malta	1	0,9	1800
<b>U<sub>TOT INTERPIANO</sub></b>	0,3843	[W/m <sup>2</sup> K]	
<b>U<sub>VERSO L'ALTO</sub></b>	0,417	[W/m <sup>2</sup> K]	
<b>U<sub>VERSO IL BASSO</sub></b>	4,911	[W/m <sup>2</sup> K]	



La stratigrafia dei muri interni è:

**Tabella 2-3 Stratigrafia dei muri interni del piano dell'utenza multifamiliare.**

Muro interno (8cm)	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Malta	1	0,9	1800
Poretherm 08	8	1,8	910
Malta	1	0,9	1800

Muro interno (12cm)	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Malta	1	0,9	1800
Poretherm 12	12	1,4	840
Malta	1	0,9	1800

Muro tra app. e vanoscale	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Malta	1	0,9	1800
Calcestruzzo	32	1,28	2200
Polistirene	5	0,0361	30
Poretherm 08	8	1,8	910
Malta	1	0,9	1800

Muro divisorio appartamenti	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Malta	1	0,9	1800
Poretherm 08	8	1,8	910
Polistirene	5	0,0361	30
Poretherm 12	12	1,4	840
Malta	1	0,9	1800

Gli elementi finestrati adottati nella costruzione dell'edificio multifamiliare sono del tipo vetrocamera 4-16-4 con gas basso emissivo caratterizzato da:

- trasmittanza dei vetri pari a 1,4 W/m<sup>2</sup>K;
- trasmittanza del telaio pari a 2,27 W/m<sup>2</sup>K.

Il rapporto percentuale tra l'area del telaio e l'area totale della finestra è il 15%.

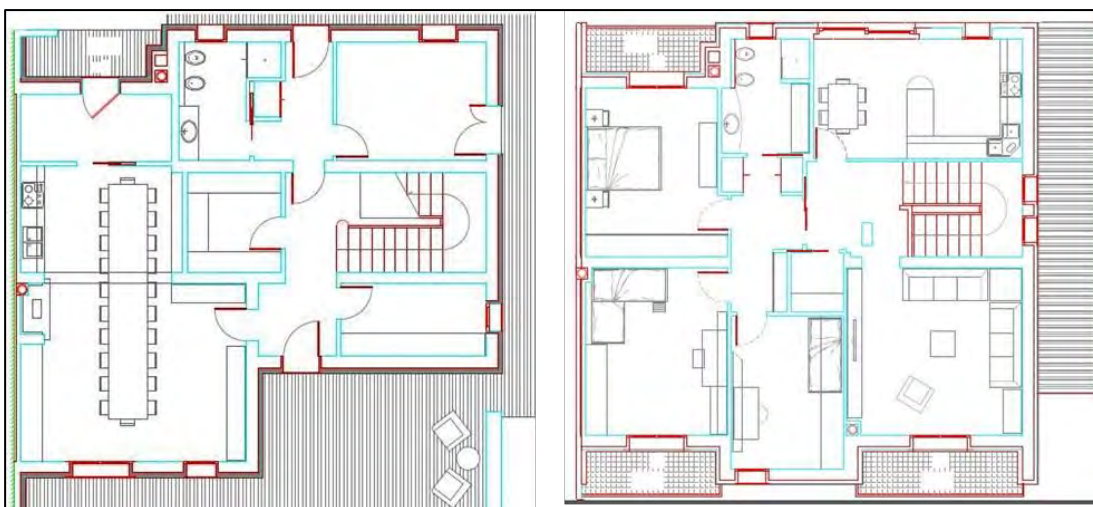
### ***Utenza monofamiliare***

L'utenza monofamiliare si sviluppa su due piani:

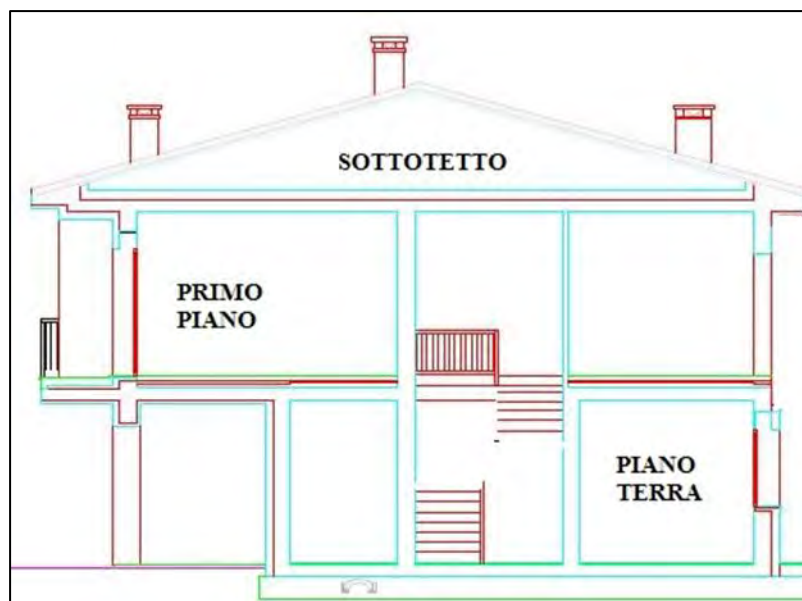
- piano terra con superficie lorda di 106.72 m<sup>2</sup>;
- primo piano con superficie lorda di 125.91 m<sup>2</sup>.

E' presente il sottotetto il quale non è adibito a mansarda e non presenta alcun impianto di riscaldamento o raffrescamento e pertanto nell'analisi dei fabbisogni termici sarà considerato come vano non riscaldato.

Di seguito si propone la planimetria del piano terra, del primo piano e il prospetto verticale dell'utenza in esame:



**Figura 2.3** Planimetria del piano terra e del primo piano.



**Figura 2.4** Prospetto verticale dell'utenza monofamiliare.

La stratigrafia dei muri esterni:

**Tabella 2-4 Stratigrafia muri esterni dell'utenza monofamiliare.**

	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Malta	2,5	0,9	1800
Mattone forato	25	0,533	1188
Malta	2,5	0,9	1800
Polystiren	6	0,0361	25
Rasante cemento	0,5	0,51	1650
Intonaco	0,3	0,7	1800
<b>U (trasmittanza)</b>	0,422	[W/m <sup>2</sup> K]	

La stratigrafia del pavimento posato a terra:

**Tabella 2-5 Stratigrafia del pavimento a terra.**

	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Piastrelle	1,5	1	2300
Massetto	5	1,36	500
Cemento	8,5	1,6	1800
<b>Sistema TABS</b>			
Cemento	5	1,6	1800
Polystyren	4	0,0361	25
Xps_50	5	0,032	50
Cls_std	5	1,28	2200
Ciottoli	8,6	0,7	1500
<b>U<sub>TOT</sub></b>	0,323	[W/m <sup>2</sup> K]	
<b>U<sub>VERSO L'ALTO</sub></b>	4,247	[W/m <sup>2</sup> K]	
<b>U<sub>VERSO IL BASSO</sub></b>	0,0196	[W/m <sup>2</sup> K]	

La stratigrafia dell'interpiano:

**Tabella 2-6 Stratigrafia solaio interpiano.**

	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Piastrelle	1,5	1	2300
Massetto	5	1,34	500
Materassino anticalpestio	3	0,0372	30
Cemento	8	1,6	1800
<b>Sistema TABS</b>			
Cemento	11	1,6	1800
Malta	1	0,9	1800
<b>U<sub>TOT</sub></b>	0,801	[W/m <sup>2</sup> K]	
<b>U<sub>VERSO L'ALTO</sub></b>	0,963	[W/m <sup>2</sup> K]	
<b>U<sub>VERSO IL BASSO</sub></b>	4,765	[W/m <sup>2</sup> K]	

La stratigrafia del solaio verso l'esterno:

**Tabella 2-7 Stratigrafia del solaio verso l'esterno.**

	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Piastrelle	1,5	1	2300
Massetto	5	1,34	500
Cemento	19	1,6	1800
Isolante	5	0,0361	950
Rasante cemento	0,5	0,51	1650
Intonaco	0,3	0,7	1800
<b>U (trasmissione)</b>	0,575	[W/m <sup>2</sup> K]	

La stratigrafia del solaio superiore:

**Tabella 2-8 Stratigrafia solaio superiore.**

	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Barriera vapore	0,1	0,4	133
Polystyren	5	0,0361	25
Cemento	10	1,6	1800
<b>Sistema TABS</b>			
Cemento	8	1,6	1800
Malta	1	0,9	1800
$U_{TOT}$	0,609	[W/m <sup>2</sup> K]	
$U_{VERSO L'ALTO}$	0,631	[W/m <sup>2</sup> K]	
$U_{VERSO IL BASSO}$	5,233	[W/m <sup>2</sup> K]	

La stratigrafia della copertura:

**Tabella 2-9 Stratigrafia copertura.**

	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Tavelle	6	0,428	617
Cls_std	4	1,28	2200
Polystyren	6	0,03611	25
Bitume	0,4	0,17	1200
$U_{COPERTURA}$	0,527	[W/m <sup>2</sup> K]	

La stratigrafia dei muri interni:

**Tabella 2-10 Stratigrafia muri interni.**

<b>Divisorio 10</b>	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Malta	1	0,9	1800
Matt. forato 775	8	0,4	775
Malta	1	0,9	1800
<b>Divisorio 30</b>	Spessore [cm]	$\lambda$ [W/mK]	Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ]
Cartongesso	2,5	0,6	750
Matt. forato 11	25	0,533	1188
Malta	2,5	0,9	1800

In questo edificio sono state installate due tipologie di finestre:

- Finestra a doppio vetro 4-16-4 con gas Argon: -trasmissione vetro pari a  $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$   
-trasmissione telaio pari a  $2,27 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Finestra a triplo vetro 4-8-4-8-4 con gas Xenon: -trasmissione vetro pari a  $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$   
-trasmissione telaio pari a  $2,27 \text{ W/m}^2\text{K}$

Il rapporto percentuale tra l'area del telaio e l'area totale della finestra è pari al 15%.

## 2.2 Analisi dei fabbisogni termici ed elettrici

### 2.2.1 Fabbisogno termico di progetto

#### *Fabbisogno termico invernale*

Il procedimento per la valutazione del fabbisogno termico invernale è descritto nella norma UNI EN 12831 ed è suddiviso nei seguenti step:

1. reperire i dati climatici della zona dove è situata l'utenza;
  2. disporre della geometria dell'edificio;
  3. calcolo delle trasmissioni termiche delle superfici opache e vetrate;
  4. calcolo delle perdite e del fabbisogno termico di progetto.
- 1) Per la prima fase si possono consultare il prospetto NA.1 e NA.2 della norma UNI EN 12831 dove sono indicati, per ogni provincia d'Italia: la zona climatica, i gradi giorno (GG) i quali sono un indice della rigidità del clima, la temperatura esterna minima e media e la temperatura interna di progetto. Per quanto concerne l'irraggiamento, il riferimento è la norma UNI 10349, nella quale i dati sono in funzione dell'esposizione e del mese e sono espressi in  $\text{MJ/m}^2$ . Per il calcolo devono essere convertiti in  $\text{kWh/m}^2$  ed è utile determinare un valore medio pesato sui giorni del periodo di riscaldamento.
- 2) E' necessario avere a disposizione la piantina dell'edificio per il calcolo delle aree delle superfici disperdenti e del volume per le perdite di ventilazione. Se in allegato si possiede il particolare della struttura edilizia con annesso l'elenco dei materiali utilizzati per la costruzione e dei relativi spessori, il calcolo sarà più vicino alla realtà. Altrimenti si può fare ricorso alle norme UNI 10355 e UNI TS 11300-1 nelle quali si trovano rispettivamente: un catalogo dei materiali usati nella costruzioni con le relative caratteristiche termiche e un elenco delle tipiche strutture murarie utilizzate in Italia in edifici esistenti.

- 3) Conoscendo la geometria e i dettagli della struttura è possibile iniziare il calcolo della trasmittanza delle superfici opache e trasparenti. Per le prime è necessario conoscere lo spessore  $s$  [m] e la conducibilità termica  $\lambda$  [W/mK], dalle quali si trova la resistenza termica per ogni strato:

$$R_i = \frac{s_i}{\lambda_i} \left[ \frac{m^2 K}{W} \right] \quad (2.1)$$

Si esegue il calcolo per ogni strato  $i$ , si sommano tutte le resistenze  $R_i$  e si aggiungono la resistenza interna e esterna pari convenzionalmente a 0,13 e 0,04  $m^2 K/W$ .

$$R_{TOT} = \sum_{i=1}^n R_i + R_{INT} + R_{EXT} \quad (2.2)$$

Per il calcolo della trasmittanza  $U$  delle superfici opache è sufficiente eseguire il reciproco di  $R_{TOT}$ :

$$U = \frac{1}{R_{TOT}} \quad (2.3)$$

Il calcolo della trasmittanza delle componenti finestrate segue la formula riportata nella norma UNI EN ISO 10077-1:

$$U_W = \frac{\sum A_G U_G + \sum A_F U_F + \sum l_G \Psi_G}{\sum A_G + \sum A_F} \quad (2.4)$$

Dove:  $U_G$  è la trasmittanza termica dell'elemento vetrato;

$A_G$  è l'area della vetrata;

$U_F$  è la trasmittanza termica del telaio;

$A_F$  è l'area del telaio;

$l_G$  è il perimetro della finestra;

$\Psi_G$  è la trasmittanza termica lineare dovuta agli effetti termici combinati della vetrata, del distanziatore e del telaio.

Se non si dispone della scheda tecnica della finestra, è possibile fare riferimento: al prospetto C.2 della norma UNI EN ISO 10077-1 per ottenere i valori di trasmittanza termica della vetrata, alla figura D2 della medesima norma per il calcolo della trasmittanza termica del telaio per il quale è necessario conoscere lo spessore e il tipo di materiale con il quale è stato fabbricato, e al prospetto A.2 della norma UNI EN ISO 14683 nella quale è presente un elenco di esempi con relativi valori precalcolati di trasmittanza termica lineare.

4) Una volta determinati i valori delle trasmittanze relativi alle superfici, si può procedere al calcolo delle perdite secondo la norma UNI EN 12831:

- Perdite per trasmissione verso il terreno  $H_{T\ i,g}$ : dipendono dalla trasmittanza del solaio e dall'area e dal perimetro esposto della soletta del pavimento. Si procede con il calcolo del fattore caratteristico B':

$$B' = \frac{A_g}{0.5 * P} \quad (2.5)$$

In funzione di questo coefficiente e della trasmittanza  $U_{\text{solaio}}$  si determina la trasmittanza equivalente  $U_{\text{equiv,bf}}$  secondo il grafico presentato in figura 3 del paragrafo 7.1.3 della medesima norma.

- Perdite per trasmissione verso l'esterno  $H_{T\ i,e}$ : sono in funzione della trasmittanza delle superfici opache e trasparenti e dalle relative superfici:

$$H_{T\ i,e} = \sum_{j=1}^n U_{j,opaco} * A_{j,opaco} + \sum_{k=1}^m U_{k>window} * A_{k>window} \quad (2.6)$$

- a. Perdite per trasmissione verso un ambiente non riscaldato  $H_{T\ i,u}$ : dipendono dalla trasmittanza delle superfici opache e trasparenti e dalle relative superfici che confinano con l'ambiente non riscaldato:

$$H_{T\ i,e} = \left( \sum_{j=1}^n U_{j,opaco} * A_{j,opaco} + \sum_{k=1}^m U_{k>window} * A_{k>window} \right) * b_u \quad (2.7)$$

Dove  $b_u$  è un fattore di forma che tiene conto del fatto che la temperatura all'interno dello spazio non riscaldato è più alta di quella esterna, ma minore di quella interna. Infatti se si è a conoscenza delle temperature all'interno di tale ambiente può essere calcolato secondo l'equazione 2.8:

$$b_u = \frac{\theta_i - \theta_u}{\theta_i - \theta_e} \quad (2.8)$$

Dove:  $i$  indica *interno*,  $u$  sta per *ambiente non riscaldato* ed  $e$  per *esterno*.

Nel caso in cui non sia possibile recuperare tali dati, la norma fornisce un'altra formula:

$$b_u = \frac{H_{UE}}{H_{IU} + H_{UE}} \quad (2.9)$$



Dove  $H_{UE}$  è la perdita di trasmissione dall'ambiente non riscaldato verso l'esterno, mentre  $H_{IU}$  è la perdita di trasmissione dall'ambiente interno a quello non riscaldato.

- Perdite per ventilazione  $H_V$ : sono in funzione del volume dell'ambiente, delle caratteristiche dell'aria (calore specifico e densità) e dal numero di ricambi aria  $n$  (fissato  $0.5 \text{ h}^{-1}$  nelle condizioni di progetto):

$$H_V = \frac{n V c_p \rho}{3600} \quad (2.10)$$

La potenza termica di progetto per il riscaldamento si determina sommando tutti i contributi delle perdite di trasmissione e ventilazione espressi in W/K e moltiplicando per la differenza di temperatura tra la temperatura interna di progetto ( $20^\circ\text{C}$ ) e la temperatura esterna di progetto ( $-5^\circ\text{C}$ ):

$$\phi = (H_T + H_V) \Delta\theta \quad (2.11)$$

Per il calcolo del fabbisogno termico netto è necessario seguire la formula presente nella norma UNI EN ISO 13790:

$$E_t = \frac{(H_T + H_V)GG \cdot 24}{1000} - \eta_V(Q_{INT} + Q_{SOLARE}) \quad (2.12)$$

Dove:  $GG$  sono i gradi giorno;

$Q_{INT}$  è la quota parte dei carichi interni la quale è in funzione degli apporti termici interni  $\Phi_{int}$  (convenzionalmente pari  $4 \text{ W/m}^2$ ), dell'area in pianta  $A_{pianta}$  e del numero di ore  $h$  della stagione di riscaldamento:

$$Q_{INT} = \frac{\Phi_{int} A_{pianta} h}{1000} \quad (2.13)$$

$\eta_v$  è il coefficiente di apporti gratuiti che convenzionalmente si assume pari a 0.95;

$Q_{SOLARE}$  rappresenta gli apporti solari provenienti dall'esterno e dipende dall'irradiazione totale stagionale per ogni esposizione calcolata in 1), dalla superficie del serramento e da un fattore di correzione pari a 0,2 che tiene conto del fatto che solo il 20% della radiazione solare che colpisce la superficie esterna entra nell'ambiente:

$$Q_{SOLARE} = 0.2 \cdot \sum I_{sol_{esp}} A_{window} \quad (2.14)$$

Per quanto riguarda il caso studio plurifamiliare, ogni singolo piano è stato suddiviso in due aree: zona A e zona B, entrambe comprendenti un appartamento con due camere e uno con tre camere. In tabella 2-11 sono presentati i valori di potenza di progetto per le due zone e il fabbisogno energetico netto per l'intero piano:

**Tabella 2-11 Valori di potenza di progetto e fabbisogno energetico netto di un piano dell'utenza multifamiliare.**

	ZONA A	ZONA B
$\Phi_{TOT}$ [W]	4727,27	4727,27
$\Phi_{TOT}$ [kW]	4,73	4,73
$\Phi^*_{SUP}$ [W/m <sup>2</sup> ]	35,41	35,41
$\Phi^*_{VOL}$ [W/m <sup>3</sup> ]	13,13	13,13
$E_T$ [kWh <sub>i</sub> ]	22092,38	
$E'_T$ [kWh <sub>i</sub> /m <sup>2</sup> ]	82,74	

L'utenza monofamiliare è stata divisa in due zone: piano terra e primo piano con superfici rispettivamente di 106.716 m<sup>2</sup> e 143.17 m<sup>2</sup>. In tabella 2-12 sono presentati i valori di potenza di progetto per i due piani e il fabbisogno energetico netto relativo all'intero edificio:

**Tabella 2-12 Valori di potenza di progetto e fabbisogno energetico netto dell'utenza monofamiliare.**

	PIANO TERRA	PRIMO PIANO
$\Phi_{TOT}$ [W]	3731,53	7318,44
$\Phi_{TOT}$ [kW]	3,73	7,32
$\Phi^*_{SUP}$ [W/m <sup>2</sup> ]	34,97	51,12
$\Phi^*_{VOL}$ [W/m <sup>3</sup> ]	12,49	18,21
$E_T$ [kWh <sub>i</sub> ]	25873,68	
$E'_T$ [kWh <sub>i</sub> /m <sup>2</sup> ]	103,54	

### ***Potenza frigorifera di progetto in regime estivo***

Per il calcolo della potenza frigorifera sensibile non esiste una norma specifica di riferimento perché la stima dei carichi termici estivi non può essere eseguita in regime stazionario, come il calcolo delle dispersioni termiche invernali. I motivi sono:

- Le oscillazioni termiche esterne influiscono significativamente sulle condizioni interne essendo la temperatura esterna più vicina a quella interna di quanto non avvenga in inverno;

- Gli apporti interni (persone, macchine, impianto d'illuminazione...) sono a carattere fortemente transitorio e ricoprono un ruolo significativo nel computo globale dei carichi termici

Perciò si necessita di un metodo che tenga conto delle variazioni orarie di temperatura esterna, di radiazione solare e degli apporti interni. Si ricorre al *metodo di Carrier*, per mezzo del quale è possibile determinare il carico termico estivo  $Q_S$  come la somma di cinque componenti:

$$Q_S = \sum_j U_j S_j \Delta\theta_{eq,j} + \sum_v U_v S_v (\theta_e - \theta_i) + \sum_v S_v I_{x,v} f_{a,v} C_s + nV c_p \rho (\theta_e - \theta_i) + \sum_k f_{a,k} Q_{s,k} \quad (2.15)$$

Dove:

- $U_j$ : trasmittanza della j-ma parete opaca esterna, [W/(m<sup>2</sup> K)];
- $S_j$ : superficie della j-ma parete opaca esterna, [m<sup>2</sup>];
- $\theta_i$ : temperatura interna, [°C];
- $I_{x,v}$ : radiazione solare massima giornaliera sulla v-ma superficie vetrata, [W/m<sup>2</sup>];
- $\theta_e$ : temperatura oraria esterna, [°C];
- $S_v$ : superficie della v-ma vetrata, [m<sup>2</sup>];
- $U_v$ : trasmittanza della v-ma finestra, [W/(m<sup>2</sup> K)];
- $f_{a,v}$ : fattore di accumulo termico per la v-ma finestra;
- $C_s$ : fattore di schermatura della generica v-ma finestra;
- $n$ : numero di ricambi orari del generico ambiente;
- $V$ : volume interno dell'ambiente considerato, [m<sup>3</sup>];
- $Q_{s,k}$ : k-ma sorgente interna di calore sensibile (generalmente 4 W/m<sup>2</sup>), [W];
- $f_{a,k}$ : fattore di accumulo per la k-ma sorgente interna di calore sensibile;
- $\Delta\theta_{eq,j}$ : è la differenza di temperatura equivalente per la generica parete, [°C].

Conoscendo la geometria dell'edificio, la struttura delle pareti e delle finestre si possono calcolare le trasmittanze come descritto nel paragrafo precedente.

Per quanto riguarda il primo termine, si deve prima calcolare le masse frontali delle pareti affacciate verso l'esterno in funzione dello spessore e della massa volumica degli strati che compongono i muri:

$$m_f = \sum_q s_q \rho_q \quad (2.16)$$

Si sommano le masse frontali di tutte le pareti e in funzione di tale valore, della latitudine del sito, dell'esposizione delle pareti, e del colore, si trovano tabellati i valori di  $\Delta\theta_{eq,j}$  in funzione dell'ora.

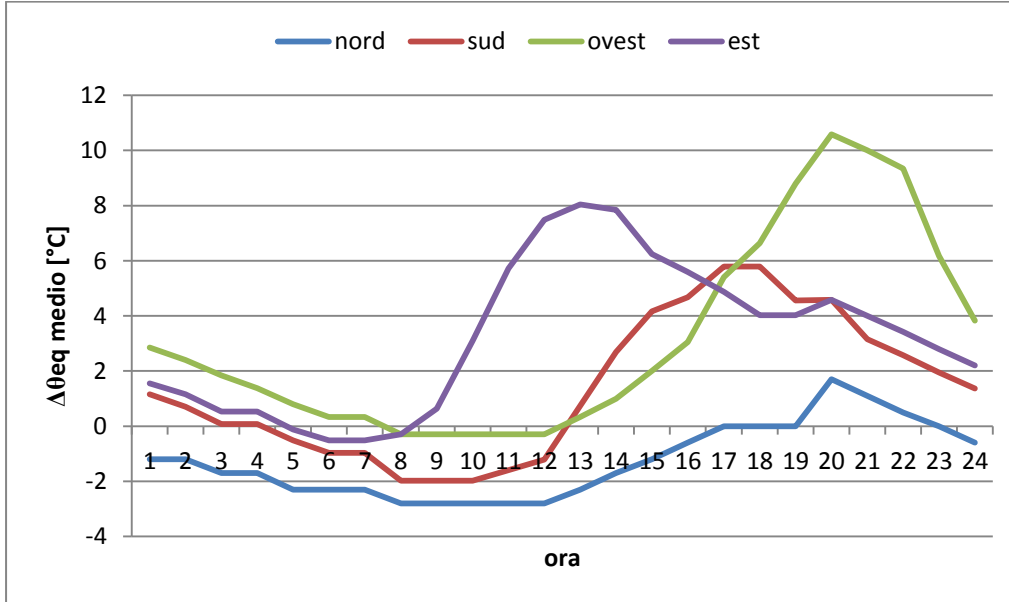


Figura 2.5 Andamento orario del  $\Delta\theta_{eq}$  medio.

Nel secondo termine, per determinare la temperatura esterna oraria sono necessari la temperatura esterna massima  $\theta_{e,max}$ , la differenza di temperatura esterna massima  $\Delta\theta_{e,max}$  e il fattore di temperatura orario  $p$ :

$$\theta_e = \theta_{e,max} + p\Delta\theta_{e,max} \quad (2.17)$$

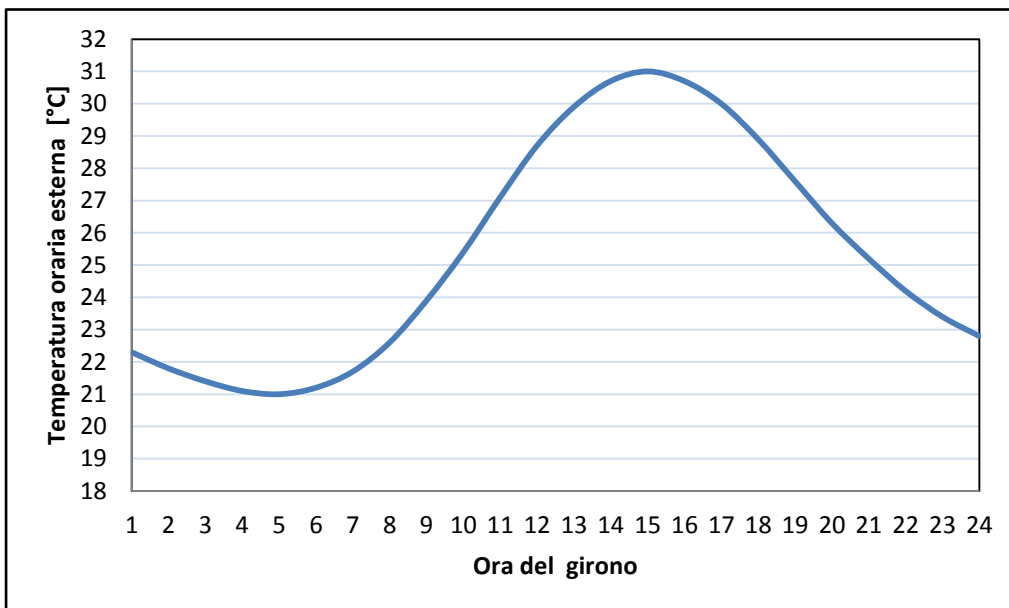


Figura 2.6 Andamento della temperatura esterna oraria.

Per il terzo termine si deve calcolare precedentemente la massa efficace della struttura in funzione delle masse frontali e superfici di pareti esterne e interne, delle masse frontali e aree dei muri confinanti con altri ambienti (moltiplicati per il fattore 0,5 poiché è impiegare solo metà della loro inerzia) e dell'area in pianta, secondo la formula:

$$M_e = \frac{\sum_i m_{f,i} A_i + 0.5 \cdot \sum_j m_{f,j} A_j}{A_{pianta}} \quad (2.18)$$

In seguito, in funzione di tale valore e dell'orientazione delle finestre, si trovano tabellati i valori del fattore di accumulo per la radiazione solare attraverso vetro  $fa,v$ .

In riferimento al quinto termine, sono elencati i valori del fattore di accumulo  $fa,k$  per la k-esima generica sorgente interna di calore sensibile, in funzione della durata in ore e della massa efficace dell'ambiente. Il valore del fattore di accumulo è definito dall'ora in cui si attiva il carico termico sensibile (ora 0). Tale parametro è, poi, moltiplicato per  $Q_{s,k}$  il quale è pari al prodotto tra il carico sensibile ( $4 \text{ W/m}^2$ ) e l'area dell'ambiente in esame.

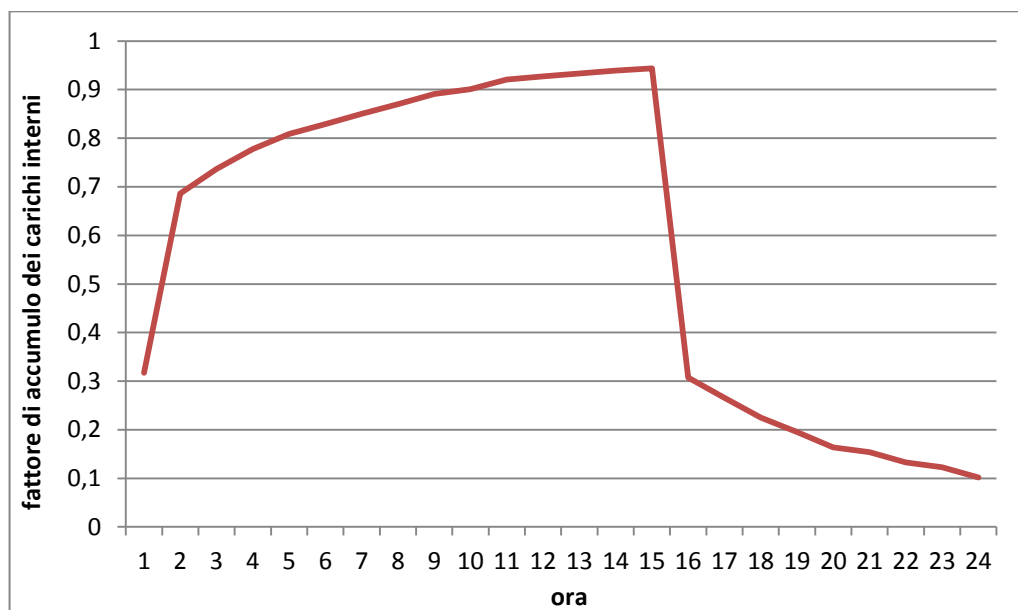
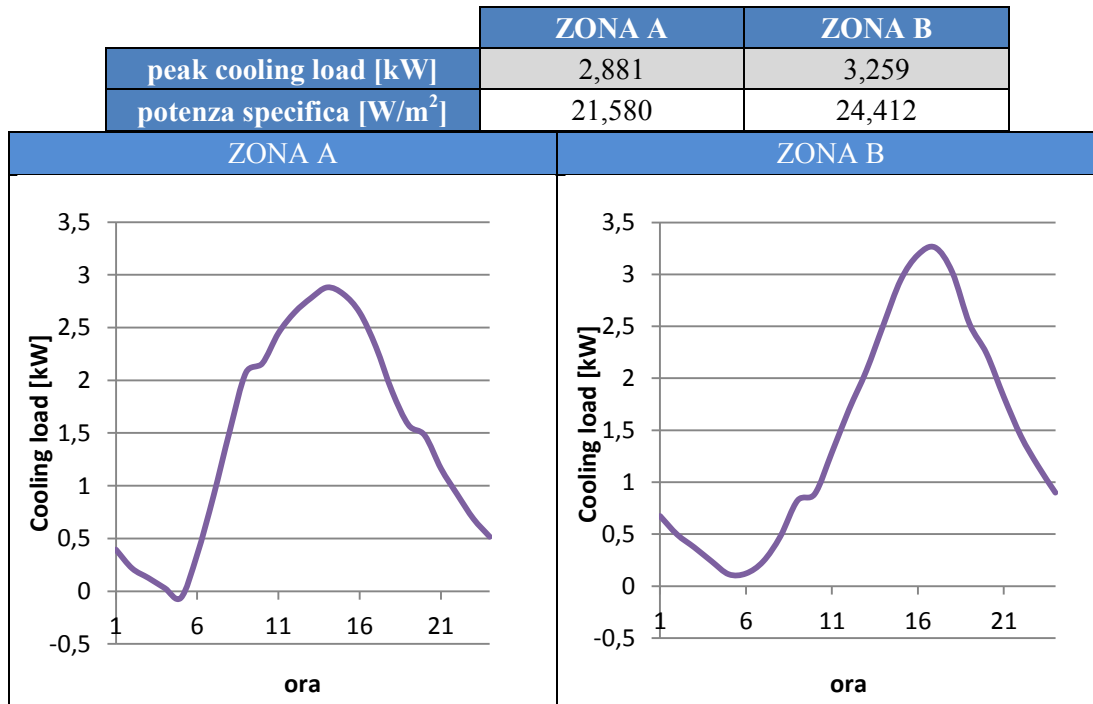


Figura 2.7 Profilo orario dei fattori di accumulo per un carico interno della durata di 14 ore.

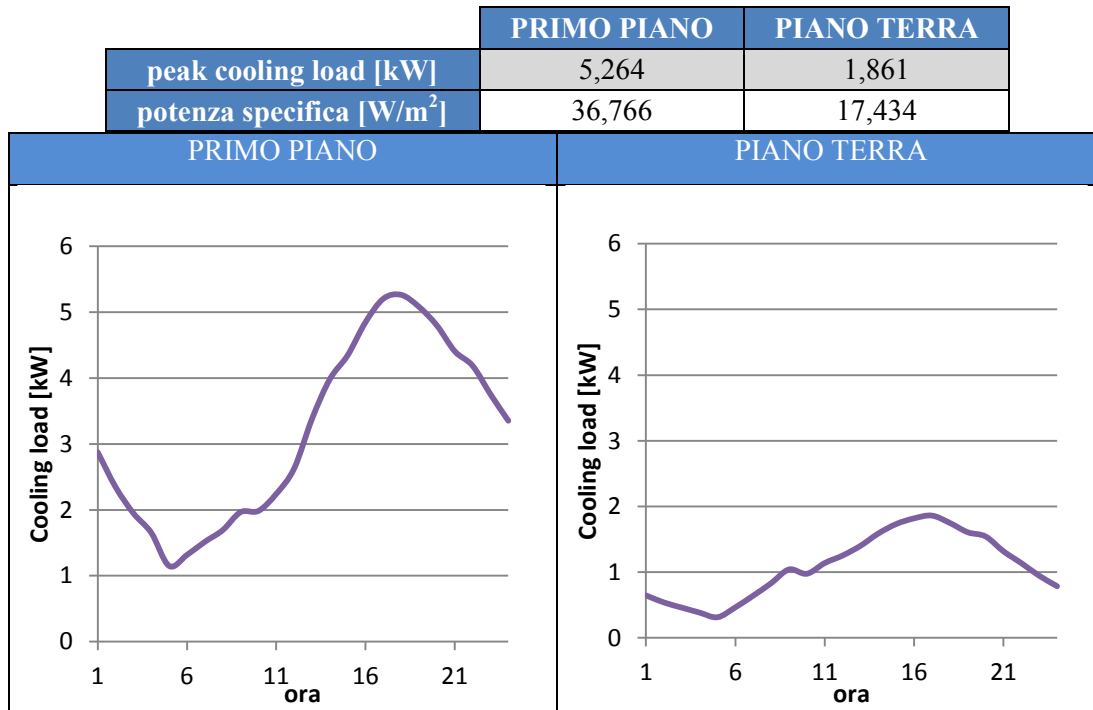
Per quanto riguarda il caso studio plurifamiliare, ogni singolo piano è stato suddiviso in due aree: zona A e zona B, entrambe comprendenti un appartamento con due camere e uno con tre camere. In tabella 2-13 sono presentati i valori di potenza frigorifera di progetto e di potenza specifica relativi alle due zone:

Tabella 2-13 Valore massimo e andamento orario della potenza frigorifera nella palazzina.



L'utenza monofamiliare è stata divisa in due zone: piano terra e primo piano. In tabella 2-14 sono presentati i valori di potenza di progetto e di potenza specifica relativi ai due piani:

Tabella 2-14 Valore massimo e andamento orario della potenza frigorifera nella villetta.



## 2.2.2 Fabbisogno elettrico

Il calcolo del fabbisogno elettrico in ambito residenziale è stato sviluppato partendo dai dati di una campagna di rilevamento, denominata progetto MICENE, condotta nel periodo 2000-2002 da eERG - end-use Energy Efficiency Research Group - del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano, in collaborazione con la Servizi Territorio SRL. La campagna di rilevamento ha monitorato i consumi di 110 abitazioni nel territorio italiano, con intervallo di rilevazione di 10 minuti e per un periodo minimo di 3 settimane. L'elaborazione dei dati ha portato alla creazione di profili di carico medi giornalieri ed alla determinazione dei fabbisogni energetici medi di vari elettrodomestici.

I dati MICENE sono resi disponibili per i fabbisogni elettrici relativi all'uso di lavastoviglie, lavatrici, frigoriferi, congelatori, pc, televisore, video ed illuminazione, ma poichè tali dati sono un po' datati, essendo passati più di 10 anni dal loro campionamento, è stato deciso di attualizzarli impiegando degli elettrodomestici maggiormente efficienti e installando luci a LED.

Per quanto riguarda frigoriferi e congelatori, è stata ipotizzata la sostituzione degli apparecchi rilevati con altri ad alta efficienza energetica, funzionanti in AC, il cui consumo massimo specifico è stato assunto in modo da poter rientrare nella classe A+++, secondo la classificazione europea avviata per gli apparecchi elettrici.

**Tabella 2-15 Valori dei consumi degli apparecchi per il freddo.**

FRIGORIFERO			
	Consumo annuo		Miglioramento
Dati MICENE	567,62	kWh/anno	
Apparecchi ad alta efficienza	304,65	kWh/anno	46%
CONGELATORE			
	Consumo annuo		Miglioramento
Dati MICENE	499,18	kWh/anno	
Apparecchi ad alta efficienza	267,92	kWh/anno	46%

Confrontando le ipotesi compiute con i dati MICENE, è stata stimata la potenza media oraria negli altri casi, semplicemente moltiplicando i valori della potenza oraria per il fattore migliorativo e successivamente è stato stimato il fabbisogno annuo per gli altri scenari.

Per quanto riguarda l'impianto d'illuminazione è stato deciso di sostituire le vecchie lampade ad incandescenza e a fluorescenza con quelle a LED e, per stimarne la potenza assorbita, si sono considerati i dati del Progetto MICENE riguardanti l'impianto di illuminazione.

Detta  $P_{ill}$  [W] la potenza media oraria per sistemi tradizionali d'illuminazione e  $\epsilon_{ill}$  [lm/W] l'efficienza media delle tecnologie delle lampade ad incandescenza, alogene e fluorescenti, è stato stimato il flusso luminoso medio  $F$  [lm]:

$$F = P_{ill} \epsilon_{ill} \quad (2.19)$$

Noto il flusso luminoso e ipotizzando un'efficienza dei LED di 100 lm/W, è stata valutata la potenza media assorbita per tale tecnologia:

$$P_{LED} = \frac{F}{\epsilon_{LED}} \quad (2.20)$$

Ora, considerando che una lampada a LED solitamente è composta da: una stringa di LED, un driver per il controllo della tensione DC/DC e un power supply per la conversione AC/DC, è possibile determinare la potenza assorbita da tutti i componenti mediante l'equazione 2.21:

$$P_{assorbita} = \frac{P_{LED}}{\eta_{AC/DC} \eta_{DC/DC}} \quad (2.21)$$

I rendimenti degli elementi elettronici sono stati ricavati da prodotti in commercio e sono pari a 0,88 e 0,85, rispettivamente per il convertitore di potenza e per il driver.

I dati sono riportati nella tabella 2-16:

**Tabella 2-16 Valori di efficienza luminosa per l'impianto di illuminazione.**

	Efficienza luminosa			Efficienza luminosa	
Incandescenza	14,5	[lm/W]	LED	100	[lm/W]
Alogene	18,03	[lm/W]		Efficienza elettrica	
Fluorescenti	73	[lm/W]		Power supply AC/DC	0,88
Media	35,17	[lm/W]		LED Driver DC/DC	0,85

Si sono, quindi, costruiti profili di carico annuali, ora per ora, dai quali sono stati calcolati i fabbisogni elettrici annuali. I risultati per il caso di alta efficienza e le lampade a LED sono riportati nella tabella 2-17:



**Tabella 2-17 Valori dei consumi energetici degli elettrodomestici riadattati partendo da quelli del progetto MICENE.**

	N° APPARECCHI	CONSUMI ELETTRICI [kWh/anno]
LAVATRICE	1	249,24
LAVASTOVIGLIE	1	405,88
FRIGORIFERO	1	304,66
CONGELATORE	1	267,92
PC	2	251,67
TV	2	248,01
VIDEO	1	70,265
ILLUMINAZIONE	1	198,80
<b>TOTALE</b>		<b>2681,74</b>

Per gli altri principali elettrodomestici quali phon, forno elettrico, aspirapolvere, ferro da stiro e piano di cottura a induzione, sono stati ipotizzati dei tempi di utilizzo e creati dei profili spot settimanali per simulare un utilizzo realistico delle apparecchiature.

Il consumo energetico è stato stimato moltiplicando i tempi di utilizzo per le potenze medie di apparecchi disponibili sul mercato, e i risultati sono proposti nella tabella 2-18:

**Tabella 2-18 Valori dei consumi energetici per gli elettrodomestici non catalogati dal progetto MICENE.**

	N° APPARECCHI	CONSUMI ELETTRICI [kWh/anno]
PHON	1	146
FERRO DA STIRO	1	157
FORNO ELETTRICO	1	174
ASPIRAPOLVERE	1	267,92
PIANO COTTURA A INDUZIONE	2	1186,25
<b>TOTALE</b>		<b>1955,92</b>

Per quanto riguarda la preparazione di acqua calda sanitaria si è deciso di installare uno scaldabagno a pompa di calore (il modello commerciale assunto come riferimento è *Air Combo 100* della Rossato Group s.r.l<sup>1</sup>): in un apparecchio di questa tipologia l'acqua accumulata nel serbatoio viene riscaldata da una pompa di calore aria-acqua che impiega

<sup>1</sup> Nelle simulazioni descritte è stato implementato un modello dell'impianto basato a volte su macchinari e componenti esistenti sul mercato. I relativi dati tecnici sono ricavati dalle schede tecniche fornite nei siti ufficiali dei produttori. Tali apparecchi sono assunti come riferimento e non rappresentano in nessun modo l'oggetto

come sorgente fredda l'aria prelevata all'interno dell'ambiente di installazione. Nel caso in cui la potenza sviluppata dalla pompa di calore non fosse sufficiente è presente una resistenza elettrica integrativa che permette di raggiungere il livello di temperatura desiderato per l'acqua sanitaria.

Tabella 2-19 Scheda tecnica scaldabagno Air Combo 100 della Rossato Group s.r.l. [19]

Grandezza	u.m.	AIR COMBO 100
Capacità nominale serbatoio	l	100
Potenza termica	W	900
Potenza elettrica assorbita	W	300
COP		3
Tempo di riscaldamento	h:m	05:22
Temperatura massima acqua	°C	56
Temperatura minima acqua	°C	10
Tipologia di fluido refrigerante		R134a
Potenza resistenza elettrica	W	1.200
Portata d'aria	m <sup>3</sup> /h	80

### ***Fabbisogno elettrico per la produzione di ACS***

Per la determinazione del fabbisogno medio di acqua calda sanitaria si è fatto riferimento all'appendice E della norma UNI 9182 nella quale sono tabellati i valori dei fabbisogni giornalieri di acqua calda a 40°C riferiti a persona o ad apparecchio. Secondo questi dati è stato creato il profilo orario di utilizzo giornaliero, illustrato in figura 2.8:

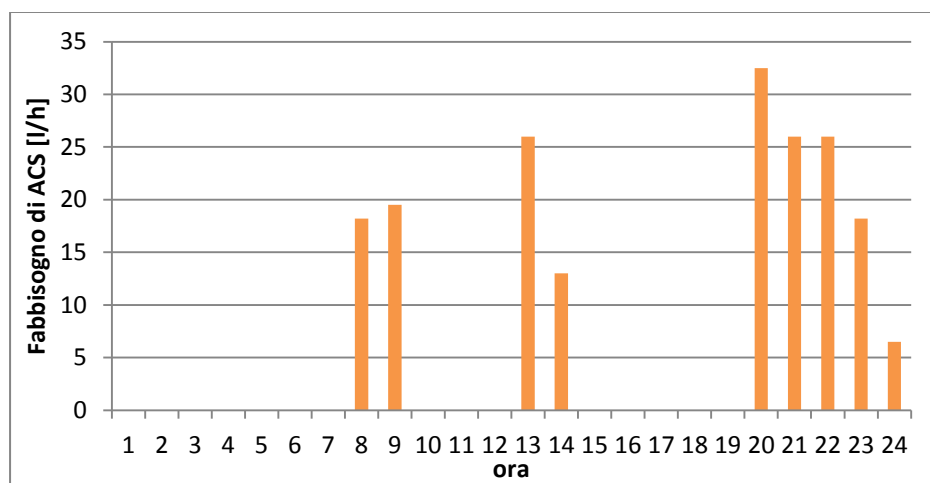


Figura 2.9 Profilo orario del fabbisogno di acqua calda sanitaria.

dell'analisi. Le prestazioni indicate riguardano il modello nel suo complesso e non i singoli componenti e in nessun caso i risultati ottenuti sono applicabili ai prodotti commerciali indicati.

Successivamente è stato realizzato un modello dinamico per mezzo del software commerciale TRNSYS per verificare il funzionamento dello scaldabagno, il numero di accensioni, la potenza era necessaria e gli interventi richiesti dalla resistenza elettrica integrativa. Per modellare lo scaldabagno è stata utilizzata la *type 534* che simula il comportamento di un serbatoio cilindrico verticale contenente acqua, dotato di scambiatori di calore immersi che innalzano la temperatura del fluido contenuto nel volume tecnico. Il modello del serbatoio schematizza l'accumulo dividendolo in nodi isotermi di temperatura e l'operatore può controllare il grado di stratificazione nell'accumulo agendo sul numero degli stessi. Tutti i nodi in cui l'accumulo è idealmente suddiviso presentano lo stesso volume e vengono considerati isotermi in ogni step della simulazione. Esso interagisce con i nodi attigui mediante flussi di energia termica e flussi di massa. L'utente ha la possibilità di modellare quattro diversi tipi di scambiatore di calore immersi nell'accumulo (oppure anche nessuno), altrimenti, com'è stato svolto nella simulazione descritta, è possibile implementare dei flussi di calore ausiliari ad ogni nodo. Nel caso discusso il serbatoio è stato diviso in cinque nodi e sono stati considerati: il nodo 3 al quale è fornita la potenza termica nominale erogabile dal circuito funzionante a pompa di calore diminuita di una percentuale pari al 5% al fine di includere le perdite di trasmissione di calore tra lo scambiatore di calore e il fluido. Al nodo 2, invece, si è imposto il flusso di potenza termica sviluppato dalla resistenza elettrica integrativa, anch'esso ridotto del 5% per i medesimi motivi.

Tramite file esterno è stato possibile indicare le temperature di inizio simulazione dei 5 nodi in cui è stato suddiviso l'accumulo termico e successivamente, nelle sezioni relative ai parametri e agli input, sono stati inseriti i valori di:

- temperatura dell'ambiente in cui è installato il dispositivo;
- numero di ingressi e uscite (nel caso in esame si hanno un ingresso e una uscita);
- portata di acqua entrante e uscente (derivano dal profilo di ACS determinato in precedenza).

Per mantenere la temperatura dell'acqua superiore al valore di 40°C, che rappresenta la soglia limite per il corretto funzionamento della preparazione dell'acqua calda sanitaria, sono stati implementati due controlli differenziali per mezzo delle *type 2a*. Il primo verifica che la temperatura dell'acqua al nodo 1 rientri nel range di  $50 \pm 5^\circ\text{C}$ , regolando l'accensione e lo spegnimento della pompa di calore, mentre il secondo monitora la temperatura al nodo 2 in modo che sia compresa tra i 30°C e i 40°C, controllando l'accensione e lo spegnimento della resistenza elettrica integrativa.

Di seguito si riporta il modello utilizzato:

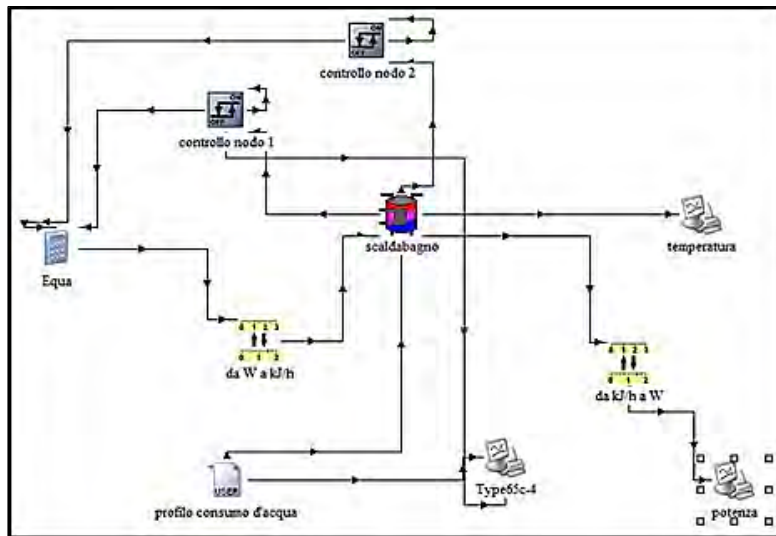


Figura 2.10 Modello utilizzato per la simulazione del funzionamento dello scaldabagno a pompa di calore.

La durata della simulazione dinamica è stata impostata pari ad una settimana durante la quale sono state analizzate la temperatura di erogazione oraria, il numero di accensioni dello scaldabagno, e quindi la potenza termica erogata dallo stesso. Gli andamenti sono riportati nelle figure 2.11 e 2.12:

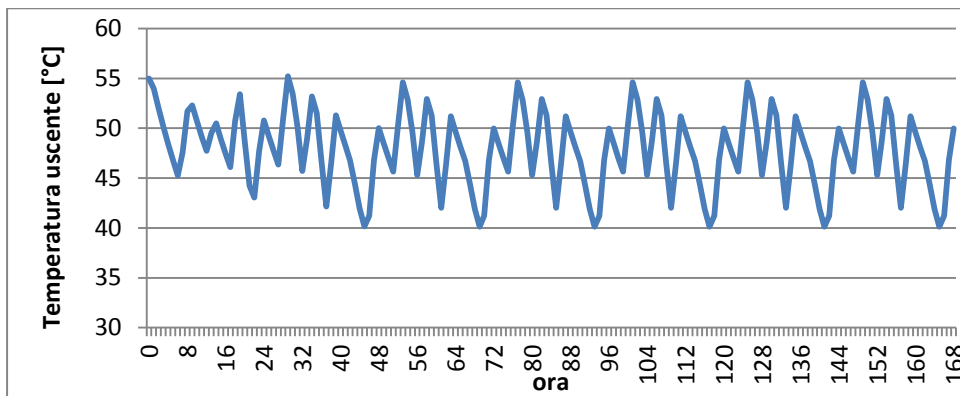


Figura 2.11 Andamento della temperatura uscente dallo scaldabagno.

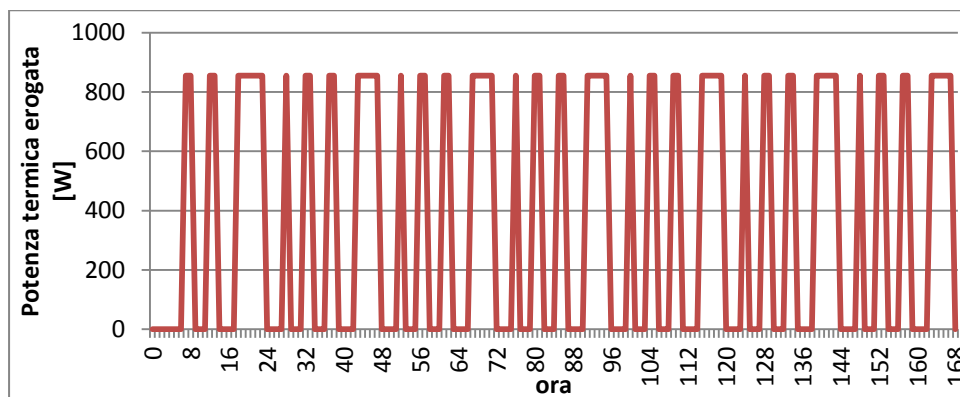


Figura 2.12 Andamento della potenza termica erogata dal condensatore del circuito a pompa di calore.

Come è possibile vedere in figura 2.12, la resistenza elettrica non entra mai in funzione perché la pompa di calore è in grado di soddisfare la richiesta del fabbisogno di acqua calda sanitaria evitando che la temperatura sia inferiore ai 40°C.

Conoscendo l'andamento della potenza termica e del COP del dispositivo si può individuare il trend della potenza elettrica assorbita:

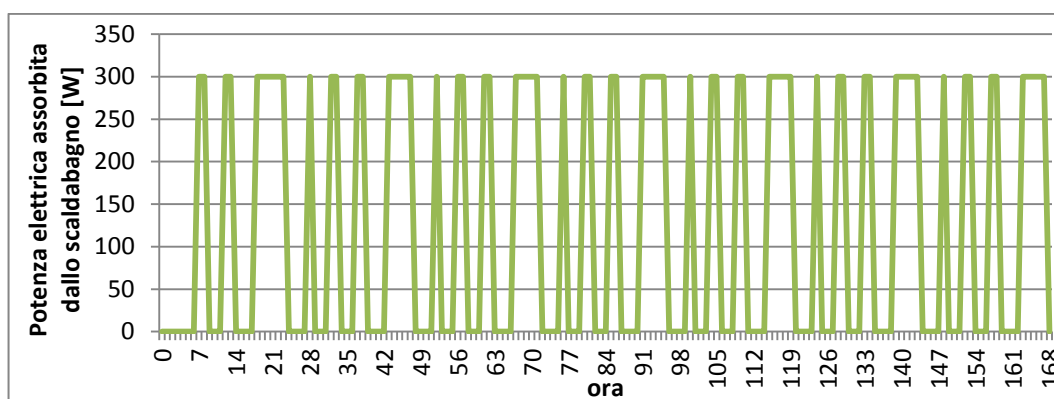


Figura 2.13 Potenza elettrica assorbita dallo scaldabagno a pompa di calore.

Da tali valori è possibile trovare il fabbisogno elettrico annuo, il quale è pari a 1101.3 kWh.

### ***Fabbisogno elettrico per la ventilazione meccanica***

Per la ventilazione meccanica è stata calcolata la portata di ventilazione: prima con la norma UNI 15251, dalla quale risulta una portata di quasi  $0,9 \text{ h}^{-1}$ , e poi con la norma UNI 12831, la quale permette di considerare nel calcolo la presenza di un recuperatore di calore e risulta una numero di ricambi ora pari a  $0,52 \text{ h}^{-1}$ . A causa dell'evidente differenza di risultati si è deciso di delineare un profilo di ventilazione orario in linea con i valori medi che si attestano nell'edilizia e che includa la presenza e l'attività degli occupanti negli ambienti e il funzionamento dello scaldabagno, il quale quando è in funzione richiede  $80 \text{ m}^3/\text{h}$  di aria. Il profilo orario ipotizzato è presentato in figura 2.13:

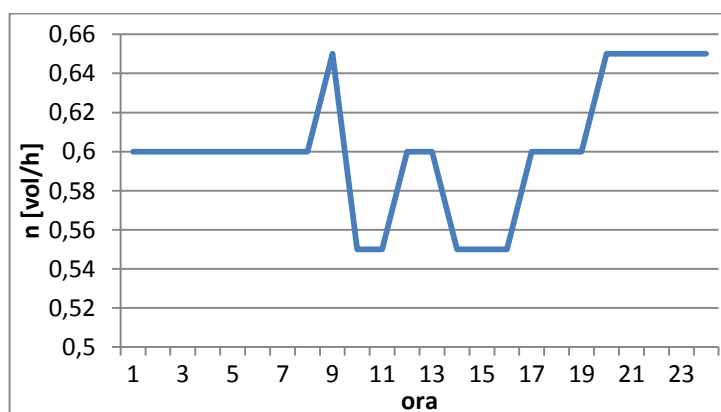


Figura 2.14 Profilo orario della portata per VMC.

Sapendo la portata e la curva della potenza dei ventilatori è possibile stabilire il fabbisogno elettrico annuo, il quale è pari a 706,274 kWh<sub>el</sub>.

Calcolati i fabbisogni elettrici annui di tutti gli elettrodomestici presenti nella abitazione, è possibile sommarli per determinare il fabbisogno elettrico annuo totale esclusa la quota relativa alla pompa di calore e i suoi ausiliari. Il valore complessivo è 6455,234 kWh<sub>el</sub>.

## 2.3 Dimensionamento sistema TABS

Per ognuno dei due casi descritti, il sistema TABS è stato dimensionato secondo la norma ISO 11855 parte 2 e parte 4 e le caratteristiche tecniche delle tubazioni utilizzate sono:

**Tabella 2-20 Caratteristiche tecniche del sistema TABS.**

Grandezza	Valore	u.m.
W(passo)	0,15	m
D <sub>ext</sub>	0,02	m
spessore	0,002	m
λ <sub>pipe</sub> (λ <sub>r</sub> )	0,35	W/mK

Per determinare il coefficiente di trasmissione termica globale  $K_H$  è stata utilizzata la formula presente nell'appendice A.3 "Heating and cooling surfaces embedded in floors, ceilings and walls":

$$K_H = K_H(\Delta R_\alpha, R_{\lambda,B}) = \frac{K_{H,Floor}}{1 + \frac{\Delta R_\alpha + R_{\lambda,B}}{R_{\lambda,B}^*} \left( \frac{K_{H,Floor}}{K_{H,Floor}^*} - 1 \right)} \quad (2.22)$$

Dove:

- $K_H(\Delta R_\alpha, R_{\lambda,B})$  è il coefficiente di trasmissione globale del sistema di riscaldamento/raffrescamento in funzione della reale resistenza termica della copertura  $R_{\lambda,B} \geq 0$  e del rispettivo valore della resistenza termica addizionale  $\Delta R_\alpha$ .
- $K_{H,Floor}$  è il coefficiente di trasmissione globale dello stesso sistema relativo alla resistenza termica di copertura  $R_{\lambda,B} = 0$ .
- $K_{H,Floor}^*$  è il coefficiente di trasmissione globale dello stesso sistema relativo alla resistenza termica di copertura  $R_{\lambda,B}^* > R_{\lambda,B}$ . Per  $R_{\lambda,B}^*$  si applica il valore di 0,15 m<sup>2</sup>K/W.

Gli ultimi due valori elencati sono ottenuti dall'equazione (2.23) presente nell'appendice A 2.2 "Systems with pipes inside the screed" della medesima norma:

$$K_H = B \cdot a_B \cdot a_w^{m_w} \cdot a_U^{m_U} \cdot a_D^{m_D} \quad (2.23)$$

Dove:

- $B = 6.7 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $a_B$  è il fattore relativo la superficie di copertura in accordo con l'equazione (2.24):

$$a_B = \frac{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_{u,0}}{\lambda_{u,0}}}{\frac{1}{\alpha} + \frac{s_{u,0}}{\lambda_E} + R_{\lambda,B}} \quad (2.24)$$

- $\alpha$  è la trasmittanza in funzione dell'applicazione:

**Tabella 2-21 Valori di  $\alpha$  in funzione dell'applicazione richiesta. [20]**

Case of application	$\alpha$ W/(m <sup>2</sup> K)	$\Delta R_\alpha = 1/\alpha - 1/10.8$ m <sup>2</sup> ·K/W
Floor heating	10.8	0.000 0
Floor cooling	6.5	0.061 3
Wall heating	8	0.032 4
Wall cooling	8	0.032 4
Ceiling heating	6.5	0.061 3
Ceiling cooling	10.8	0.000 0

- $\lambda_{u,0} = 1 \text{ W/mK}$ ;
  - $s_{u,0} = 0.045 \text{ m}$ ;
  - $R_{\lambda,B}$  è la resistenza termica della copertura del pavimento ed è pari a  $0 \text{ m}^2\text{K/W}$  per il calcolo di  $K_{H,Floor}$  e  $0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$  per  $K^*_{H,Floor}$  ;
  - $\lambda_E$  è la conduttività termica del materiale adiacente ai tubi, in tal caso si tratta di cemento.
- $a_w$  è il fattore relativo al passo fra i tubi come in accordo con la tabella 2-22 ed è in funzione di  $R_{\lambda,B}$ :

**Tabella 2-22 Valori del fattore  $a_w$ . [20]**

$R_{\lambda,B}$ (m <sup>2</sup> K/W)	0	0.05	0.10	0.15
$a_w$	1.23	1.188	1.156	1.134

- $a_U$  è il coefficiente riguardante la copertura come in accordo con la tabella 2-23, ed è in funzione del passo fra i tubi  $W$  e della resistenza  $R_{\lambda,B}$ :

Tabella 2-23 Valori del fattore  $a_U$ . [20]

$R_{\lambda,B}$ (m <sup>2</sup> K/W)	0	0.05	0.10	0.15
W (m)	Covering factor $a_U$			
0.05	1.069	1.065	1.043	1.037
0.075	1.066	1.053	1.041	1.035
0.1	1.063	1.05	1.039	1.0335
0.15	1.057	1.046	1.035	1.0305
0.2	1.051	1.041	1.0315	1.0275
0.225	1.048	1.038	1.0295	1.026
0.3	1.0395	1.031	1.024	1.021
0.375	1.03	1.0221	1.018	1.015

- $a_D$  è il fattore concernente il diametro esterno dei tubi come in accordo con la tabella 2-24, ed è in funzione del passo fra i tubi  $W$  e della resistenza  $R_{\lambda,B}$ :

Tabella 2-24 Valori del fattore  $a_D$ . [20]

$R_{\lambda,B}$ (m <sup>2</sup> K/W)	0	0.05	0.10	0.15
W (m)	Pipe external diameter factor $a_D$			
0.05	1.013	1.013	1.012	1.011
0.075	1.021	1.019	1.016	1.014
0.1	1.029	1.025	1.022	1.018
0.15	1.04	1.034	1.029	1.024
0.2	1.046	1.04	1.035	1.03
0.225	1.049	1.043	1.038	1.033
0.3	1.053	1.049	1.044	1.039
0.375	1.056	1.051	1.046	1.042

- $m_W = 1 - \frac{W}{0.075}$ , dove  $W$  deve essere compreso tra 0.05 m e 0.375 m;
- $m_U = 100 (0.045 - s_U)$ , dove  $s_U$  è lo spessore dello strato sopra i tubi e deve essere maggiore di 0.01 m;
- $m_D = 250 (D - 0.020)$ , dove  $D$  è il diametro esterno dei tubi e deve essere compreso tra 0.008 m e 0.03 m.



Ottenuto  $K_H = K_H(\Delta R_\alpha, R_{\lambda,B})$  dall'equazione (2.22) si determinata la portata di progetto  $\dot{m}_{H,sp}$  secondo il modello di resistenze contenuto nell'appendice B della norma ISO 11855-4 e appendice B.2 della norma ISO 11855-2:

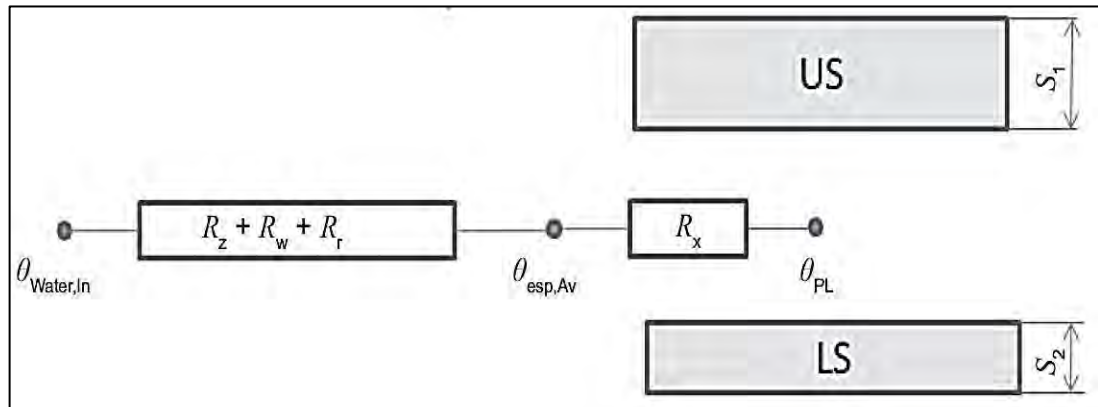


Figura 2.15 Modello di resistenze sistema TABS. [7]

$R_z$  è la resistenza di Fiktive tra la temperatura di alimentazione e la temperatura media:

$$R_z = \frac{1}{2 \dot{m}_{H,sp} c_W} \quad (2.25)$$

$R_w$  è la resistenza tra il fluido e la parete della tubazione:

$$R_w = \frac{W^{0.13}}{8\pi} \left( \frac{d_a - 2s_r}{\dot{m}_{H,sp} L_R} \right)^{0.87} \quad (2.26)$$

$R_r$  è la resistenza relativa la parete della tubazioni:

$$R_r = \frac{W \ln\left(\frac{d_a}{d_a - 2s_r}\right)}{2 \pi \lambda_r} \quad (2.27)$$

$R_x$  è la resistenza tra la temperatura esterna la tubazione e la temperatura media dello strato conduttivo (in tal caso lo strato di cemento):

$$R_x = \frac{W \ln\left(\frac{W}{\pi d_a}\right)}{2 \pi \lambda_E} \quad (2.28)$$

$R_i$  è la resistenza dello strato conduttivo tra il piano delle tubazioni e l'ambiente da riscaldare/raffrescare:

$$R_i = \frac{1}{U_i} \quad (2.29)$$

Le dimensioni e altri parametri rilevanti sono descritti per mezzo della figura 2.15:

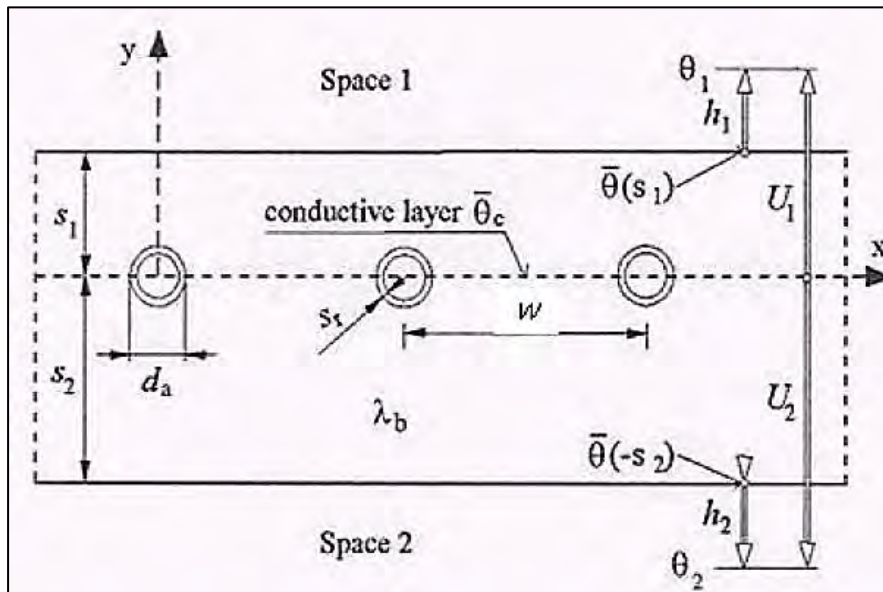


Figura 2.16 Dimensioni della struttura di un sistema TABS. [20]

Essendo a conoscenza che  $K_H(\Delta R_{\alpha}, R_{\lambda, B})$  è pari all'inverso della somma delle resistenze appena elencate, si determina la portata di progetto, e successivamente per la legge fondamentale del trasferimento di calore ( $q = K_H(\Delta R_{\alpha}, R_{\lambda, B})\Delta\theta_{ml}$ ) si ottiene per iterazione la temperatura di mandata di progetto.

Per l'utenza multifamiliare si è ipotizzato un sistema TABS a soffitto con flusso di calore prevalentemente verso il basso per esigenze d'isolamento acustico tra i diversi appartamenti, mentre per il caso studio monofamiliare è stato dimensionato il sistema in modo tale che:

- il solaio interpiano emetta calore sia verso il basso che verso l'alto (anche se, in quest'ultimo caso, è presente un leggero isolamento per ovviare al problema del rumore);
- il pavimento a terra abbia la possibilità di emettere il flusso termico verso l'alto;
- il soffitto del primo piano permetta la cessione/asportazione di calore rispetto l'ambiente sottostante, ovvero il primo piano.

I risultati ottenuti per l'utenza multifamiliare e per l'utenza monofamiliare sono presentati, rispettivamente, nella tabella 2-25 e 2-26:

Tabella 2-25 Risultati del dimensionamento del sistema TABS per l'utenza multifamiliare.

UTENZA MULTIFAMILIARE		
	Appartamento bicamera	Appartamento tricamera
$A_{UTILE} [m^2]$	65	68,5
$\dot{m}_{HEATING} [kg/h]$	852,06	897,94
$\dot{m}_{HEATING} [kg / m^2 h]$	13,11	13,11
$\theta_{mandata,H} [^{\circ}C]$	32	32
$\dot{m}_{COOLING} [kg/h]$	718,35	681,65
$\dot{m}_{COOLING} [kg / m^2 h]$	10,49	10,49
$\theta_{mandata,C} [^{\circ}C]$	18,5	18,5

Tabella 2-26 Risultati del dimensionamento del sistema TABS per l'utenza monofamiliare.

UTENZA MONOFAMILIARE			
	Pavimento a terra	Solaio interpiano	Soffitto primo piano
$A_{UTILE} [m^2]$	96,14	96,14	115,3
$\dot{m}_{HEATING} [kg/h]$	1000	1000	1600
$\dot{m}_{HEATING} [kg / m^2 h]$	10,40	10,40	13,87
$\theta_{mandata,H} [^{\circ}C]$	32	32	32
$\dot{m}_{COOLING} [kg/h]$	1000	1000	1400
$\dot{m}_{COOLING} [kg / m^2 h]$	10,40	10,40	12,14
$\theta_{mandata,C} [^{\circ}C]$	18	18	18

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE  
PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

## Capitolo 3

# SIMULAZIONE DINAMICA DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO

### 3.1 TRNSYS 16.1

Le analisi dinamiche del seguente elaborato sono state realizzate tramite il programma TRNSYS 16.1, software che lavora in regime dinamico e grazie al quale è possibile effettuare simulazioni in condizioni variabili del sistema edificio-impianto.

Tale strumento contiene diversi *tools*, ma nello studio svolto si farà riferimento solo a due di essi: TRNBUILD e SIMULATION STUDIO.

#### **TRNBUILD**

TRNBUILD è un programma che permette di modellare l'edificio da analizzare e imporre le condizioni di lavoro tramite una serie di input che devono essere definiti dall'utente. Tali input possono essere: dei valori costanti, delle *schedule* (definite su base oraria all'interno dello stesso software) o dei valori da terze parti che saranno definiti per mezzo di SIMULATION STUDIO.

Aprendo l'interfaccia ci si trova di fronte alla schermata di figura 3.1:

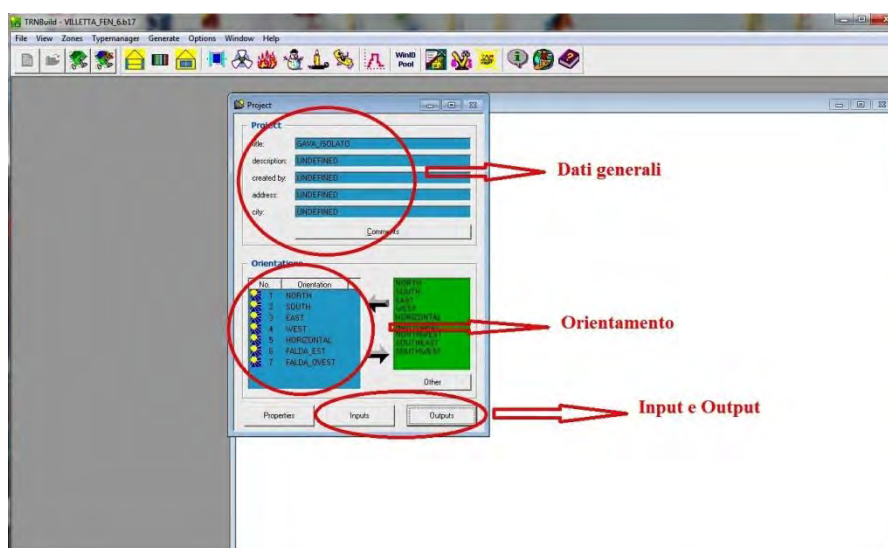


Figura 3.1 Schermata iniziale di TRNBUILD.

Tale finestra consente di definire i dati generali del progetto, quali: nome, descrizione, paese e indirizzo dell'edificio di cui si realizzerà la simulazione. E' inoltre possibile definire i tipi di orientamento che saranno utilizzati, in seguito, nella schermata riguardante la geometria delle zone. Oltre a quelli già presenti è possibile specificarne altri attraverso il tasto "Other". Per quanto riguarda le proprietà adottate, in mancanza di una definizione da parte dell'utente si utilizzano i valori di default.

Attraverso il tasto *Input* è possibile creare i dati d'ingresso del progetto, mentre grazie al tasto *Output* è consentito scegliere i dati che si desiderano in uscita dal programma, oltre a quelli di default.

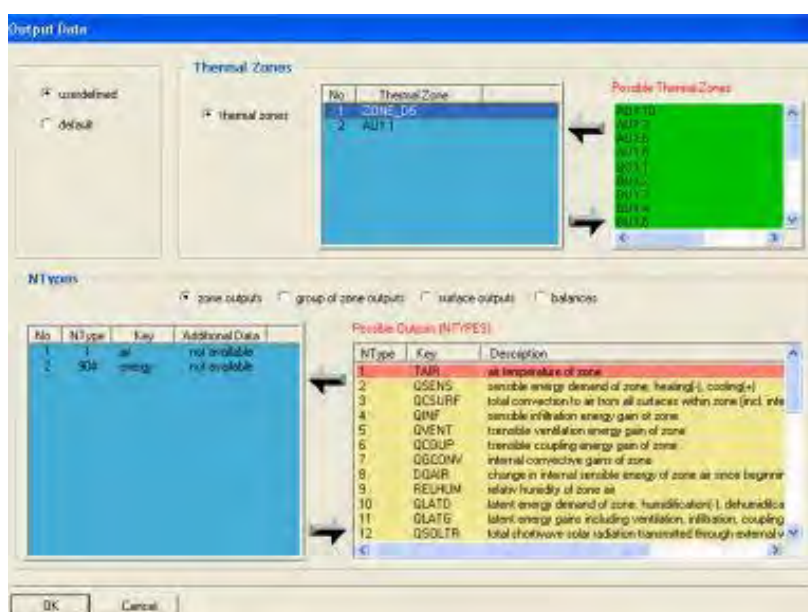


Figura 3.2 Finestra per la scelta degli output.

La schermata per la definizione delle ZONE permette di definire tutti i parametri dell'ambiente in analisi e i dati inseribili possono essere divisi in quattro categorie:

1. Dati iniziali;
2. Caratteristiche delle strutture opache;
3. Caratteristiche delle finestre;
4. Dati relativi agli impianti, quali le infiltrazioni d'aria attraverso l'involucro (*infiltration*), le condizioni di ventilazione naturale o meccanica (*ventilation*), dati sugli impianti di riscaldamento (*heating*) e raffreddamento (*cooling*) e i rispettivi sistemi di gestione e dati relativi agli apporti gratuiti (*gains*).

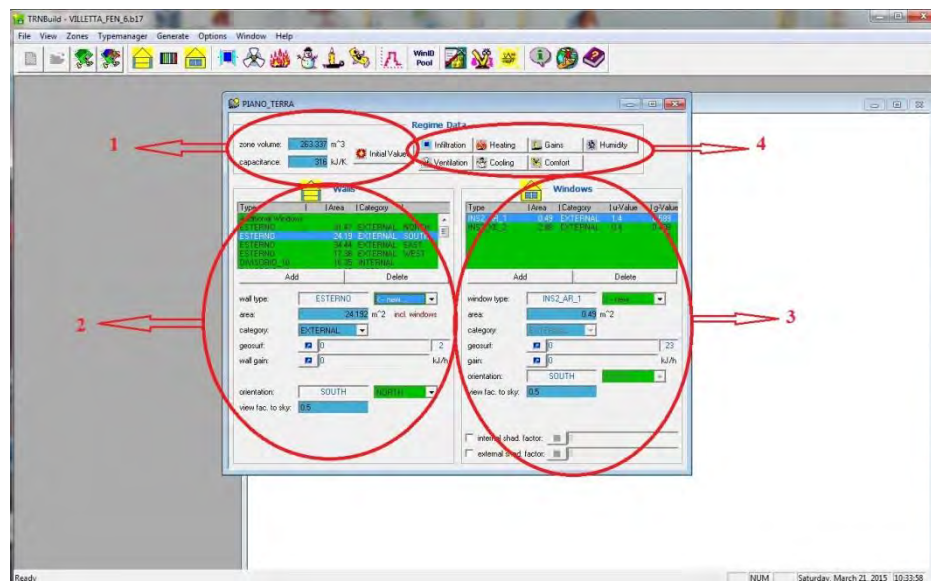


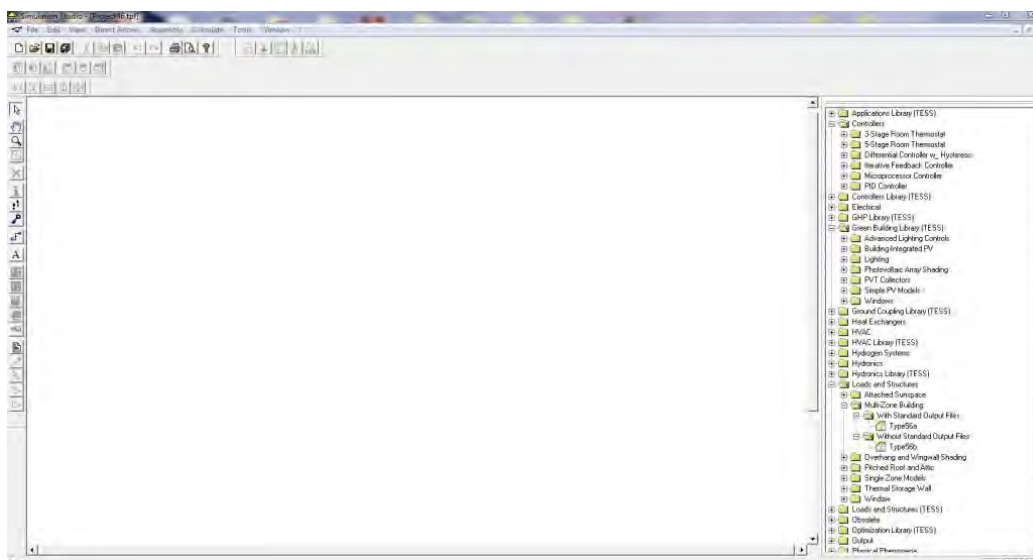
Figura 3.3 Schermata per la definizione della zona termica

1. I dati iniziali sono rappresentati da:
  - volume della zona [ $\text{m}^3$ ];
  - capacità termica [ $\text{kJ/K}$ ] calcolata in maniera automatica dal programma;
  - temperatura di inizio simulazione [ $^{\circ}\text{C}$ ];
  - umidità relativa d’inizio simulazione.
2. Nella parte relativa alla struttura, l’utente può aggiungere, modificare o eliminare le pareti della *thermal zone*. Cliccando il tasto *Add* è possibile inserire i muri che comporranno la zona. Per la selezione del muro è possibile visualizzare le strutture murarie disponibili dal menù a tendina situato nella parte destra della sezione oppure si definisce un nuovo tipo di parete selezionando *new* nel menù a tendina. Si apre una nuova finestra nella quale è possibile creare il nuovo muro aggiungendo i *layers* (che rappresentano i materiali di cui sarà composta la parete) desiderati, i quali possono, sia essere scelti dalla libreria di cui è in possesso *Trnsys*, sia essere creati, noti conducibilità [ $\text{kJ/h m K}$ ], densità [ $\text{kg/m}^3$ ] e capacità [ $\text{kJ/kg K}$ ] del materiale. Una volta selezionato la tipologia di muro occorre definire la superficie, la categoria (ovvero se si tratta di muro esterno, interno, confinante con un’altra zona, o di bordo) e infine è necessario specificare l’orientazione.
3. Le finestre possono essere connesse ad un muro oppure aggiunte separatamente. Anche in questo caso, come per le pareti, cliccando il tasto *Add* è possibile aggiungere una nuova componente trasparente. Queste possono essere scelte dalla libreria in possesso da TRNSYS, oppure create, ma in tal caso è necessario far riferimento ad un ulteriore programma compatibile con TRNSYS: Window 5.1.

4. I dati relativi alle condizioni interne e all'impianto sono così suddivisi:
- *Infiltrazioni*: si deve specificare la portata d'aria proveniente dall'esterno;
  - *Ventilazione*: è possibile indicare le condizioni dell'aria entrante per mezzo di sistemi di ventilazione;
  - *Riscaldamento*: l'utente può definire la temperatura di settaggio dell'ambiente, il potere di riscaldamento radiante e l'umidificazione dell'aria all'interno della zona;
  - *Raffrescamento*: analogo discorso svolto per il caso di riscaldamento, ma riferito al regime estivo;
  - *Apporti gratuiti*: si definiscono gli apporti interni causati dalla presenza di persone, elettrodomestici, lampade e altri carichi energetici.

### ***SIMULATION STUDIO***

SIMULATION STUDIO è un *tool* che permette di assemblare il modello da analizzare, attraverso un sistema di implementazione ad “oggetti” e di realizzare la simulazione dinamica. Questa interfaccia si presenta come un foglio bianco con una colonna a destra nella quale sono presenti le *Type* che possono essere inserite per trascinamento nel foglio per creare il modello che interessa simulare, e a sinistra dei pulsanti utili per realizzare i collegamenti o delle macro, per controllare i dati di simulazione e per lanciare la simulazione.



**Figura 3.4** Interfaccia Simulation Studio.



Cliccando su ciascuna *Type* si aprono vari tab, i cui principali sono:

- *Parameters*: sono i valori che l'utente deve definire manualmente in funzione delle schede tecniche dei vari dispositivi che si prevede di utilizzare o in base a calcoli svolti in precedenza;
- *Input*: sono i valori d'ingresso provenienti da altre *Type*;
- *Output*: sono i valori in uscita i quali possono essere stampati oppure diventare gli input per altre *Type* operando i collegamenti opportuni e verificando con attenzione le unità di misura;
- *External files*: quando viene richiesto, è necessario inserire dei file *.txt* che contengono dei dati o per indicare il file di destinazione per la stampa finale.

Si ricordi che dietro a ogni *Type* è presente una subroutine contenente tutte le equazioni utilizzate per determinare i valori in uscita in funzione dei dati in ingresso e dei parametri iniziali, le quali sono descritte nel manuale del programma, e pertanto per eventuali approfondimenti è necessario consultarlo.

Concluso il modello è possibile lanciare la simulazione e, a eccezione di errori a causa di non convergenza di valori o altro, si apre una interfaccia grafica che presenta tutti i valori che si è deciso di visualizzare, i quali, poi, è possibile esportare in file di testo al fine di utilizzarli con altri programmi di calcolo.

### **3.2 Modellazione dell'edificio con *TRNBUILD***

Le due tipologie di edifici residenziali sono state simulate in TRNSYS attraverso la creazione di un modello ciascuna: per l'utenza multifamiliare si è modellato un piano (in particolare il secondo) suddividendolo in quattro zone corrispondenti ai quattro appartamenti al fine di analizzare in modo efficace il comportamento di ognuno di essi poichè gli appartamenti affacciati a nord avranno una maggiore richiesta in regime invernale, mentre quelli a sud in regime estivo. L'utenza monofamiliare è stata divisa in piano terra e primo piano a causa delle rilevanti differenze, di fabbisogno energetico invernale e di carico di raffrescamento tra le due zone, riscontrate durante l'analisi stazionaria descritta nel capitolo 2.

Prima di procedere alla creazione delle varie zone, si è resa necessaria la definizione dei vari strati che compongono i muri esterni e interni, i pavimenti e i soffitti, per mezzo dei dati che si trovano nel capitolo 2 al paragrafo 2.1 e seguendo la procedura indicata nel paragrafo precedente.

Definiti i pacchetti murari di cui è composto l'involucro edilizio e le finestre (si veda paragrafo precedente), sono state create le varie zone in cui si è deciso di suddividere l'edificio. In primo luogo si è definito il volume della zona, dedotto dalle piante degli edifici, nel box in alto a sinistra della figura 3.3 e poi sono state inserite le tipologie di muro, create in precedenza, nella sezione *Walls* tramite il menù a tendina presente a destra. Si è specificata la superficie, le condizioni operative (ovvero se si tratta di un muro esterno, interno, adiacente a un'altra zona oppure confinante con un ambiente con le stesse caratteristiche termiche e igrometriche della zona in analisi), e nel caso di muri esterni deve essere definita anche l'orientazione poiché TRNSYS include la radiazione solare nei propri calcoli interni. Successivamente sono state specificate le tipologie di finestre impiegate nell'abitazione tramite la libreria della sezione *Windows*.

Una volta importata la geometria dell'edificio, si sono imposte infiltrazioni pari a  $0,1 \text{ h}^{-1}$  poiché l'edificio è caratterizzato da un buon isolato e da una bassa permeabilità all'aria.

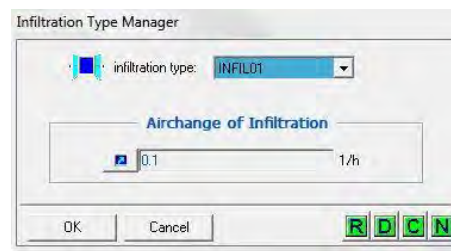


Figura 3.5 Particolare della sezione *Infiltration*.

Nell'impianto ipotizzato per le due utenze in esame è prevista l'installazione di un sistema di ventilazione meccanica controllata a doppio flusso con recuperatore di calore entalpico. Perciò nella sezione *Ventilation* è stato creato un input denominato "VMC" che comprende tre voci: portata di ventilazione [ $\text{h}^{-1}$ ], temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] e umidità relativa dell'aria di ingresso. Questi parametri saranno definiti in un secondo momento durante l'implementazione in *Simulation Studio*.

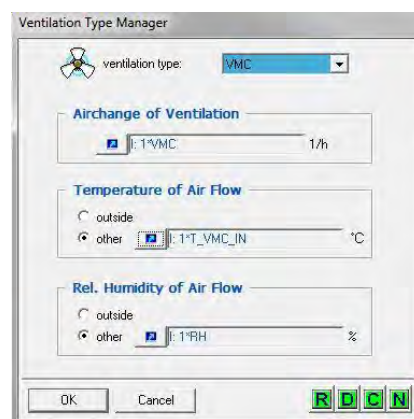


Figura 3.6 Particolare della sezione *Ventilation*.

La valutazione dei carichi interni è stata eseguita secondo la norma UNI EN ISO 13790, la quale, convenzionalmente, impone un valore pari a  $4 \text{ W/m}^2$ . Tale valore è stato moltiplicato per l'area utile della zona termica delineata in precedenza e successivamente convertito in kJ/h. La sezione *Gains*, però, richiede di indicare una parte convettiva e una radioattiva e perciò il valore relativo ai carichi termici interni è stato equamente ripartito nelle due voci. La generazione di vapore rappresenta un carico interno aggiuntivo ed è stata valutata secondo la tabella presente nella CEN TR 14788:2006:

ATTIVITA'	PRODUZIONE DI VAPORE ACQUEO
Adulto che dorme	40 g/h
Adulto in attività domestica	55 g/h
Cucinare	3 kg/giorno
Igiene personale	0.2 kg/giorno a persona
Lavatrice	0.5 kg/giorno
Asciugatura dei vestiti	1.5 kg/giorno a persona
Lavastoviglie	0.3 kg/giorno

Tabella 3-1 Tassi di generazione di umidità. [21]

Da tali valori si è creato il profilo orario della durata di un giorno sia per un appartamento, sia per l'utenza monofamiliare e il risultato ottenuto è riportato in tabella 3-2:

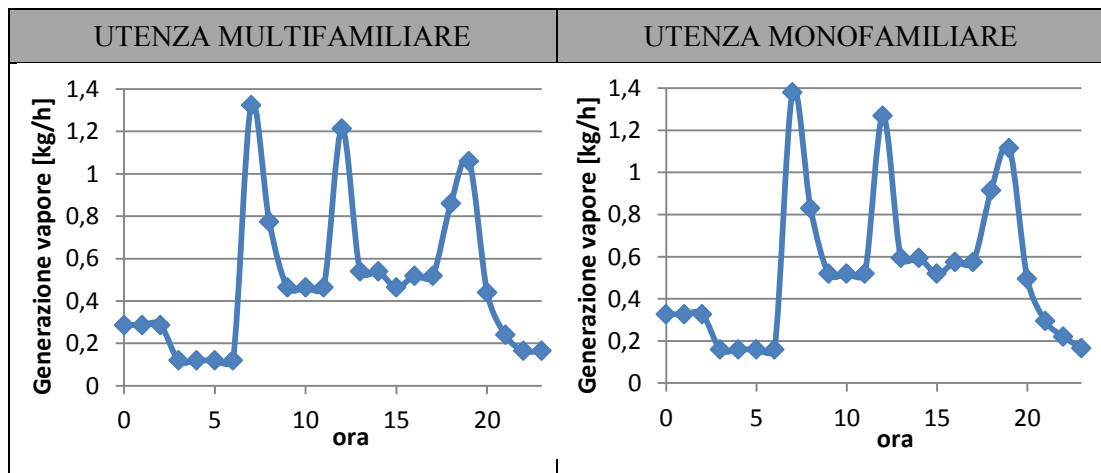


Tabella 3-2 Profili di generazione di vapore per utenza multifamiliare e utenza monofamiliare.

Il profilo di generazione risultante è stato inserito nella sezione *Gains* come input proveniente da un file esterno, diversamente dal caso precedente in cui il valore era imposto costante.

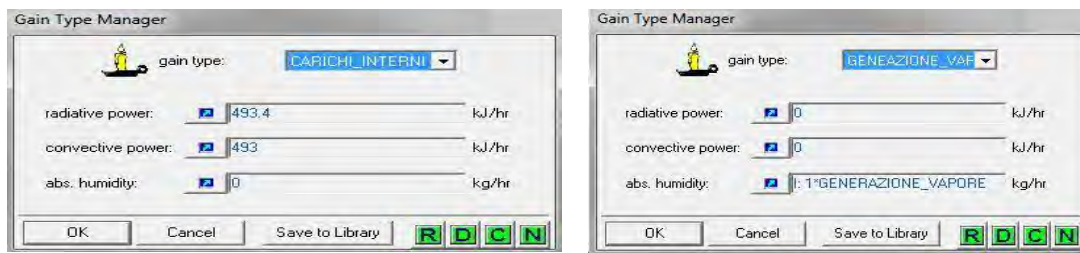


Figura 3.7 Particolare della sezione Gains.

### 3.2.1 Modellazione del sistema TABS tramite *Active layer*

La modellazione numerica di componenti edilizi all'interno dell'ambiente di calcolo in regime dinamico TRNSYS si può avvalere, grazie alla modellazione ad elementi finiti in campo energetico (FEM), di uno strumento di semplice utilizzo denominato "*Active Layer*" implementato all'interno del simulatore TRNBUILD.

Tale strumento permette grazie a forti semplificazioni, come si evince da figura 3.8, di analizzare il problema tridimensionale di diffusione del calore riconducendolo ad un semplice problema di analisi monodimensionale grazie all'inserimento di uno strato "attivo" all'interno dei pacchetti murari definiti in TRNSYS che rappresenta la presenza di tubazioni radianti che cedono o assorbono calore dagli strati massivi adiacenti. Il modello ad ogni modo presenta delle limitazioni geometriche atte a ridurre l'errore di calcolo complessivo basato sul modello di diffusione del calore raffigurato sempre in figura 3.8.

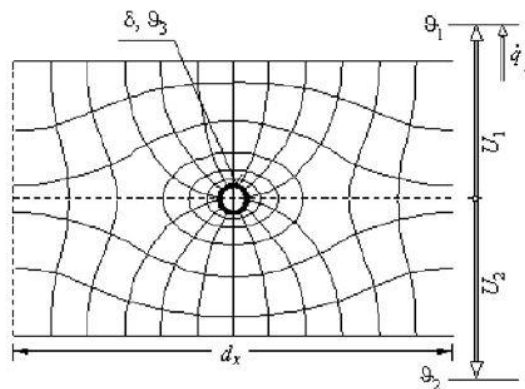


Figura 3.8 Modello *Active layer* per implementazione di un sistema TABS.

Nell'interfaccia di TRNBUILD è possibile definire gli strati componenti il pacchetto murario secondo quattro categorie, ma nella simulazione svolta ne sono state utilizzate due: la prima è *Massive layer* caratterizzante gli strati che hanno una certa massa come il cemento, piastrelle e qualsiasi altro materiale usato normalmente nell'edilizia, mentre la seconda è denominata *Active layer* e fornisce la possibilità di implementare lo strato di tubazioni

costituenti il sistema TABS. Per l'inserimento dello strato attivo è necessario entrare nella sezione *Layer Type Manager*, selezionare la voce *Active layer* e inserire le seguenti caratteristiche (riportate nello specifico in tabella 2-20):

- il calore specifico del fluido che circola nei tubi [kJ/kg K];
- il passo interasse fra i tubi[m];
- il diametro esterno di un tubo[m];
- lo spessore del tubo [m];
- la conducibilità termica del materiale di cui sono composte le tubazioni [kJ/h m K].



Figura 3.9 Schermata di TRNBUILD per l'inserimento dei dati relativi a un *Active layer*.

Successivamente si deve inserire tale strato nella struttura che ci interessa tramite la sezione *Wall Type Manager* come descritto nel paragrafo 3.1. Si faccia attenzione che lo strato attivo viene inserito dal programma in modo arbitrario, dividendo lo strato massivo selezionato in due sezioni dalle identiche caratteristiche termiche, e solo in un secondo momento è possibile modificarne lo spessore.



Figura 3.10 Schermata utile all'inserimento dello strato attivo nella struttura muraria.

Nella finestra in cui è stata definita la zona termica, le strutture contenenti lo strato attivo sono contrassegnate dalla lettera “A” e presentano il pulsante denominato *Specification* il quale, se cliccato, fa apparire la schermata illustrata in figura 3.11.

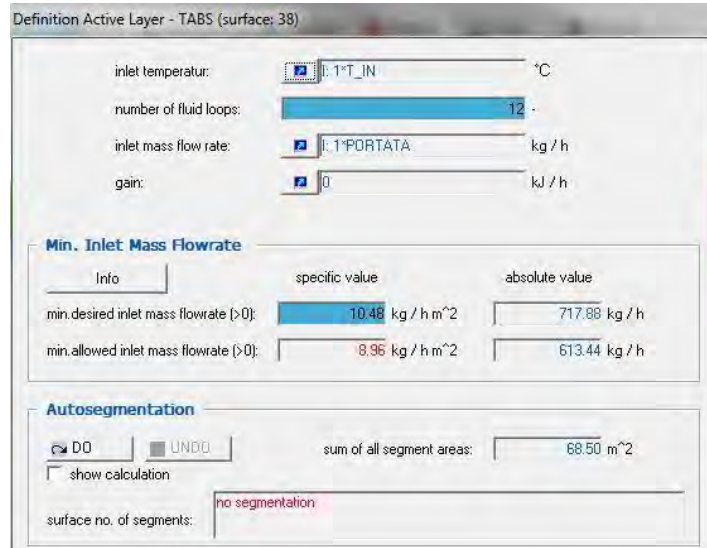


Figura 3.11 Finestra necessaria per l'inserimento di dati specifici del sistema TABS.

In tale finestra si sono inserite come input esterno la temperatura d'ingresso dell'acqua e la portata circolante nei tubi. In seguito sono stati specificati il numero dei circuiti e la minima portata entrante desiderata, dai quali il software calcola automaticamente la portata minima permessa contrassegnata dal colore rosso.

Nel corso delle simulazioni sono stati riscontrati parecchi problemi a causa di un errore di convergenza da parte del software TRNBUILD. Tale errore era dovuto al fatto che la portata di progetto calcolata nella fase di dimensionamento risultava inferiore alla minima portata permessa dal programma, anche se in realtà non era vero. Per ovviare al problema si è fatto ricorso al processo di *Autosegmentation* il quale suddivide la superficie in più parti caratterizzate dalla stessa area e nel contempo si è suddiviso la portata di acqua da immettere nelle tubazioni in funzione dei sottocircuiti risultanti da tale procedimento. Tuttavia dall'interfaccia grafica dei risultati si è riscontrato che la temperatura di uscita e la potenza fornita dal fluido non presentavano valori uguali per le varie parti in cui era suddivisa la superficie attiva e perciò la simulazione risultava falsata. Successivamente si è provato ad utilizzare il valore di portata minima richiesta dal programma con risultati scadenti dato che la portata necessaria era di molto superiore rispetto a quella derivante dal dimensionamento e quindi la simulazione risultante non aveva validità.

In ultima analisi, previa lettura di alcuni forum riguardanti l'argomento, è stato deciso di mantenere la portata di progetto calcolata e aumentare il numero di loops fino a che l'errore

non si verificasse più, e si è riscontrato che i risultati acquisivano maggior senso dal punto di vista fisico e termico. Tale procedimento non è stato utile solo nel caso della portata di raffrescamento circolante nel soffitto dell'utenza monofamiliare e pertanto si è utilizzato la portata minima permessa la quale è pari a 1580 kg/h, mentre quella di progetto è uguale 1400 kg/h.

Conclusa l'importazione dell'edificio in TRNBUILD si è proseguito con l'implementazione dell'impianto per mezzo di SIMULATION STUDIO, il cui processo sarà descritto nel paragrafo seguente.

### 3.3 Modellazione dell'impianto con *SIMULATION STUDIO*

Con il programma *SIMULATION STUDIO* è possibile modellare l'impianto connesso all'edificio grazie a una serie di blocchi, denominati *Type*, interconnessi fra di loro.

Le *Type* utilizzate per implementare la configurazione d'impianto da simulare sono:

- *Type 15-6*: legge dati meteorologici ad intervalli di tempo regolari da un file esterno presente nella libreria del programma e li rende disponibili ad altri componenti.
- *Type 56b*: modella il comportamento termico di un edificio. La relativa descrizione è letta da file esterno, in particolare dal \*.bui creato con TRNBUILD. Nella simulazione in oggetto il componente fornisce come output: la temperatura ambiente, l'umidità relativa dell'aria, la temperatura dell'acqua in uscita dallo strato attivo, la temperatura dello strato adiacente al sistema TABS e la temperatura superficiali.
- *Type 501*: usata solo per la simulazione della villetta, modella la distribuzione verticale di temperatura del suolo, in funzione della temperatura media superficiale del suolo annuale, della propria variazione annuale, del tempo fra l'inizio dell'anno e l'istante nel quale si ha la minima temperatura superficiale e la diffusività termica del terreno.
- *Type 515*: legge da file esterno \*.txt il numero di giorni del periodo di riscaldamento/raffrescamento e in funzione della stagione restituisce il valore 1 o 0.
- *Type 9a*: ha lo scopo di leggere dei dati ad intervalli regolari da un file esterno \*.txt. Questa componente è di natura molto generale e può leggere qualsiasi tipo di dato.
- *Type 2b*: genera una funzione di controllo che può avere un valore di 1 o 0. Il valore di tale segnale è scelto in funzione della differenza tra le temperature superiori e inferiori ( $T_h$  e  $T_l$ ), rispetto alle due *dead band temperature differences* ( $\Delta T_h$  e  $\Delta T_l$ ). Il nuovo valore della funzione di controllo dipende dal valore di quella allo step temporale

precedente. Tale type è normalmente usata con il segnale di controllo in ingresso collegato al segnale di controllo in uscita, fornendo un effetto d'isteresi.

- *Type 93*: memorizza un certo numero  $N_i$  di valori in ingresso dei precedenti  $N_t$  step temporali.
- *Type 62*: implementa un collegamento con Excel. La routine Fortran comunica con tale programma attraverso l'interfaccia *Component Object Model (COM)* per il trasferimento veloce dei dati. TRNSYS invia gli input alle celle di lavoro del foglio di calcolo identificate con il nome "Inp1"..."Inp8", e riceve gli output dalle celle identificate come "Out1"..."Out9".
- *Type 65c*: stampa i dati adimensionali su file esterno e contemporaneamente visualizza un plotter online con i risultati della simulazione.
- *Equation*: svolgono il ruolo di calcolatrice e permettono di fare dei piccoli calcoli senza richiamare un foglio excel il quale appesantirebbe notevolmente lo svolgersi della simulazione.

Si propongono di seguito i modelli per il secondo piano dell'utenza multifamiliare e per quella monofamiliare:

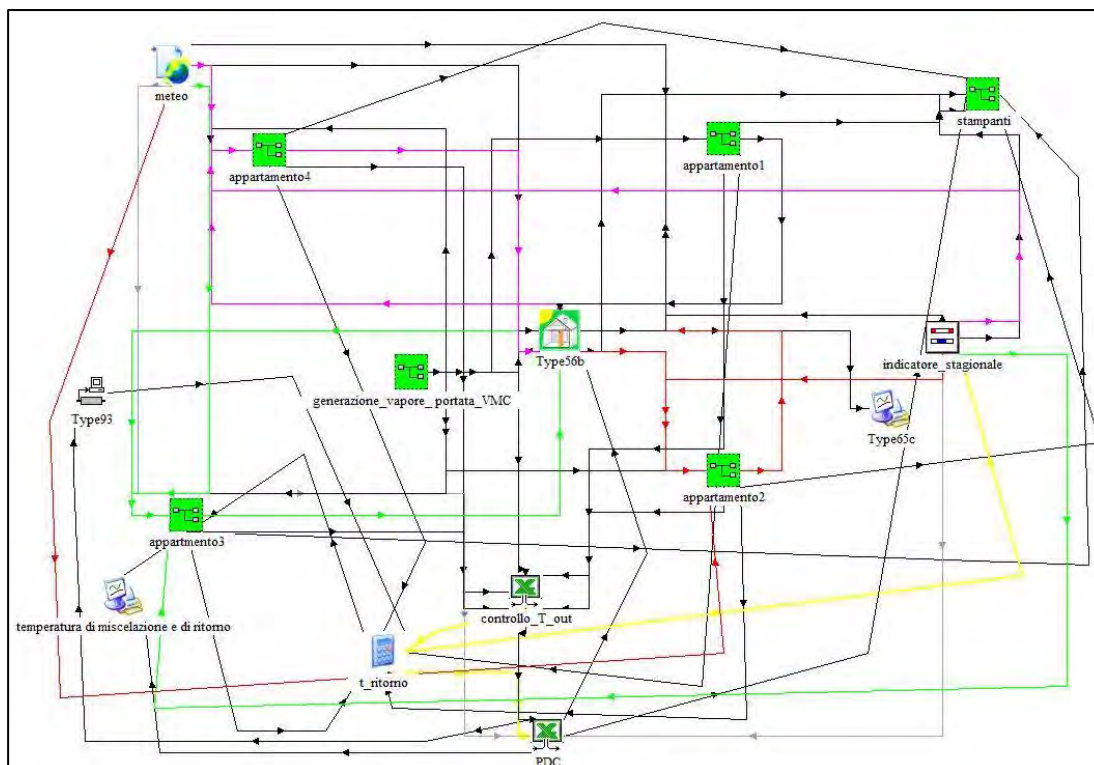


Figura 3.12 Modello dell'impianto per un piano dell'utenza multifamiliare con *SIMULATION STUDIO*.



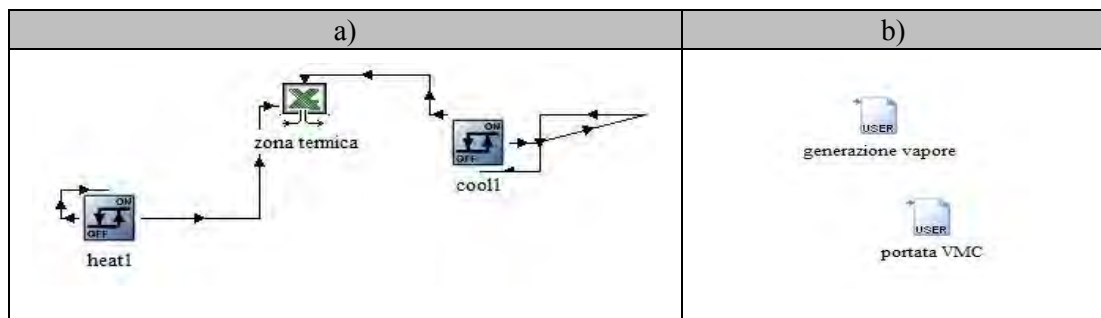


Figura 3.13 Particolari delle macro: a) appartamenti e piani della villetta, b) generazione vapore e VMC.

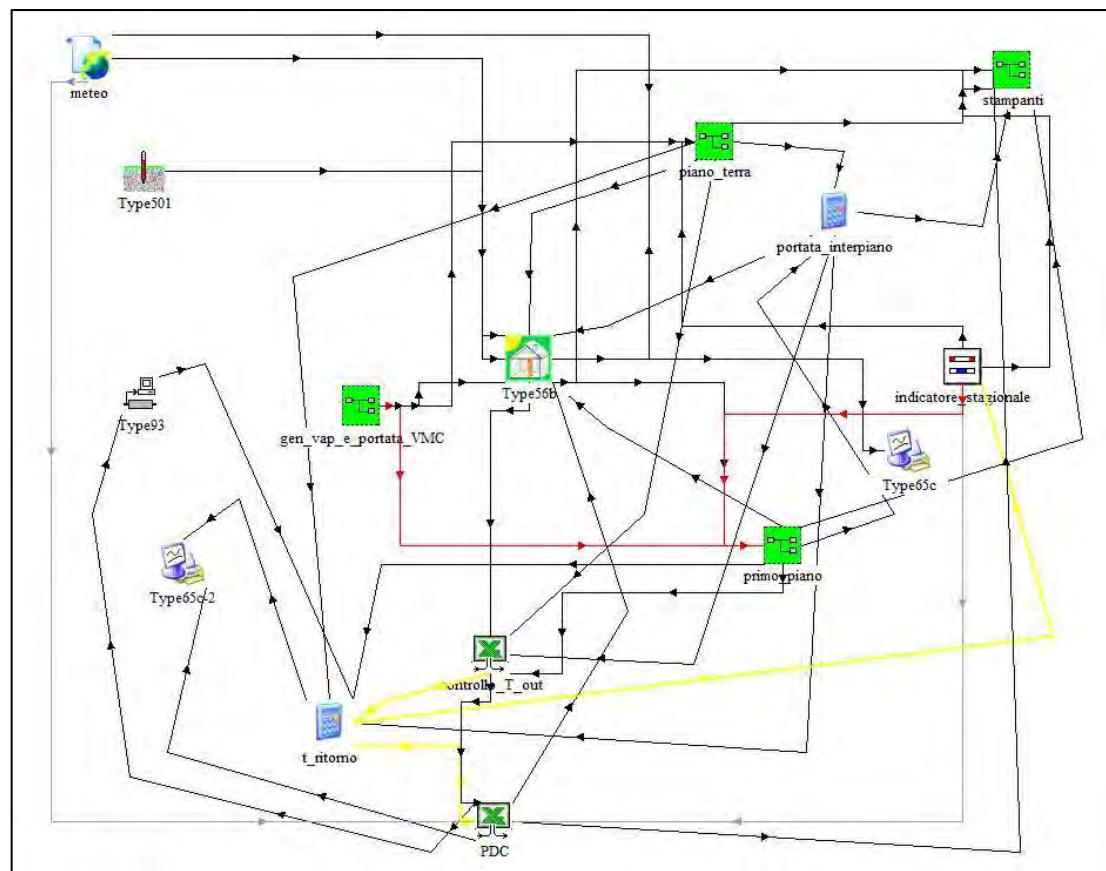


Figura 3.14 Modello dell'impianto per l'utenza monofamiliare con SIMULATION STUDIO.

Per i due modelli sono state configurate le type in questo modo:

- Type 15-6: legge i dati *Meteonorm* da file esterno, relativi alla località di Venezia Tessera. I parametri inseriti manualmente sono: il numero di superfici esposte verso l'ambiente esterno (4 per la palazzina e 6 per la villetta), l'angolo di inclinazione delle pareti (90° per la pareti e 20° per le falde del tetto della villetta) e l'azimuth delle superfici (0° per esposizione a Sud, 90° per esposizione a ovest, 180° per esposizione a Nord e 270° per esposizione a Est).

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

- Type 501: è utilizzata solo per la villetta e fornisce la temperatura del suolo secondo questi parametri: la temperatura media del terreno (15°C), l'ampiezza di temperatura superficiale (5°C), il *Time shift* (30 giorni), le caratteristiche termiche del suolo e la profondità a cui valutare la temperatura del terreno (0.25m).
- Type 56b: legge i dati dell'edificio da file esterno \*.bui. e gli input e output sono:

INPUT	FORNITI DA:
Temperatura a bulbo secco ambiente esterno	Type 15-6
Umidità relativa ambiente esterno	
Temperatura effettiva del cielo	
Radiazione solare totale per l'n-esima superficie	
Radiazione solare diretta per l'n-esima superficie	
Angolo di incidenza della radiazione solare per l'n-esima superficie	
Temperatura del suolo (solo villetta)	Type 501
Generazione di vapore	Type 9a
Portata per la VMC	
Temperatura di ingresso per la VMC	Type 62 (fogli Excel relativi ai singoli appartamenti e piani della villetta)
RH% in ingresso per la VMC	
Portata per sistema TABS	
Temperatura in ingresso per il sistema TABS	Type 62 (foglio excel "PDC")
OUTPUT	VERSO A:
Temperatura ambiente	Type 2a, Type 62 (fogli excel relativi ai singoli appartamenti e piani della villetta)
Umidità relativa interna	Type 62 (fogli excel relativi ai singoli appartamenti e piani della villetta)
Temperatura in uscita dal sistema TABS	Type 65c e Type 62 ("controllo_T_out")
Temperatura <i>core</i>	Type 65c
Temperatura superficiale	

- Type 2a: è un controllo differenziale che in relazione alla variazione della temperatura ambiente interna regola l'accensione e lo spegnimento del sistema TABS e quindi anche il funzionamento della pompa di calore. Si è imposto tale controllo sia per la stagione di riscaldamento, sia per quella di raffrescamento per ogni appartamento e per ogni piano dell'abitazione unifamiliare come si evince dalla figura 3.13 a. I parametri da inserire sono il numero di oscillazioni permessa in uno step temporale prima che vada in blocco e segnali errore e il valore di cut-off della temperatura oltre al quale la type restituisce sempre valore nullo e quindi il sistema risulterà spento.

Nel caso di regime invernale la temperatura ambiente di ogni zona termica uscente dalla type 56b sarà collegata alla *Lower input temperature*, mentre gli altri valori sono immessi manualmente. Nello specifico s'impone la *Upper input temperature* pari a 20.5 °C e le *dead band* superiore e inferiore pari rispettivamente a 1 e -0.1.

Nel caso di regime estivo la temperatura ambiente uscente dalla type 56b sarà collegata alla *Upper input temperature*, mentre gli altri valori sono immessi manualmente. Nello specifico si impone la *Lower input temperature* pari a 26 °C e le *dead band* superiore e inferiore pari rispettivamente a 1 e -0.1.

In entrambi i casi si è connesso il valore della funzione di controllo in uscita a quello in entrata fornendo così un effetto di isteresi.

- Type 515: si è creato un file di testo in cui s'indica l'inizio e la fine della stagione di riscaldamento (di conseguenza anche quella di raffrescamento). Effettuando le simulazioni si è notato che il periodo di raffrescamento era troppo ridotto, causando un aumento eccessivo della temperatura interna nelle mezze stagioni. Pertanto è stata accorciata la normale stagione di riscaldamento senza compromettere il comfort termico interno. Il valore di uscita da tale blocco è impiegato come input nelle type 62 riguardanti le zone termiche e la pompa di calore, la calcolatrice "*t\_ritorno*" e nella type 65c.
- Type 9a: sono presenti nella macro "*generazione\_vapore\_portata\_VMC*" e svolgono il compito di importare nella type contenente le caratteristiche dell'edificio i profili orari di generazione di vapore e di portata d'aria relativa alla ventilazione meccanica, descritti rispettivamente nel paragrafo 3.2 e 2.2.2. I parametri da impostare sono: il numero di linee da saltare, il numero di colonne da leggere, il tempo di intervallo dei dati presenti nel file di testo, il fattore moltiplicativo, il fattore addizionale, il parametro che impone se i dati vengono interpolati o meno e il parametro che interroga l'utente se i valori inseriti sono istantanei o medi. I più interessanti sono gli ultimi due: al primo è stato imposto il valore -1 in modo che i dati non siano interpolati automaticamente dal programma e al secondo il valore 0 così che restituisca i valori indicati nel file di testo e non svolga calcoli interni.
- Type 93: memorizza la temperatura di mandata dell'acqua ai sistemi TABS allo step precedente al fine di calcolare la temperatura di ritorno alla pompa di calore poichè alla mandata del sistema termoattivo sono presenti delle valvole a tre vie le quali, se il controllo della type 2a restituisce un valore pari a 0, svolgono la funzione di ricircolo della portata riguardante la specifica zona termica. I parametri da inserire sono il numero di valori e di step temporali da memorizzare.

- Type 62: permette di richiamare dei fogli di calcolo esterni. Con tale metodo è stato modellato il funzionamento della pompa di calore e della ventilazione meccanica controllata a doppio flusso con recupero entalpico e l'accensione e lo spegnimento del sistema TABS. Nel paragrafo seguente si procede alla spiegazione di tali fogli Excel.

### 3.3.1 Fogli di calcolo Excel richiamati da *Type 62*

#### *Foglio di calcolo per VMC e on-off TABS*

I dati di ingresso e di uscita di questo foglio sono:

INPUT	FORNITI DA:	OUTPUT	VERSO A:
Controllo heating	Type 2a	Portata del sistema TABS	Type 56b
Controllo cooling		Temperatura d'immissione della VMC	
Indicatore stagionale	Type 515	RH% d'immissione della VMC	
Temperatura esterna	Type 15-6		
RH% esterna			
Temperatura ambiente interna	Type 56b		
RH% interna			

Nel modello analizzato la portata del sistema TABS è mantenuta costante durante la fase operativa (si vedano tabella 2-25 e 2-26) e il valore varia solo a seconda della stagione, dell'edificio in esame e del funzionamento del controllo differenziale di temperatura che monitora la temperatura ambiente interna. L'indicatore stagionale specifica se il valore di portata da inviare è relativo al periodo di riscaldamento o di raffrescamento, mentre il controllo differenziale segnala se è necessario o meno che ci sia circolazione di acqua nelle tubazioni componenti lo strato attivo. Nel primo caso la portata di fluido viene inviata al sistema TABS nel quale cede o asporta calore, invece nel secondo, la portata è fatta ricircolare mediante l'utilizzo di valvola a tre vie poste a monte del terminale d'impianto e quindi alla type 56b si avrà un valore di portata d'acqua in ingresso nullo

Per quanto riguarda la ventilazione meccanica è stato deciso di adottare la soluzione a doppio flusso con recuperatore di calore entalpico e il dispositivo a cui si è fatto riferimento, per la creazione del foglio di calcolo, è l'unità di recupero di calore TRS della *AERMEC*<sup>2</sup> di cui, in seguito, si presenta un'immagine e la propria scheda tecnica.

<sup>2</sup> Nelle simulazioni descritte è stato implementato un modello dell'impianto basato a volte su macchinari e componenti esistenti sul mercato. I relativi dati tecnici sono ricavati dalle schede tecniche fornite nei siti ufficiali


a)	b)			
	<b>RECUPERATORE DI CALORE</b>			<b>TRS15</b>
	Funzionamento invernale			
	Efficienza	Temperatura	%	77
		Entalpia	%	62
		Potenza recuperata alla massima velocità	kW	1,3
	Funzionamento estivo			
	Efficienza	Temperatura	%	63
		Entalpia	%	60
		Potenza recuperata alla massima velocità	kW	0,5
	Portata aria nominale	Massima	m <sup>3</sup> /h	150
		Media	m <sup>3</sup> /h	150
		Minima	m <sup>3</sup> /h	100
	Pressione statica utile (*)	Massima	Pa	85
		Media	Pa	70
		Minima	Pa	50
Potenza assorbita	Massima	W	80	
	Media	W	55	
	Minima	W	30	
∅ Livello di pressione sonora	Massima	dB(A)	26	
	Media	dB(A)	24	
	Minima	dB(A)	22	
Alimentazione elettrica		V/ph/Hz		

Figura 3.15: a) unità di recupero di calore TRS con recuperatore entalpico; b) scheda tecnica. [22]

I dati della scheda tecnica rilevanti in questa fase sono: l'efficienza percentuale di recupero termico ed entalpico in base alla stagione. Il primo valore è necessario per il calcolo della temperatura d'immissione nell'ambiente in funzione della temperatura dell'aria di rinnovo esterna e dell'aria ambiente interna da espellere:

$$T_{immisione} = (T_{interna} - T_{esterna}) * \eta_T + T_{esterna} \quad (3.1)$$

Il secondo per determinare le condizioni di entalpia d'immissione in funzione dell'entalpia dell'aria esterna e dell'aria interna da espellere:

$$h_{immisione} = (h_{interna} - h_{esterna}) * \eta_h + h_{esterna} \quad (3.2)$$

Negli input del foglio di calcolo non sono presenti i valori di entalpia, ma quelli di umidità relativa in percentuale. Pertanto è necessario calcolarli secondo il procedimento proposto in seguito e in funzione della temperatura e di RH che sono facilmente ricavabili per mezzo delle Type presenti nel modello.

In base ai dati elencati in precedenza, al calore specifico del vapore  $cp_V$  (1,875 kJ/kg K), al calore specifico dell'aria secca  $cp_A$  (1,006 kJ/kg K), al calore latente di vaporizzazione  $r_0$  (determinato in funzione della temperatura), alla pressione totale  $p$  (0,980665 bar) e alla pressione di saturazione  $p_{SAT}$  calcolata in base alla equazione (3.3):

---

dei produttori. Tali apparecchi sono assunti come riferimento e non rappresentano in nessun modo l'oggetto dell'analisi. Le prestazioni indicate riguardano il modello nel suo complesso e non i singoli componenti e in nessun caso i risultati ottenuti sono applicabili ai prodotti commerciali indicati.

$$p_{SAT} = \frac{\exp \left[ A + \left( \frac{2.303 T}{B + C \cdot T + D \cdot T^2} \right) \right]}{10^5} \quad (3.3)$$

Dove A, B, C, D rappresentano delle costanti e T è la temperatura di riferimento nello step temporale.

A	6,41542
B	31,61489
C	0,13276
D	1,55593*10 <sup>-5</sup>

L'umidità specifica  $x$  è calcolata secondo l'equazione (3.4):

$$x = 0.622 \left( \frac{RH \cdot p_{SAT}}{p - RH \cdot p_{SAT}} \right) \quad (3.4)$$

Il valore di entalpia dell'aria umida  $h$  è determinato in base l'equazione (3.5):

$$h = cp_A \cdot T + (r_0 + cp_V \cdot T) \cdot x \quad (3.5)$$

Il procedimento appena descritto è stato utilizzato per il calcolo dei valori di entalpia per l'aria esterna e per l'aria interna da espellere. Il valore di entalpia relativo all'aria da immettere nell'ambiente è stato determinato in funzione: dell'efficienza entalpica dell'unità di recupero di calore e dell'equazione (3.2). Successivamente è possibile calcolare l'umidità relativa percentuale dell'aria entrante nell'edificio secondo le equazioni seguenti:

$$x_{imm} = \left( \frac{h_{imm} - cp_A \cdot T}{r_0 + cp_V \cdot T} \right) \quad (3.6)$$

$$\phi = \left( \frac{p \cdot x_{imm}}{p_{SAT} \cdot (x_{imm} + 0.622)} \right) \quad (3.7)$$

$$RH = \phi \cdot 100 \quad (3.8)$$

**Foglio di calcolo per la valutazione della temperatura in uscita e formule utilizzate nella calcolatrice “t\_ritorno”.**

Gli input e gli output di tale foglio sono:

INPUT	FORNITI DA:	OUTPUT	VERSO A:
Portata appartamento 1 <b>Portata pav. a terra</b>	Type 62 ( foglio di calcolo relativo alle zone termiche)	Somma temperature di ritorno	calcolatrice “t_ritorno”
Portata appartamento 2 <b>Portata interpiano</b>		Portata TOT	Type 62 (foglio di calcolo relativo alla PDC) e calcolatrice “t_ritorno”
Portata appartamento 3 <b>Portata soffitto</b>			
Portata appartamento 4			
Temperatura di ritorno 1 <b>Temperatura di ritorno da pav. a terra</b>	Type 56b		
Temperatura di ritorno 2 <b>Temperatura di ritorno da interpiano</b>			
Temperatura di ritorno 3 <b>Temperatura di ritorno da soffitto</b>			
Temperatura di ritorno 4			

La somma delle temperature di ritorno dal sistema TABS per 4 appartamenti e per la villetta è stata calcolata pesando il valore di ogni temperatura derivante dalla singola zona termica con la propria portata di circolazione, secondo la formula (3.9):

$$Somma T'_{ritorno} = \sum_i^n T_{OUT,i} * \dot{m}_i \quad (3.9)$$

Ma poiché per l’utenza multifamiliare si vuole analizzare il funzionamento della pompa di calore per 10 appartamenti, tale formula diventa:

$$Somma T_{ritorno,10 app} = Somma T'_{ritorno} * 2 + Somma T'_{ritorno}/2 \quad (3.10)$$

La somma delle portate è:

$$\dot{m}_{IN TOT} = \sum \dot{m}_i \quad (3.11)$$

Per determinare la temperatura di ritorno reale alla pompa di calore dopo il ricircolo che avviene nel caso in cui il controllo differenziale delle singole zone sia in off, impiegando valvole a tre vie in mandata al TABS, si utilizza una calcolatrice che presenta i seguenti input:

- l'indicatore stagionale;
- la temperatura di mandata allo step temporale precedente  $T_{MANDATA TABS_t^{-1}}$ ;
- Somma  $T'_{ritorno}$ .

In questa type si calcola la portata totale  $\dot{m}_{TOT}$  che si avrebbe nel caso in cui sia richiesto il funzionamento del sistema TABS in tutte le zone termiche. Per 10 appartamenti dell'utenza multifamiliare, in regime invernale, si deve disporre di una portata complessiva di 8750 kg/h, mentre in regime estivo, di 7000kg/h. L'utenza monofamiliare necessita di una portata complessiva di 3600 kg/h in inverno e 3580 kg/h in estate.

Dopo tale procedimento è possibile determinare la temperatura di ritorno reale step per step secondo l'equazione (3.12):

$$T_{ritorno_{reale}} = \frac{\left[ \text{Somma } T_{ritorno,10 \text{ app}} + (\dot{m}_{TOT} - \dot{m}_{IN_{TOT}}) \cdot T_{MANDATA TABS_t^{-1}} \right]}{\dot{m}_{TOT}} \quad (3.12)$$

### **Foglio di calcolo per l'implementazione della pompa di calore aria-cqua**

I dati di ingresso e di uscita di questo foglio sono:

INPUT	FORNITO DA:	OUTPUT	VERSO
Temperatura di ritorno dal TABS	Calcolatrice "t ritorno"	Potenza termica	Type 65c
Indicatore stagionale	Type 515	Potenza elettrica assorbita	
Temperatura esterna	Type 15-6	Temperatura di mandata pre-miscelazione	
Somma delle portate	Type 62 (calcolo della temperatura in uscita dai TABS)	Temperatura di mandata dopo miscelazione	Type 56b e Type 65c
		Temperatura di ritorno	Type 65c

La pompa di calore adottata nel modello è di tipo aria-acqua e per i dati tecnici si è deciso di utilizzare come riferimento il modello Mirai Split della EMMETTI<sup>3</sup> dalla potenza di 24 kW per 10 appartamenti dell'utenza multifamiliare e 8kW per il caso studio monofamiliare. L'apparecchio è composto da due sezioni: una unità interna con gruppo idronico e una unità esterna con circuito frigorifero R410A. Le due unità si collegano mediante linee frigorifere per la circolazione del refrigerante.

<sup>3</sup> Nelle simulazioni descritte è stato implementato un modello dell'impianto basato a volte su macchinari e componenti esistenti sul mercato. I relativi dati tecnici sono ricavati dalle schede tecniche fornite nei siti ufficiali dei produttori. Tali apparecchi sono assunti come riferimento e non rappresentano in nessun modo l'oggetto dell'analisi. Le prestazioni indicate riguardano il modello nel suo complesso e non i singoli componenti e in nessun caso i risultati ottenuti sono applicabili ai prodotti commerciali indicati.





Figura 3.16 Pompa di calore Mirai Split. [23]

Tale macchina ha un range di applicabilità molto ampio (da -20°C a 20 °C in inverno e da 15°C a 40°C in estate) ed è idonea alle tipologie di terminale di impianto che operano a bassa temperatura quali: sistemi radianti, unità terminali ad aria e radiatori a bassa temperatura.

Di seguito si propone la scheda tecnica dei modelli impiegati:

Modello	T.W.u	30			35			40			45			50			55		
	T.A.e	PH	PA	COP	PH	PA	COP	PH	PA	COP	PH	PA	COP	PH	PA	COP	PH	PA	COP
EH2413-ST	-20	11,91	4,86	2,45	11,56	5,34	2,17	11,16	5,87	1,90	10,81	6,54	1,65	10,41	7,24	1,44	10,18	8,06	1,26
	-15	12,89	4,93	2,61	12,51	5,42	2,31	12,07	5,97	2,02	11,69	6,64	1,76	11,26	7,36	1,53	11,01	8,18	1,35
	-7	16,28	5,04	3,23	15,81	5,54	2,85	15,26	6,09	2,51	14,79	6,78	2,18	14,23	7,52	1,89	13,91	8,36	1,66
	-2	18,96	5,07	3,74	18,41	5,57	3,31	17,76	6,12	2,90	17,22	6,81	2,53	16,56	7,55	2,19	16,20	8,41	1,93
	0	20,05	5,07	3,96	19,47	5,57	3,50	18,79	6,12	3,07	18,21	6,81	2,68	17,52	7,55	2,32	17,13	8,41	2,04
	2	21,14	5,07	4,17	20,53	5,57	3,69	19,82	6,12	3,24	19,20	6,81	2,82	18,48	7,55	2,45	18,06	8,41	2,15
	7	24,31	5,11	4,76	23,60	5,62	4,20	22,78	6,19	3,68	22,06	6,87	3,21	21,24	7,61	2,79	20,77	8,49	2,45
	12	27,47	5,07	5,42	26,67	5,58	4,78	25,74	6,13	4,20	24,94	6,82	3,66	24,00	7,56	3,17	23,47	8,43	2,79
	15	29,66	5,07	5,85	28,79	5,57	5,17	27,79	6,12	4,54	26,92	6,81	3,96	25,92	7,55	3,43	25,34	8,41	3,01
20	33,54	4,99	6,73	32,57	5,49	5,94	31,43	6,02	5,22	30,46	6,71	4,54	29,31	7,43	3,95	28,66	8,28	3,46	

Modello	T.A.e	20			25			30			35			40		
	T.W.u	PF	PA	EER	PF	PA	EER	PF	PA	EER	PF	PA	EER	PF	PA	EER
EH2413-ST	7	23,23	4,64	5,01	22,24	5,18	4,29	21,05	5,82	3,62	19,86	6,52	3,04	18,65	7,30	2,55
	10	25,62	4,67	5,48	24,42	5,24	4,66	23,03	5,89	3,91	21,84	6,61	3,30	20,45	7,41	2,76
	13	28,00	4,69	5,97	26,61	5,29	5,03	25,42	5,96	4,26	24,03	6,70	3,58	22,44	7,52	2,98
	15	29,59	4,71	6,28	28,20	5,31	5,31	26,81	6,00	4,47	25,42	6,76	3,76	23,83	7,61	3,13
	18	32,17	4,73	6,80	30,78	5,36	5,74	29,19	6,07	4,81	27,60	6,87	4,02	26,01	7,72	3,37
	22	35,74	4,75	7,53	34,15	5,42	6,30	32,57	6,16	5,29	30,78	6,99	4,40	29,19	7,88	3,70

Figura 3.17 Scheda tecnica della pompa di calore Mirai Split da 24 kW utilizzata per l'impianto dell'utenza multifamiliare. [24]

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

Modello	T.W.u	30			35			40			45			50			55		
		T.A.e	PH	PA	COP	PH	PA	COP	PH	PA	COP	PH	PA	COP	PH	PA	COP	PH	PA
EH0813-SM	-20	4,14	1,54	2,69	4,02	1,69	2,38	3,88	1,86	2,09	3,76	2,07	1,82	3,62	2,29	1,58	3,54	2,55	1,39
	-15	4,48	1,56	2,87	4,35	1,71	2,54	4,19	1,89	2,22	4,06	2,10	1,93	3,91	2,33	1,68	3,83	2,58	1,48
	-7	5,66	1,60	3,54	5,49	1,75	3,14	5,30	1,93	2,75	5,14	2,15	2,40	4,94	2,37	2,08	4,83	2,64	1,83
	-2	6,59	1,60	4,13	6,40	1,76	3,64	6,17	1,94	3,18	5,98	2,16	2,77	5,76	2,38	2,42	5,63	2,65	2,12
	0	6,97	1,60	4,36	6,77	1,76	3,85	6,53	1,94	3,37	6,33	2,16	2,93	6,09	2,38	2,56	5,95	2,65	2,24
	2	7,35	1,60	4,60	7,13	1,76	4,06	6,88	1,94	3,55	6,67	2,16	3,10	6,42	2,38	2,70	6,27	2,65	2,36
	7	8,45	1,62	5,23	8,20	1,78	4,61	7,91	1,96	4,04	7,67	2,17	3,53	7,38	2,41	3,06	7,22	2,68	2,69
	12	9,54	1,61	5,94	9,27	1,76	5,27	8,94	1,94	4,61	8,66	2,16	4,02	8,34	2,39	3,49	8,16	2,65	3,07
	15	10,30	1,60	6,45	10,00	1,76	5,69	9,65	1,94	4,98	9,35	2,16	4,34	9,00	2,38	3,78	8,80	2,65	3,31
	20	11,66	1,58	7,39	11,32	1,73	6,54	10,92	1,91	5,72	10,58	2,12	5,00	10,18	2,35	4,33	9,96	2,61	3,81

Modello	T.W.u	20			25			30			35			40		
		T.A.e	PF	PA	EER	PF	PA	EER	PF	PA	EER	PF	PA	EER	PF	PA
EH0813-SM	7	7,34	1,43	5,12	7,02	1,60	4,39	6,65	1,80	3,70	6,27	2,01	3,11	5,89	2,25	2,61
	10	8,09	1,44	5,61	7,71	1,62	4,77	7,27	1,82	4,00	6,90	2,04	3,38	6,46	2,29	2,82
	13	8,84	1,45	6,10	8,40	1,63	5,15	8,03	1,84	4,36	7,59	2,07	3,67	7,09	2,32	3,05
	15	9,34	1,45	6,43	8,90	1,64	5,43	8,46	1,85	4,57	8,03	2,09	3,85	7,52	2,35	3,20
	18	10,16	1,46	6,96	9,72	1,66	5,87	9,22	1,87	4,92	8,72	2,12	4,11	8,21	2,38	3,45
	22	11,29	1,47	7,70	10,78	1,67	6,45	10,28	1,90	5,41	9,72	2,16	4,50	9,22	2,43	3,79

Figura 3.18 Scheda tecnica della pompa di calore Mirai Split da 8 kW utilizzata per l'impianto dell'utenza monofamiliare. [24]

Dai dati della scheda tecnica è stato possibile ricavare la curva della potenza termica e del COP in funzione delle condizioni esterne per la temperatura di alimentazione richiesta dalla nostra configurazione impiantistica. Tali curve sono presentate nelle figure 3.19 e 3.20:

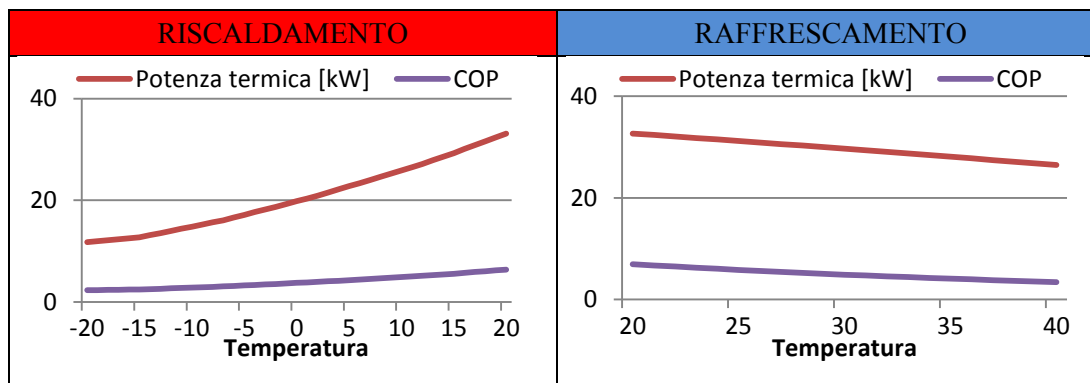


Figura 3.19 Curva della potenza termica e del COP per la pompa di calore da 24 kW

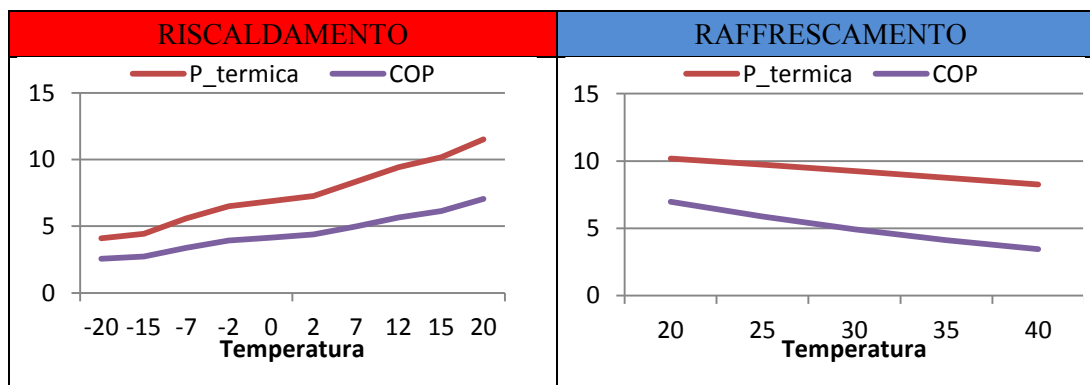


Figura 3.20 Curva della potenza termica e del COP per la pompa di calore da 8 kW

In base alla temperatura di ritorno calcolata in precedenza e al  $\Delta T_{IDEALE}$  ( $5^{\circ}\text{C}$ ) che può fornire la pompa di calore, si è determinata la temperatura di mandata ideale  $T_{INideale}$ , mantenendo come limite termico massimo erogabile la temperatura definita durante la fase di dimensionamento. Si calcola la potenza termica ideale fornita dalla pompa di calore in funzione della propria portata nominale, del calore specifico dell'acqua e della differenza di temperatura tra la mandata e il ritorno, e si confronta, in ogni step temporale, con il valore reale derivante dalle curve di funzionamento illustrate in figura 3.19 e 3.20.

Se il valore risultante dalle curve caratteristiche del dispositivo è superiore a quello ideale si utilizza in mandata la temperatura  $T_{INideale}$  e si determina la potenza elettrica assorbita in funzione della potenza termica ideale e del COP. Nel caso in cui la potenza termica reale sia inferiore a quella ideale, si ricalcola la temperatura di mandata e la potenza elettrica assorbita in riferimento al reale funzionamento della pompa di calore.

La pompa di calore impiegata nel modello è caratterizzata da una portata nominale di 4600 kg/h per il modello a 24 kW e da una portata nominale di 1410 kg/h per quello a 8 kW. Poiché la portata circolante nel sistema TABS, in entrambe le tipologie edilizie analizzate, è superiore a quella nominale della pompa di calore si è realizzato un impianto con un ricircolo in mandata al sistema TABS, come raffigurato in figura 3.21 e figura 3.22.

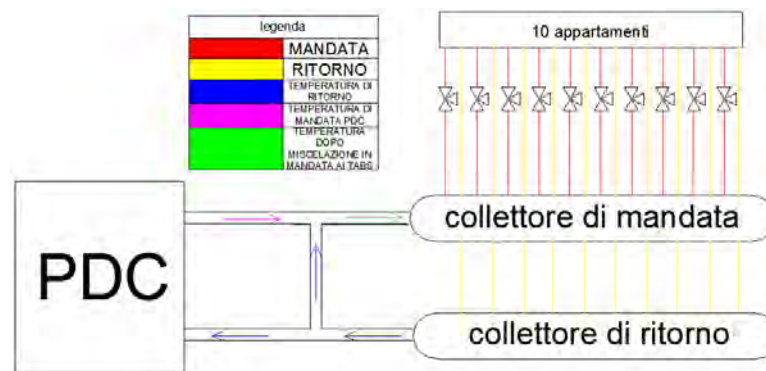


Figura 3.21 Schema impiantistico per l'utenza multifamiliare.

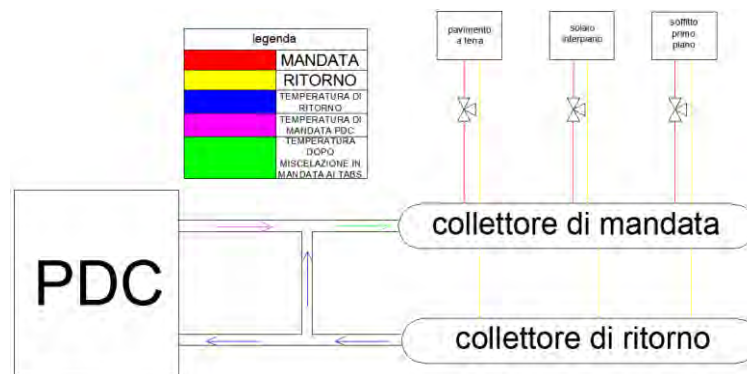


Figura 3.22 Schema impiantistico per l'utenza monofamiliare.

In riferimento alle figure 3.21 e 3.22, si evince che la temperatura di ritorno dal sistema TABS è la medesima di quella entrante nella pompa di calore, mentre la temperatura di mandata ai solai termoattivi è pari alla temperatura che risulta dalla miscelazione della portata di ricircolo e di quella elaborata dalla macchina. Pertanto, in regime invernale, il livello termico a disposizione del sistema TABS è sempre inferiore a quello fornibile dalla pompa di calore o a quello calcolato durante la fase di dimensionamento, mentre in estate è maggiore.

### **3.4 Discussione risultati**

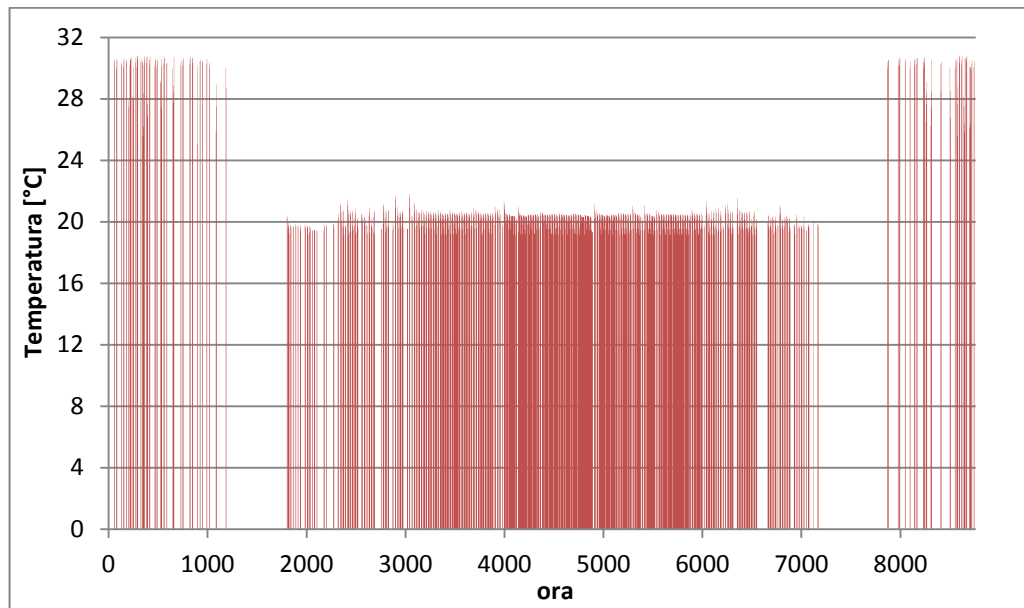
In questo paragrafo s'intende illustrare e discutere i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con TRNSYS prima per l'utenza multifamiliare e poi per quella monofamiliare.

I parametri che saranno descritti in questa sede sono:

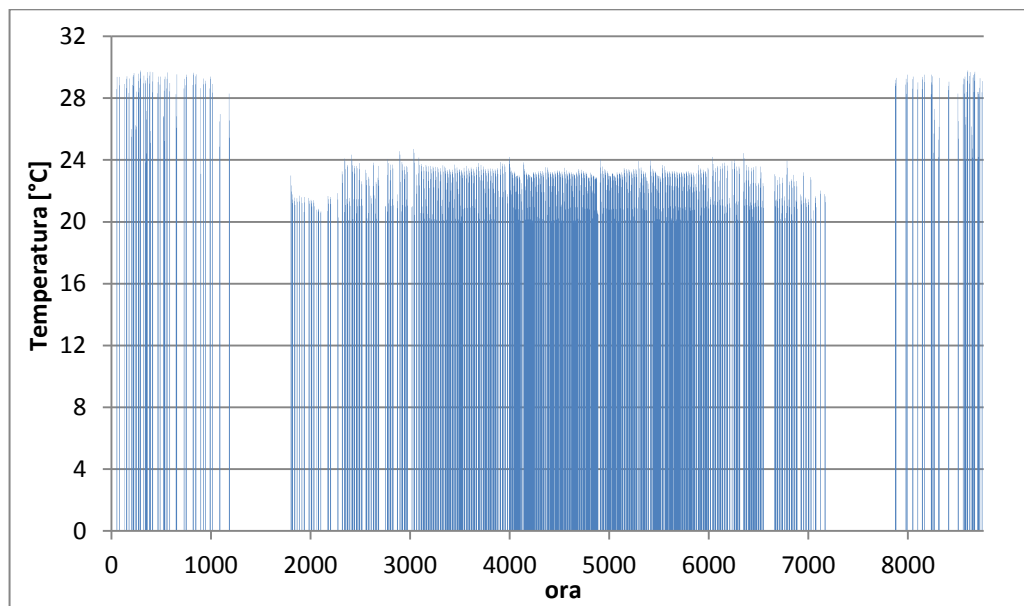
- la temperatura di ritorno dal sistema TABS;
- la temperatura di mandata al sistema TABS;
- la temperatura dell'aria ambiente interna per ogni zona termica;
- la temperatura di ogni solaio termoattivo (“*Core temperature*”);
- l'umidità relativa per ogni zona termica;
- la portata circolante in ogni solaio termoattivo.

#### **3.4.1 Utenza multifamiliare**

Il complesso multifamiliare è stato analizzato in modo semplificato valutando il comportamento di un singolo piano. Il secondo piano della palazzina è stato assunto come riferimento, esso è composto da quattro appartamenti e contiene nella parte centrale il vano scale. Per le future considerazioni riguardo alla palazzina nel suo complesso si assume che gli altri piani dell'edificio presentino il medesimo comportamento e i risultati ottenuti siano pertanto generalizzabili all'edificio nella sua totalità. Per quanto concerne l'impiantistica si riportano l'andamento della temperatura di mandata e di ritorno al sistema TABS.



**Figura 3.23** Andamento della temperatura di mandata al sistema TABS.



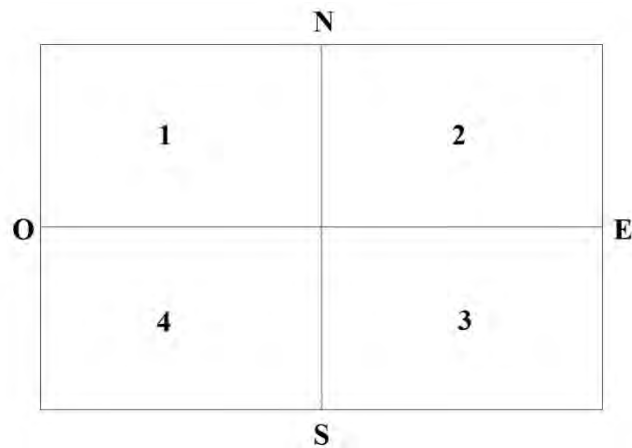
**Figura 3.24** Andamento della temperatura di ritorno dal sistema TABS.

In riferimento alla figura 3.23 si nota che la temperatura di mandata non è mai pari a 32°C in inverno e a 18,5°C in estate come determinato durante la fase di dimensionamento, perché a causa della configurazione a ricircolo dell'impianto, il livello termico tende ad diminuire nella stagione di riscaldamento e ad aumentare in quella di raffreddamento rispetto quello raggiunto all'uscita della pompa di calore. Confrontando i due grafici si evidenzia che la

differenza di temperatura tra ingresso e uscita è molto ridotta, poiché la portata circolante nei sistemi TABS è maggiore rispetto al caso di altre tipologie di terminali d'impianto e conseguentemente diminuisce la differenza di temperatura, in particolare il  $\Delta T_{MAX,inverno}$  è pari  $2,327^{\circ}C$  e il  $\Delta T_{MAX,estate}$  è di  $-2,901^{\circ}C$ .

Gli appartamenti sono stati analizzati singolarmente per comprendere meglio il differente comportamento in funzione dell'esposizione solare a cui sono soggetti. Per semplicità espositiva e di comprensione dei risultati, i quattro alloggi saranno numerati come segue:

- l'appartamento 1 è esposto a Nord ed Ovest;
- l'appartamento 2 è esposto a Nord ed Est;
- l'appartamento 3 è esposto a Sud ed Est;
- l'appartamento 4 è esposto a Sud ed Ovest.



**Figura 3.25 Numerazione appartamenti del secondo piano del condominio**

Di seguito si presentano gli andamenti di:

- temperatura interna;
- temperatura della struttura muraria attiva (“*Core Temperature*”);
- umidità relativa percentuale;
- portata circolante nel sistema TABS di ogni singolo appartamento.

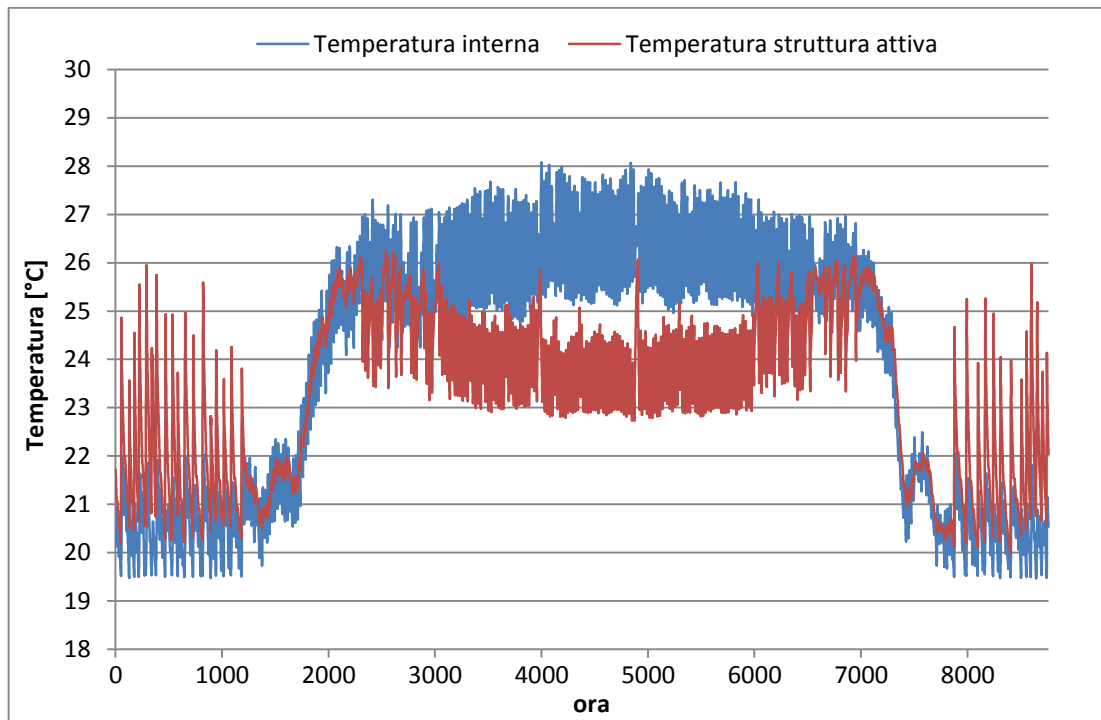


Figura 3.26 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 1.

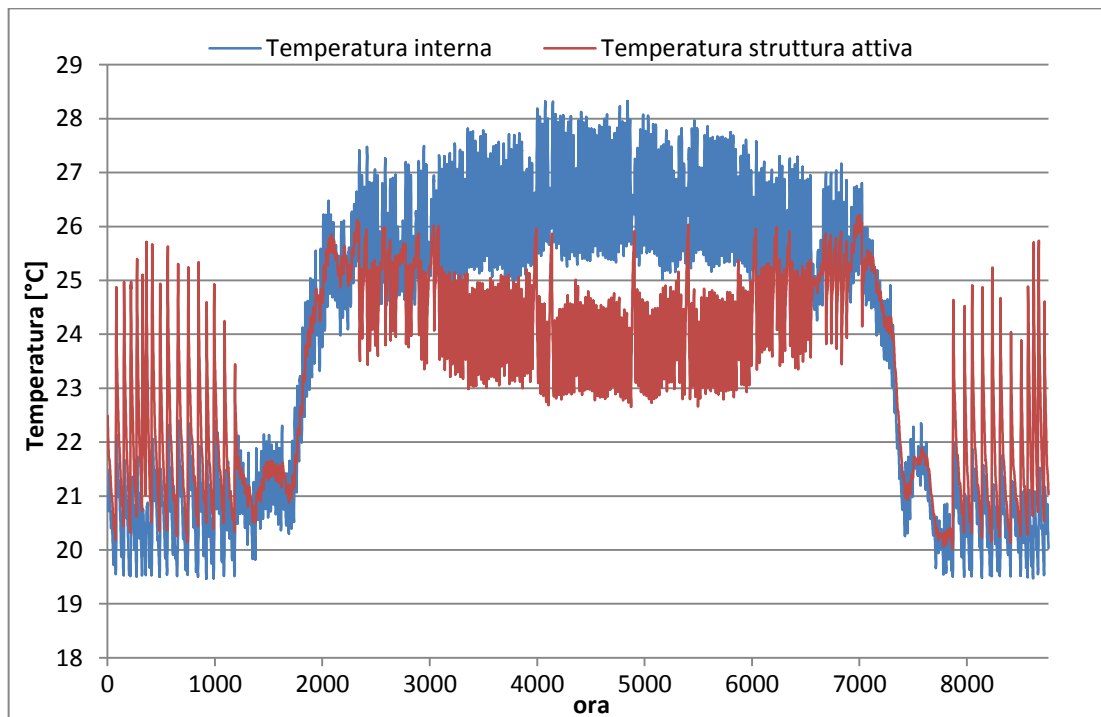


Figura 3.27 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 2.

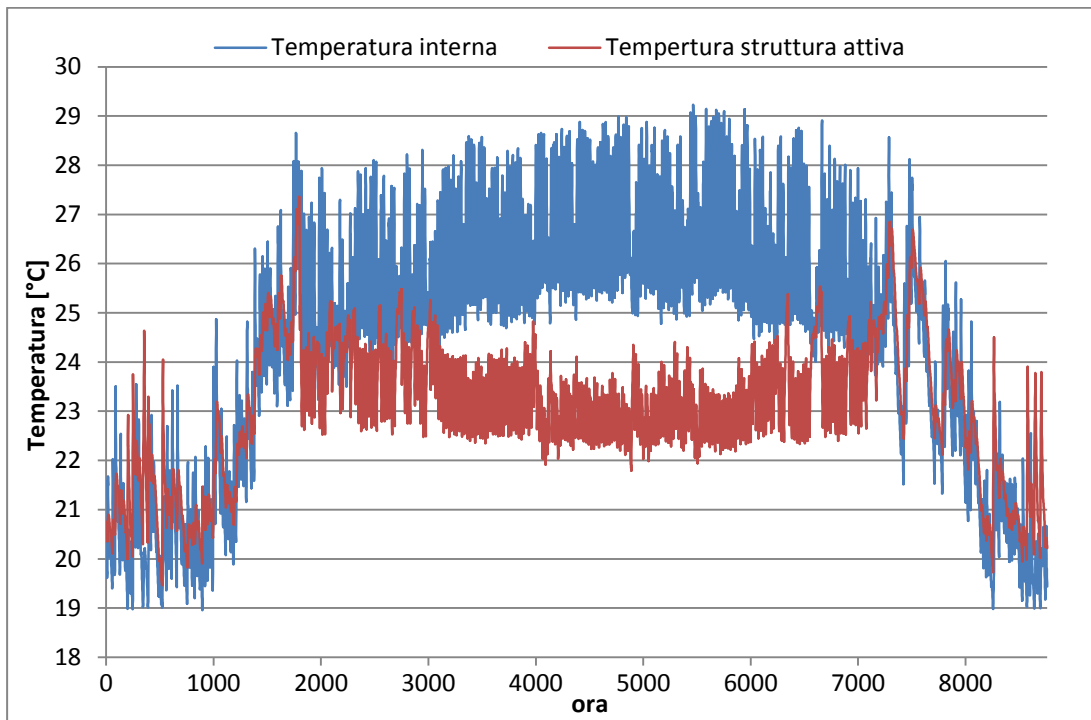


Figura 3.28 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 3.

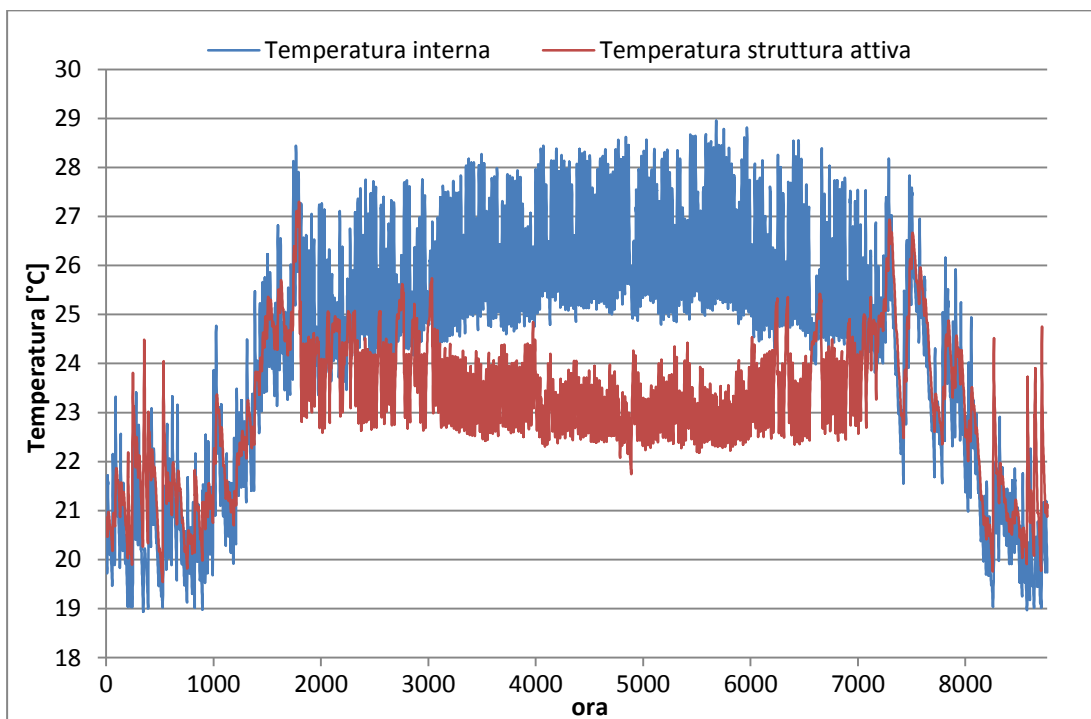


Figura 3.29 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 4.



# SIMULAZIONE DINAMICA DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO

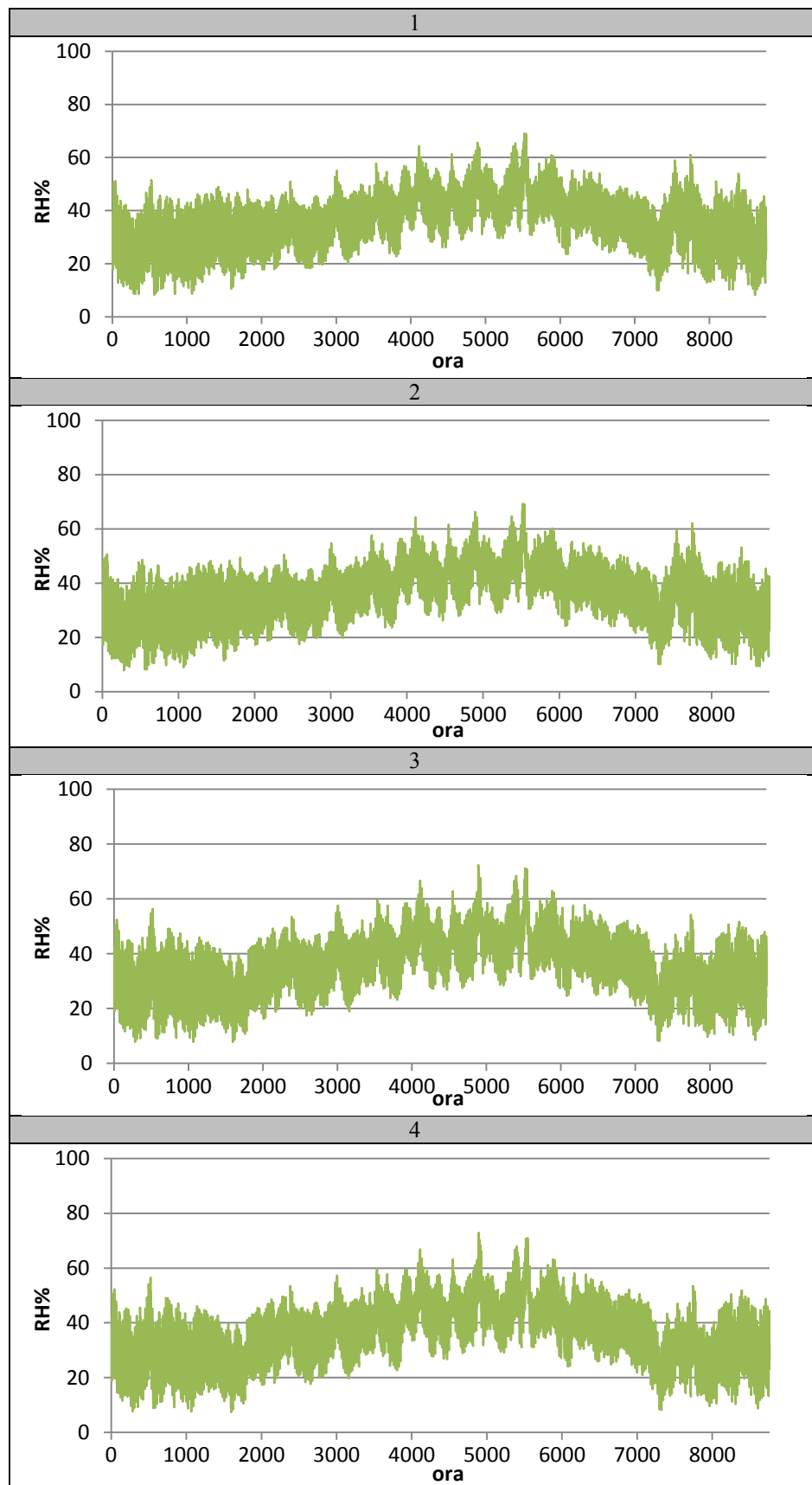


Figura 3.30 Andamento dell'umidità relativa percentuale di tutti e quattro gli appartamenti analizzati.

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

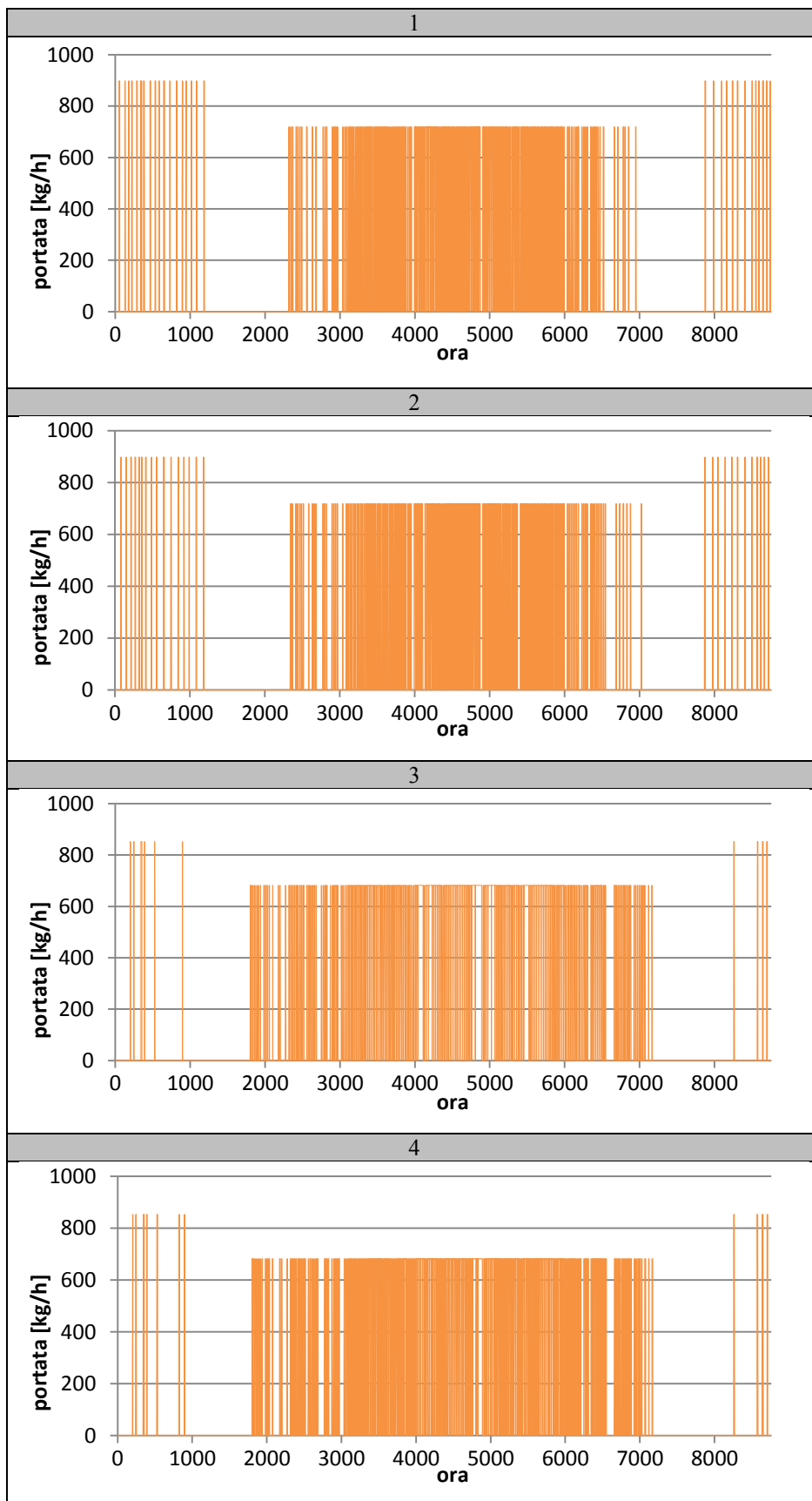


Figura 3.31 Andamento della portata circolante nel sistema TABS dei quattro appartamenti.

I profili di portata circolante nei sistemi TABS evidenziano che, grazie all'elevata inerzia termica dei solai, non è indispensabile un funzionamento continuo per mantenere la temperatura di comfort all'interno degli alloggi, ma è sufficiente un periodo limitato per stoccare/asportare il calore. Con tale tipologia di terminale d'impianto è possibile:

- traslare il picco di richiesta termica in ore della giornata con la tariffazione elettrica è più vantaggiosa,
- il calore, precedentemente stoccato, è reso disponibile all'utente durante le ore di non funzionamento della pompa di calore permettendo un conseguente risparmio economico.

In riferimento alle figure 3.26, 3.27, 3.28 e 3.29, si nota che è presente una continua oscillazione di valori termici dovuta all'inerzia termica del sistema poichè, in inverno, prima il calore è stoccato nello strato attiguo le tubazioni e successivamente viene reso disponibile per radiazione all'ambiente interno. In estate, invece, il sistema TABS asporta il calore stoccato nella struttura muraria attiva raffreddando, conseguentemente, l'alloggio. Tale variazione di temperatura rientra nel range di comfort di 4 K/h, e la temperatura media interna si attesta in media su i 20°C in regime di riscaldamento e su i 26°C in regime di raffrescamento. D'altra parte i valori istantanei minimi e massimi divergono non poco da quelli medi e perciò, durante questi intervalli di tempo, non può essere garantito il livello di comfort prestabilito dalla normativa europea.

**Tabella 3-3 Valori di temperatura interna medi, massimi e minimi degli appartamenti.**

REGIME INVERNALE				
	APP.1	APP.2	APP.3	APP.4
$T_{MEDIA}$ [°C]	20,66	20,66	21,69	21,76
$T_{MAX}$ [°C]	22,49	22,40	24,87	24,94
$T_{MIN}$ [°C]	19,46	19,47	18,96	18,94
REGIME ESTIVO				
	APP.1	APP.2	APP.3	APP.4
$T_{MEDIA}$ [°C]	25,97	25,94	26,07	25,98
$T_{MAX}$ [°C]	28,07	28,33	29,23	28,95
$T_{MIN}$ [°C]	24,24	24,25	23,73	23,81

In riferimento alla tabella 3-3, si evidenzia che la temperatura massima raggiunta negli appartamenti, soprattutto quelli esposti a Sud, è molto elevata e ciò implica che le condizioni interne non siano adeguate a garantire un sufficiente comfort termico, mentre l'umidità relativa risulta essere contenuta per merito della ventilazione meccanica in abbinamento a un recuperatore entalpico.

Tale comportamento deriva dal fatto che, non essendo presente nessun tipo di ombreggiamento esterno alle finestre, il carico interno relativo alla radiazione solare è molto elevato. In inverno il carico interno funge da apporto gratuito di calore, diminuendo la richiesta termica da fornire con i solai termoattivi, mentre in estate rappresenta una quota di calore che deve essere asportata, costringendo il sistema TABS a stare in funzione per un tempo prolungato (si veda figura 3.30) per raffrescare l'ambiente. Ciò comunque non permette di contenere i picchi di temperatura durante i giorni caratterizzati da un'elevata insolazione.

Dai dati della simulazione si è quantificata la potenza che, in ogni ora, il sistema TABS è in grado di fornire/sottrarre all'ambiente, attraverso l'equazione (3.13):

$$Q = U_{solaio} A_{utile\ solai} \Delta T_{ml} \quad (3.13)$$

Dove  $U_{solaio}$  è la trasmittanza termica della superficie attiva,  $A_{utile\ solai}$  l'area netta del solaio e  $\Delta T_{ml}$  è la differenza di temperatura medio logaritmica determinata in funzione della temperatura interna e della muratura secondo l'equazione (3.14) per l'inverno e (3.15) per l'estate.

$$\Delta T_{ml\ heat} = \frac{(T_{core_t} - T_{air_{t-1}}) - (T_{core_{t-1}} - T_{air_t})}{\ln\left(\frac{T_{core_t} - T_{air_{t-1}}}{T_{core_{t-1}} - T_{air_t}}\right)} \quad (3.14)$$

$$\Delta T_{ml\ cool} = \frac{(T_{air_{t-1}} - T_{core_t}) - (T_{air_t} - T_{core_{t-1}})}{\ln\left(\frac{T_{air_{t-1}} - T_{core_t}}{T_{air_t} - T_{core_{t-1}}}\right)} \quad (3.15)$$

Dove  $t'$  indica che si tratta del valore allo step temporale precedente, mentre  $t$  lo step temporale presente.

Dalla serie di valori risultanti si è dedotta la potenza massima in regime di riscaldamento e raffrescamento, e si è ricavato il flusso di potenza massimo in  $W/m^2$  in funzione dell'area e della trasmittanza della parte del solaio che va dalle tubazioni costituenti il sistema TABS all'ambiente analizzato. I valori ottenuti sono riportati in tabella 3-4:

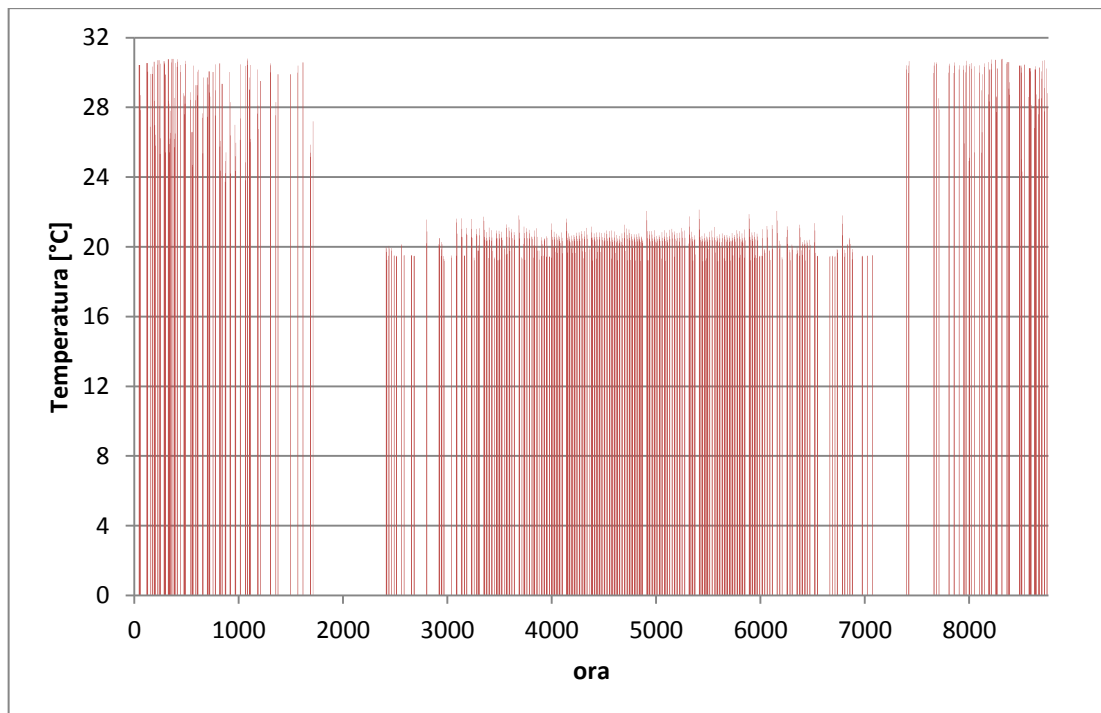
**Tabella 3-4 Flusso di potenza attraverso il sistema TABS nei quattro appartamenti.**

	APP.1	APP.2	APP.3	APP.4
Flusso di potenza massimo in regime di riscaldamento [ $W/m^2$ ]	26,48	25,18	22,13	22,77
Flusso di potenza massimo in regime di raffrescamento [ $W/m^2$ ]	23,45	23,78	29,98	28,07

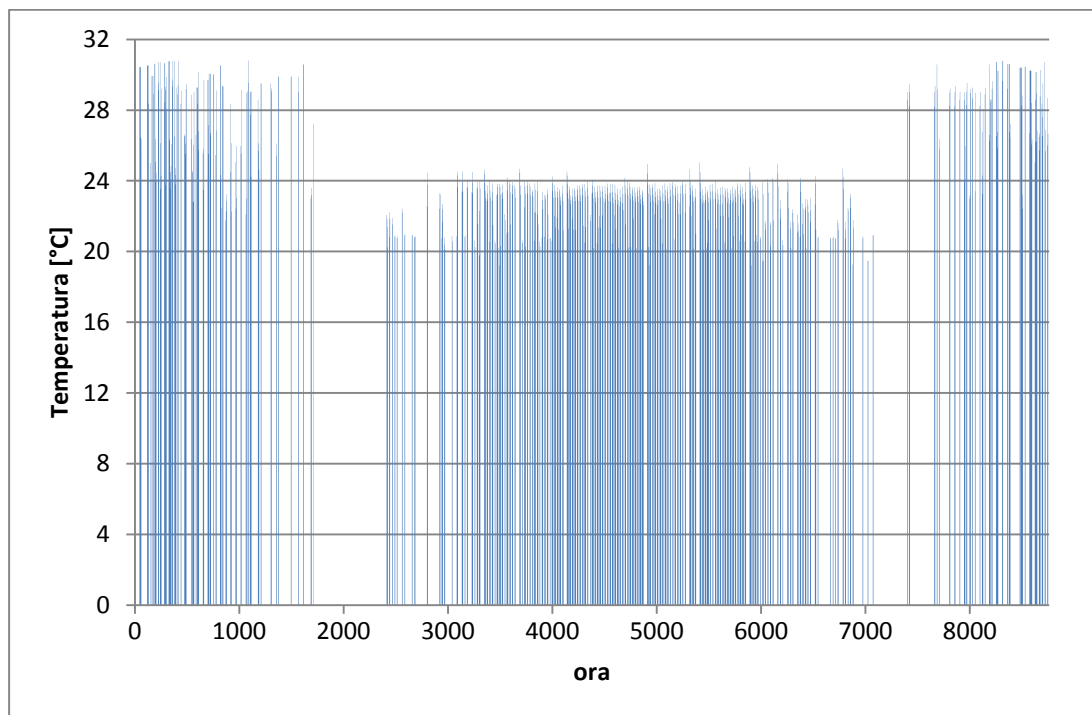
La tabella 3-4 evidenzia che negli appartamenti 3 e 4 il flusso di potenza specifico in regime di raffrescamento è elevato, al limite dei valori che si riscontrano in edifici energeticamente non prestanti. Questo è sintomo dell'elevato fabbisogno termico estivo richiesto, in particolare dagli alloggi esposti a sud, e per tale motivo si sono cercati degli accorgimenti tecnici per ridurlo.

Pertanto sono stati introdotti degli ombreggiamenti esterni alle componenti finestrate dell'edificio tramite l'interfaccia di TRNBUILD. Nella sezione *Windows* si è imposto un coefficiente di ombreggiamento esterno pari a 0,5 per le finestre esposte a Sud, Est ed Ovest, ed è stata rifatta la simulazione mantenendo inalterate le altre componenti dell'impianto.

I risultati ottenuti relativi alla parte impiantistica sono illustrati nei grafici seguenti:



**Figura 3.32 Andamento della temperatura di mandata al sistema TABS nel caso con ombreggiamento esterno.**



**Figura 3.33 Andamento della temperatura di ritorno al sistema TABS nel caso con ombreggiamento esterno.**

Analogamente al caso precedente, si presentano temperature di mandata minori in inverno e maggiori in estate rispetto ai valori derivanti dalla fase di dimensionamento, per le medesime motivazioni descritte in precedenza. La differenza tra il livello termico di ingresso e uscita è sempre ridotto e nella stagione invernale il valore massimo è di  $2,336^{\circ}\text{C}$  e nella stagione estiva è pari a  $-2,91^{\circ}\text{C}$ .

L'unica diversità rilevante riscontrata è l'aumento del periodo nel quale è richiesto riscaldamento e la conseguente riduzione del periodo di raffrescamento. Ciò è motivato dall'installazione degli ombreggiamenti esterni che riducono fortemente la radiazione solare entrante nell'ambiente e quindi anche il relativo apporto di calore sia nella stagione invernale, sia nella stagione estiva.

Di seguito si presentano gli andamenti di:

- temperatura interna;
- temperatura della struttura muraria attiva;
- umidità relativa
- portata circolante nel sistema TABS di ogni singolo appartamento;

nel caso di installazione di dispositivi atti all'ombreggiamento esterno.

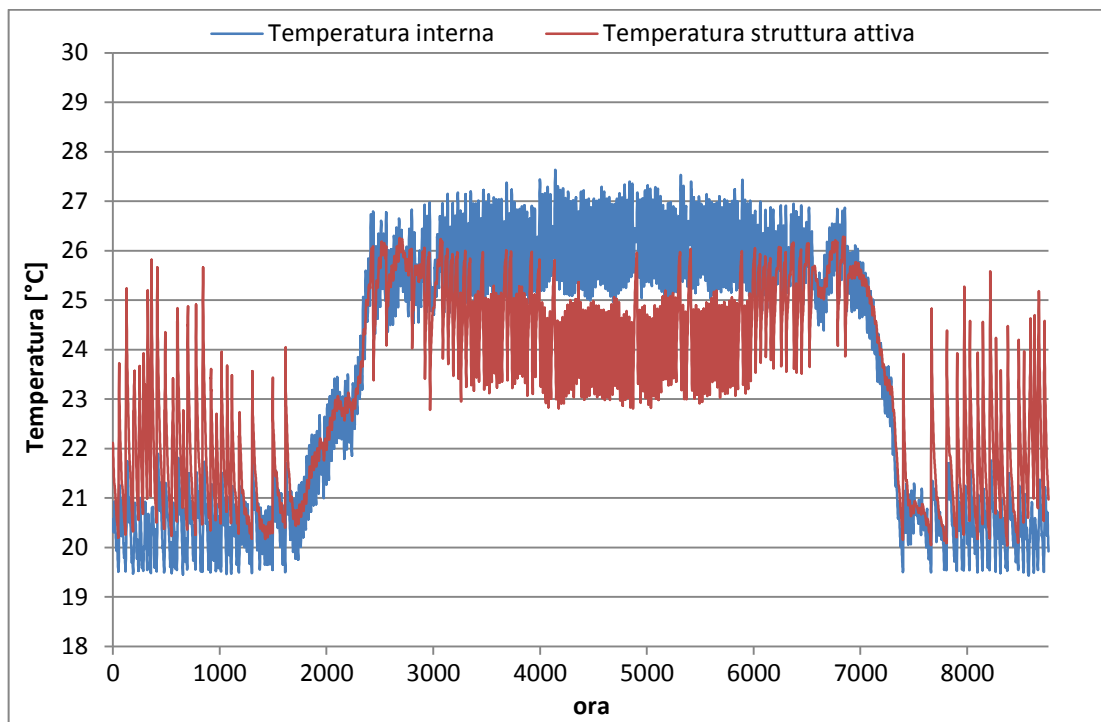


Figura 3.34 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 1 con ombreggiamento esterno.

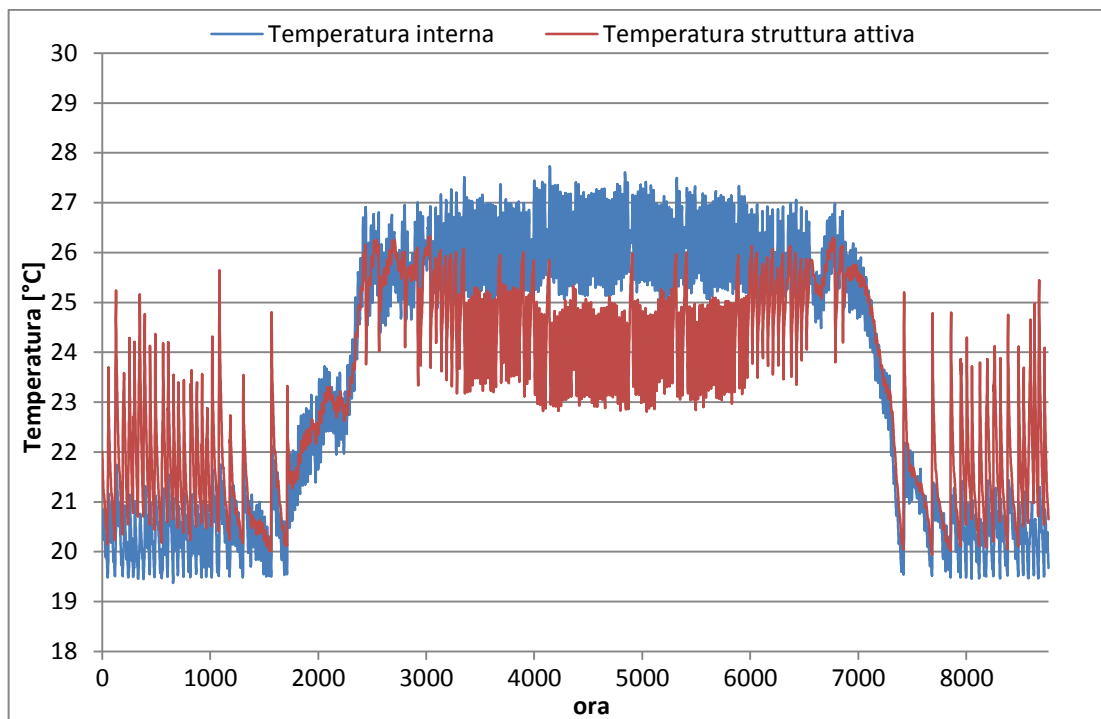


Figura 3.35 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 2 con ombreggiamento esterno.

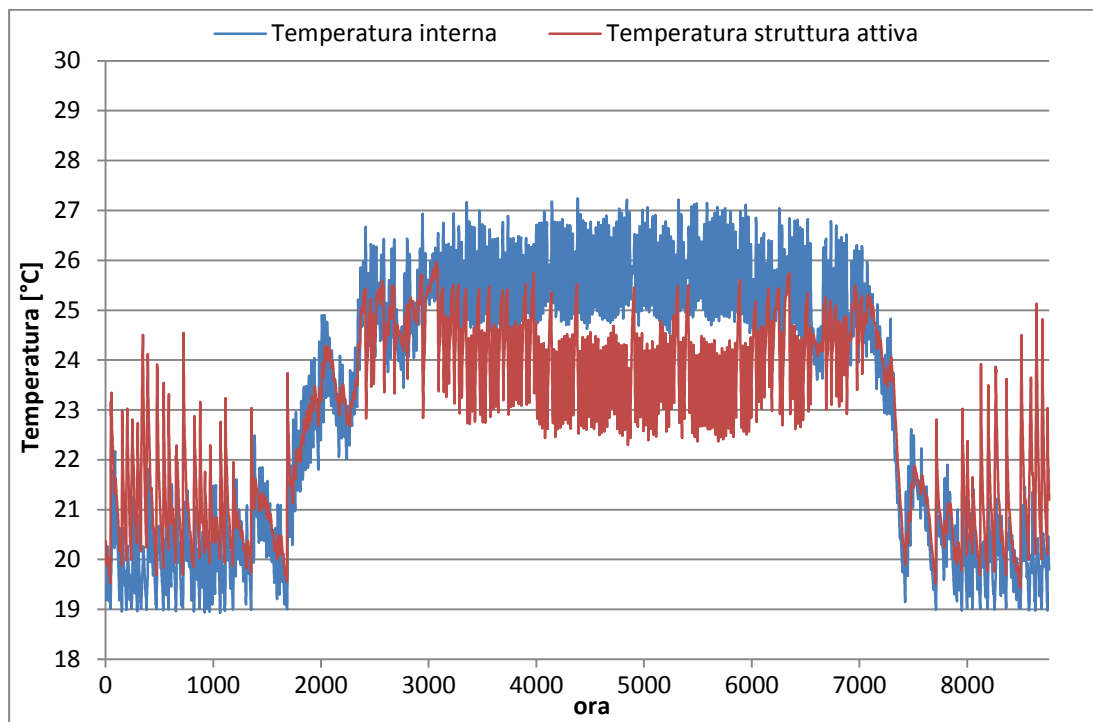


Figura 3.36 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 3 con ombreggiamento esterno.

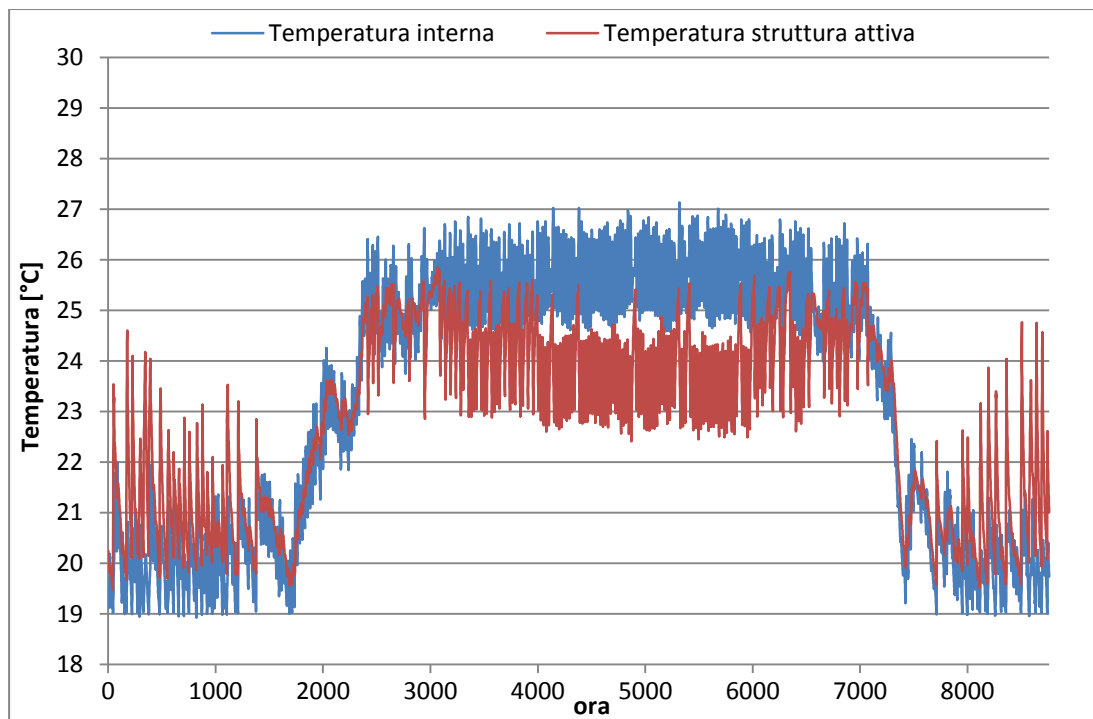


Figura 3.37 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per l'appartamento 4 con ombreggiamento esterno.



# SIMULAZIONE DINAMICA DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO

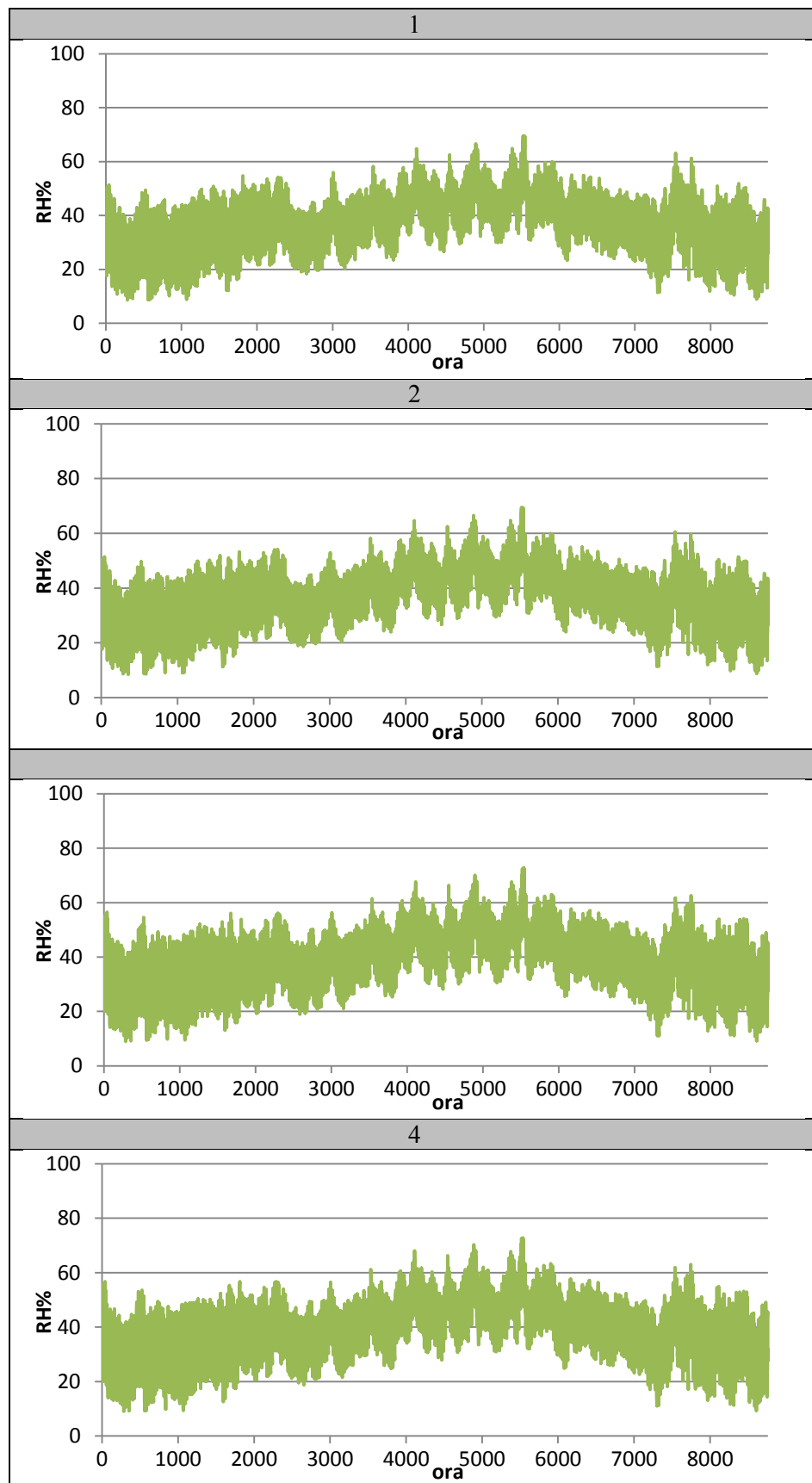


Figura 3.38 Andamento dell'umidità relativa percentuale di tutti e quattro gli appartamenti analizzati nel caso di ombreggiamento esterno.

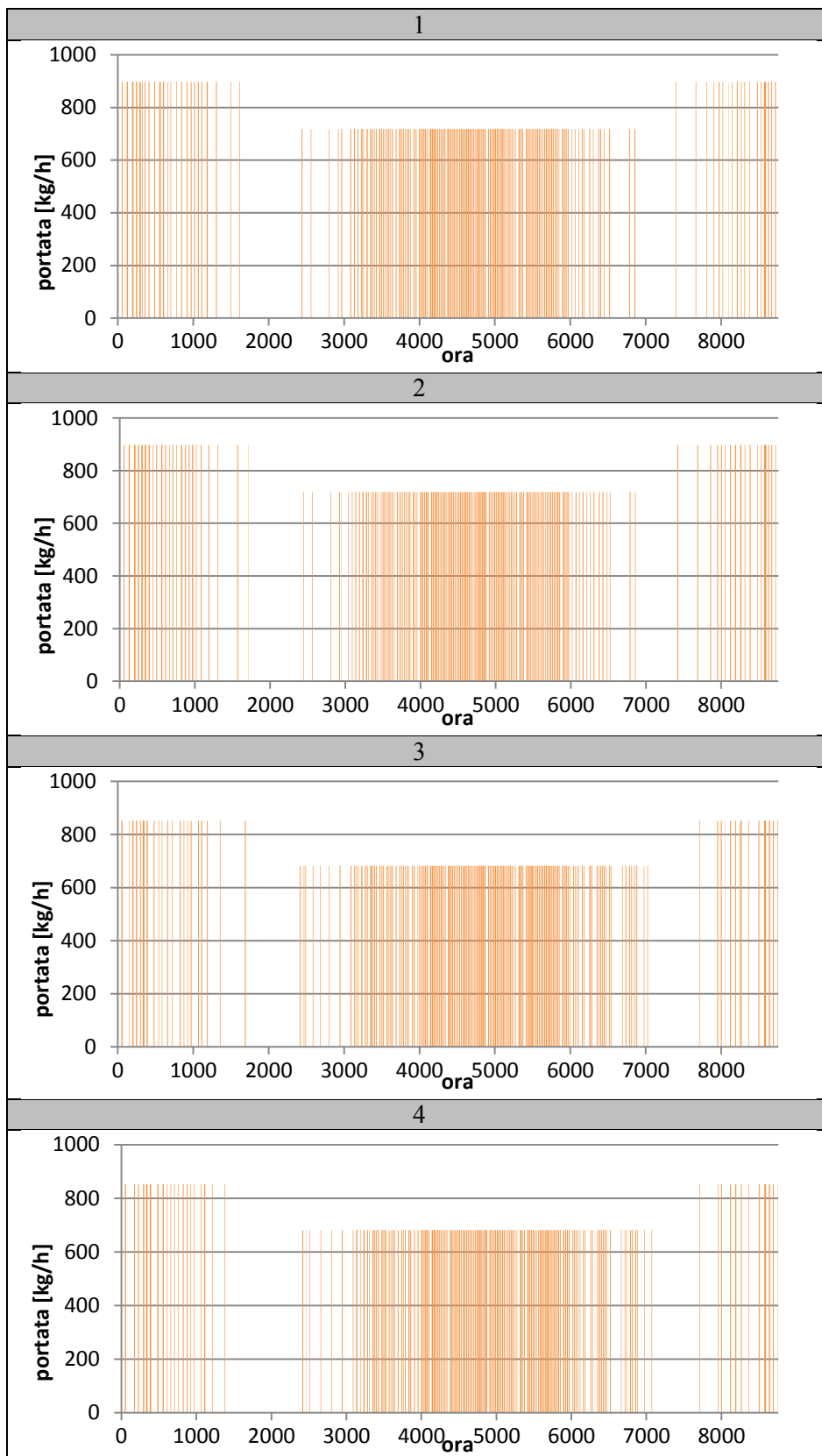


Figura 3.39 Andamento della portata circolante nel sistema TABS dei quattro appartamenti nel caso di ombreggiamento esterno.

In riferimento alle figure 3.34, 3.35, 3.36 e 3.37, si nota che, rispetto al caso precedente, si manifesta una forte attenuazione dei picchi di temperatura, soprattutto per quanto concerne il lato estivo, mentre le temperature minime e le temperature medie non subiscono forti alterazioni. La tabella 3-5 evidenzia che le temperature massime, che in precedenza sfioravano i 30°C, hanno valori poco superiori ai 27°C, permettendo di garantire agli occupanti un buon comfort, mentre le temperature medie si attestano intorno ai 20°C in inverno e ai 26°C in estate come in precedenza. Le temperature minime, negli appartamenti 3 e 4 si attestano a valori di poco inferiori ai 19°C, ma solo in casi isolati come riportato nei profili di temperatura, senza compromettere il benessere interno.

Nella tabella 3-6 si riportano i valori di flusso termico specifico in W/m<sup>2</sup> determinati con il medesimo procedimento descritto in precedenza. La differenza riscontrata, rispetto al caso senza ombreggiamenti esterni, è la serie di valori riguardante il regime estivo. Si prenda ad esempio l'appartamento 3: il flusso termico specifico in raffrescamento è stato ridotto del 36%, mentre quello in riscaldamento è aumentato dell'8%. Ciò significa che per mezzo degli ombreggiamenti esterni è stato possibile ridurre fortemente il carico estivo solare, comportando un maggior benessere interno e la riduzione dei picchi di temperatura. In inverno, invece, si è ridotto l'apporto gratuito che deriva dalla radiazione senza, però, influire in modo rilevante sul livello di comfort o sull'aumento dei flussi specifici di potenza.

**Tabella 3-5 Valori di temperatura interna media, massima e minima degli appartamenti con ombreggiamento esterno.**

REGIME INVERNALE				
	APP.1	APP.2	APP.3	APP.4
T <sub>MEDIA</sub> [°C]	20,40	20,37	20,08	20,09
T <sub>MAX</sub> [°C]	21,89	21,75	22,17	21,99
T <sub>MIN</sub> [°C]	19,43	19,37	18,93	18,92
REGIME ESTIVO				
T <sub>MEDIA</sub> [°C]	25,91	25,91	25,46	25,45
T <sub>MAX</sub> [°C]	27,64	27,73266	27,24288	27,13
T <sub>MIN</sub> [°C]	23,30	23,38	23,42	23,22

**Tabella 3-6 Flusso di potenza attraverso il sistema TABS nei quattro appartamenti con ombreggiamento esterno.**

	APP.1	APP.2	APP.3	APP.4
Flusso di potenza massimo in regime di riscaldamento [W/m <sup>2</sup> ]	25,56	24,54	24,03	22,80
Flusso di potenza massimo in regime di raffrescamento [W/m <sup>2</sup> ]	19,60	19,63	19,06	18,19

### 3.4.2 Utenza monofamiliare

Il secondo caso studio vuole individuare le prestazioni di un sistema TABS installato presso un'utenza monofamiliare di due piani: piano terra e primo piano.

Le superfici attive ipotizzate per tale abitazione sono:

- il pavimento a terra;
- il solaio interpiano;
- il solaio a soffitto.

A differenza di quanto ipotizzato per il caso studio multifamiliare, l'impianto a pompa di calore è di tipo autonomo e di potenza pari a 8 kW.

I risultati ottenuti relativi alla parte impiantistica sono illustrati nei grafici seguenti:

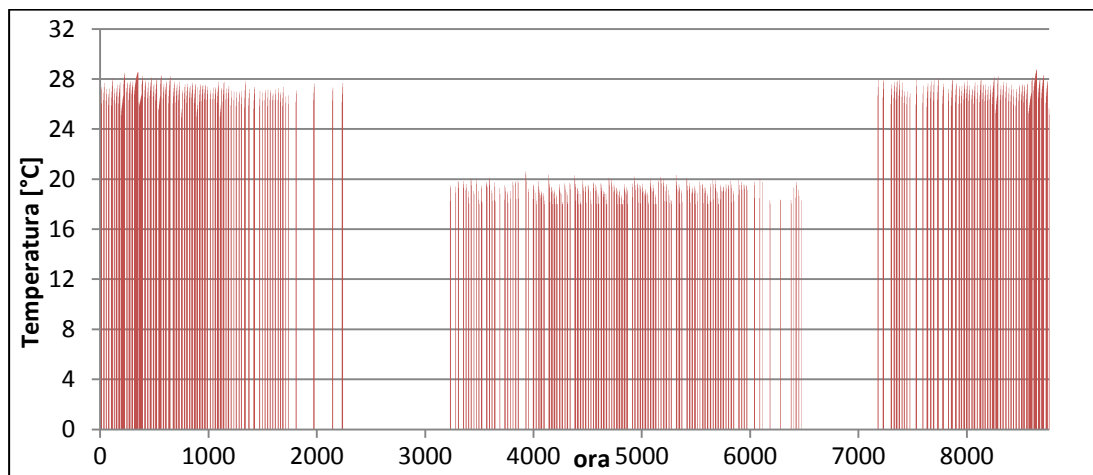


Figura 3.40 Andamento della temperatura di mandata al sistema TABS nell'utenza monofamiliare.

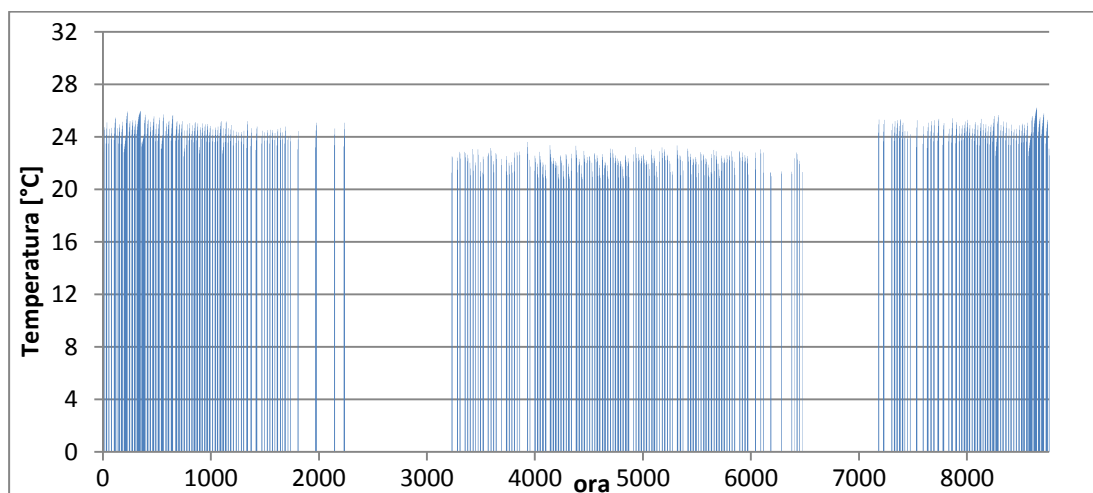


Figura 3.41 Andamento della temperatura di ritorno al sistema TABS nell'utenza monofamiliare.

In riferimento alla figura 3.40 si nota che la temperatura di mandata non è mai di 32°C in inverno e di 18°C in estate come calcolato durante la fase di dimensionamento, perché a causa del ricircolo di portata, il livello di temperatura tende ad diminuire nella stagione di riscaldamento e ad aumentare in quella di raffrescamento rispetto quello raggiunto all'uscita della pompa di calore. La differenza tra il livello termico di ingresso e uscita rimane sempre ridotto e nella stagione invernale il valore massimo è di 2,714°C e nella stagione estiva è pari a -3,03.

Di seguito si presentano gli andamenti di:

- temperatura interna;
- temperatura della struttura muraria attiva;
- umidità relativa;
- portata circolante per ogni singolo piano della villetta.

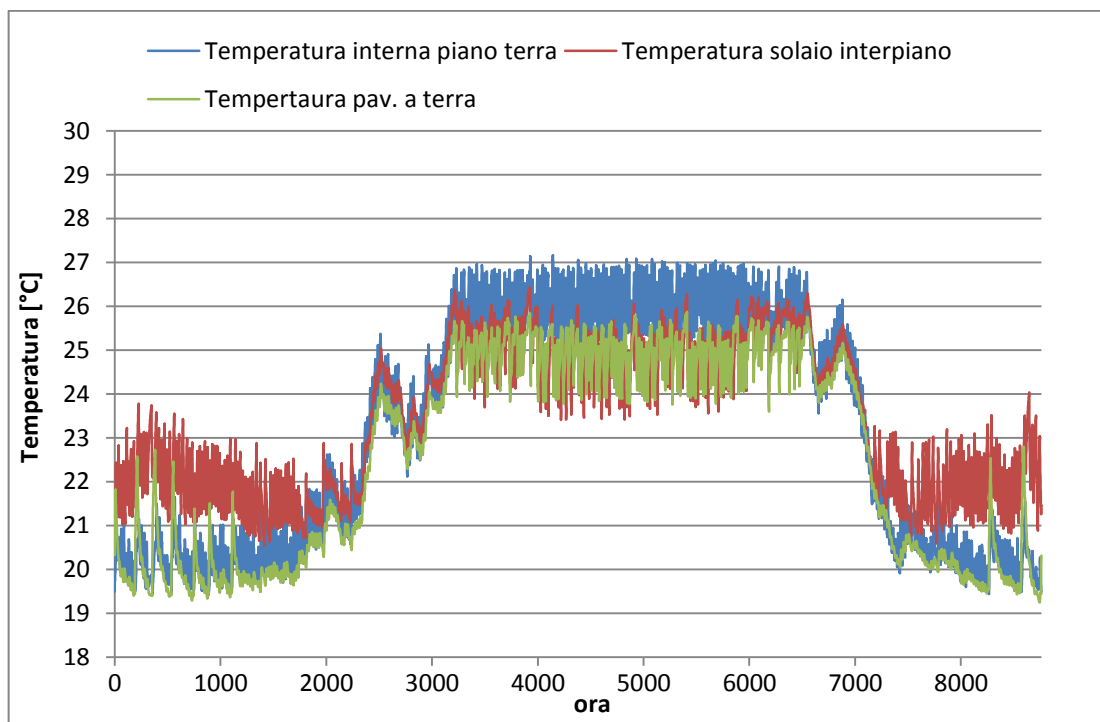


Figura 3.42 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per il piano terra.

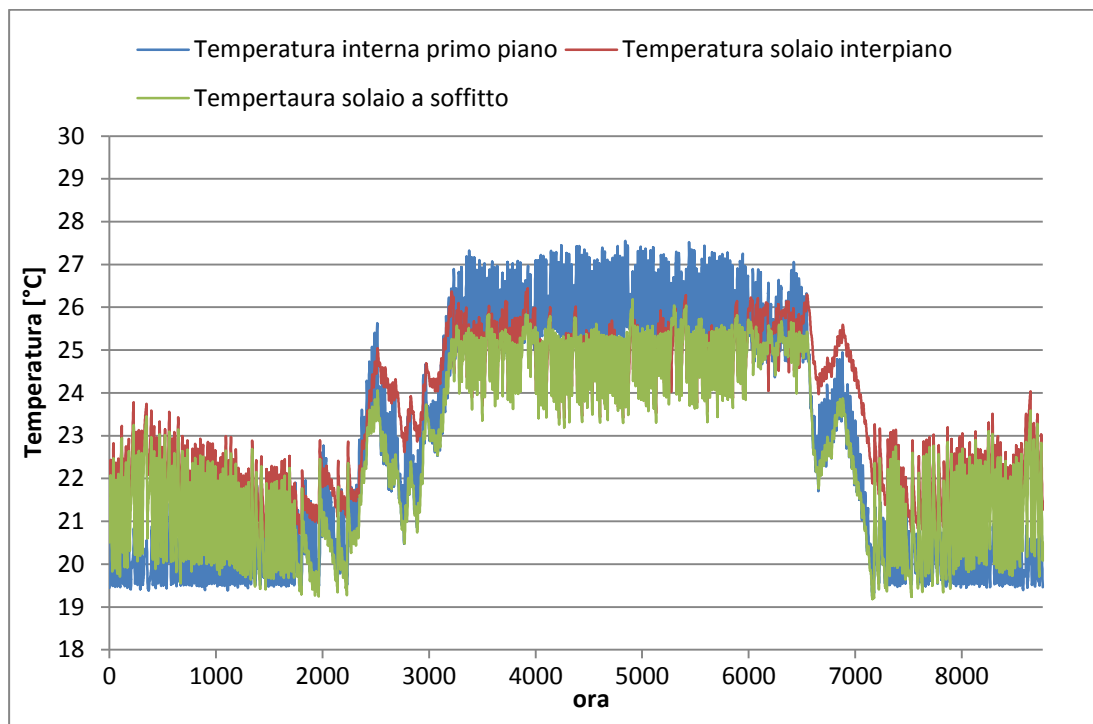


Figura 3.43 Andamento della temperatura interna e della struttura attiva per il primo piano.

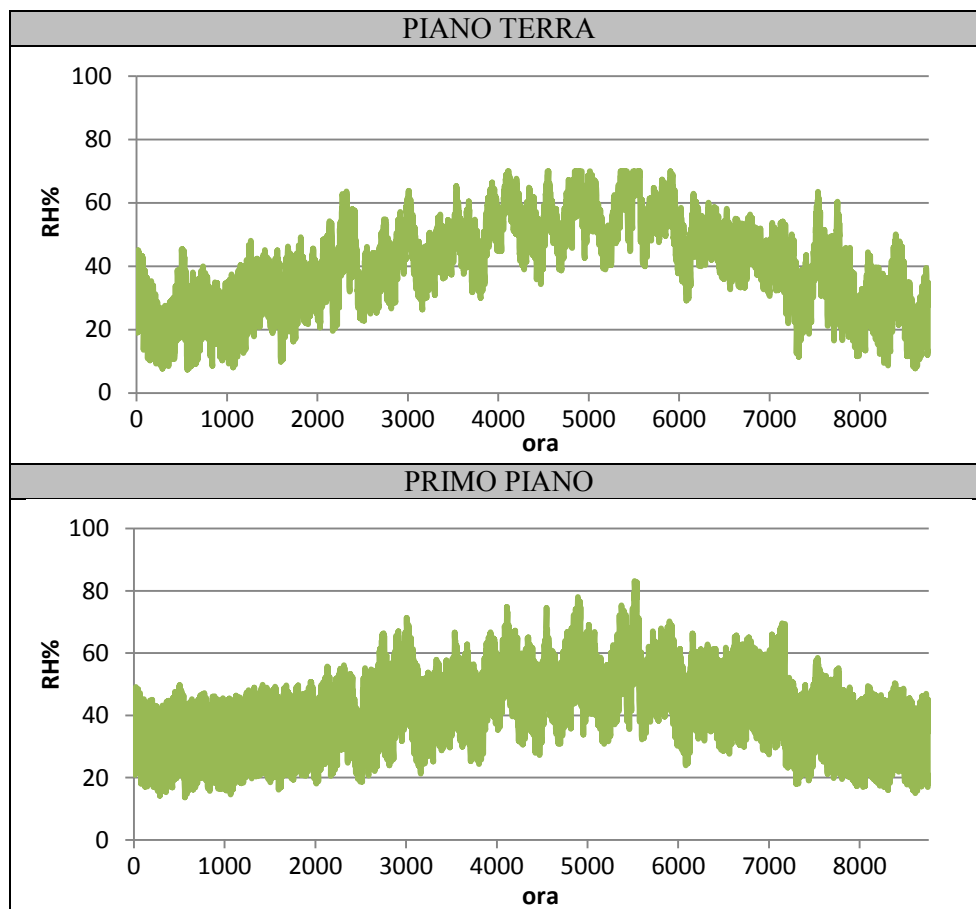


Figura 3.44 Andamento dell'umidità relativa nei due piani dell'utenza monofamiliare.

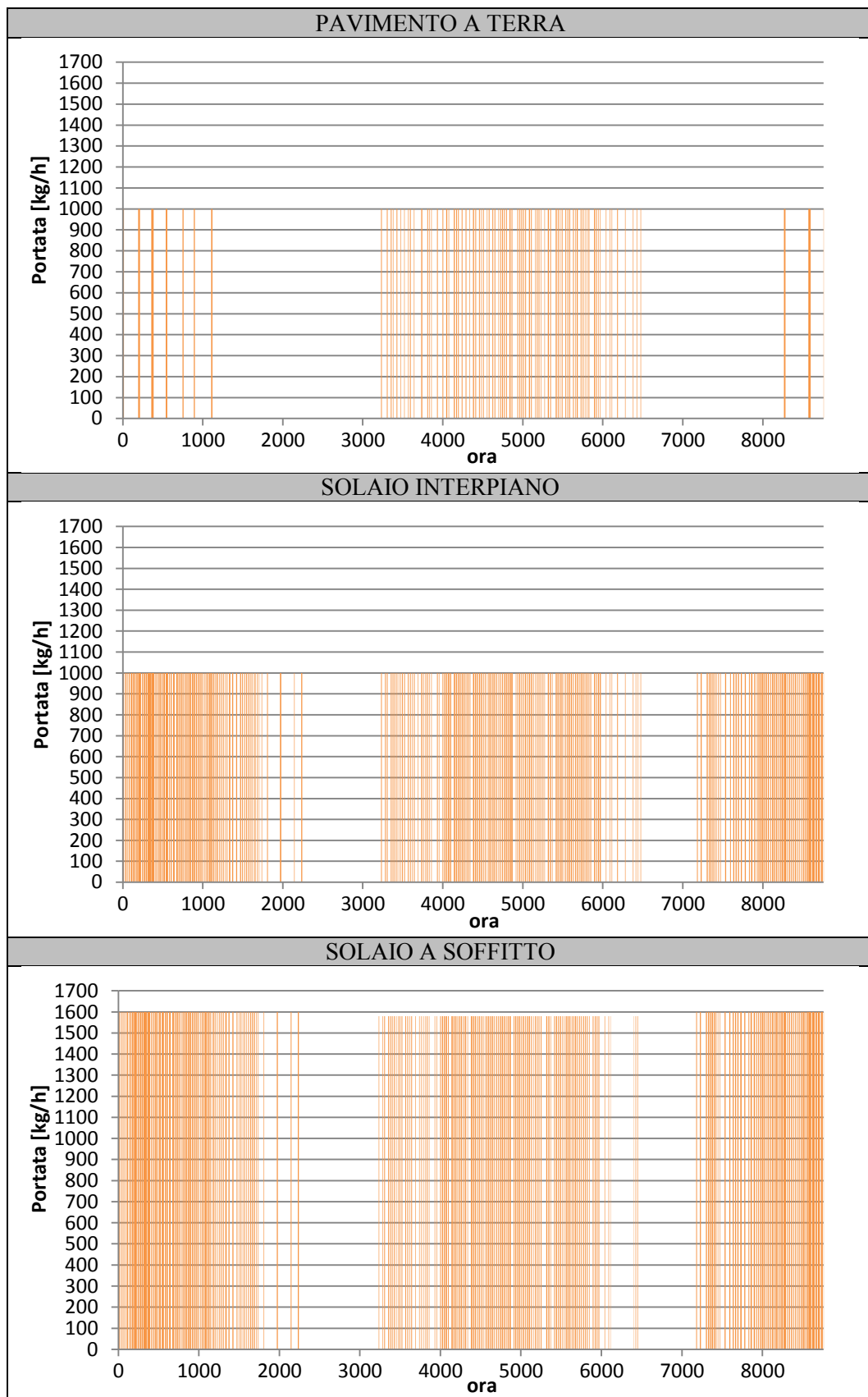


Figura 3.45 Andamento della portata circolante nel sistema TABS installato nell'utenza monofamiliare.

Dai profili di temperatura illustrati in figura 3.42 e 3.43, si evince che con tale sistema impiantistico è possibile ottenere un ottimo comfort interno per gli occupanti, anche se le oscillazioni sono continue, ma sempre incluse nel range di 4K/h. Tale fatto è evidenziato anche dalla tabella 3-7: le temperature medie interne invernali e estive rientrano nei valori di normativa, e inoltre le temperature massime e minime non sono tali da compromettere il benessere interno dell'abitazione.

**Tabella 3-7 Valori di temperatura interna media, massima e minima del piano terra e del primo piano della villetta.**

	PIANO TERRA	PRIMO PIANO
<b>REGIME INVERNALE</b>		
$T_{\text{MEDIA}} [^{\circ}\text{C}]$	20,58	20,33
$T_{\text{MAX}} [^{\circ}\text{C}]$	22,62	22,77
$T_{\text{MIN}} [^{\circ}\text{C}]$	19,44	19,38
<b>REGIME ESTIVO</b>		
$T_{\text{MEDIA}} [^{\circ}\text{C}]$	25,96	25,94
$T_{\text{MAX}} [^{\circ}\text{C}]$	27,17	27,55
$T_{\text{MIN}} [^{\circ}\text{C}]$	23,70	24,36

Nella tabella 3-8 si riportano i valori di flusso termico specifico in  $\text{W/m}^2$  determinati come descritto nel caso di utenza multifamiliare. Si osserva subito che i valori riguardanti il solaio interpiano al primo piano sono molto ridotti a causa della installazione di un materassino anticalpestio posto al di sotto della copertura che, essendo anche un isolante termico, impedisce a una parte del calore di raggiungere la superficie. Il pavimento a terra presenta dei flussi termici minori rispetto a quelli del soffitto perché, in pratica, funge da integrazione al solaio interpiano, soprattutto in regime invernale, come si evince in figura 3.58. Gli altri valori, presenti in tabella, rientrano nella media per abitazioni energeticamente prestanti.

**Tabella 3-8 Flusso di potenza attraverso il sistema TABS nel piano terra e primo piano della villetta.**

	PIANO TERRA		PRIMO PIANO	
	PAV. A TERRA	SOLAIO INTERPIANO	SOLAIO INTERPIANO	SOLAIO A SOFFITTO
Flusso di potenza massimo in regime di riscaldamento [ $\text{W/m}^2$ ]	9,30	18,83	3,48	15,78
Flusso di potenza massimo in regime di raffrescamento [ $\text{W/m}^2$ ]	12,63	14,42	3,34	19,08



### 3.5 Caso confronto: ventilconvettori

Per analizzare le prestazioni termiche e elettriche del sistema TABS in ambito residenziale, si è deciso di confrontarlo con un terminale di impianto più utilizzato nel parco edilizio italiano nel caso di riqualificazione energetica: il ventilconvettore.

Un ventilconvettore (abbreviato con VC o FC) è costituito da un carter metallico all'interno del quale sono presenti una o due batterie di scambio termico aria/acqua, un ventilatore, un filtro dell'aria e una vaschetta per la raccolta della condensa; mentre all'esterno presenta i collegamenti con le reti dell'acqua calda e/o refrigerata. Per installazioni a vista, possono essere dotati di un mobile di copertura che maschera la struttura, i collegamenti elettrici, l'eventuale comando e i collegamenti idraulici con le eventuali valvole di intercettazione.

Nei sistemi ad una sola batteria di scambio termico (2 tubi) il fluido di scambio, caldo o freddo, circola negli stessi tubi, per cui si può avere, nello stesso periodo, solo riscaldamento (con acqua calda) o solo condizionamento (con acqua refrigerata). Nei sistemi a due batterie di scambio termico (4 tubi), è possibile utilizzare sia il fluido caldo, sia il fluido freddo nello stesso periodo di utilizzo: con l'ausilio di valvole all'ingresso delle batterie, viene scelto il fluido da utilizzare in base alla temperatura richiesta in ambiente e, quindi, riscaldare o raffrescare a seconda delle necessità. Esisteva anche una versione per impianti a 3 tubi, ormai andata in disuso. Questo sistema sfruttava un unico tubo di ritorno dell'acqua, calda o fredda, ma richiedeva un notevole impegno dal punto di vista impiantistico con il solo risparmio di una tubazione acqua.

Il ventilconvettore è un'unità a "tutto ricircolo" di aria. L'aria ambiente è prelevata dal ventilatore, passa attraverso il filtro, dove si libera delle polveri grosse, viene spinta verso la batteria di scambio termico, dove per convezione forzata scambia calore con l'acqua, e poi viene espulsa. In caso di riscaldamento il calore viene prelevato, in caso di raffreddamento viene ceduto. Quando l'aria è raffreddata, si opera anche la deumidificazione: l'umidità che è trattenuta durante lo scambio termico condensa e l'acqua prodotta cade nella vasca di raccolta condensa. Questa poi è da evacuare per caduta (o gravità) oppure tramite una pompa di rilancio.

Gli edifici implementati con TRNBUILD per il sistema TABS sono stati privati degli *Active layers*, non più necessari per il caso in esame, mentre la struttura muraria è rimasta immutata. Nell'analisi dell'impianto, i fancoil non sono stati trattati come un sistema operante ad aria perché i risultati ottenuti erano poco soddisfacenti e non riscontravano validità nella realtà. Per tale motivo si è deciso di considerare la potenza che sono in grado di scambiare con l'aria come un carico interno, inserendo un nuovo input nella sezione *Gains*

del programma TRNBILD. Tale carico è pari alla potenza sensibile richiesta dall'edificio in regime dinamico, e per poterlo ricavare si è, prima, imposto che si desidera una temperatura minima di 20°C e massima di 26°C, rispettivamente, nella sezione *Heating* e *Cooling* come raffigurato in figura 3.46.

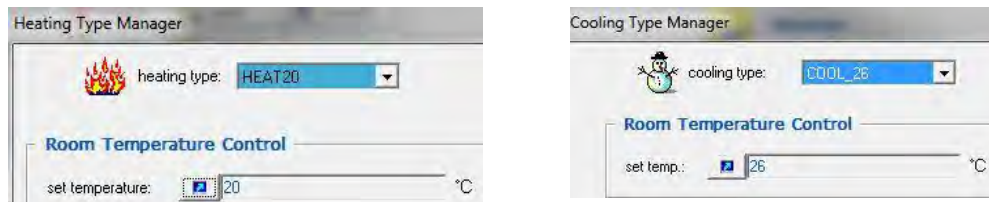


Figura 3.46 Sezione *Heating* e *Cooling* del programma TRNBUILD.

Successivamente è stato eseguito un modello mediante SIMULATION STUDIO (si vedano figure 3.47 e 3.48), sia per l'utenza multifamiliare che monofamiliare, dal quale si sono ottenuti i valori richiesti. La descrizione delle *Type* utilizzate si trova al paragrafo 3.3

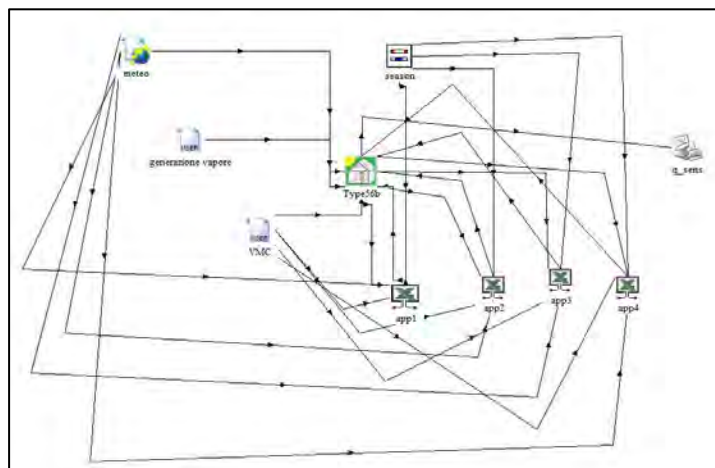


Figura 3.47 Modello in SIMULATION STUDIO dell'utenza multifamiliare per ricavare la potenza sensibile in regime dinamico.

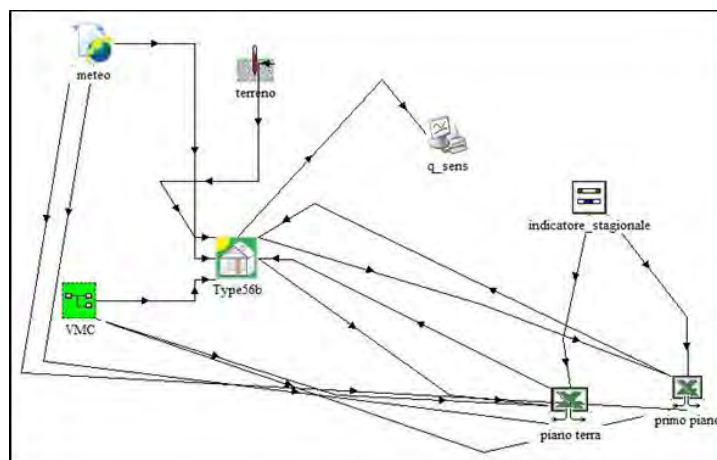


Figura 3.48 Modello in SIMULATION STUDIO dell'utenza monofamiliare per ricavare la potenza sensibile in regime dinamico.

Ricavata la potenza sensibile oraria richiesta dall'edificio, nell'interfaccia di *TRNBUILD* si elimina il vincolo sulle temperature desiderate, imposto precedentemente, e si aggiunge il nuovo input esterno relativo al carico da fornire nella apposita sezione *Gains*. Ora si può procedere alla creazione del modello d'impianto con ventilconvettori con *SIMULATION STUDIO*.

Le *Type* utilizzate sono:

- Type 15-6: legge i dati *Meteonorm* da file esterno, relativi alla località di Venezia Tessera. I parametri inseriti manualmente sono: il numero di superfici esposte verso l'ambiente esterno (4 per la palazzina e 6 per la villetta), l'angolo di inclinazione delle pareti (90° per la pareti e 20° per le falde del tetto della villetta) e l'azimuth delle superfici (0° per esposizione a Sud, 90° per esposizione a ovest, 180° per esposizione a Nord e 270° per esposizione a Est).
- Type 501: è utilizzata solo per la villetta e fornisce la temperatura del suolo secondo questi parametri: la temperatura media del terreno (15°C), l'ampiezza di temperatura superficiale (5°C), il Time shift (30 giorni), le caratteristiche termiche del terreno e la profondità a cui valutare la temperatura del suolo (0.25m).
- Type 56b: legge i dati dell'edificio da file esterno \*.bui. e gli input e output sono:

INPUT	FORNITI DA:
Temperatura a bulbo secco ambiente esterno	Type 15-6
Umidità relativa ambiente esterno	
Temperatura effettiva del cielo	
Radiazione solare totale per l'n-esima superficie	
Radiazione solare diretta per l'n-esima superficie	
Angolo di incidenza della radiazione solare per l'n-esima superficie	
Temperatura del suolo (solo villetta)	Type 501
Generazione di vapore	Type 9a
Portata per la VMC	
Potenza sensibile oraria	
Temperatura di ingresso per la VMC	Type 62 (fogli Excel relativi agli ambienti)
RH% in ingresso per la VMC	
OUTPUT	VERSO A:
Temperatura ambiente	Type 62 (fogli excel relativi agli ambienti) e Type 65c
Umidità relativa interna	

## APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

- Type 515: si è creato un file di testo in cui s'indica l'inizio e la fine della stagione di riscaldamento (di conseguenza anche quella di raffreddamento). Il valore di output di tale blocco è usato come input nelle type 62 riguardanti le zone termiche e la pompa di calore, la calcolatrice "t\_ritorno" e nella type 65c.
- Type 9a: rappresenta un *Data Reader* ed utilizzato per importare nel modello il profilo della generazione di vapore, della portata associata alla ventilazione meccanica e della potenza termica richiesta in riscaldamento e raffreddamento.
- Type 93: memorizza la temperatura di mandata ai ventilconvettori allo step precedente per calcolare la temperatura di ritorno alla pompa di calore.
- Type 62: permette di richiamare dei fogli di calcolo esterni. Con tale metodo è stato modellato il funzionamento della pompa di calore e della ventilazione meccanica controllata a doppio flusso con recupero entalpico e i ventilconvettori.

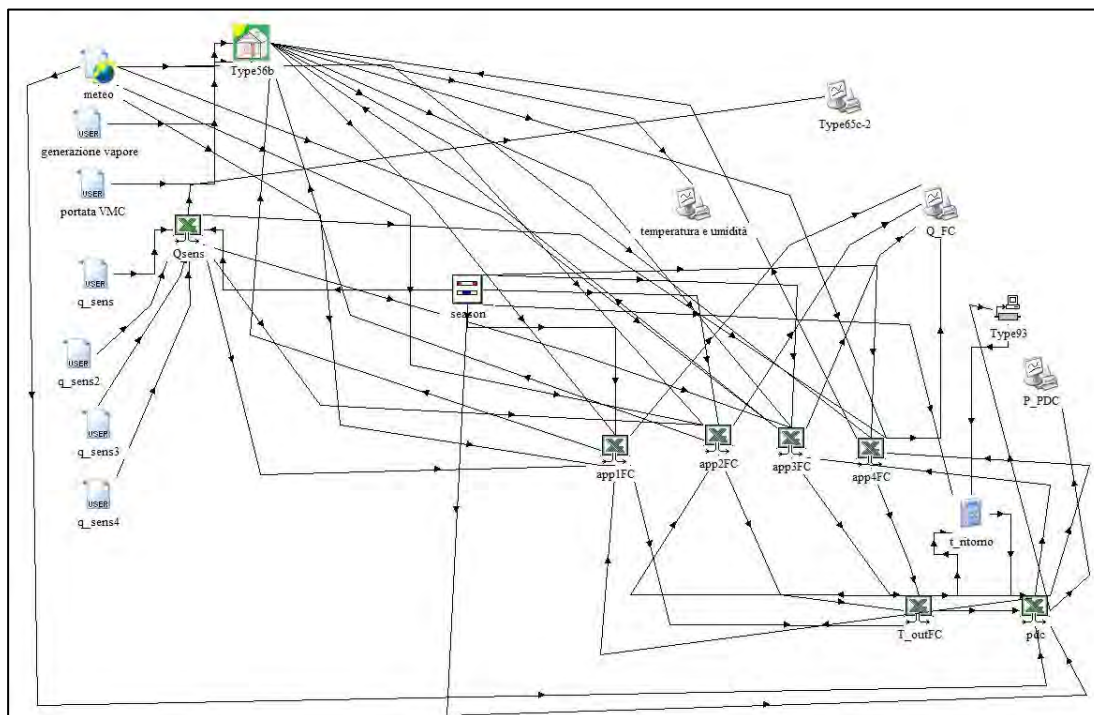
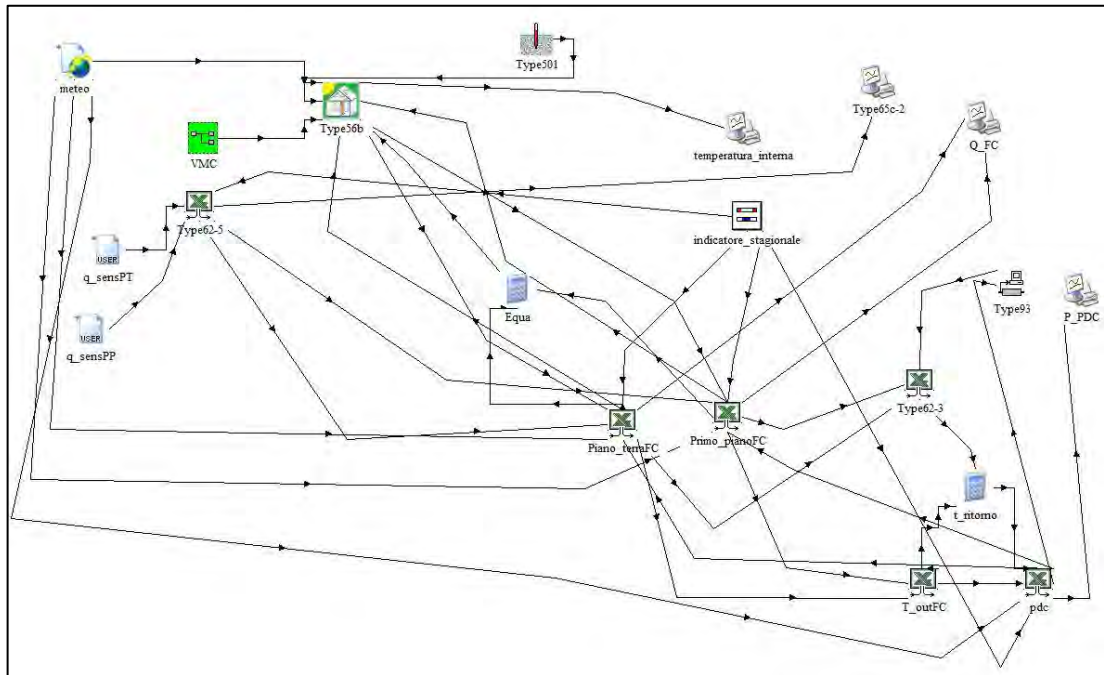


Figura 3.49 Modello in SIMULATION STUDIO per impianto a ventilconvettori dell'utenza multifamiliare.



**Figura 3.50 Modello in SIMULATION STUDIO per impianto a ventilconvettori dell'utenza monofamiliare.**

I fogli di calcolo utilizzati per modellare la ventilazione meccanica controllata e per il calcolo della temperatura di ritorno sono gli stessi che sono stati utilizzati nel caso del sistema TABS. Per la pompa di calore, invece, si è modificato la temperatura di erogazione in riscaldamento e raffrescamento, le quali sono, rispettivamente, 50°C e 7°C e di conseguenza sono stati creati nuovi profili di potenza termica e di COP in funzione dei dati tecnici del dispositivo.

I dati in ingresso e uscita del foglio di calcolo relativo ai ventilconvettori sono:

INPUT	FORNITO DA:	OUTPUT	VERSO:
$Q_{HEAT}$	Type 62 (foglio di calcolo per il $Q_{SENS}$ )	POTENZA FANCOIL	Type56b
$Q_{COOL}$			
Indicatore stagionale	Type515		
Temperatura mandata	Type 62 (foglio di calcolo della pompa di calore)		

I ventilconvettori adottati nella simulazione sono appartenenti al modello FCX della AERMEC<sup>4</sup> di cui si propone in seguito l'immagine.



Figura 3.51 Ventilconvettore FCX della AERMEC. [24]

Negli appartamenti dell'utenza multifamiliare senza ombreggiamento esterno sono installati il seguente numero di ventilconvettori:

	N° FC	POTENZA TERMICA [W]	POTENZA VENTILATORE [W]	PORTATA D'ACQUA [l/h]	PORTATA D'ARIA [m <sup>3</sup> /h]
APPARTAMENTO 1					
Heating	2	1510	22	210	220
Cooling	4	1220	22	210	220
APPARTAMENTO 2					
Heating	2	1510	22	210	220
Cooling	4	1220	22	210	220
APPARTAMENTO 3					
Heating	2	1510	22	210	220
Cooling	4	1500	25	258	290
APPARTAMENTO 4					
Heating	2	1510	22	210	220
Cooling	4	1500	25	258	290

<sup>4</sup> Nelle simulazioni descritte è stato implementato un modello dell'impianto basato a volte su macchinari e componenti esistenti sul mercato. I relativi dati tecnici sono ricavati dalle schede tecniche fornite nei siti ufficiali dei produttori. Tali apparecchi sono assunti come riferimento e non rappresentano in nessun modo l'oggetto dell'analisi. Le prestazioni indicate riguardano il modello nel suo complesso e non i singoli componenti e in nessun caso i risultati ottenuti sono applicabili ai prodotti commerciali indicati.

## SIMULAZIONE DINAMICA DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO

Negli appartamenti dell'utenza multifamiliare con ombreggiamenti esterni sono utilizzati il seguente numero di ventilconvettori:

	N° FC	POTENZA TERMICA [W]	POTENZA VENTILATORE [W]	PORTATA D'ACQUA [l/h]	PORTATA D'ARIA [m³/h]
<b>APPARTAMENTO 1</b>					
Heating	2	1510	22	210	220
Cooling	3	1220	22	210	220
<b>APPARTAMENTO 2</b>					
Heating	2	1510	22	210	220
Cooling	3	1220	22	210	220
<b>APPARTAMENTO 3</b>					
Heating	2	1510	22	210	220
Cooling	3	840	19	144	140
<b>APPARTAMENTO 4</b>					
Heating	2	1510	22	210	220
Cooling	3	840	19	144	140

L'utenza monofamiliare è equipaggiata dai seguenti fancoil:

	N° FC	POTENZA TERMICA [W]	POTENZA VENTILATORE [W]	PORTATA D'ACQUA [l/h]	PORTATA D'ARIA [m³/h]
<b>PIANO TERRA</b>					
Heating	5	1510	22	210	220
Cooling	5	1220	22	210	220
<b>PRIMO PIANO</b>					
Heating	6	1770	25	258	290
Cooling	6	1500	25	258	290

La potenza sensibile richiesta da ogni ambiente è stata suddivisa per il numero di ventilconvettori disponibili in esso installati e confrontata con la potenza termica che il dispositivo può rendere disponibile in funzione della temperatura di mandata, della propria portata nominale e della temperatura di ritorno nominale. Se la potenza richiesta è inferiore a quella erogabile dal fancoil, s'invia tale valore alla type rappresentante l'edificio e si calcola la temperatura di ritorno alla pompa di calore. Se superiore, invece, si utilizza il valore di potenza termica messo a disposizione dall'apparecchio e la temperatura di ritorno sarà pari a quella nominale. In tal caso l'ambiente non avrà modo di essere riscaldato/raffrescato

adeguatamente e quindi esiste il rischio che la temperatura interna non rientri nel range di comfort.

I profili di temperatura ottenuti dalle simulazioni delle due tipologie edilizie sono illustrati nei grafici seguenti.

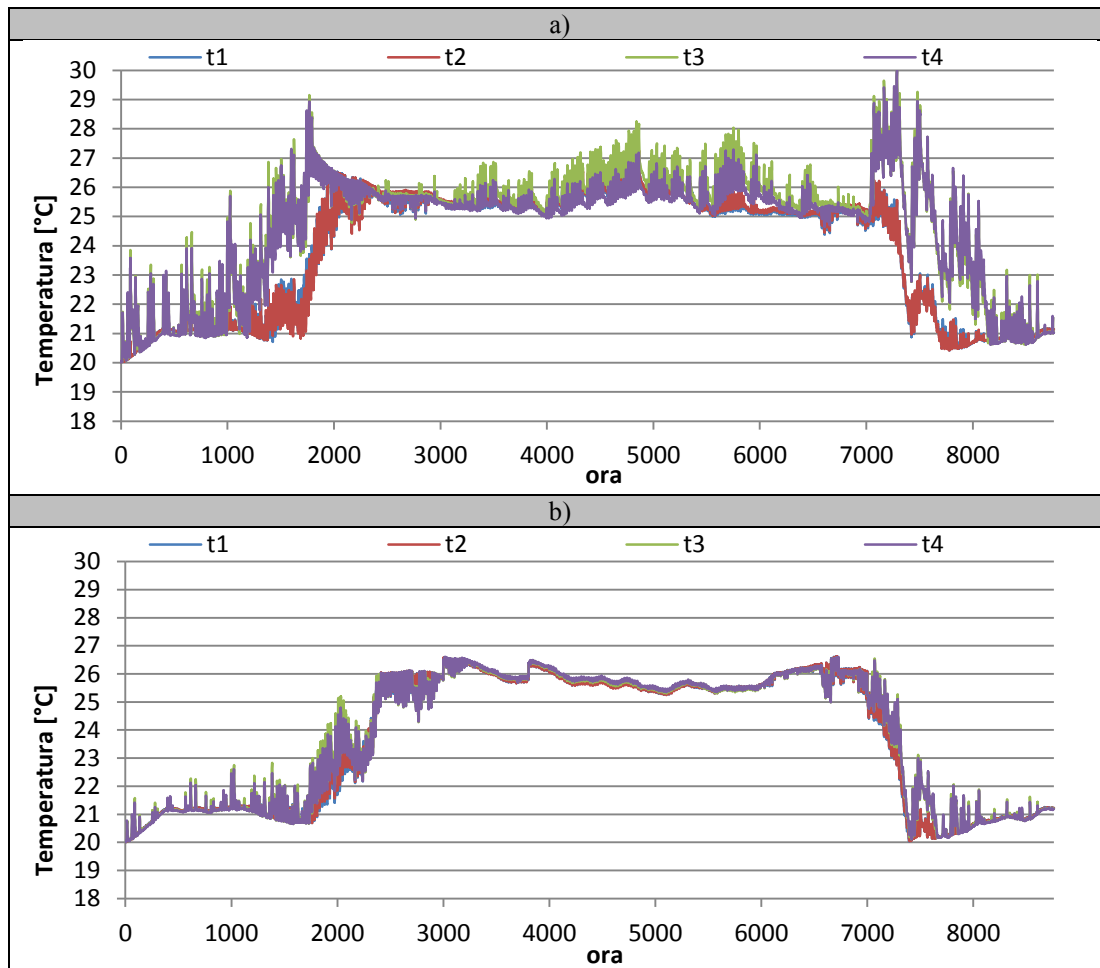


Figura 3.52 Andamento della temperatura interna nei 4 appartamenti: a) caso senza ombreggiamento, b) caso con ombreggiamento

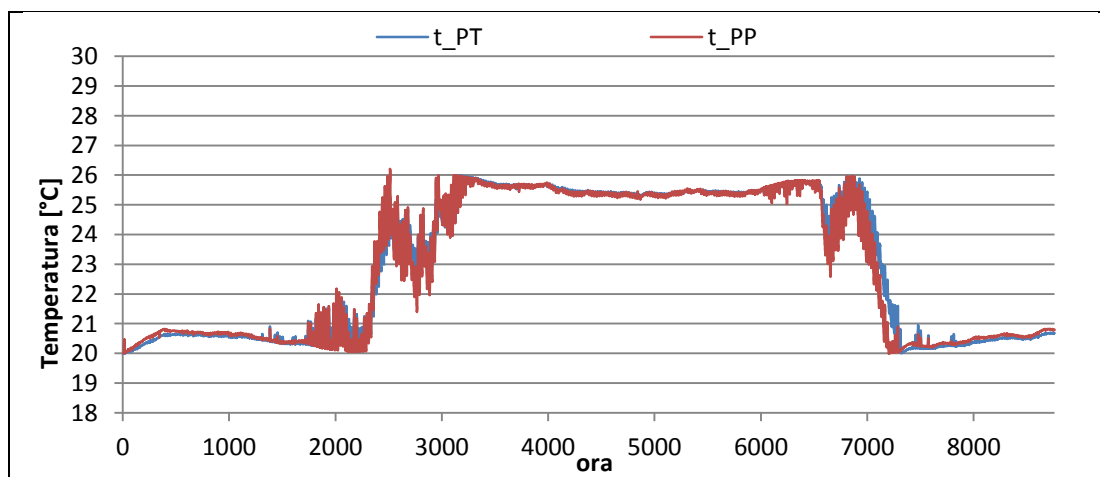


Figura 3.53 Andamento della temperatura interna nei due piani dell'utenza monofamiliare.



In riferimento alla figura 3.52a, si nota che, nel caso di utenza multifamiliare senza ombreggiamento esterno, sia molto difficile mantenere una temperatura di comfort adeguata all'interno degli appartamenti a causa dell'elevato carico estivo dovuto alla radiazione solare, soprattutto nei mesi primaverili e autunnali. Negli altri casi, invece, l'impianto a ventilconvettori è in grado di soddisfare la richiesta termica degli alloggi e non si verificano problemi di sotto raffreddamento in inverno e surriscaldamento in estate.

Se si confrontano i profili di temperatura forniti dal modello d'impianto con ventilconvettori e con sistema TABS, si riscontra, nel primo caso, una minore escursione termica nel tempo poiché il tempo di risposta all'accessione è molto più rapido, mentre i secondi sono caratterizzati da una elevata inerzia termica che non permette un tempo di risposta breve e perciò necessita di un arco di tempo maggiore per entrare a regime e riscaldare/raffrescare l'ambiente. D'altro canto, i fancoil sono costretti a funzionare per tutta la stagione invernale ed estiva o in un continuo on-off, perché, essendo un sistema "senza" inerzia termica, appena viene spento le condizione termoisolative interne tendono a portarsi velocemente verso quello esterne. Diversamente dai ventilconvettori, il sistema TABS, per esempio in inverno, stocca il calore nello strato attivo e, una volta spento, lo rilascia per radiazione per un tempo prolungato, e solo quando la temperatura interna scende oltre il valore di controllo imposto si avvia.

### **3.6 Confronto prestazionale tra le due tipologie di terminale d'impianto**

Sulla base delle simulazioni svolte delle due tipologie impiantistiche in esame, si procede al confronto dell'energia termica che deve essere fornita dalla pompa di calore e dell'energia elettrica che essa necessita. Dai due valori risultanti si otterrà il COP medio che sarà utilizzato come termine di paragone per valutare quale delle due configurazioni impiantistiche sia più conveniente.

Dai modelli presentati in figura 3.47 e 3.48 si ottiene il valore del fabbisogno di energia sensibile invernale e estivo per il piano analizzato dell'utenza multifamiliare, che sarà in un secondo momento mediato sui 4 appartamenti di cui è costituito, e per l'utenza monofamiliare. Un appartamento, nel caso di ombreggiamento, richiede un'energia termica pari a 1014,56 kWh e un'energia frigorifera di 2660,99 kWh; nel caso senza ombreggiamenti esterni, un'energia termica di 579,82 kWh e frigorifera di 4970 kWh. Nel caso studio unifamiliare si ha una richiesta di 8214,30 kWh termici e di 8165,02 kWh frigoriferi.

Tale fabbisogno è stato, poi, pesato in funzione del rendimento globale dei due diversi terminali d'impianto, che comprende il rendimento di distribuzione e di emissione, per eseguire un confronto sui valori reali che devono essere messi a disposizione delle abitazioni residenziali. Il sistema TABS ha un'efficienza pari a 0,96, mentre i ventilconvettori pari a 0,92.

Dalle simulazioni delle due tipologie di edifici residenziali e dei due diversi impianti in esame, si è ricavata l'energia termica fornita dalla pompa di calore e l'energia elettrica necessaria. Per il caso dell'utenza multifamiliare, la pompa di calore è stata dimensionata per soddisfare la richiesta di 10 appartamenti, e quindi, per valutare la quota di energia termica disponibile al singolo utente, si è diviso il valore globale per il numero degli appartamenti. Nel caso studio relativo all'utenza monofamiliare si è considerata l'intera energia termica erogata dal dispositivo, poiché si tratta di un impianto autonomo e non centralizzato come il caso precedente. L'analogo discorso vale per l'energia elettrica che deve essere fornita per il corretto funzionamento della pompa di calore.

I fabbisogni di energia termica ed elettrica ottenuti dai modelli impiantistici svolti con TRNSYS risultano diversi da quelli derivanti dalla simulazione dinamica dell'edificio in cui si è imposto la temperatura di progetto invernale pari a 20°C e estiva di 26°C. I motivi sono:

- differenza di concezione del modello: il sistema TABS è stato provvisto di un controllo differenziale di temperatura interna, il quale invia un segnale di on/off all'impianto in base ai parametri imposti dall'utente e alle condizioni interne della zona termica, e quindi c'è una diretta interazione tra impianto e edificio. I ventilconvettori non hanno nessun controllo perché il loro funzionamento è relativo a valori precalcolati di potenza termica e frigorifera su base oraria, e nel programma *TRNBUILD* sono introdotti come un carico interno e non come sistema di ventilazione, come sarebbe in realtà più corretto. E' stata adottata tale scelta per semplicità nell'implementazione del modello è perché tale sistema rappresenta un caso confronto e non è l'oggetto in esame della tesi.
- modellazione del sistema TABS attraverso *Active layer*: tale procedura ha delle limitazioni geometriche imposte dal software *TRNBUILD*, il quale riconduce il problema tridimensionale di diffusione di calore ad un semplice problema di analisi monodimensionale. Per uno studio più approfondito sarebbe necessario: l'utilizzo della *Type 360* che non è presente nella libreria di TRNSYS perché a pagamento, oppure una analisi ad elementi finiti, ma ciò comportava un dispendio maggiore di tempo e, inoltre, non sarebbe stato possibile effettuare l'analisi dell'impianto nella sua interezza.

SIMULAZIONE DINAMICA DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO

**Tabella 3-9 Confronto tra sistema TABS e ventilconvettori per l'utenza multifamiliare senza ombreggiamento.**

UTENZA MULTIFAMILIARE			
SENZA OMBREGGIAMENTO			
HEATING			
FABBISOGNO REALE MEDIO		579,82	kWh
FABBISOGNO PESATO SU I RENDIMENTI DEL SISTEMA			
FANCOIL		TABS	
630,23	kWh	603,97	kWh
ENERGIA TERMICA FORNITA			
602,79	kWh	681,85	kWh
0,96		1,13	
-4%		13%	
ENERGIA ELETTRICA FORNITA			
260,85	kWh	182,05	kWh
ENERGIA ELETTRICA FORNITA IN FUNZIONE DEI FABBISOGNI REALI			
272,73	kWh	161,26	kWh
COP MEDIO			
2,31		3,74	
COOLING			
FABBISOGNO REALE MEDIO		4969,99	kWh
FABBISOGNO PESATO SU I RENDIMENTI DEL SISTEMA			
FANCOIL		TABS	
5402,17	kWh	5177,08	kWh
ENERGIA TERMICA FORNITA			
4960,16	kWh	5242,46	kWh
0,92		1,01	
-8%		1%	
ENERGIA ELETTRICA FORNITA			
1035,59	kWh	819,31	kWh
ENERGIA ELETTRICA FORNITA IN FUNZIONE DEI FABBISOGNI REALI			
1127,88	kWh	809,09	kWh
COP MEDIO			
4,79		6,39	

In conformità a questi fatti, per esaminare di quanto differiscono i valori di energia termica ottenuti da quelli che sono necessari in realtà, si è calcolato il rapporto tra l'energia termica erogata dai due impianti e il fabbisogno reale pesato sul rendimento globale. Sulla base di tali valori si è corretto il fabbisogno di energia elettrica, il quale rappresenta ciò che in realtà deve essere fornito alla pompa di calore per ottenere i fabbisogni di energia richiesti dalle utenze, al netto delle perdite di inefficienza.

Il COP medio è stato calcolato secondo l'equazione (3.16):

$$COP_{medio} = \frac{\text{Fabbisogno pesato su i rendimenti del sistema}}{\text{Energia elettrica fornita corretta}} \quad (3.16)$$

Il confronto dei risultati è presentato nelle tabelle da 3-9 a 3-11.

**Tabella 3-10 Confronto tra sistema TABS e ventilconvettori per l'utenza multifamiliare con ombreggiamento.**

UTENZA MULTIFAMILIARE				
CON OMBREGGIAMENTO				
HEATING				
FABBISOGNO REALE MEDIO		1014,56	kWh	
FABBISOGNO PESATO SU I RENDIMENTI DEL SISTEMA				
FANCOIL			TABS	
1102,78	kWh		1056,83	kWh
ENERGIA TERMICA FORNITA				
1069,38	kWh		1211,21	kWh
0,97			1,15	
-3%			15%	
ENERGIA ELETTRICA FORNITA				
453,29	kWh		314,26	kWh
ENERGIA ELETTRICA FORNITA IN FUNZIONE DEI FABBISOGNI REALI				
467,38	kWh		274,21	kWh
COP MEDIO				
2,36			3,85	
COOLING				
FABBISOGNO REALE MEDIO		2660,90	kWh	
FABBISOGNO PESATO SU I RENDIMENTI DEL SISTEMA				
FANCOIL			TABS	
2892,38	kWh		2771,86	kWh
ENERGIA TERMICA FORNITA				
283,62	kWh		2892,72	kWh
0,98			1,04	
-2%			4%	
ENERGIA ELETTRICA FORNITA				
614,37	kWh		485,81	kWh
ENERGIA ELETTRICA FORNITA IN FUNZIONE DEI FABBISOGNI REALI				
627,55	kWh		465,51	kWh
COP MEDIO				
4,61			5,98	

SIMULAZIONE DINAMICA DEL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO

**Tabella 3-11 Confronto tra sistema TABS e ventilconvettori per l'utenza monofamiliare.**

UTENZA MONOFAMILIARE			
HEATING			
FABBISOGNO REALE MEDIO		8214,30	kWh
FABBISOGNO PESATO SU I RENDIMENTI DEL SISTEMA			
FANCOIL		TABS	
8928,59	kWh	8556,56	kWh
ENERGIA TERMICA FORNITA			
8587,58	kWh	9825,43	kWh
0,96		1,15	
-4%		15%	
ENERGIA ELETTRICA FORNITA			
3111,66	kWh	2234,92	kWh
ENERGIA ELETTRICA FORNITA IN FUNZIONE DEI FABBISOGNI REALI			
3235,23	kWh	1946,30	kWh
COP MEDIO			
2,76		4,39	
COOLING			
FABBISOGNO REALE MEDIO		8165,02	kWh
FABBISOGNO PESATO SU I RENDIMENTI DEL SISTEMA			
FANCOIL		TABS	
8875,02	kWh	8505,23	kWh
ENERGIA TERMICA FORNITA			
8686,54	kWh	7539,77	kWh
0,98		0,89	
-2%		-11%	
ENERGIA ELETTRICA FORNITA			
1906,42	kWh	1336,62	kWh
ENERGIA ELETTRICA FORNITA IN FUNZIONE DEI FABBISOGNI REALI			
1947,78	kWh	1507,77	kWh
COP MEDIO			
4,56		5,64	

In riferimento alle tabelle 3-9 e 3-10, si evidenzia che, nel caso di installazione di ombreggiamenti esterni, il fabbisogno di energia in inverno aumenta, mentre in estate diminuisce, comportando in totale una richiesta inferiore di energia elettrica annua.

In tutti i casi presentati si nota che il COP medio della pompa di calore è notevolmente maggiore quando si abbina la pompa di calore a un sistema TABS rispetto i ventilconvettori, perché:

- il livello di temperatura a cui lavora il sistema TABS è inferiore a quello a cui opera il ventilconvettore, comportando minori perdite per irreversibilità e di efficienza nel ciclo di funzionamento della pompa di calore;
- Il sistema TABS è caratterizzato da un'elevata inerzia termica che permette di stoccare il calore nel solaio e renderlo disponibile nell'arco della giornata quando non è in funzione. Ciò consente una riduzione rilevante dell'energia elettrica necessaria alla pompa di calore, poiché il tempo di funzionamento è minore rispetto al caso di ventilconvettori;
- l'impianto a ventilconvettori, per come è stato modellato, deve essere sempre in funzione per mantenere il comfort interno. Questo comporta che la pompa di calore deve lavorare per un arco temporale maggiore e conseguentemente aumenta la richiesta elettrica, anche a causa degli ausiliari che richiedono una quota di energia rilevante.

Essendo il COP maggiore, la richiesta di energia elettrica da parte del singolo utente risulta inferiore rispetto al caso di impianto a ventilconvettori, a parità di energia termica fornita. Ciò comporta un vantaggio perché l'importo da pagare in bolletta per ogni abitazione sarà ridotto e, dal punto di vista ambientale, diminuisce l'energia primaria richiesta per la produzione di tale fabbisogno elettrico.

## Capitolo 4

# IMPIANTO ELETTRICO

Il prezzo del petrolio sempre più elevato e l'inquinamento sempre meno sostenibile rendono le fonti di energia alternativa rinnovabile un'irrinunciabile necessità. Gli incentivi economici e gli enormi passi avanti della tecnologia elettronica consentono l'impiego d'impianti fotovoltaici in modo semplice ed economicamente conveniente. Attualmente, gli impianti fotovoltaici consentono di risparmiare ogni anno diversi milioni di tonnellate equivalenti di petrolio in tutta Europa. Il risparmio maggiore risulta dalla somma dei tanti piccoli impianti fotovoltaici privati. Finora, tuttavia, l'energia solare per consumo proprio era utilizzabile soltanto nelle ore diurne, cosicché l'energia necessaria al mattino e alla sera doveva essere acquistata dalla rete. Molti proprietari d'impianti fotovoltaici desidererebbero quindi una soluzione ad accumulo, ossia un accumulatore a batteria, che fornisca energia anche negli orari a bassa luminosità.

L'impiego di energia elettrica per il riscaldamento e il raffrescamento in ambito residenziale, tramite pompa di calore, è ormai di uso comune in Italia e in Europa e ciò ha comportato, negli ultimi anni, un aumento di richiesta elettrica da parte dei vari utenti.

Per tali motivi, si sono voluti esaminare due differenti impianti elettrici che possono essere installati nell'utenza multifamiliare e monofamiliare e la relativa resa in funzione del terminale d'impianto (sistema TABS o ventilconvettori).

Le due configurazioni impiantistiche analizzate in questa sede sono:

- sistema fotovoltaico;
- sistema fotovoltaico con sistema di stoccaggio per mezzo di batterie.

### 4.1 Profili elettrici

I profili elettrici analizzati in questa sede sono relativi a un singolo appartamento appartenente all'utenza multifamiliare e al caso studio unifamiliare.

Il fabbisogno di energia elettrica per i vari elettrodomestici, per lo scaldabagno a pompa di calore e per la ventilazione meccanica sono stati determinati in base ai dati del progetto MICENE e a calcoli già descritti nel paragrafo 2.2.2 di questo elaborato.

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

Tabella 4-1 a) Fabbisogno elettrico dei dispositivi domestici in un appartamento. b) Percentuale di energia elettrica per ogni dispositivo installato.

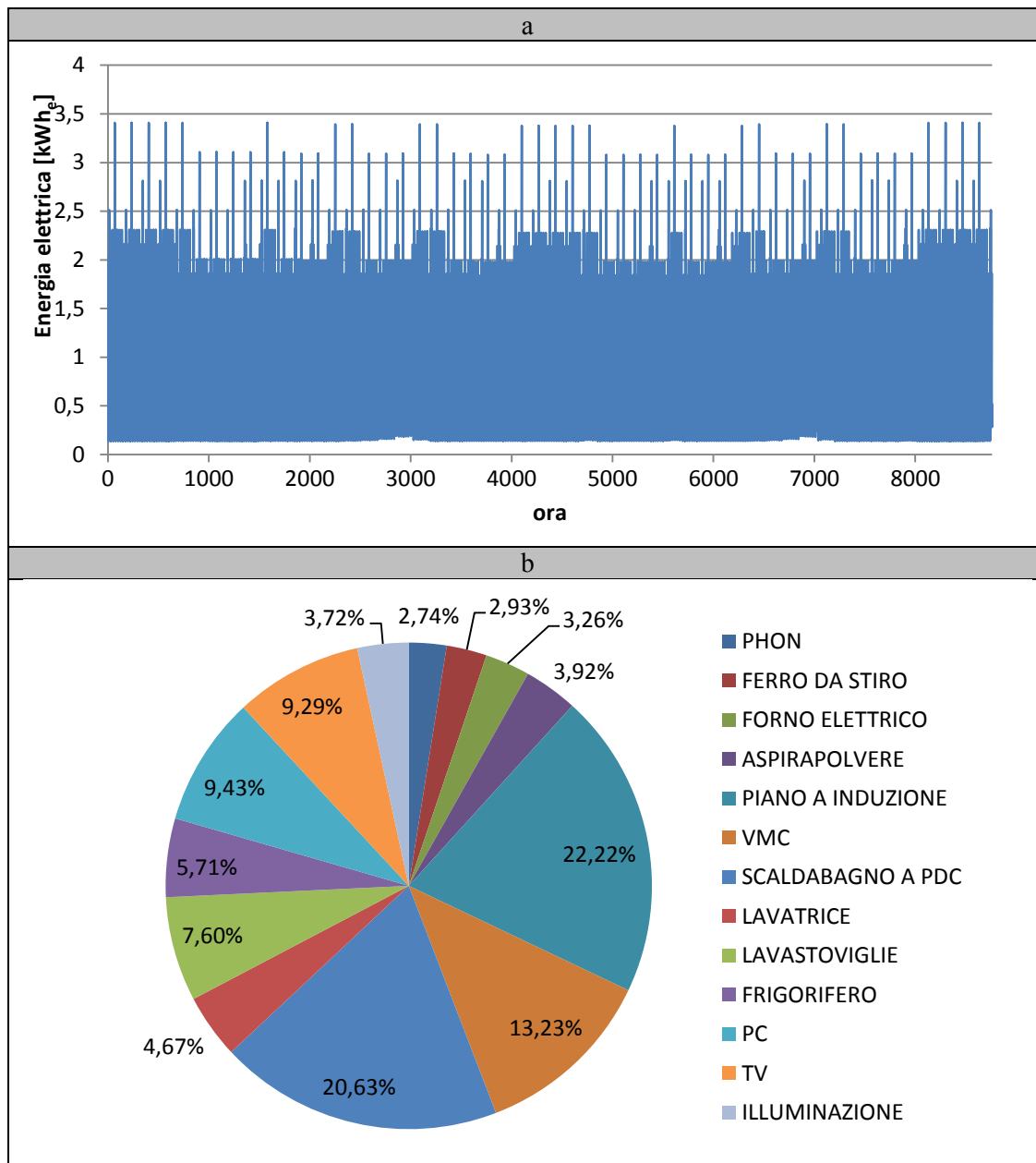
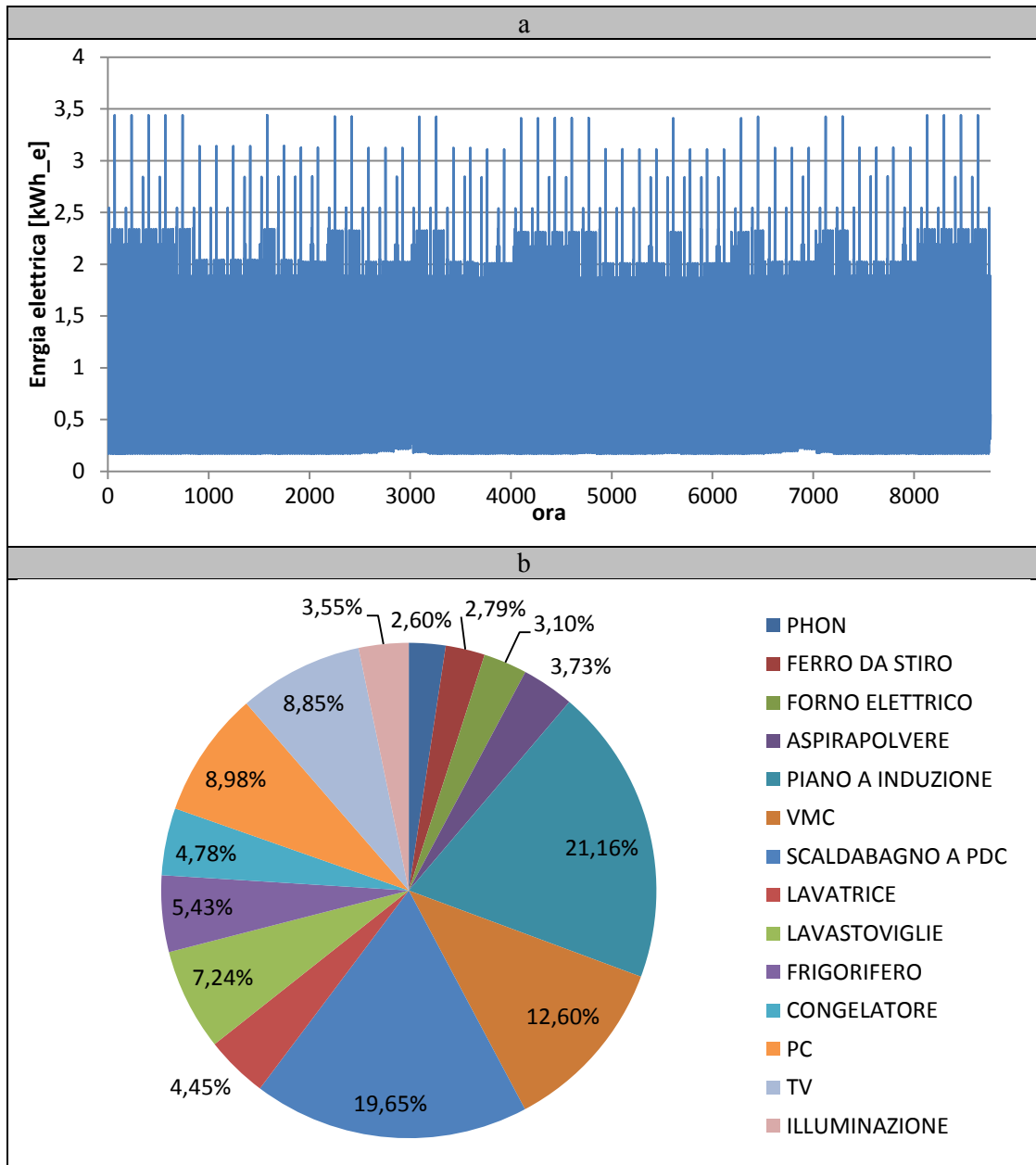




Tabella 4-2 a) Fabbisogno elettrico dei dispositivi domestici nell'utenza monofamiliare. b) Percentuale di energia elettrica per ogni dispositivo installato.



Il profilo elettrico relativo alla pompa di calore è stato ricavato dalle simulazioni svolte nel capitolo precedente ed è stato corretto in base al rapporto tra il fabbisogno termico pesato sui rendimenti globali del sistema e l'energia termica fornita, per realizzare un'analisi più veritiera possibile, a parità di fabbisogno di energia termica fornita alle utenze. Si è, poi, aggiunto il contributo degli ausiliari: ventilatori (solo per i ventilconvettori) e pompe di circolazione dell'acqua. Le potenze dei ventilatori sono state ricavate dalla scheda tecnica dei fancoil, mentre per le pompe di circolazione sono stati adottati due prodotti della azienda

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

WILO<sup>5</sup>: per l'utenza multifamiliare la pompa YONOS MAXO 25/0,5-10, per l'utenza monofamiliare la pompa YONOS PICO 25/1-8.

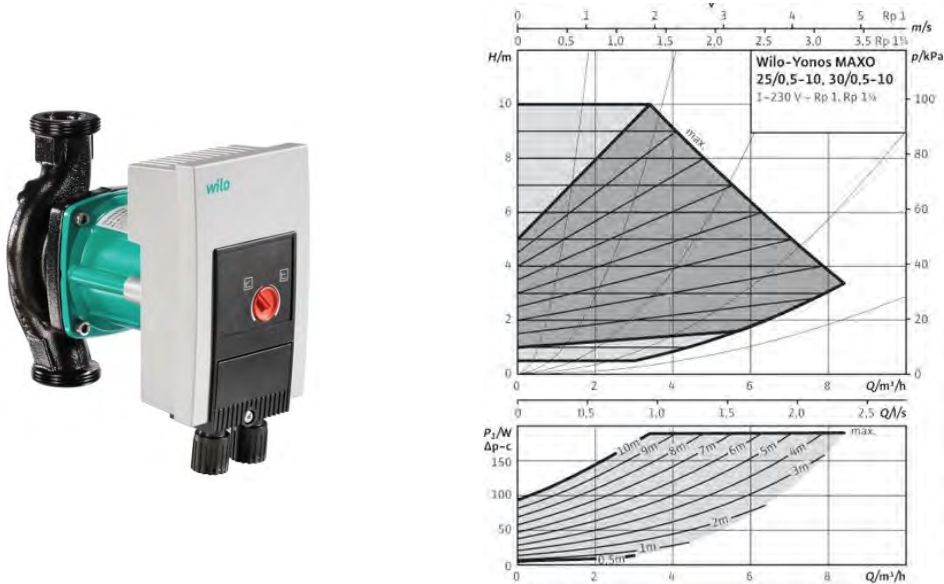


Figura 4.1 Pompa di circolazione YONOS MAXO 25/0,5-10. [25]

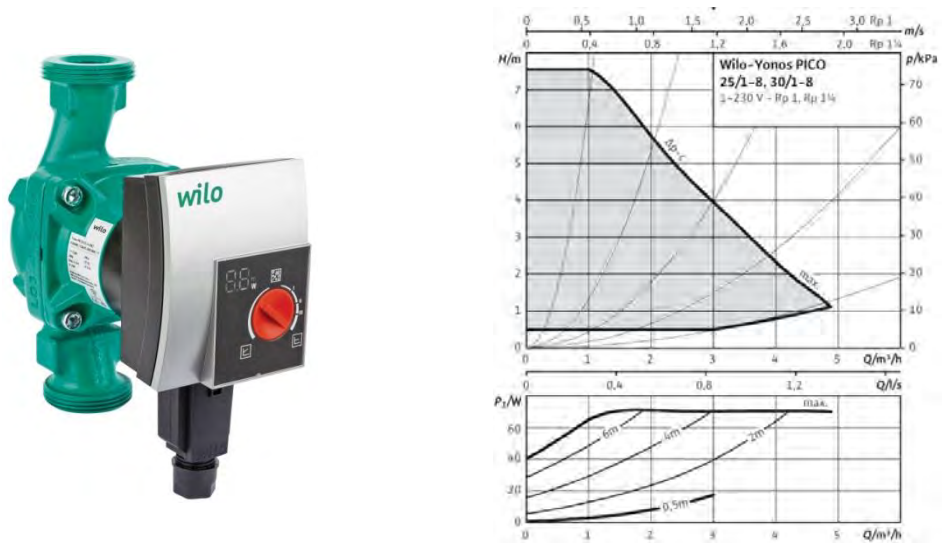


Figura 4.2 Pompa di circolazione YONOS PICO 25/1-8. [25]

Dalle curve caratteristiche presentate nelle figure 4.1 e 4.2 si è ricavato la potenza elettrica necessaria al funzionamento delle pompe: per l'utenza multifamiliare si è stabilito una

<sup>5</sup> Nelle simulazioni descritte è stato implementato un modello dell'impianto basato a volte su macchinari e componenti esistenti sul mercato. I relativi dati tecnici sono ricavati dalle schede tecniche fornite nei siti ufficiali dei produttori. Tali apparecchi sono assunti come riferimento e non rappresentano in nessun modo l'oggetto dell'analisi. Le prestazioni indicate riguardano il modello nel suo complesso e non i singoli componenti e in nessun caso i risultati ottenuti sono applicabili ai prodotti commerciali indicati.

potenza media di 50W nel caso di utilizzo di un sistema TABS e 52W per i ventilconvettori, mentre per quella monofamiliare, di 27 W nel primo caso e 45W nel secondo.

I profili elettrici ottenuti per l'impianto a pompa di calore e la percentuale di energia necessaria per gli ausiliari e per la macchina, sono illustrati nelle figure seguenti.

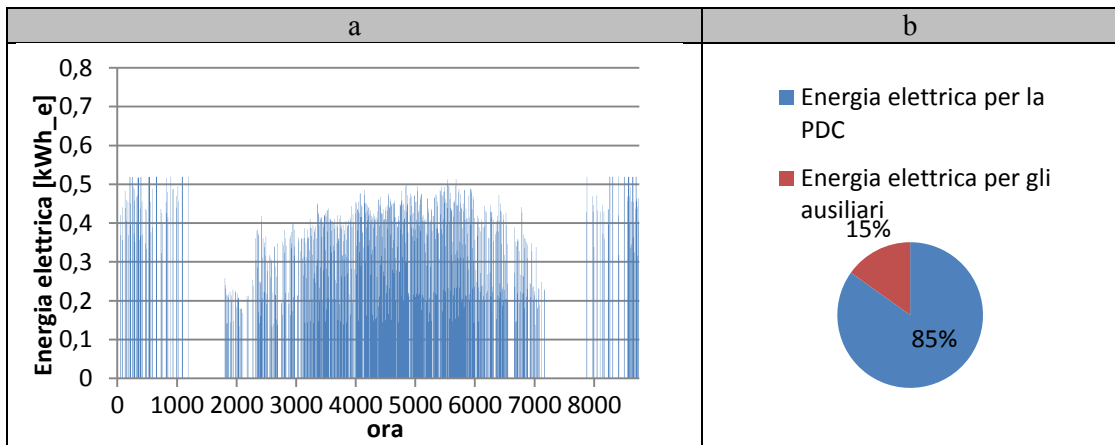


Figura 4.3: a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a sistema TABS per un appartamento senza ombreggiamento, b) Percentuale energia ausiliari e PDC.

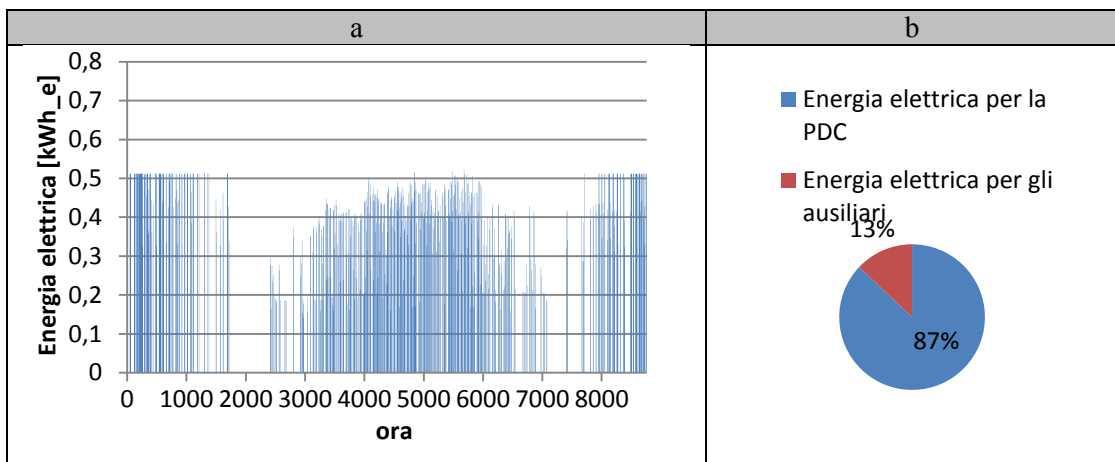


Figura 4.4 a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a sistema TABS per un appartamento con ombreggiamento, b) Percentuale energia ausiliari e PDC.

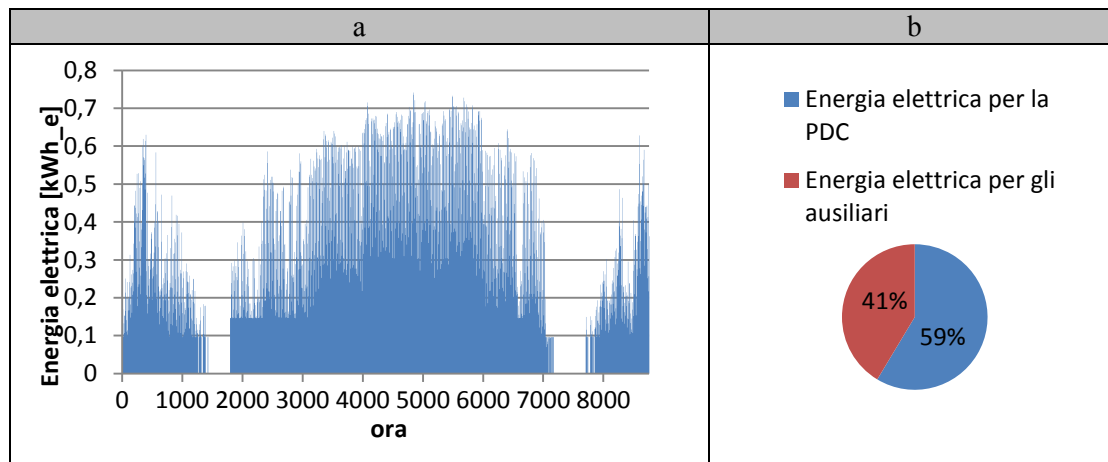


Figura 4.5 a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a ventilconvettori per un appartamento senza ombreggiamento, b) Percentuale energia ausiliari e PDC.

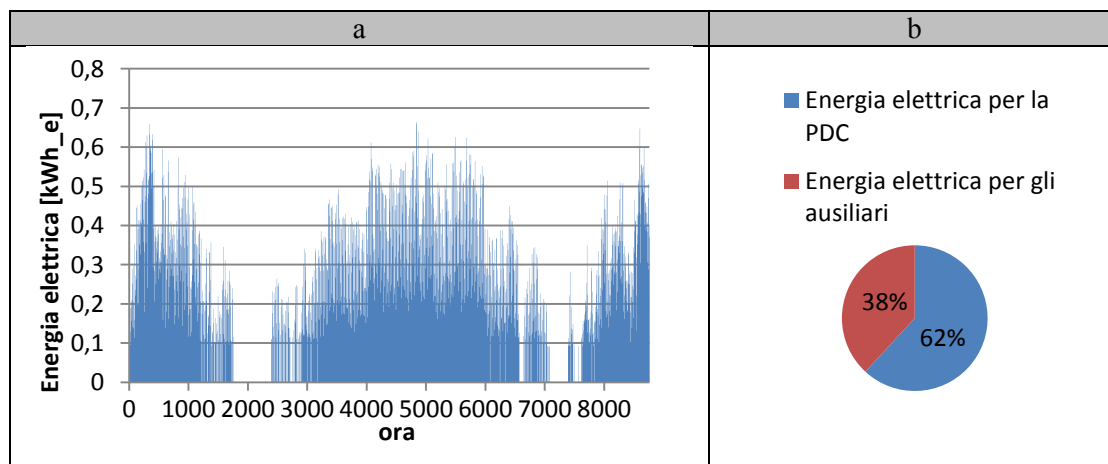


Figura 4.6 a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a ventilconvettori per un appartamento con ombreggiamento, b) Percentuale energia ausiliari e PDC.

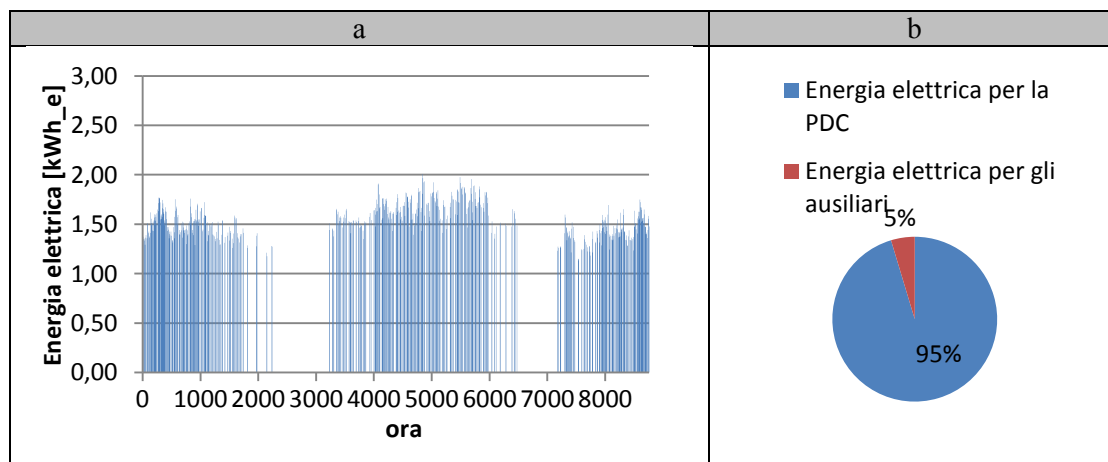
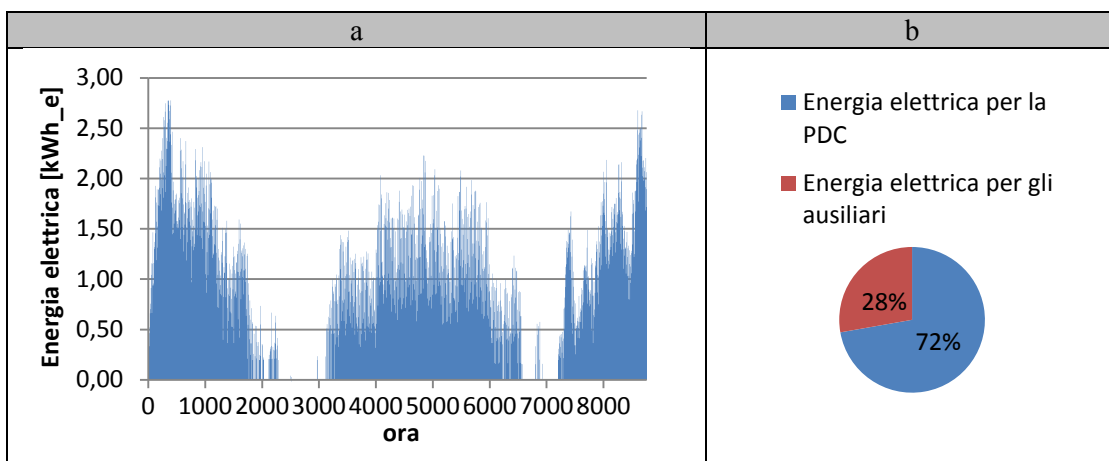


Figura 4.7 a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a sistema TABS per utenza monofamiliare, b) Percentuale energia ausiliari e PDC.



**Figura 4.8 a) Profilo di energia elettrica per pompa di calore associata a ventilconvettori per utenza monofamiliare, b) Percentuale energia ausiliari e PDC.**

In riferimento alle figure 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 si nota come installando degli ombreggiamenti esterni alle finestre aumenta il fabbisogno elettrico invernale e diminuisce quello estivo, comportando una diminuzione generale dell’energia elettrica richiesta. Tramite i grafici a torta si sottolinea che con l’utilizzo di fancoil come terminale d’impianto si ha un aumento non trascurabile della percentuale di energia da fornire agli ausiliari perché, oltre le pompe di circolazione, necessitano di ventilatori per aspirare il volume d’aria da condizionare

**Tabella 4-3 Valori di fabbisogno elettrico e energia primaria per utenza multifamiliare e monofamiliare in relazione a sistema TABS e ventilconvettori**

TABS		FANCOIL	
<b>UTENZA MULTIFAMILIARE CON OMBREGGIAMENTO</b>			
TOT [kWh <sub>e</sub> ]		TOT [kWh <sub>e</sub> ]	
849,97		1770,18	
Energia primaria		Energia primaria	
0,16	tep	0,33	tep
1848,20	kwh	3849,14	kwh
<b>UTENZA MULTIFAMILIARE SENZA OMBREGGIAMENTO</b>			
TOT [kWh <sub>e</sub> ]		TOT [kWh <sub>e</sub> ]	
1143,10		2388,91	
Energia primaria		Energia primaria	
0,21	tep	0,45	tep
2485,60	kwh	5194,53	kwh
<b>UTENZA MONOFAMILIARE</b>			
TOT [kWh <sub>e</sub> ]		TOT [kWh <sub>e</sub> ]	
3567,69		7174,29	
Energia primaria		Energia primaria	
0,67	tep	1,34	tep
7757,71	kwh	15600,03	kwh

In riferimento alla tabella 4-3, si sottolinea come la diminuzione dell'energia elettrica richiesta da parte di un impianto a pompa di calore abbinato a sistema TABS, rispetto a uno con ventilconvettori, sia quasi del 50%. Dal punto di vista ambientale ciò è un vantaggio, poichè si consente di ridurre l'energia primaria necessaria alla produzione di energia elettrica tramite combustibili fossili, diminuendo la quantità:

- di inquinanti emessi in atmosfera;
- di petrolio e i suoi derivati bruciati negli impianti di conversione di energia elettrica.

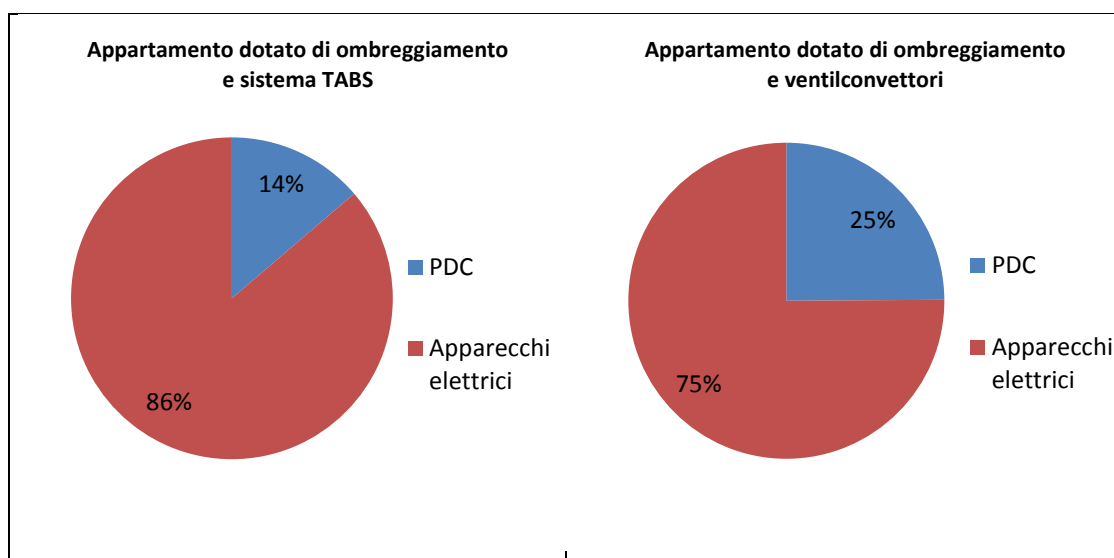
In definitiva, l'ammontare di energia elettrica totale richiesta da ogni appartamento dell'utenza multifamiliare e da quella monofamiliare, nelle diverse configurazioni d'impianto, è presentato in tabella 4-4:

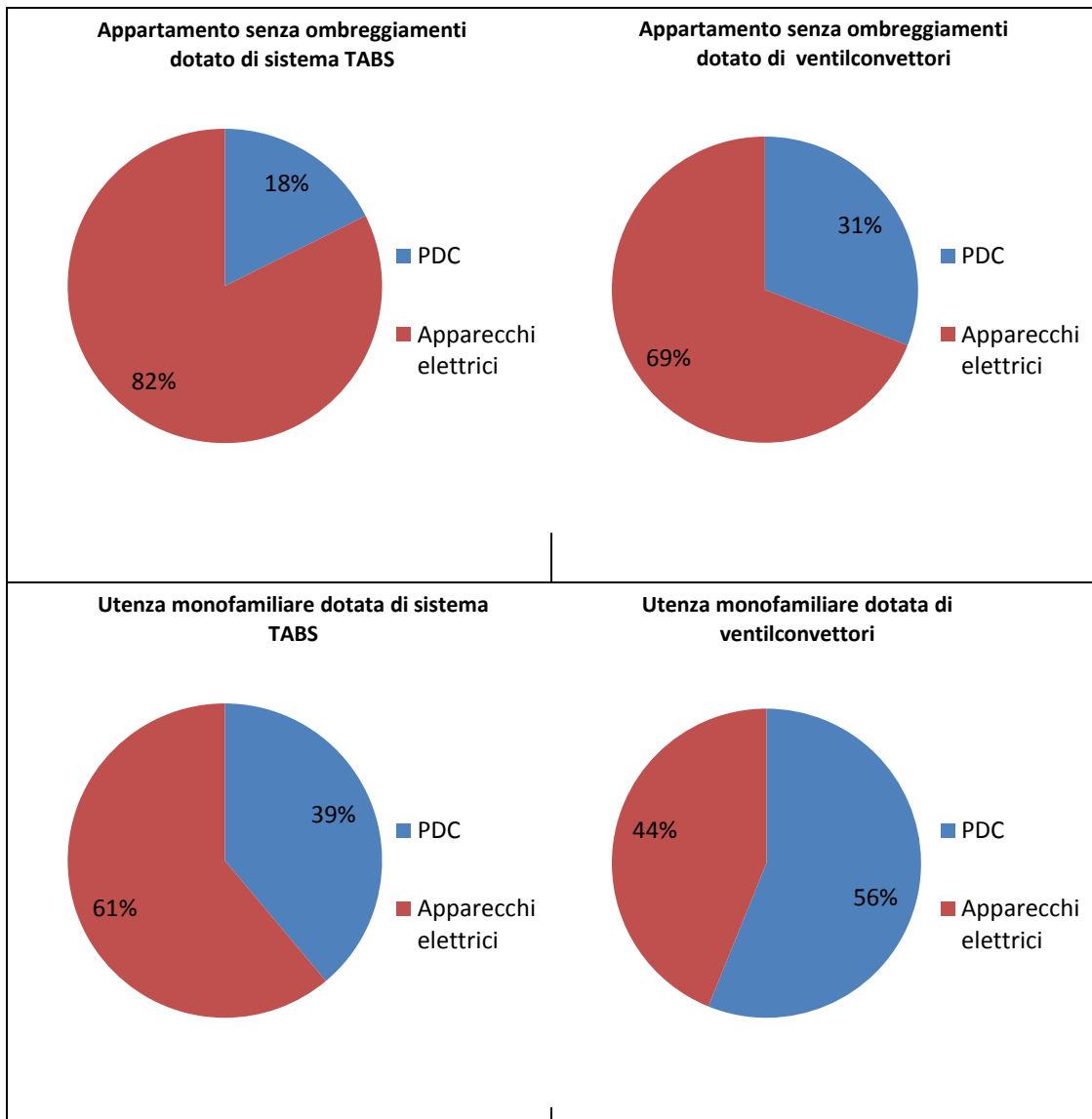
**Tabella 4-4 Fabbisogno di energia elettrica totale per le diverse configurazione di impianto.**

	TABS	FANCOIL
Energia elettrica per appartamento senza ombreggiamento [kWh <sub>e</sub> ]	6480,97	7726,81
Energia elettrica per appartamento con ombreggiamento [kWh <sub>e</sub> ]	6187,84	7108,07
Energia elettrica per utenza monofamiliare [kWh <sub>e</sub> ]	9173,52	12780,13

Si evidenzia che l'adozione di un sistema TABS, rispetto a un impianto tradizionale a ventilconvettori, comporta: una riduzione media del 16% sulla richiesta elettrica e una diminuzione della spesa economica che deve essere sostenuta da parte dell'utente. In seguito si riportano i grafici a torta nei quali sono rappresentate le quote percentuali relative alla pompa di calore con i propri ausiliari e agli apparecchi elettrici installati nelle utenze rispetto il fabbisogno di energia elettrica totale richiesto.

**Tabella 4-5 Quote percentuali di energia elettrica relative alla pompa di calore e agli apparecchi elettrici.**





Dai grafici illustrati in tabella 4-5, si evince che, nel caso di utilizzo di ventilconvettori come terminale d’impianto, la quota percentuale di energia elettrica relativa alla pompa di calore e i propri ausiliari è maggiore rispetto all’abbinamento con sistema TABS, perché:

- la temperatura di mandata richiesta dai ventilconvettori è maggiore rispetto a quella necessaria al sistema TABS;
- la pompa di calore in abbinamento ai fancoil è costretta a funzionare per un tempo superiore;
- la quota percentuale degli ausiliari nel caso dei ventilconvettori è più elevata rispetto al caso di sistema TABS, poiché oltre le pompe di circolazione dell’acqua necessita di ventilatori per l’aspirazione d’aria.

Tra il caso studio plurifamiliare e monofamiliare si registra una certa differenza riguardo i valori risultanti della quota percentuale relativa alla pompa di calore, ma ciò è evidentemente

dovuto dal fatto che la superficie della villetta è notevolmente maggiore rispetto a quella relativa dell'appartamento. Inoltre la pompa di calore installata nell'utenza monofamiliare è caratterizzata da una potenza nominale maggiore in confronto a quella disponibile al singolo alloggio.

## 4.2 Modello elettrico

### 4.2.1 Modellazione del sistema fotovoltaico con SIMULATION STUDIO

I moduli impiegati nella simulazione del sistema fotovoltaico appartengono alla serie ND della SHARP<sup>6</sup>: sono composti da 60 celle in silicio policristallino e sono caratterizzati da una potenza di picco pari a 250Wp.

Dati elettrici (STC)			Dati elettrici (at NOCT)		
ND-R250A5			ND-R250A5		
Potenza di picco	$P_{max}$	250	Potenza di Picco	$P_{max}$	180.2
Tensione a circuito aperto	$V_{oc}$	37.6	Tensione a circuito chiuso	$V_{oc}$	36.7
Corrente di corto circuito	$I_{sc}$	8.68	Corrente di corto circuito	$I_{sc}$	7.0
Tensione alla massima potenza	$V_{mpp}$	30.9	Tensione alla massima potenza	$V_{mpp}$	27.7
Corrente alla massima potenza	$I_{mpp}$	8.10	NominalOperatingCellTemperature NOCT		47.5
Efficienza del modulo	$\eta$	15.2			

Dati meccanici		Coefficiente di temperatura	
Altezza	1,652mm(+/-3.0mm)	$P_{max}$	-0.440% / °C
Larghezza	994 mm (+/-2.0 mm)	$V_{oc}$	-0.329% / °C
Spessore	46 mm (+/-0.8 mm)	$I_{sc}$	+0.038% / °C
Peso	19 kg		

Figura 4.9 Scheda tecnica del modulo fotovoltaico serie ND della SHARP. [26]

Nel calcolo del numero di pannelli fotovoltaici che è possibile installare sopra il piano orizzontale della palazzina sono stati considerati i seguenti parametri:

<sup>6</sup> Nelle simulazioni descritte è stato implementato un modello dell'impianto basato a volte su macchinari e componenti esistenti sul mercato. I relativi dati tecnici sono ricavati dalle schede tecniche fornite nei siti ufficiali dei produttori. Tali apparecchi sono assunti come riferimento e non rappresentano in nessun modo l'oggetto dell'analisi. Le prestazioni indicate riguardano il modello nel suo complesso e non i singoli componenti e in nessun caso i risultati ottenuti sono applicabili ai prodotti commerciali indicati.



- dati geometrici del modulo fotovoltaico;
- inclinazione dei moduli (30°);
- area utile dell'ultimo piano della palazzina;
- latitudine (45,407°);
- declinazione solare nel solstizio di inverno ( $\delta=-23,45^\circ$ );
- altezza solare (HS):

L'altezza solare si calcola secondo l'equazione (4.1):

$$HS = 90^\circ - \text{Latitudine} + \delta \quad (4.1)$$

La distanza B tale per cui non ci sia ombreggiamento tra i vari pannelli nell'istante in cui l'altezza solare è minima, si determina in base la formula (4.2):

$$B = \text{altezza modulo} * \frac{\sin(180^\circ - \text{inclinazione modulo} - HS)}{\sin(HS)} \quad (4.2)$$

Determinata la distanza necessaria tra le file dei pannelli e conoscendo l'area dei moduli, si è ricavato che ne è possibile installare in totale 80, e perciò sono disponibili 4 moduli per appartamento.

Nel caso studio unifamiliare non sussiste il problema di ombreggiamento tra pannelli perché sono posti alla medesima inclinazione del tetto (15°). Dunque, per la determinazione del numero massimo di moduli installabili è sufficiente eseguire il rapporto tra l'area della falda e l'area del modulo fotovoltaico. Da tale calcolo risultano 37 pannelli per falda, ma per scelta impiantistica ed economica si è deciso di applicarne solo 10 e quindi 20 in totale.

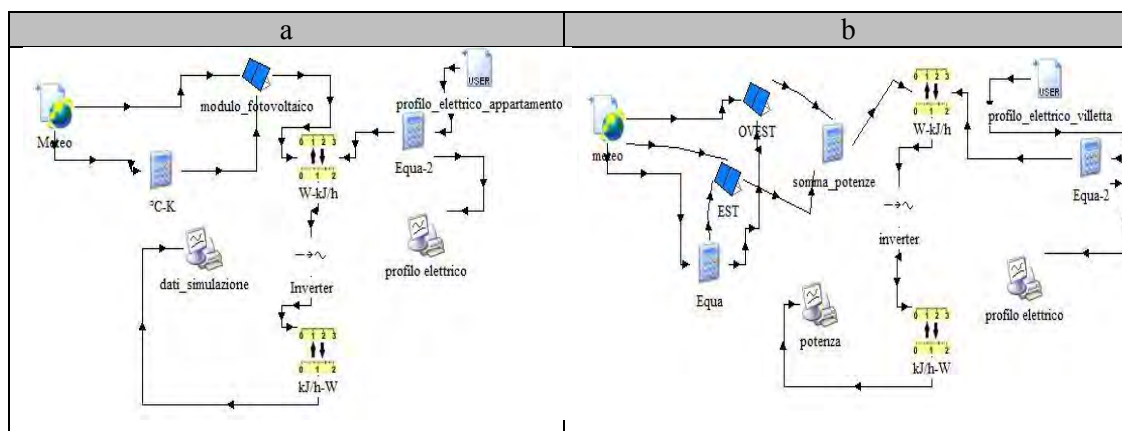
Le *Type* utilizzate per simulare il sistema fotovoltaico sono:

- *Type 15-6* :legge dati meteorologici ad intervalli di tempo regolari da un file esterno presente nella libreria del programma e li rende disponibili ad altri componenti.
- *Type 9a*: ha lo scopo di leggere dei dati ad intervalli regolari da un file esterno \*.txt. Questa componente è di natura molto generale e può leggere qualsiasi tipo di dato.
- *Type 94*: questo componente modella le performance elettriche di un campo fotovoltaico. Può essere utilizzato in simulazioni con connessione alla rete, con accoppiamento diretto al carico o che coinvolgono l'impiego di batterie di stoccaggio. Esso impiega l'equazione di un modello empirico di circuito equivalente per predire la caratteristica corrente-tensione del singolo modulo. Questo circuito è costituito da una sorgente di corrente continua, il diodo, e una o due resistenze. I risultati per un singolo modulo sono utilizzati per caratterizzare il comportamento dell'intero campo fotovoltaico. Per pannelli composti da silicio cristallino o policristallino, tale type impiega un modello a “quattro parametri” il cui valore non può essere ottenuto

direttamente dai cataloghi dei produttori, ma vengono calcolati in modo automatico in base ai dati disponibili.

- *Type 48a*: tale componente modella il comportamento del regolatore e dell'inverter. Tale blocco lavora secondo *Mode 0*, il che significa che non può essere impiegato con un sistema di stoccaggio. La potenza in uscita dai moduli fotovoltaici è moltiplicata per l'efficienza dell'inverter e inviata al carico. Quando il carico supera tale valore, la rete fornisce la differenza tra la potenza richiesta dal carico e quella erogata dal sistema fotovoltaico, mentre se è inferiore, la potenza in surplus è riversata nella rete nazionale.
- *Type 57*: è un semplice convertitore.
- *Type 65c*: stampa i dati adimensionali su file esterno e contemporaneamente visualizza un plotter online con i risultati della simulazione.
- *Equation*: svolgono il ruolo di calcolatrice e permettono di fare dei piccoli calcoli senza richiamare un foglio excel che appesantirebbe notevolmente lo svolgersi della simulazione.

Si propongono di seguito i modelli per un appartamento e per l'utenza monofamiliare:



**Figura 4.10 a) modello del sistema fotovoltaico per un appartamento. b) modello del sistema fotovoltaico per utenza monofamiliare.**

I due modelli sono stati configurati nel seguente modo:

- *Type 15-6*: legge i dati *Meteonorm* da file esterno, relativi alla località di Venezia Tessera. I parametri inseriti manualmente sono: il numero di superfici esposte verso l'ambiente esterno (1 per la palazzina e 2 per la villetta), l'angolo di inclinazione dei moduli (30° per il condominio e 15° per la villetta) e l'azimuth delle superfici (0° per esposizione a Sud, 90° per esposizione a ovest, e 270° per esposizione a Est).
- *Type 94*: nella sezione relativa ai parametri sono stati inseriti dall'utente:
  - la corrente di cortocircuito;

- il voltaggio a circuito aperto;
- la temperatura e l'insolazione di riferimento;
- il voltaggio e la corrente nelle condizioni di massima potenza;
- il coefficiente di perdita della corrente di cortocircuito e della tensione a circuito aperto;
- il numero di celle;
- il numero di moduli in serie e in parallelo;
- la temperatura del modulo e dell'ambiente nelle condizioni NOCT
- l'area del modulo

Per l'appartamento si è deciso di connettere 2 moduli in serie e due in parallelo, mentre per l'utenza monofamiliare sono 5 in serie e 2 in parallelo per ogni falda. Gli input e gli output sono:

INPUT	FORNITO DA:	OUTPUT	VERSO:
Radiazione incidente totale	Type 15-6	Potenza nel punto di massima potenza	Type 48a
Temperatura ambiente			
Inclinazione modulo			
Radiazione diretta			
Radiazione diffusa			
Angolo di incidenza della radiazione diretta			
Voltaggio del carico	manualmente		

- *Type 48a*: gli ingressi e le uscite da fornire a questa componente sono elencati nella tabella seguente.

INPUT	FORNITO DA:	OUTPUT	VERSO:
Potenza dal sistema fotovoltaico	Type 48a	Potenza in entrata	Type 65c
Potenza richiesta dal carico	Type9a	Potenza in uscita	
		Potenza in eccesso (>0 dalla rete, <0 verso la rete)	

## 4.2.2 Modellazione del sistema fotovoltaico con sistema di stoccaggio

I moduli fotovoltaici adottati sono gli stessi del paragrafo precedente, e il medesimo discorso vale per le type utilizzate per la modellazione del funzionamento del campo fotovoltaico. Il dispositivo caratterizzante questo tipo d'impianto è il sistema di stoccaggio composto da batterie al piombo acido. Come riferimento si sono prese le batterie *OPzV solar.power* della *HOPPECKE*<sup>7</sup> con capacità da 1500 Ah e 750 Ah.

Tabella 4-6. Batterie al piombo acido OPzV solar.power della HOPPECKE. [27]



Type	C <sub>100h</sub> /1.85 V Ah	C <sub>20h</sub> /1.85 V Ah	C <sub>2h</sub> /1.83 V Ah	C <sub>1h</sub> /1.80 V Ah	C <sub>0.1h</sub> /1.77 V Ah	
4 OPzV solar.power	250	287	364	243	204	189
5 OPzV solar.power	310	359	329	304	255	236
6 OPzV solar.power	370	430	395	365	306	283
5 OPzV solar.power	420	478	453	428	391	346
6 OPzV solar.power	520	574	543	513	470	415
7 OPzV solar.power	620	670	634	599	548	485
6 OPzV solar.power	750	847	802	762	682	595
7 OPzV solar.power	875	990	935	888	796	694
8 OPzV solar.power	1000	1130	1070	1016	909	793
9 OPzV solar.power	1125	1271	1203	1143	1023	893
10 OPzV solar.power	1250	1412	1337	1270	1137	992
11 OPzV solar.power	1375	1553	1471	1397	1250	1091
12 OPzV solar.power	1500	1695	1604	1624	1364	1190
12 OPzV solar.power	1700	1955	1870	1785	1545	1372
14 OPzV solar.power	2000	2281	2182	2082	1802	1601
16 OPzV solar.power	2300	2607	2493	2380	2060	1829
18 OPzV solar.power	2600	2933	2805	2677	2317	2058
20 OPzV solar.power	2900	3258	3117	2975	2574	2287
22 OPzV solar.power	3200	3584	3428	3272	2832	2515
24 OPzV solar.power	3500	3910	3740	3570	3089	2744

Le type utilizzate in questo modello sono le medesime di quello precedente, fatta eccezione per l'inverter/regolatore di carica MPPT e per le batterie, per i quali sono state impiegate, rispettivamente, le *type 48c* e *47b*.

La più interessante è la *type 48c*, che simula il comportamento del regolatore di carica MPPT e dell'inverter ed è adatta alla interazione con un sistema di stoccaggio a differenza di quella utilizzata nel modello precedente. Con tale blocco è possibile monitorare lo stato di carica e decidere come si desidera sia eseguito il processo di carica e scarica delle batterie. E' possibile implementare due modalità di carica: la prima è denominata "total charge", la quale ha come prerogativa quella di ricaricare, con l'energia erogata dal fotovoltaico, prima la batteria fino allo stato di piena carica a discapito del carico, il quale deve usufruire della corrente proveniente dalla rete, a meno che il sistema fotovoltaico non produca abbastanza

<sup>7</sup> Nelle simulazioni descritte è stato implementato un modello dell'impianto basato a volte su macchinari e componenti esistenti sul mercato. I relativi dati tecnici sono ricavati dalle schede tecniche fornite nei siti ufficiali dei produttori. Tali apparecchi sono assunti come riferimento e non rappresentano in nessun modo l'oggetto dell'analisi. Le prestazioni indicate riguardano il modello nel suo complesso e non i singoli componenti e in nessun caso i risultati ottenuti sono applicabili ai prodotti commerciali indicati.

energia tale da sopperire alla richiesta della utenza e della batteria contemporaneamente. La seconda, utilizzata in questo modello, è quella di assegnare priorità al carico richiesto nelle abitazioni e poi ricaricare la batteria con la potenza eccedente proveniente da fotovoltaico. In entrambi i casi, il regolatore fissa un limite minimo di percentuale di carica: se lo stato di carica è inferiore a tale limite la batteria non può erogare potenza per evitare i danni provocati da eccessiva scarica, mentre se tale limite è oltrepassato durante la fase di erogazione di potenza da parte del sistema di stoccaggio, non viene bocciato il flusso di corrente per evitare problemi di divergenza di frequenza con l'inverter.

Gli input e gli output di questa type sono:

INPUT	FORNITO DA:	OUTPUT	VERSO:
Potenza da PV	Type 94	Potenza da o verso la batteria	Type 47b e type 65c
Potenza richiesta dal carico	Type 9a	Potenza da PV	Type 65c
Stato di carica della batteria	Type 47b	Potenza verso il carico	
Voltaggio batteria		Potenza generata da PV dispersa	
Potenza massima per la ricarica		Potenza dalla rete	
Potenza massima per la scarica			
Limite minimo di tensione della batteria (DCV)			
Potenza corrispondente al DCV			
Limite massimo di tensione durante la carica (CCV)			
Potenza corrispondente al CCV			

La *type 47b* rappresenta il comportamento del parco batterie al piombo acido, e gli ingressi e le uscite sono elencati nella tabella seguente.

INPUT	FORNITO DA:	OUTPUT	VERSO:
Potenza da o verso la batteria	Type 48c	Stato di carica della batteria	Type 48c
		Voltaggio batteria	
		Potenza massima per la ricarica	
		Potenza massima per la scarica	
		Limite minimo di tensione della batteria (DCV)	
		Potenza corrispondente al DCV	
		Limite massimo di tensione durante la carica (CCV)	
		Potenza corrispondente al CCV	

Si propongono di seguito i modelli per un appartamento e per l'utenza monofamiliare:

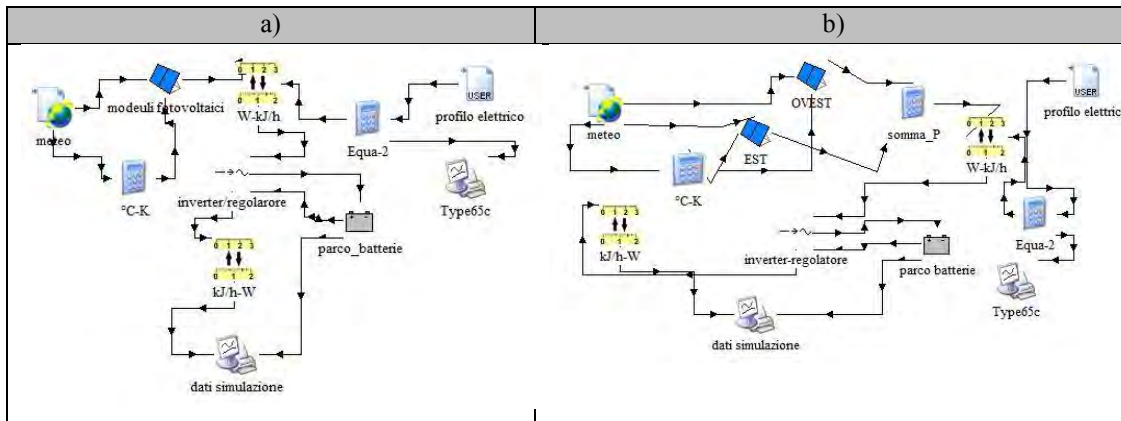


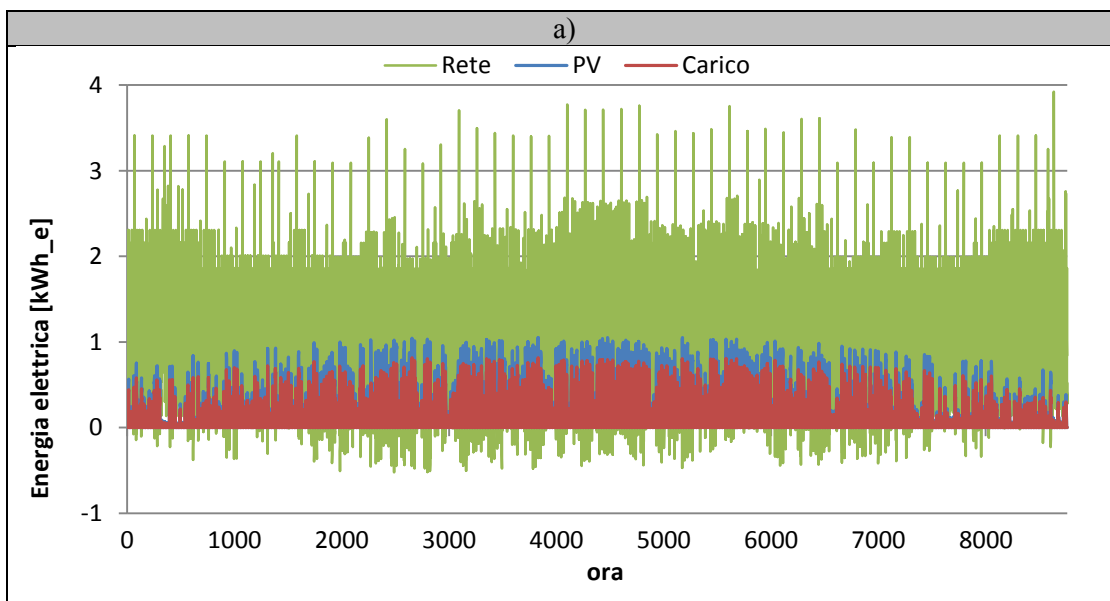
Figura 4.11 Modelli del sistema fotovoltaico con sistema di stoccaggio: a) per utenza multifamiliare, b) per utenza monofamiliare.

### 4.2.3 Analisi e discussione dei risultati

I dati utili per l'analisi e il confronto sono:

- l'energia derivante dal sistema fotovoltaico;
- l'energia fornita al carico nel caso di solo fotovoltaico e di fotovoltaico più sistema di stoccaggio;
- l'energia prelevata dalla rete;
- l'energia in esubero inviata alla rete.

Per quanto riguarda il modello del solo sistema fotovoltaico si riportano i casi dell'utenza multifamiliare equipaggiata con i dispositivi di ombreggiamento e dell'utenza monofamiliare, differenziati per tipologia di terminale di impianto.



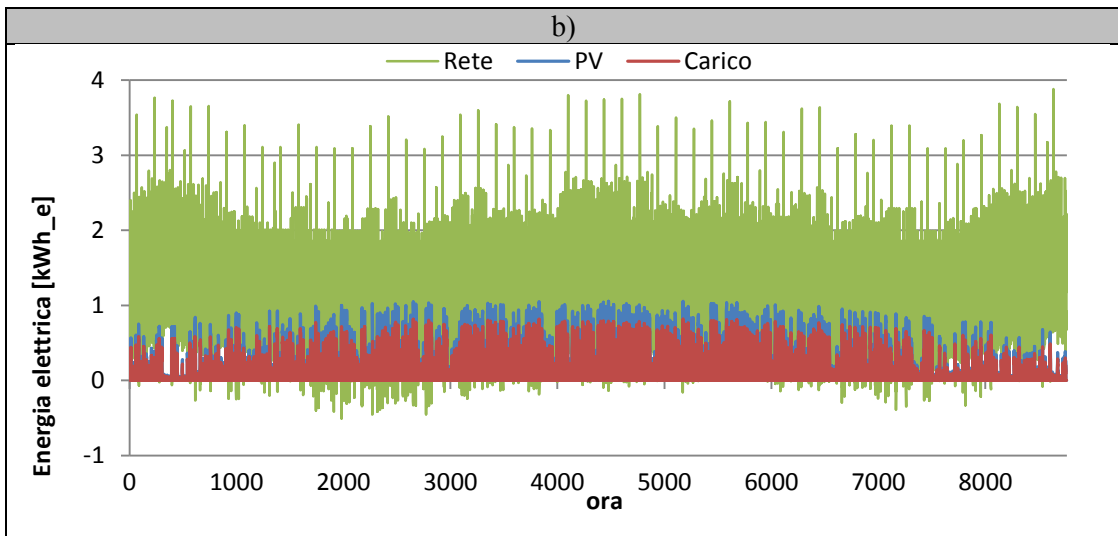


Figura 4.12: a) profilo di energia elettrica nel caso di utenza multifamiliare con ombreggiamento e sistema TABS. b) profilo di energia elettrica nel caso di utenza multifamiliare con ombreggiamento e ventilconvettori.

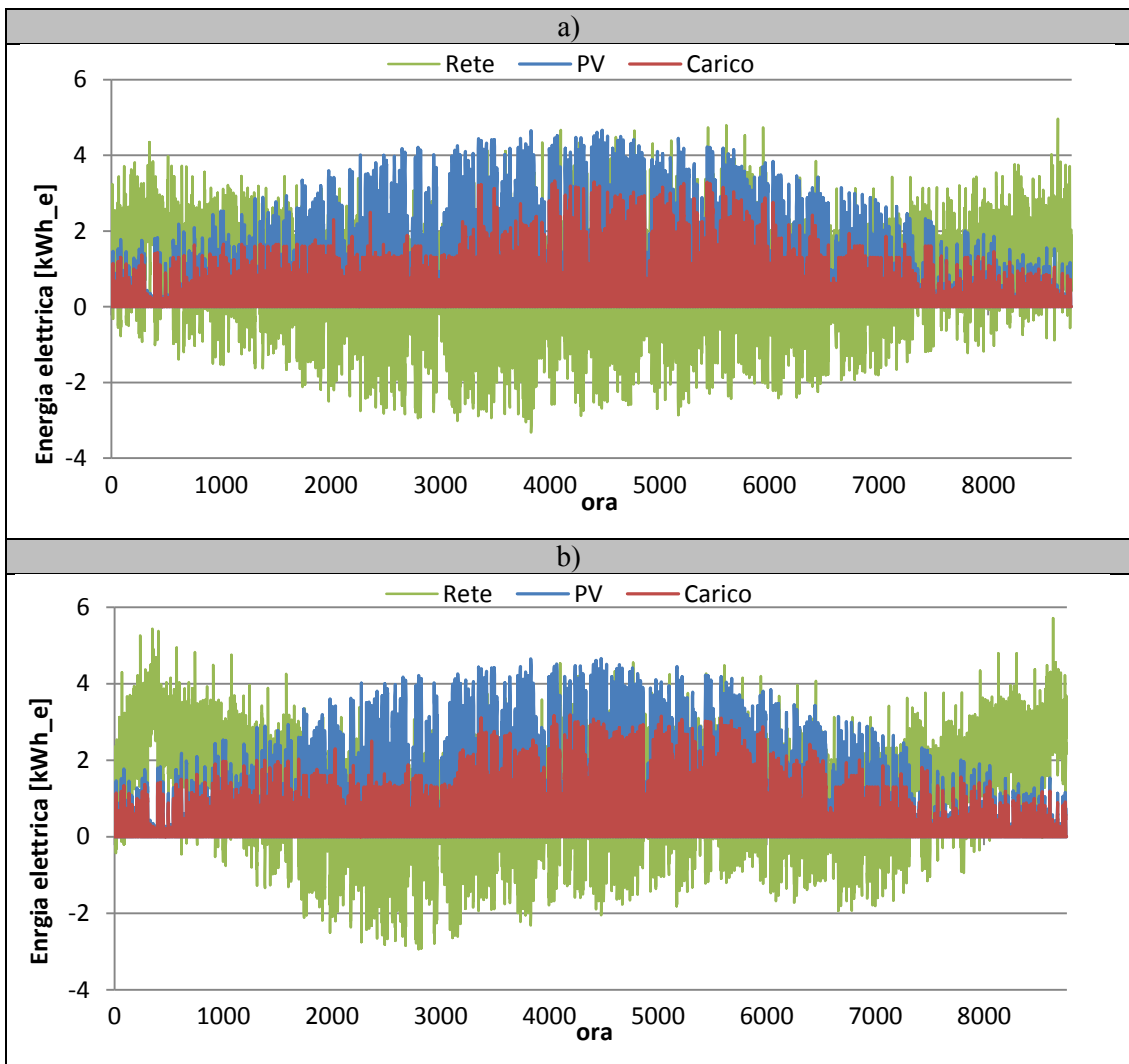


Figura 4.13: a) profilo di energia elettrica nel caso di utenza monofamiliare e sistema TABS. b) profilo di energia elettrica nel caso di utenza monofamiliare e ventilconvettori.

In riferimento alle figure 4.12 e 4.13, si evidenzia che il numero ridotto di pannelli a disposizione di ogni appartamento non permette di coprire buona parte del carico richiesto, a differenza di quanto accade per l'utenza monofamiliare presso la quale sono installati 20 moduli fotovoltaici. Inoltre, lavorando con un sistema TABS, la richiesta elettrica risulta inferiore all'impianto con ventilconvettori, è quindi possibile vendere una quota di energia maggiore (curva verde con valori negativi) attraverso lo scambio sul posto, portando un maggiore vantaggio economico al singolo utente.

Nel secondo modello proposto, il parco batterie è stato simulato in 4 composizioni per l'utenza multifamiliare e in 3 per quella monofamiliare. Nel primo caso le combinazioni sono:

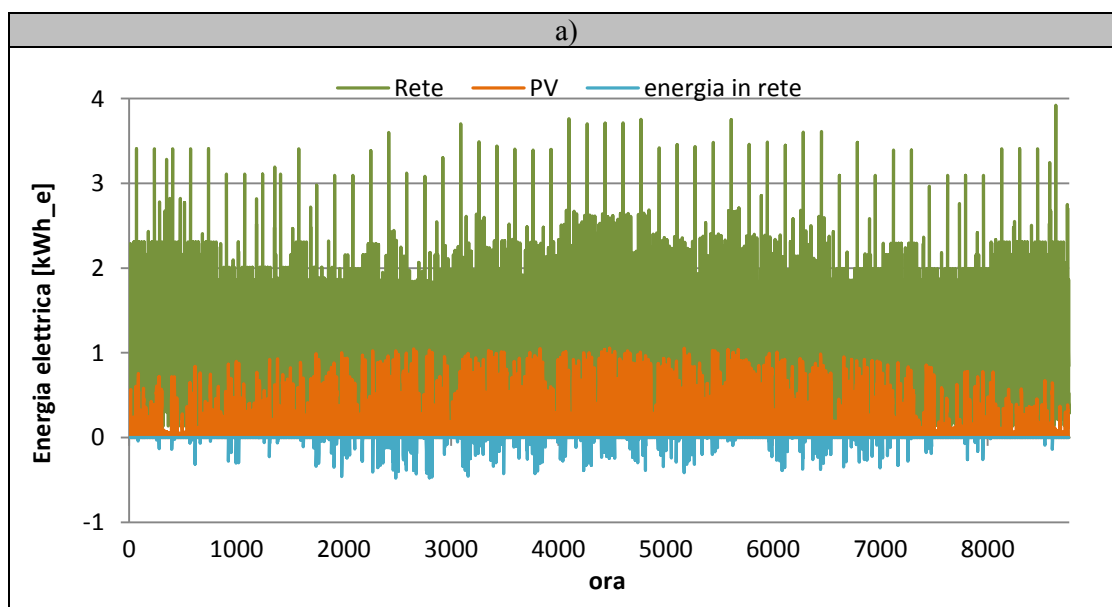
- 3 batterie da 1500 Ah;
- 2 batterie da 1500Ah;
- 1 batteria da 1500Ah;
- 1 batteria da 750Ah.

Nel secondo caso le combinazioni sono:

- 5 batterie da 1500Ah;
- 4 batterie da 1500Ah;
- 3 batterie da 1500Ah.

I risultati migliori, dal punto di vista economico (si veda paragrafo seguente), sono stati ottenuti con la configurazione che prevede una batteria da 750 Ah per appartamento e 3 batterie da 1500 Ah per la casa unifamiliare.

Per questioni di sintesi si propongono di seguito i risultati delle configurazioni giudicate più prestazionali:





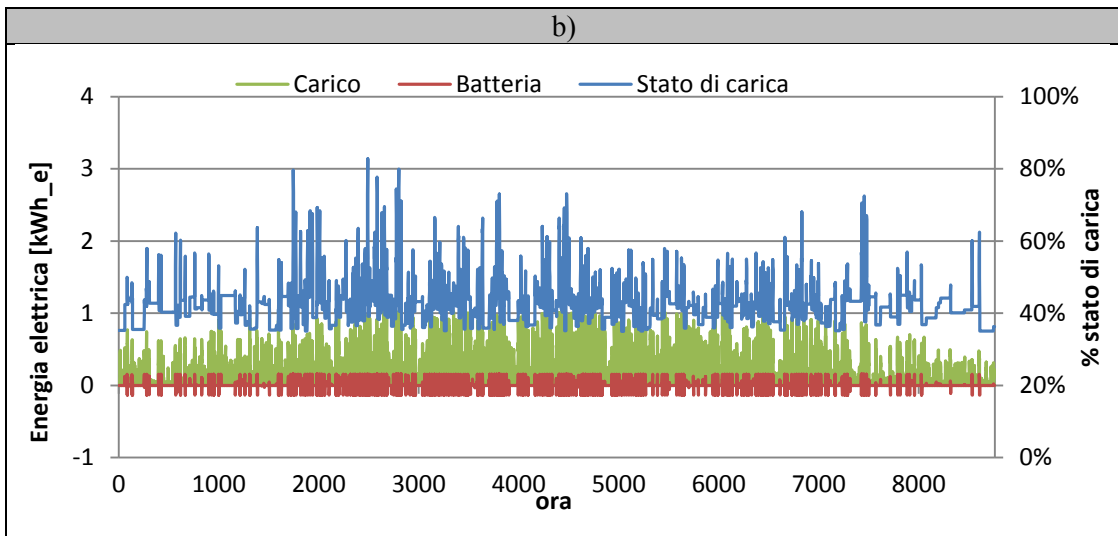


Figura 4.14 Profili di energia elettrica nel caso di un appartamento con ombreggiamento e sistema TABS: a) energia dalla rete, verso la rete e da impianto fotovoltaico, b) energia da batteria, energia verso il carico da PV e batteria, e stato della carica.

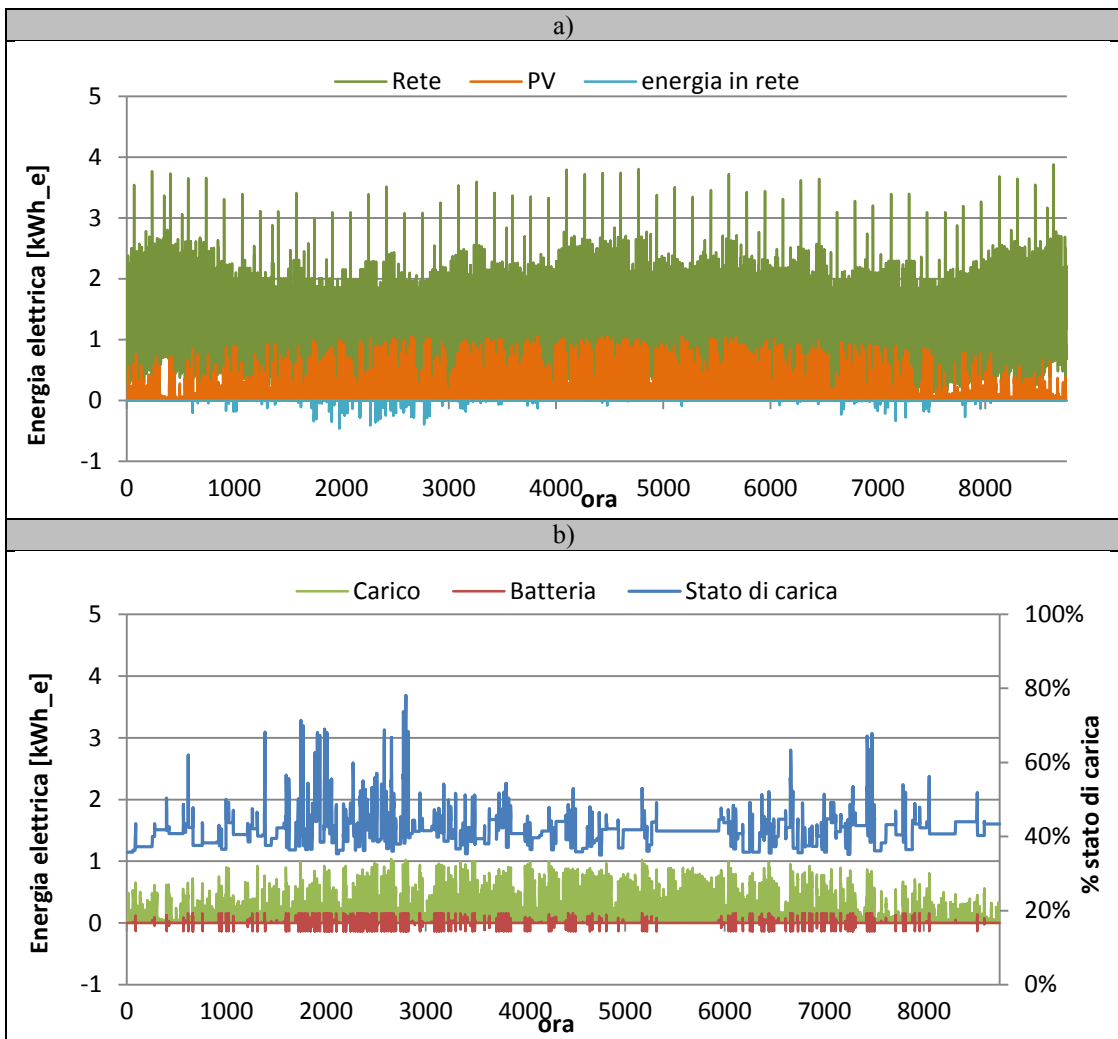


Figura 4.15 Profili di energia elettrica nel caso di un appartamento con ombreggiamento e ventilconvettori: a) energia dalla rete, verso la rete e da impianto fotovoltaico, b) energia da batteria, energia verso il carico da PV e batteria, e stato della carica.

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

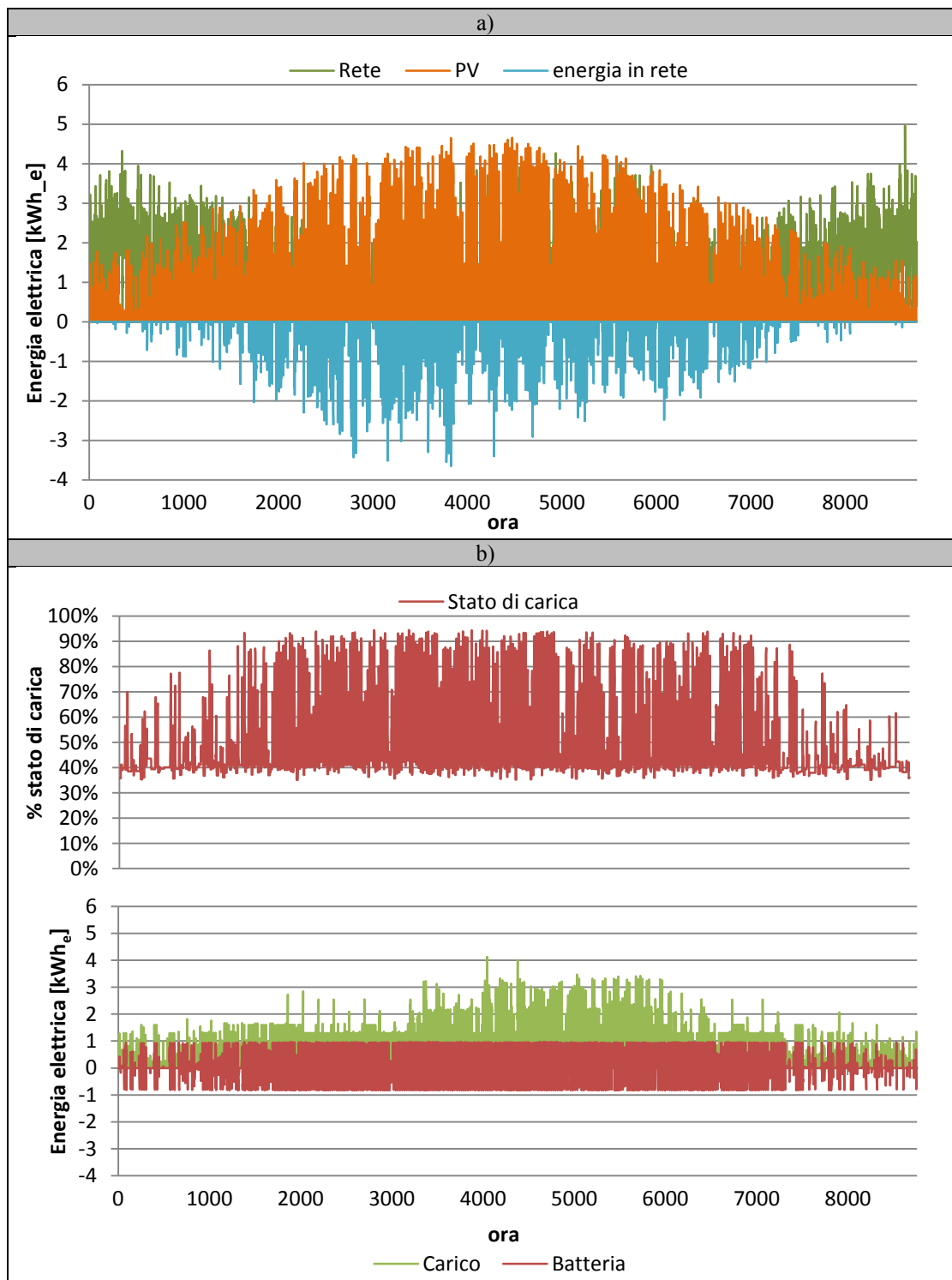


Figura 4.16 Profili di energia elettrica nel caso di utenza monofamiliare e sistema TABS: a)energia dalla rete, verso la rete e da impianto fotovoltaico, b) energia da batteria, energia verso il carico da PV e batteria, e stato della carica.

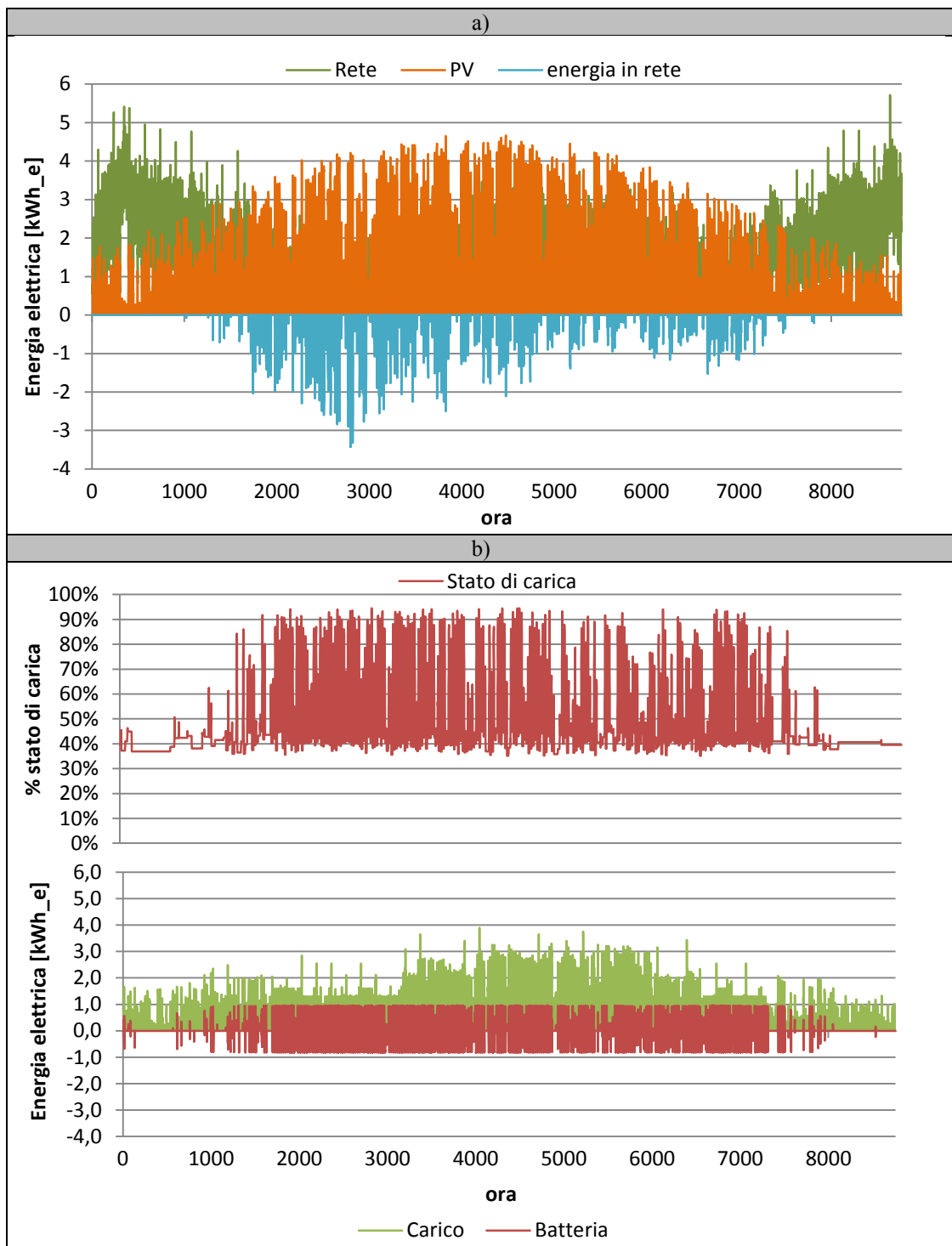


Figura 4.17 Profili di energia elettrica nel caso di utenza monofamiliare e ventilconvettori: a)energia dalla rete, verso la rete e da impianto fotovoltaico, b) energia da batteria, energia verso il carico da PV e batteria, e stato della carica.

In riferimento alle figure 4.14 e 4.15, si nota come, con una singola batteria per appartamento, non si riesca ad avere una quota apprezzabile di autoconsumo; il sistema fotovoltaico è poco performante e la parte di energia in esubero è esigua. Tale aspetto è evidenziato dall'andamento dello stato di carica delle batterie che riescono a caricarsi in modo limitato determinando un contributo praticamente trascurabile. Per l'utenza monofamiliare (figure 4.16 e 4.17), il sistema di stoccaggio sembra vantaggioso dato che la capacità totale del parco batterie è maggiore e la quota di energia in surplus prodotta dal fotovoltaico è superiore rispetto al caso precedente. Quindi le batterie, soprattutto nel periodo estivo, sono in grado di ridurre, in modo rilevante, la quota di potenza da prelevare dalla rete nazionale, con un conseguente ritorno economico.

### **4.3 Confronto delle prestazioni elettriche**

Nel confronto delle prestazioni elettriche degli impianti a sistema TABS e a ventilconvettori non è stato considerato il caso dell'utenza multifamiliare senza ombreggiamento esterno perché, come si è visto nei paragrafi precedenti, dal punto di vista energetico, è scarsamente sostenibile, derivando da un involucro non ottimizzato. Nella presente sezione, i risultati ottenuti attraverso le simulazioni effettuate per l'impianto fotovoltaico e la configurazione con sistema di stoccaggio a batterie sono confrontati da un punto di vista energetico ed economico.

#### **4.3.1 Sistema fotovoltaico**

Il primo caso analizzato è rappresentato dal solo impianto fotovoltaico, senza accoppiamento al parco batterie, nelle applicazioni per le utenze multifamiliare e monofamiliare. I risultati del confronto delle prestazioni e dei flussi di energia elettrica generata, autoconsumata e assorbita dalla rete sono riportate sia nel caso di sistemi TABS sia per sistemi a ventilconvettori. In tabella 4-6 sono riportati i risultati ottenuti per l'utenza multifamiliare:

**Tabella 4-7 Confronto delle prestazioni elettriche del sistema fotovoltaico tra impianto con sistema TABS e con ventilconvettori per l'utenza multifamiliare.**

SOLO SISTEMA FOTOVOLTAICO						
UTENZA MULTIFAMILIARE						
	SISTEMA TABS			VENTILCONVETTORI		
	4 MODULI	u.m	20 MODULI	4 MODULI	u.m	20 MODULI
Energia al carico da PV	17,83%		39,58%	16,32%		38,42%
Energia assorbita dalla rete	82,17%		60,42%	83,68%		61,58%
Energia venduta	1,53%		57,22%	0,53%		45,85%
Energia totale richiesta dal carico	6187,84	kWh	6187,84	7108,07	kWh	7108,07
Bolletta	1958,78	euro		2285,70	euro	

Le percentuali presenti nella tabella 4-7, e anche nelle tabelle successive, fanno sempre riferimento al fabbisogno di energia elettrica totale. E' giustificato, quindi, che la somma delle prime due voci sia pari al 100%, mentre la terza rappresenta la quota di energia elettrica autoprodotta in esubero rispetto al carico annuale richiesto dall'utenza.

I risultati proposti evidenziano come l'energia prodotta dal sistema fotovoltaico, in accoppiamento ad entrambe le configurazioni impiantistiche TABS e ventilconvettori, sia piuttosto ridotta a causa del limitato numero di moduli a disposizione per ogni appartamento. Per tale motivo si è voluto verificare quale risultato potesse essere ottenuto per le applicazioni multifamiliari nel caso in cui ogni utente avesse a disposizione la stessa quantità di pannelli (20) della villetta unifamiliare. In questa situazione ideale, nel caso di un sistema TABS, la quota di energia generata dal sistema fotovoltaico che può alimentare direttamente il carico aumenta, aumenta dal 17% al 39% (più del doppio) e anche la quota di energia in esubero venduta al gestore elettrico subisce un incremento importante passando da appena l'1,5% al 45,85% , generando conseguentemente un vantaggio economico. Tuttavia la condizione descritta è stata definita ideale, infatti, la superficie di copertura disponibile non permette l'installazione ad ogni utente di un impianto di tali dimensioni, e l'analisi è stata effettuata solamente per permettere un più semplice confronto rispetto all'applicazione dello stesso sistema nelle applicazioni monofamiliari. Da un punto di vista economico, il sistema fotovoltaico analizzato risulta più conveniente quando abbinato a sistemi di tipo TABS : come si evince dal costo della bolletta elettrica presentato in tabella 4-7, che è diminuito del 15% rispetto il caso di impianto a ventilconvettori.

La valorizzazione economica di un kWh<sub>e</sub>, nel caso di impianto centralizzato, è stato effettuata scorpondo il fabbisogno di energia elettrica di base dell'utenza dal fabbisogno

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

relativo alla pompa di calore e agli ausiliari di impianto. La prima quota del fabbisogno è stata calcolata considerando i parametri presentati in tabella 4-8 e la valutazione prevede che ogni unità abitativa sia servita da un proprio contratto di fornitura elettrica.

**Tabella 4-8 Parametri per il calcolo del costo di un kWh<sub>e</sub> in base alla tariffa D1 senza incentivazioni per la pompa di calore.**

Abitazione di residenza anagrafica con potenza impegnata superiore a 3 kW o abitazione diversa dalla residenza anagrafica								
	Servizi di vendita			Servizi di rete	Oneri	TOTALE		
	Monorario	Biorario				Monorario	Biorario	
Quota energia (€/kWh)	fascia unica	fascia F1	fascia F23			fascia unica	fascia F1	fascia F23
kWh/anno: da 0 a 1800	0,0768	0,08	0,074	0,025	0,08	0,185	0,189	0,183
da 1801 a 2640				0,042		0,2027	0,206	0,200
da 2641 a 4440				0,082		0,242	0,246	0,240
oltre 4440				0,124		0,285	0,289	0,283
Quota fissa (€/anno)	24,4217			20,11		44,534		
Quota potenza (€/kW/anno)				15,99	0,23	16,2306		
Accise	0.0227 euro/kWh				IVA	10%		
Sistema TABS					VENTILCONVETTORI			
0,37euro/kWh					0,37euro/kWh			

**Tabella 4-9 Parametri per il calcolo del costo di un kWh<sub>e</sub> in base alla tariffa D1 per la pompa di calore.**

	Servizi di vendita			Servizi di rete	Oneri	TOTALE		
	fascia F1	fascia F2	fascia F3			fascia F1	fascia F2	fascia F3
Quota energia (€/kWh)								
gen-15	0,0851	0,084	0,0671	0,00757	0,0752	0,167	0,167	0,149
feb-15	0,0853	0,085	0,0674			0,1682	0,168	0,150
mar-15	0,0813	0,085	0,0676			0,164	0,168	0,150
Quota fissa (€/anno)	75,3538			25,3211	146,47	247,1515		
Quota potenza (€/kW/anno)	34,138				34,1382			
Accise	0.0227 euro/kWh				IVA	10%		
Sistema TABS					VENTILCONVETTORI			
0,25 euro/kWh					0,23 euro/kWh			
0,012 euro/kWh (per appartamento)					0,011 euro/kWh (per appartamento)			

**Tabella 4-10 Confronto delle prestazioni elettriche del sistema fotovoltaico tra impianto con sistema TABS e con ventilconvettori per l'utenza monofamiliare.**

UTENZA MONOFAMILIARE				
	SISTEMA TABS		VENTILCONVETTORI	
Energia al carico da PV	33,52%		29,00%	
Energia assorbita dalla rete	66,48%		71,00%	
Energia a venduta	22,12%		10,94%	
Energia totale richiesta dal carico	9173,53	kWh	12780,13	kWh
Bolletta	1488,45	euro	2142,54	euro

La seconda quota è calcolata sulla base dei dati riportati in tabella 4-9. La pompa di calore al servizio dell'utenza multifamiliare è stata valutata come connessa ad un contatore indipendente, a gestione condominiale, pertanto il costo complessivo è stato redistribuito equamente su ciascuno dei 20 appartamenti.

In riferimento alla tabella 4-10 è possibile notare come, per quanto riguarda le utenze monofamiliari, a parità di carichi elettrici generici, il sistema TABS permetta un significativo risparmio di energia elettrica (più di 3000 kWh<sub>e</sub>) rispetto ai ventilconvettori.

Analizzando invece la convenienza del sistema fotovoltaico, esso è in grado di soddisfare in autonomia circa il 29% del fabbisogno elettrico richiesto dall'impianto a ventilconvettori e ben il 33% di quello richiesto con l'utilizzo di solai termoattivi, anche l'energia ceduta al gestore elettrico è maggiore nel secondo caso.

**Tabella 4-11 Tabella per il calcolo del costo di un kWh<sub>e</sub> in base alla tariffa D1 con incentivazione per l'uso esclusivo di pompa di calore.**

	Servizi di vendita			Servizi di rete	Oneri	TOTALE		
	Monorario	Biorario				Monorario	Biorario	
	fascia unica	fascia F1	fascia F23			fascia unica	fascia F1	fascia F23
Quota energia (€/kWh)	---	0,0810	0,0746	0,0173	0,07526	---	0,17359	0,1672
Quota fissa (€/anno)	24,4217			20,112	27,85	72,384		
Quota potenza (€/kW/anno)				15,996	0,2342	16,2306		
Accise	0.0227 euro/kWh				IVA	10%		
Sistema TABS				VENTILCONVETTORI				
0,24 euro/kWh				0,24 euro/kWh				

I risultati ottenuti mostrano senza dubbio la bontà dell'abbinamento di un generatore a pompa di calore ad un sistema TABS, il quale si ha un notevole risparmio un bolletta, dato

che il costo annuo di gestione risulta pari a 1488 euro/anno, decisamente inferiore alla cifra di 2142 euro/anno, necessaria per un sistema equivalente a ventilconvettori. Il costo medio dell'energia elettrica è stato valutato adottando la tariffa D1 per clienti domestici con incentivazione per l'uso esclusivo di pompa di calore sia per il riscaldamento, sia per il raffrescamento, come descritto in tabella 4-11.

### 4.3.2 Impianto fotovoltaico con sistema di stoccaggio

I risultati, presentati nelle tabelle seguenti, sono stati ottenuti con il medesimo numero di moduli fotovoltaici utilizzati in precedenza variando combinando il sistema fotovoltaico a diverse configurazioni di stoccaggio elettrico, ottenute variando la tipologia e la potenza del parco batterie. Nel caso di residenza multifamiliare, l'analisi è stata condotta per un'utenza tipo, le configurazioni valutate per il parco batterie sono le seguenti: 3 batterie da 1500 Ah, 2 batterie da 1500 Ah, 1 batteria da 1500 Ah e 1 batteria da 750 Ah.

La tabella 4-12 riporta i risultati ottenuti e i parametri economici per ciascuna delle configurazioni indicate.

**Tabella 4-12 Confronto economico e delle prestazioni elettriche dell'impianto fotovoltaico con sistema di stoccaggio per un appartamento dell'utenza multifamiliare.**

	Sistema TABS		VENTILCONVETTORI		
POTENZA DA PV E BATTERIE	21,03%		18,511%		3 BATTERIE DA 1500 Ah
POTENZA DA RETE	78,97%		81,489%		
POTENZA DISPERSA	0,00%		0,000%		
POTENZA TOT RICHIESTA [kWh <sub>e</sub> ]	6187,84	kWh	7108,07	kWh	
Bolletta	1882,40	euro	2225,93	euro	
kWh <sub>e</sub> risparmiati	198,28	kWh	155,61	kWh	
Investimento	1860	euro	1860	euro	
tasso di sconto	0,1	0,075	0,1	0,075	
fattore di attualizzazione	0,117	0,098	0,117	0,0980	
VAN	-1209,68	-1081,28	-1350,87	-1250,3	
POTENZA DA PV E BATTERIE	21,02%		18,50%		2 BATTERIE DA 1500 Ah
POTENZA DA RETE	78,98%		81,49%		
POTENZA DISPERSA	0,513%		0%		
POTENZA TOT RICHIESTA [kWh <sub>e</sub> ]	6187,84	kWh	7108,07	kWh	



Bolletta	1882,83	euro	2226,13	euro	
kWh risparmiati	197,17	kWh	155,02	kWh	
Investimento	1240	euro	1240	euro	
tasso di sconto	0,1	0,075	0,1	0,075	
fattore di attualizzazione	0,117	0,098	0,117	0,098	
VAN	-593,31	-465,63	-732,81	-632,66	
POTENZA DA PV E BATTERIE	20,76%		18,44%		1 BATTERIE DA 1500 Ah
POTENZA DA RETE	79,23%		81,55%		
POTENZA DISPERSA	0,31%		0,067%		
POTENZA TOT RICHIESTA [kWh <sub>e</sub> ]	6187,84	kWh	7108,07	kWh	
Bolletta	1888,79	euro	2227,80	euro	
kWh risparmiati	181,70	kWh	150,67	kWh	
Investimento	620	euro	620	euro	1 BATTERIE DA 750 Ah
tasso di sconto	0,1	0,075	0,1	0,075	
fattore di attualizzazione	0,117	0,098	0,117	0,098	
VAN	-24,07	93,59	-127,03	-29,701	
POTENZA DA PV E BATTERIE	20,29%		18,27%		
POTENZA DA RETE	79,71%		81,73%		
POTENZA DISPERSA	0,93%		0,282%		1 BATTERIE DA 750 Ah
POTENZA TOT RICHIESTA [kWh <sub>e</sub> ]	6187,84	kWh	7108,07	kWh	
Bolletta	1900,17	euro	2232,40	euro	
kWh risparmiati	152,16	kWh	138,72	kWh	
Investimento	350	euro	350	euro	
tasso di sconto	0,1	0,075	0,1	0,075	
fattore di attualizzazione	0,117	0,098	0,117	0,098	1 BATTERIE DA 750 Ah
VAN	149,05	247,58	103,86	193,47	

In riferimento alla tabella 4-12, si nota che l'incremento dell' energia elettrica autoconsumata, dovuto all'apporto delle batterie, è piuttosto ridotto e quindi il contributo del parco batterie risulta scarsamente rilevante. Una possibile spiegazione è imputabile al ridotto numero di pannelli fotovoltaici disponibili per ogni appartamento dell'edificio multifamiliare, infatti, come mostrato in tabella 4-7, l'energia prodotta in eccesso rispetto al fabbisogno istantaneo di energia elettrica dal sistema fotovoltaico in assenza di batterie è pari, in media, al solo 1% rispetto al fabbisogno totale. Questo comporta che lo stoccaggio,

applicato a tale sistema, ha la possibilità di immagazzinare e di rendere disponibile in un secondo momento, una ridotta quota di energia.

Le batterie al piombo acido, considerate nell'analisi, sono al giorno d'oggi ancora piuttosto costose, per tale motivo è stata realizzata una valutazione economica dell'investimento basata sul metodo del valore attuale netto. In tal senso, per ogni caso proposto, è stato calcolato l'indice del *VAN (Valore Attuale Netto)* in base l'equazione (4.1):

$$VAN = -I_0 + \frac{D}{f_{ATTUALIZZAZIONE}} \quad (4.1)$$

Dove:

- $I_0$  rappresenta l'investimento iniziale e cioè il costo delle batterie.
- $D$  rappresenta la differenza tra ricavi e costi, ma visto che, in tal caso, i costi di gestione e manutenzione sono minimi si è deciso di porli pari a zero. I ricavi, invece, sono stati calcolati facendo il prodotto tra la quantità di energia elettrica risparmiata, rispetto al caso di solo sistema fotovoltaico, e il prezzo a kWh<sub>e</sub> che dovrebbe pagare l'utente se si servisse dalla rete.
- $f_{ATTUALIZZAZIONE}$  rappresenta il fattore di utilizzazione il quale è in funzione del tasso di sconto  $r$  e il numero di anni di vita  $n$  del dispositivo installato. Il tasso di sconto è stato preso pari al *WACC (Weight Average Cost of Capital)*, mentre il numero di anni di vita è pari a 20. Il fattore di attualizzazione è stato determinato secondo l'equazione 4.2:

$$f_{ATTUALIZZAZIONE} = \frac{r}{1 - (1 - r)^{-n}} \quad (4.2)$$

L'analisi economica è stata condotta assumendo due casi distinti: nel primo l'utente si espone per l'intera cifra dell'investimento ( $f_{ATT}=0,1$ ), nel secondo, invece, metà investimento è opera coperto richiedendo un finanziamento ( $f_{ATT}=0,075$ ).

L'unica situazione in cui il VAN risulta positivo, anche se di poco, è quella in cui sia installata una singola batteria da 750 Ah oppure una batteria da 1500 Ah. Quest'ultimo caso, però, è conveniente, se e solo se, si accede ad un finanziamento. E' da notare, comunque, che, nonostante l'indice economico sia positivo, procedere nell'investimento rappresenta comunque un rischio, infatti in caso di guasto nei 20 anni ipotizzati per la durata di vita del sistema, ogni convenienza, per quanto limitata, andrebbe persa.

Nelle restanti situazioni il VAN è largamente inferiore a zero, e quindi è fortemente sconsigliato adottare uno stoccaggio con un numero elevato di batterie, poiché l'investimento risulta non conveniente è oltretutto, il vantaggio energetico aggiuntivo, rispetto all'installazione di una sola batteria, è molto ridotto.

Nel caso di utenza monofamiliare le configurazioni valutate per il parco batterie sono le seguenti: 5 batterie da 1500 Ah, 4 batterie da 1500 Ah e 3 batterie da 1500 Ah;

La tabella 4-13 riporta i risultati ottenuti e i parametri economici per ciascuna delle configurazioni indicate.

**Tabella 4-13 Confronto economico e delle prestazioni elettriche dell'impianto fotovoltaico con sistema di stoccaggio per l'utenza monofamiliare.**

	Sistema TABS		VENTILCONVETTORI		
POTENZA DA PV E BATTERIE	50,60%		39,09%		5 BATTERIE DA 1500 Ah
POTENZA DA RETE	49,40%		60,90%		
POTENZA DISPERSA	7,41%		3,05%		
POTENZA TOT RICHIESTA[kWh <sub>e</sub> ]	9173,53	kWh	12780,13	kWh	
Bolletta	1106,02		1837,95		
kWh risparmiati	1566,92	kWh	1289,93	kWh	
Investimento	3100	euro	3100	euro	
tasso di sconto	0,1	0,075	0,1	0,075	
fattore di attualizzazione	0,117	0,098	0,117	0,098	
VAN	155,91	798,76	-506,89	5,10	
POTENZA DA PV E BATTERIE	48,56%		38,04%		4 BATTERIE DA 1500 Ah
POTENZA DA RETE	51,47%		61,96%		
POTENZA DISPERSA	10,05%		4,39%		
POTENZA TOT RICHIESTA[kWh <sub>e</sub> ]	9173,53	kWh	12780,13	kWh	
Bolletta	1152,42		1869,74		
kWh risparmiati	1376,79	kWh	1155,31	kWh	
Investimento	2480	euro	2480	euro	
tasso di sconto	0,1	0,075	0,1	0,075	
fattore di attualizzazione	0,117	0,098	0,117	0,098	
VAN	380,83	945,67	-157,51	301,04	
POTENZA DA PV E BATTERIE	45,89%		36,60%		3 BATTERIE DA 1500 Ah
POTENZA DA RETE	54,11%		63,40%		
POTENZA DISPERSA	13,41%		6,24%		
POTENZA TOT RICHIESTA[kWh <sub>e</sub> ]	9173,53	kWh	12780,13	kWh	
Bolletta	1211,42		1913,27		
kWh risparmiati	1135,07	kWh	970,93	kWh	

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI

Investimento	1860,00	euro	1860,00	euro	
tasso di sconto	0,1	0,075	0,1	0,075	
fattore di attualizzazione	0,117	0,098	0,117	0,098	
VAN	498,56	964,24	91,84	477,21	

Con riferimento alla tabella 4-13, l'energia elettrica che lo stoccaggio elettrico è in grado di convogliare all'utenza è notevolmente incrementato rispetto al caso multifamiliare, infatti il più elevato numero di pannelli fotovoltaici installati, garantisce maggiori flussi di energia verso le batterie. Il costo delle batterie e la scelta di limitare il loro numero fa sì che non tutta l'energia in esubero possa essere stoccata e utilizzata al bisogno, tuttavia rispetto al caso di sola installazione dell'impianto fotovoltaico . si nota un aumento apprezzabile della quota di energia elettrica autoconsumo. Ciò comporta una diminuzione della bolletta elettrica di circa 300 euro sia nel caso di sistemi TABS, sia di impianti a ventilconvettori.

Dal punto di vista economico, analizzando l'indice del VAN, le soluzioni impiantistiche adottate sono convenienti, a parte nel caso di utilizzo, come terminale d'impianto, di fancoil e se l'investimento è coperto interamente dall'utente.

La soluzione migliore dal punto di vista energetico sarebbe quella con 5 batterie da 1500 Ah, ma, in termini economici, la configurazione più conveniente è il sistema di stoccaggio con 3 batterie da 1500 Ah, anche se la quota di autoconsumo rispetto all'ottimo energetico si riduce di circa 400 kWh con i sistemi TABS e di 300 kWh con i ventilconvettori.

Da quanto emerso, è possibile concludere che il sistema di stoccaggio per mezzo di batterie è conveniente sia energeticamente, sia economicamente, se e solo se è collegato a un impianto fotovoltaico di taglia sufficiente a produrre, nell'arco di tempo in cui si ha irraggiamento solare, una quantità di energia superiore a quella richiesta dal carico, come accade per l'utenza monofamiliare. Nelle applicazioni multifamiliari, invece, dovrebbe essere possibile installare un parco fotovoltaico di maggiore estensione per garantire la medesima convenienza. Ma poiché ciò risulta impossibile per problemi di spazio e perché ogni inquilino deve poter accedere equamente alle proprietà comuni, in tali casi si sconsiglia vivamente l'installazione di un sistema di stoccaggio, mentre è possibile invece procedere all'installazione del solo impianto fotovoltaico.

## CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha analizzato il funzionamento di un sistema impiantistico radiante ad alta inerzia termica annegato in superfici edili orizzontali, denominato TABS (*Thermally Activated Building Structures*), e ne ha dimostrato l'applicabilità in riferimento a due casi studio di carattere residenziale: un'utenza multifamiliare e un'utenza monofamiliare, nonostante in letteratura siano presenti analisi tecnico-scientifiche riguardanti sistemi di tale tipologia applicati in ambito residenziale ed allo stato attuale si incontrino solo rare installazioni in edifici a destinazione d'uso terziaria.

Il primo passo è stato redarre l'analisi dei fabbisogni energetici invernali e estivi secondo la normativa UNI TS 11300 parti 1 e 2 delle le utenze edilizie in esame e quindi è stato possibile procedere al dimensionamento del sistema TABS sulla base della norma ISO 11855 parte 2 e parte 4, ricavando la portata e la temperatura di progetto per il fluido operativo.

Completato il dimensionamento e di sistemi l'analisi delle prestazioni energetiche è stata realizzata per mezzo del codice di calcolo TRNSYS che ha permesso di valutare il sistema in regime dinamico. Gli impianti TABS sono stati implementati tramite l'interfaccia TRNBUILD per implementazione dell'edificio. Il sistema edificio- impianto è stato quindi implementato e modellato annoverando in aggiunta un sistema di ventilazione meccanica controllata a doppio flusso con recuperatore entalpico e una pompa di calore aria-acqua. Con l'ausilio del modello descritto è stato possibile valutare: :

- il comportamento del sistema TABS;
- il comfort dell'ambiente interno;
- l'energia termica fornita dal pompa di calore al sistema TABS;
- i flussi di potenza dei solai termoattivi;
- l'energia elettrica fornita assorbita dalla pompa di calore.

Per valutare l'attendibilità dei risultati ottenuti è stato scelto di operare un'analisi comparativa a parità di condizioni con una soluzione impiantistica più comune e molto diffusa sia nella riqualificazione energetica degli edifici esistenti, sia negli edifici di nuova costruzione: il ventilconvettore. Dal confronto si è dedotto che:

- attraverso sistemi TABS è possibile soddisfare le esigenze termiche dell'utenza, garantendo un adeguato standard di comfort, mantenendo dei limitati flussi specifici di potenza agendo sulla durata del periodo di funzionamento dell'impianto.
- i sistemi TABS producono una continua variazione della temperatura interna durante il periodo di funzionamento, tuttavia tale variazione rispetto al valore di set point non

- supera mai il valore limite di 4K/h proposto dalla regolamentazione ASHRAE per garantire il comfort indoor. La temperatura interna media si attesta attorno ai 20°C in inverno e ai 26°C in estate, come imposto da normativa nazionale, garantendo le condizioni di comfort termico richieste.
- Le analisi condotte sul modello con sistemi a ventilconvettore hanno evidenziato un’escursione della temperatura dell’ambiente interno inferiore rispetto al caso precedentemente discusso, i valori medi stagionali che non si discostano molto da quelli imposti da norma. Tuttavia dall’analisi dinamica condotta non è possibile fare emergere l’incorrere dei fenomeni di discomfort dovuti alle correnti d’aria, tipici di tali soluzioni d’impianto soprattutto durante il regime di raffrescamento.
  - L’analisi dei consumi elettrici necessari ad alimentare la pompa di calore al servizio delle due tipologie d’impianto e nei due casi studio analizzati ha evidenziato un altro aspetto a favore dei sistemi TABS, infatti l’energia primaria necessaria risulta essere del 50% inferiore rispetto al sistema con ventilconvettori, come è evidenziato nella tabella seguente.

TABS		FANCOIL	
<b>UTENZA MULTIFAMILIARE CON OMBREGGIAMENTO</b>			
Energia primaria		Energia primaria	
0,16	tep	0,33	tep
1848	kWh	3849	kWh
<b>UTENZA MULTIFAMILIARE SENZA OMBREGGIAMENTO</b>			
Energia primaria		Energia primaria	
0,21	tep	0,45	tep
2485,60	kWh	5194	kWh
<b>UTENZA MONOFAMILIARE</b>			
Energia primaria		Energia primaria	
0,67	tep	1,34	tep
7758	kWh	15600	kWh

**Tabella 2 Riepilogo dei fabbisogni di energia primaria.**

La sezione conclusiva del lavoro ha valutato, infine, l’accoppiamento all’impianto descritto di un sistema fotovoltaico (con e senza sistema di stoccaggio per mezzo di batterie al piombo acido) al fine di verificare i possibili vantaggi economici derivanti dall’autoproduzione di una quota del fabbisogno di energia elettrica complessivo dell’utenza. I sistemi TABS presentano, come citato in precedenza, un fabbisogno energetico inferiore, e l’abbinamento a sistemi fotovoltaici permette una interessante la riduzione dell’assorbimento di energia elettrica per entrambe le tipologie edilizie in esame. L’introduzione di un parco di batterie per lo stoccaggio dell’energia elettrica fotovoltaica produce effetti diversi in funzione

dell'utenza considerata. La maggiorazione della quota di energia fotovoltaica utilizzabile relativa all'installazione delle batterie non risulta rilevante in applicazioni di tipo condominiale a causa del numero ridotto di pannelli fotovoltaici disponibili per appartamento. Al contrario nel caso di utenze monofamiliari la percentuale di energia che il sistema di stoccaggio è in grado rendere disponibile è sufficientemente interessante da rendere l'investimento conveniente. Dal punto di vista economico, l'abbinamento con batterie risulta conveniente solo nel caso studio unifamiliare, mentre per le utenze multifamiliari è sufficiente l'installazione di un sistema fotovoltaico tradizionale.

Concludendo, per entrambe le tipologie residenziali analizzate il sistema TABS risulta performante sia da un punto di vista energetico sia in termini economici, perché permette al generatore a pompa di calore di operare in modo più efficiente, realizzando COP medi stagionali mediamente superiori rispetto al caso di confronto, caratterizzato da un impianto a ventilconvettori, consentendo la riduzione globale dei consumi elettrici e bolletta dei costi di gestione

APPLICAZIONE DEI SISTEMI TABS IN AMBITO RESIDENZIALE, ANALISI DELLE  
PRESTAZIONI IN ABBINAMENTO A SISTEMI FOTOVOLTAICI



**BIBLIOGRAFIA**

- [1] M. DE CARLI, M. KOSCHENZ, B.W.OLESEN e M.SCARPA, «Valutazione delle prestazioni termiche di sistemi con solai termo attivi in regime non stazionario.», 46° Convegno Internazionale AICARR, Milano, Marzo 2008.
- [2] «Multizone Building modelling with Type56 and TRNBuild,» in TRNSYS 16, pp. 150-162.
- [3] UNI EN 15733-3, «Impianti di riscaldamento negli edifici – Progettazione degli impianti radianti di riscaldamento e raffrescamento, alimentati ad acqua integrati in pavimenti, pareti e soffitti – Parte 3: Ottimizzazione per l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile,» 2008.
- [4] B.LEHMANN, V.DORER e M.KOSCHENZ, «Application range of thermally activated building systems TABS», Energy and Buildings, 2007, pp. 593-598.
- [5] J. KOLARIK, «Simulation of energy use, human thermal comfort and office work performance in buildings with moderately drifting operative temperatures», Energy and Buildings, 2011, pp. 2988-2997.
- [6] J. TOFTUM, «Occupant Responses and energy use in buidings with moderately drifting temperatures», ASHRAE, 2008, p. 145.
- [7] ISO 11855-4, «Building environment design — Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems —Part 4: Dimensioning and calculation of the dynamic heating and cooling capacity of Thermo Active Building Systems (TABS)», 2012.
- [8] M. DE CARLI, «Dispense per il corso impianti termici e frigoriferi».
- [9] A. CAVALLINI e L. MATTAROLO, «Pompe di calore», TERMODINAMICA APPLICATA, Padova, CLEUP, 1992.
- [10] «Pompe di calore: caratteristiche, vantaggi e svantaggi», <http://www.energyhunters.it/>.
- [11] E. GRANRYD, «REFRIGERATING ENGINEERING», PART II, US-AB Trick&Media, 2005.
- [12] «I sistemi geotermici a bassa temperatura: il terreno come sorgente termica», [http://www.geometra.info/i-sistemi-geotermici-a-bassa-temperatura-il-terreno-come-sorgente-termica\\_news\\_x\\_25433.html](http://www.geometra.info/i-sistemi-geotermici-a-bassa-temperatura-il-terreno-come-sorgente-termica_news_x_25433.html).
- [13] «Ventilazione meccanica controllata con recupero di calore», <https://www.aspira.it>.
- [14] G.ZOLLINO, «Dispense per il corso di Impianti fotovoltaici».
- [15] D. DEL COL, «Dispense per il corso di Energie Rinnovabili».

- [16] A. CAVALLINI, D. DEL COL, «LA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA».
- [17] «Il tuo fotovoltaico: classificazione e tipologia»,  
[http://www.iltuofotovoltaico.it/contents/it/d4\\_Classificazione\\_e\\_tipologia.html](http://www.iltuofotovoltaico.it/contents/it/d4_Classificazione_e_tipologia.html).
- [18] «Kit Solare Casa 0,75kW/3kWh con accumulo»,  
<http://www.shop.ilportaledelsole.com/>.
- [19] ROSSATO GROUP s.r.l, «Manuale scaldabagni a pompa di calore Air Combo 100».
- [20] ISO11855-2, «Building environment design — Design, dimensioning, installation and control of embedded radiant heating and cooling systems —Part 2: Determination of the design heating and cooling capacity» 2012.
- [21] CEN TR 14788:2006, pag. 75, 2006.
- [22] AERMEC, «TRS Unità di recupero di calore con scambiatore entalpico», scheda tecnica.
- [23] EMMETTI, «pompa di calore Mirai Split», scheda tecnica.
- [24] AERMEC, «FCX ventilconvettori», scheda tecnica.
- [25] WILO, «Modello pompa YONOS», scheda tecnica.
- [26] SHARP, «Modulo fotovoltaico serie ND», scheda tecnica.
- [27] HOPPECKE, «Batterie OPzV solar.power», scheda tecnica