

**Alma Mater Studiorum- Università di Bologna**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE- LAUREA  
SPECIALISTICA**

*DIENCA- Dipartimento ingegneria energetica, nucleare e del controllo  
ambiente*

TESI DI LAUREA in Impianti Tecnici LS

**Analisi energetica di un impianto di climatizzazione a  
pannelli radianti con simulazione dinamica del sistema  
edificio-impianto**

CANDIDATO

Elisa Falavena

RELATORE

Chiar.mo Prof. Giovanni Semprini

CORRELATORI

Ing. Prof. A. Cocchi

Ing. Cosimo Marinosci

Anno Accademico 2008/2009

Sessione III

**PAROLE CHIAVE:** pannelli radianti, pompa di calore, sonde geotermiche,  
analisi energetica

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>pag. 9</b>
<b>Capitolo 1. Problema energetico nell'edilizia</b>	<b>pag. 13</b>
1.1 Problema energetico. . . . .	pag. 13
1.2 Edilizia e risparmio energetico. . . . .	pag. 17
1.2.1 Involucro edilizio e sostenibilità ambientale. . . . .	pag. 18
1.2.2 Progettazione di edifici a bassa consumo energetico. . . . .	pag. 20
1.2.3 Comportamento energetico dell'involucro. . . . .	pag. 22
1.2.4 Prestazioni termiche dell'involucro . . . . .	pag. 24
1.2.5 Legislazione nazionale. . . . .	pag. 25
1.2.6 Legislazione regionale. . . . .	pag. 34
<b>Capitolo 2. UNI/TS 11300-1-2 e UNI/EN 12831</b>	<b>pag. 37</b>
2.1 UNI/TS 11300-1/2. . . . .	pag. 37
2.1.1 UNI/TS 11300-1:2008. . . . .	pag. 40
2.1.1.1 Dati in ingresso per i calcoli. . . . .	pag. 41
2.1.1.2 Calcolo scambio termico per ventilazione e per trasmissione. . . . .	pag. 44
2.1.1.3 Calcolo apporti termici interni e solari. . . . .	pag. 47
2.1.1.4 Parametri dinamici. . . . .	pag. 50
2.1.2 UNI/TS 11300-2:2008. . . . .	pag. 51

2.1.2.1 Sottosistemi per l'impianto di riscaldamento. . . . .	pag. 53
2.2 UNI EN 12831. . . . .	pag. 58
2.2.1 Dispersioni termiche in un spazio riscaldato	pag. 58
2.2.1.1 Procedimento di calcolo. . . . .	pag. 58
2.2.1.2 Dati richiesti. . . . .	pag. 58
2.2.1.3 Calcolo dispersione termica totale di progetto. . . . .	pag. 60
<b>Capitolo 3. Pompe di calore e sonde geotermiche</b> _____	<b>pag. 63</b>
3.1 Pompe di Calore . . . . .	pag. 65
3.1.1 Pompe di calore elettriche a compressione. . . . .	pag. 67
3.1.2 Prestazioni energetiche. . . . .	pag. 69
3.2 Sonde geotermiche. . . . .	pag. 76
3.2.1 Sonde geotermiche verticali. . . . .	pag. 76
3.2.2 Sonde geotermiche orizzontali . . . . .	pag. 79
3.2.3 Altri tipi di sonde. . . . .	pag. 83
<b>Capitolo 4. Sistemi a pannelli radianti</b> _____	<b>pag. 85</b>
4.1 Pannelli a pavimento. . . . .	pag. 86
4.2 Pannelli a parete. . . . .	pag. 87
4.3 Vantaggi dei pannelli radianti. . . . .	pag. 89
4.4 Limiti legati ai pannelli. . . . .	pag. 92
4.5 Quadro normativo. . . . .	pag. 93
4.5.1 UNI EN 1264. . . . .	pag. 94
4.6 Dimensionamento dei pannelli radianti a pavimento. . . . .	pag. 105
4.6.1 Determinazione della temperatura di mandata. . . . .	pag. 107
4.6.2 Determinazione della portata. . . . .	pag. 110
4.6.3 Determinazione della lunghezza dei circuiti. . . . .	pag. 112
4.6.4 Specifiche sui parametri richiesti. . . . .	pag. 112
<b>Capitolo 5. Caso studio</b> _____	<b>pag. 115</b>
5.1 Principali dati costruttivi dell'involucro edilizio. . . . .	pag. 117

---

5.2 Impianto. . . . .	pag. 132
5.2.1 Impianti di riscaldamento. . . . .	pag. 132
5.2.2 Impianto di acqua calda sanitaria. . . . .	pag. 133
<b>Capitolo 6. Analisi in regime stazionario</b>	<b>pag. 137</b>
6.1 Strumento di calcolo utilizzato: MC4 Suite 2009. . .	pag. 138
6.2 Modellazione edificio. . . . .	pag. 140
6.3 Calcolo dispersioni invernali. . . . .	pag. 152
6.4 Dimensionamento dei pannelli radianti. . . . .	pag. 156
6.4.1 Determinazione temperatura di mandata e potenza massima emessa dal pannello. . . . .	pag. 157
6.4.2 Dimensionamento dei pannelli radianti tramite un software commerciale (software Pannelli radianti Caleffi s.p.a.) . . . .	pag. 159
6.4.2.1 Confronto foglio Excel - risultati Software. . . . .	pag. 162
6.4.2.2 Compensazione potenza residua. . . . .	pag. 165
6.4.3 Dimensionamento pannelli radianti tramite MC4. . . . .	pag. 166
6.4.3.1 Confronto foglio Excel - risultati software MC4 . . . . .	pag. 171
6.4.3.2 Compensazione potenza residua. . . . .	pag. 173
6.5 Calcolo del fabbisogno invernale. . . . .	pag. 176
6.6 Inserimento generatore. . . . .	pag. 180
6.6.1 Rendimento medio stagionale e indicatore di prestazione. . . . .	pag. 182
6.6.2 Inserimento di una caldaia. . . . .	pag. 184
6.6.2.1 Caldaia tradizionale. . . . .	pag. 184
6.6.2.2 Caldaia a condensazione. . . . .	pag. 186
6.6.3 Inserimento di Pompa di Calore. . . . .	pag. 189
6.6.4 Considerazioni. . . . .	pag. 195
6.7 Carichi termici e fabbisogno estivo. . . . .	pag. 200
6.7.1 Carichi termici estivi. . . . .	pag. 200

6.7.2 Fabbisogno energetico estivo. . . . .	pag. 201
6.8 Capacità termica e costante di tempo. . . . .	pag. 204
6.9 Considerazioni riassuntive. . . . .	pag. 206

## **Capitolo 7. Analisi in regime dinamico** \_\_\_\_\_ **pag. 209**

7.1 Strumento di calcolo utilizzato: TRNSYS 16.1. . . . .	pag. 210
7.1.1 Interfaccia: TRNBUILD. . . . .	pag. 211
7.1.2 Interfaccia: SIMULATION STUDIO. . . . .	pag. 215
7.2 Modellazione dell'edificio esaminato. . . . .	pag. 217
7.2.1 Creazione dei pacchetti murari. . . . .	pag. 217
7.2.2 Creazione delle finestre. . . . .	pag. 218
7.2.2.1 Creazione dei sistema di vetri. . . . .	pag. 219
7.2.2.2 Creazione del telaio. . . . .	pag. 220
7.2.2.3 Creazione della finestra. . . . .	pag. 220
7.2.3 Creazione delle zone tramite TRNBUILD. . . . .	pag. 221
7.2.4 Creazione del progetto tramite SIMULATION STUDIO. . . . .	pag. 224
7.2.5 Creazione degli ombreggiamenti. . . . .	pag. 226
7.2.5.1 Creazione dell'edificio. . . . .	pag. 227
7.2.5.2 Output programma. . . . .	pag. 229
7.3 Calcolo del fabbisogno termico in regime dinamico. . . . .	pag. 230
7.3.1 Metodo delle funzioni di trasferimento. . . . .	pag. 231
7.3.2 Bilancio termico applicato da TRNSYS. . . . .	pag. 237
7.3.2.1 Flusso di calore attraverso muri e finestre. . . . .	pag. 237
7.4 Simulazioni effettuate. . . . .	pag. 244
7.5 Calcolo del fabbisogno energetico e confronto con regime stazionario. . . . .	pag. 245
7.5.1 Settaggio in TRNSYS. . . . .	pag. 245
7.5.2 Risultati. . . . .	pag. 246
7.6 Calcolo fattore di carico. . . . .	pag. 259
7.6.1 Settaggio in TRNSYS. . . . .	pag. 260
7.6.2 Risultati. . . . .	pag. 260

---

7.7 Fabbisogno energetico considerando i muri	
interni. . . . .	pag. 263
7.7.1 Settaggio in TRNSYS. . . . .	pag. 264
7.7.2 Risultati. . . . .	pag. 264
7.8 Funzionamento parziale dell’impianto. . . . .	pag. 266
7.8.1 Settaggio in TRNSYS. . . . .	pag. 267
7.8.2 Risultati. . . . .	pag. 267
7.9 Free cooling. . . . .	pag. 276
7.9.1 Settaggio in TRNSYS. . . . .	pag. 276
7.9.2 Risultati. . . . .	pag. 277
7.10 Variazione spessore isolante. . . . .	pag. 279
7.10.1 Variazione spessore isolante tetto. . . . .	pag. 280
7.10.1.1 Settaggio in TRNSYS. . . . .	pag. 280
7.10.1.2 Risultati. . . . .	pag. 281
7.10.2 Isolante controsoffitto. . . . .	pag. 284
7.10.2.1 Settaggio in TRNSYS. . . . .	pag. 284
7.10.2.2 Risultati. . . . .	pag. 284
7.10.3 Isolamento a cappotto. . . . .	pag. 287
7.10.3.1 Settaggio in TRNSYS. . . . .	pag. 287
7.10.3.2 Risultati. . . . .	pag. 288
7.11 Valutazione fabbisogno considerando tende	
interne, tende esterne oppure schermature. . . . .	pag. 294
7.11.1 Settaggio in TRNSYS. . . . .	pag. 295
7.11.2 Risultati. . . . .	pag. 296
7.12 Valutazione fabbisogno energetico al variare	
della massa dei muri. . . . .	pag. 300
7.12.1 Settaggio in TRNSYS. . . . .	pag. 300
7.12.2 Risultati. . . . .	pag. 301
7.13 Considerazioni riassuntive. . . . .	pag. 302
<b>Conclusioni</b>	<b>pag. 307</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>pag. 309</b>



# Introduzione

Di fronte alla necessità di ridurre l'impatto ambientale prodotto dagli edifici, si sta pian piano diffondendo una maggiore sensibilità sui problemi del risparmio energetico.

La Direttiva europea 2002/91/CE sul rendimento energetico nell'edilizia ha dato impulso a un rinnovamento legislativo, che in Italia ha prodotto, a livello nazionale, il Decreto 19 agosto 2005 n. 192 (ora corretto e integrato dal Decreto 10 giugno 2009, n. 59) e, a livello locale, una serie di regolamenti rivolti alla riduzione dei consumi e alla certificazione energetica. Si ritrova tra questi il pacchetto di norme tecniche UNI/TS 11300 "Prestazioni energetiche degli edifici" che rappresenta una grande opportunità di armonizzazione e razionalizzazione delle procedure di valutazione energetica ad oggi esistenti. L'obiettivo dunque che oggi giorno ci si prefissa è comprendere gli aspetti di riduzione e uso razionale dell'energia, contenere il consumo delle risorse non rinnovabili e ridurre l'impatto ambientale dei sistemi energetici a servizio degli edifici. Per raggiungere tali mete occorre ragionare su due aspetti: il *sistema edificio* e il *sistema impianto*.

Per realizzare un sistema energeticamente efficiente occorre, quindi, che si massimizzino gli apporti energetici naturali e si minimizzino le dispersioni termiche interne. Occorre cioè un involucro che reagisca in maniera flessibile alle sollecitazioni esterne minimizzando le dispersioni termiche nel periodo invernale e limitando l'innalzamento della temperatura nel periodo estivo.

Per contro il sistema impianto dovrà essere modulato in maniera adeguata alle reali efficienze dell'involucro edilizio. Ovviamente progettare un involucro che

massimizzî i guadagni di energia e minimizzî le perdite fa sì di non dover far uso di sistemi impiantistici di elevata potenza.

Nell'obiettivo del risparmio energetico e nell'uso di risorse rinnovabili si trova l'utilizzo del terreno come fonte termica. Di fatti il terreno è una risorsa che ben sfruttata può ridurre i consumi energetici degli usi termici quali riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria. Il dispositivo che permette di sfruttare questa fonte è la pompa di calore, che sulla base di un normale ciclo frigorifero, più comunemente a compressione con alimentazione diretta, trasferisce il calore assorbito dalla sorgente fredda, il terreno, alla sorgente calda, l'impianto. Il terreno diventa dunque un'alternativa efficace all'aria presentando alcune caratteristiche favorevoli: a causa della sua elevata inerzia termica sin dai primi metri risente poco delle fluttuazioni termiche giornaliere e stagionali, tant'è che la temperatura può essere considerata costante tutto l'anno.

In definitiva è logico affermare che una progettazione energeticamente efficiente deve prevedere sia una corretta coibentazione dell'involucro edilizio sia un'adeguata scelta delle apparecchiature coinvolte nell'impianto di climatizzazione.

Il problema delle dispersioni energetiche si presenta di rilevante importanza nelle villette singole in cui molto spesso il rapporto S/V è molto elevato.

Oggetto del presente elaborato è dunque la valutazione energetica di un edificio realmente esistente caratterizzato da un impianto con pompa di calore geotermica. Tale obiettivo varrà perseguito attraverso due approcci: un approccio basato su di un calcolo stazionario e uno basato su di un calcolo dinamico. Per quanto riguarda l'analisi in regime stazionario si utilizzerà un software commerciale MC4 Suite 2009, grazie al quale sarà possibile dimensionare, coerentemente alle dispersioni termiche registrate, l'impianto di riscaldamento. Sarà inoltre determinato il fabbisogno netto di energia in modo tale da valutare, una volta definito il generatore, il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento invernale. Oltre all'inserimento della pompa di calore geotermica verranno considerate caldaia tradizionale e caldaia a condensazione in modo tale da definirne le differenze nei riguardi del rendimento medio stagionale, indice di prestazione e consumo in termini di

spesa annua. Per finire sarà fatto un confronto con il fabbisogno di energia primaria ottenuto con l'utilizzo di una pompa di calore in un edificio gemello, nel quale, però, risultano rispettati i limiti di trasmittanza previsti dalla normativa attuale per tutti i pacchetti murari.

La seconda parte sarà caratterizzata dalla valutazione energetica dell'edificio tramite un software che opera in regime dinamico: TRNSYS 16.1. Le simulazioni effettuate in regime dinamico permetteranno un'analisi molto più realistica e completa valutando nel dettaglio i contributi apportati dall'inerzia termica dell'involucro e dalla ventilazione naturale, che hanno ripercussioni sulle prestazioni termiche sia in regime invernale, ma soprattutto in quello estivo. Un'analisi dinamica permetterà, dunque, di considerare il giusto peso di fattori come l'escursione termica giorno-notte e l'irraggiamento solare.

Verranno dunque affrontati diversi confronti tra i fabbisogni energetici reali relativi al periodo invernale ed estivo e i fabbisogni ottenuti variando alcuni fattori fondamentali quali per esempio isolamento dell'edificio e ombreggiamento degli infissi. Verranno inoltre evidenziate le variazioni che tali parametri possono apportare sulla temperatura interna.



# Capitolo 1

## Problema energetico ed edilizia

### 1.1 Problema energetico

---

La terra è circondata da un involucro gassoso, l'atmosfera, costituita di una miscela di gas: azoto 78 %, ossigeno 21%, gas serra 1%. Essa è costantemente irraggiata dalle radiazioni elettromagnetiche provenienti dal sole, che scaldano il nostro pianeta e danno origine alla vita.

L'energia solare arriva sotto forma di radiazioni ad “onde corte” ; molte di queste radiazioni vengono riflesse dall'atmosfera mentre al contrario una buona parte la attraversano e riscaldano la superficie terrestre. La superficie terrestre riflette tali radiazioni a “onde lunghe” o infrarosse. La maggior parte di questa radiazioni viene assorbita dall' atmosfera terrestre, grazie alla presenza di gas serra. I principali gas serra sono il biossido di carbonio, conosciuto con il nome di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), il metano ( $\text{CH}_4$ ), il biossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e il vapore acqueo. Essi svolgono due importanti funzioni : filtrano le radiazioni provenienti dal sole, evitando in tal modo di far giungere sulla superficie quelle più nocive alla vita e ostacolano l'uscita delle radiazioni infrarosse. La concentrazione del più importante di questi gas, il biossido di carbonio, è aumentata nell'atmosfera da 290 ppmv (parti per milione in volume) nel 1880 a circa 380 ppmv nel 2006.

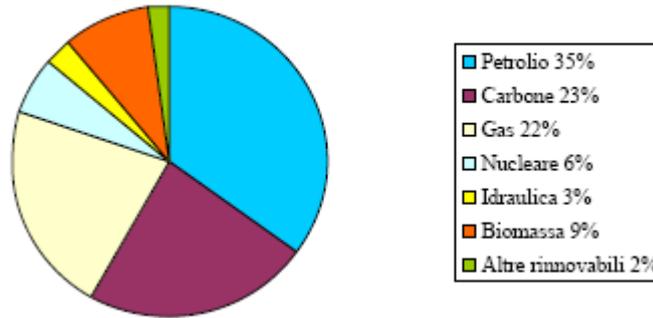
La crescita delle emissioni di gas serra generate dalle attività dell'uomo ha avuto inizio dalla rivoluzione industriale : l'uso del carbone nell'ottocento e successivamente dei combustibili fossili nel novecento ne sono le principali cause.

L'ecosistema terrestre ha una capacità naturale di assorbire le emissioni eccessive di gas mediante il processo della fotosintesi vegetale e attraverso l'assorbimento operato dagli oceani, ma la deforestazione e l'enorme quantità di emissioni inquinanti hanno vanificato il tentativo di mantenere stabile l'equilibrio dello stesso. La vita sulla terra dipende da un intervallo di temperatura di pochi gradi.

Ogni anno constatiamo che variazioni minime di temperatura globale hanno conseguenze drastiche per il clima e per le condizioni di vita. Il problema dell'effetto serra è complesso così come lo sono i meccanismi del pianeta come sistema : l'anidride carbonica, infatti ha una durata media in atmosfera di 100 anni, e anche riducendo immediatamente e drasticamente le emissioni, non riusciremo comunque a ridurre in breve tempo la sua presenza in atmosfera.

Oggi circa il 90% dell'approvvigionamento energetico proviene da fonti *non rinnovabili*: petrolio, carbone, gas naturale, uranio. I combustibili fossili coprono la quasi totalità del fabbisogno energetico globale e considerando un aumento del 2% della domanda di energia, si ritiene che possano esaurirsi, entro qualche decina d'anni. Con la loro combustione, inoltre, non si genera solo energia ma si liberano anche vapor acqueo e anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e poiché il combustibile non brucia mai completamente, vengono rilasciati in atmosfera anche gas inquinanti quali l'ossido di carbonio, gli ossidi di azoto e zolfo, metano ed altri idrocarburi. Un'elevata concentrazione di questi gas in atmosfera causa l'aumento del naturale effetto serra del pianeta che porta a gravi conseguenze a livello ambientale.

Un altro aspetto importante è legato al mercato dei combustibili fossili che costituisce ancora il fulcro attorno al quale ruota la società moderna.



**Figura 1.1- Energia sfruttata nel mondo.**

I blackout energetici oggi costituiscono una grossa preoccupazione e iniziano a creare il caos anche nei paesi cosiddetti “sviluppati”. Il crescente utilizzo dei condizionatori sta aggravando notevolmente la pressione sulla rete elettrica che dovrà aumentare la capacità delle centrali, con la conseguenza di erogare ancora più energia.

Una delle maggiori sfide che affronta il mondo in questo momento è l’aumento della popolazione. Attualmente la cifra si aggira attorno a 6500 milioni di persone con un tasso di crescita annuale dell’1,4%. Se nell’anno 2050 tutta la popolazione mondiale consumasse energia al ritmo degli Stati Uniti, che risultano il Paese che più consuma in termini di energia procapite (11kW/procapite) la domanda sarebbe di 122 TW, 8 volte maggiore della domanda registrata nel 2004 (14,8 TW).

Si può dedurre immediatamente che non sarà possibile soddisfare i livelli di consumo con le sole fonti non rinnovabili.

Nasce in questo quadro il concetto di *sostenibilità*.

La definizione più nota di sostenibilità è quella proposta dal Rapporto Brundtland del 1987: “ *uno sviluppo che soddisfi i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni*”.

Tale concetto è quindi volto ad un uso della biosfera tale da mantenerne il suo potenziale a modelli di sviluppo economico in grado di evitare l’impoverimento delle risorse naturali e il degrado di quelle ambientali. Si cerca dunque di ridurre l’impatto delle attività antropiche sulle risorse naturali e sull’ambiente sfruttando in modo consapevole il territorio, riciclando e

riutilizzando, prevenendo l'inquinamento industriale di terreni e acque e soprattutto incentivando il più possibile l'uso di fonti energetiche rinnovabili. Si definiscono *fonti energetiche rinnovabili* quelle fonti che possono essere considerate virtualmente inesauribili nel tempo. Esse comprendono : l'energia solare, l'energia idraulica, quella eolica, quella prodotta dalle biomasse, delle onde, l'energia geotermica e l'energia dissipata sulle coste dalle maree. Inoltre anche i rifiuti, in parte per la loro composizione, in parte perché la loro produzione inevitabilmente accompagna la vita e le attività dell'uomo, vengono considerati fonte di energia rinnovabile. Opportune tecnologie consentono di convertire la fonte rinnovabile di energia in energia secondaria, che può essere termica, elettrica, meccanica e chimica. L'impatto sull'ambiente varia in modo significativo a seconda della fonte e della tecnologia, ma in ogni caso è nettamente inferiore a quello delle risorse tradizionali; in particolare per le contenute emissioni di gas serra. Nel futuro sarà necessario aumentare la produzione di energia da fonti rinnovabili sia per far fronte ai problemi del degrado ambientale sia per fronteggiare l'esaurimento delle scorte fossili.

Secondo una relazione dell'Agenzia europea dell'ambiente pubblicata il 20 ottobre 2008, l'80% delle emissioni di gas a effetto serra in Europa provengono ancora dal settore energetico. Questo settore continua infatti ad avere un impatto significativo sull'ambiente, nonostante il fatto che una più efficiente produzione di energia elettrica e calore, unitamente ad un maggiore ricorso alle fonti di energia rinnovabile e alla sostituzione di carbone e petrolio con il gas naturale, stiano gradualmente contribuendo a ridurre le emissioni di gas a effetto serra e di inquinanti atmosferici in Europa.

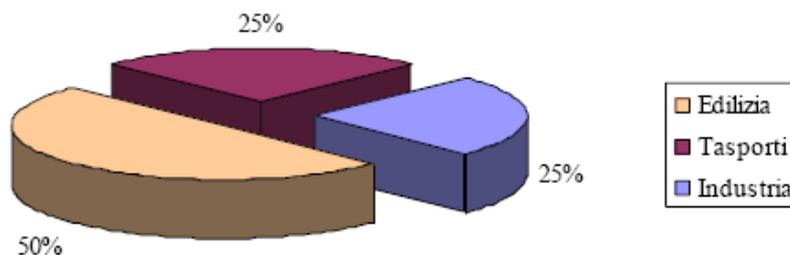
La *Relazione sull'energia e l'ambiente del 2008* conferma che, se i cittadini europei si limitassero ad attenersi alle attuali politiche e misure, il consumo di energia continuerebbe a crescere fino al 26% entro il 2030, mentre i combustibili fossili rimarrebbero la principale fonte di approvvigionamento energetico. *“Nel sistema energetico è necessaria una radicale inversione di tendenza”* ha affermato la professoressa Jacqueline McGlade, direttrice esecutiva dell'EEA (European Environment Agency), in occasione della presentazione della relazione al Parlamento europeo a Strasburgo. Il passaggio

a una società caratterizzata da basse emissioni di carbonio “non sta avvenendo abbastanza rapidamente per garantire un futuro al nostro ambiente”.

## 1.2 Edilizia e risparmio energetico

In Italia il 45% del consumo energetico proviene dal settore dell’edilizia. Tale valore è naturalmente in crescita se si considera che il fabbisogno energetico aumenta dell’1% l’anno e i consumi energetici aumentano anche del doppio.

Dei 190 milioni di TEP (Tonnellate Equivalenti di Petrolio) consumate annualmente, circa 28 milioni sono riconducibili agli usi residenziali, con un tasso di crescita annuo del 2%, contro l’1% dell’incremento generale italiano del consumo di energia.



**Figura 1.2- Consumo di energia nei vari settori.**

Ogni abitazione, uffici, locale pubblico consuma energia elettrica : l’illuminazione, gli elettrodomestici e parte dei sistemi impiantistici ricorrono a questa fonte di energia, che viene immediatamente consumata, in quantità più o meno massiccia a seconda del tipo e delle ore di utilizzo di ciascun apparecchio.

Tali consumi, però, coprono una percentuale irrilevante del fabbisogno di energia, le principali cause dell’inefficienza sono riservate al: riscaldamento degli ambienti (72%), acqua calda sanitaria ( 13%), raffrescamento e condizionamento estivo.

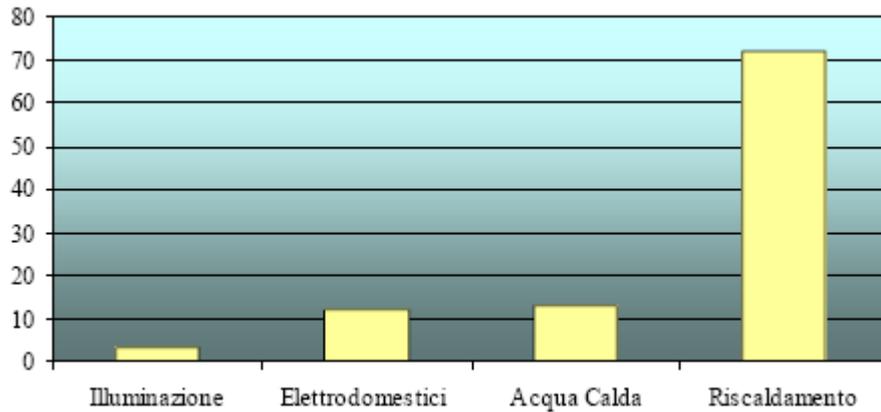


Figura 1.3- Consumi negli edifici civili.

### 1.2.1 Involucro edilizio e sostenibilità ambientale

Se si osserva il parco edilizio nazionale ci si rende conto che gran parte degli edifici sono o edifici storici (di grande bellezza e rilevanza artistica, che vengono tuttora utilizzati, più o meno ristrutturati, ad uso uffici, abitazioni, per fornire servizi pubblici) oppure condomini e residenze costruite nel boom economico degli anni sessanta e settanta. Al di là dell'estetica e della fruibilità di tali edifici, è opportuno notare che entrambe le tipologie sono antecedenti alla prima legge sul risparmio energetico, la legge 373/76 che si rilevò alquanto inefficiente conseguentemente alla ridotta sensibilità al concetto di risparmio energetico. L'effetto è che oggi il maggiore spreco energetico è originato da questi edifici che costituiscono il 60% del parco edilizio europeo. Il modo più economico per intervenire su questi edifici è durante la fase di ristrutturazione. In questo modo è possibile risparmiare il 60% del consumo energetico totale degli edifici.

Il concetto di *involucro edilizio* si è quindi evoluto nel tempo, passando da una semplice barriera protettiva verso l'esterno ad un concetto dinamico che ottimizza le interazioni con l'ambiente. Diviene così un elemento volto a regolare i flussi energetici legati al passaggio di calore, alla trasmissione della luce e alla protezione dalla radiazione solare.

Di grande importanza risultano senz'altro le dispersioni termiche che dipendono dalla differenza di temperatura tra la faccia interna e quella esterna dell'involucro stesso e dalla resistenza dei materiali costituenti ( i materiali che

compongono un involucro che separa due ambienti a differente temperatura offrono una resistenza al passaggio di calore che dipende dallo spessore del materiale stesso e alla sua capacità di trasmettere calore).

Questo significa che la realizzazione dei componenti di chiusura riveste un ruolo decisamente importante per la valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio stesso e quindi si può affermare che negli edifici esiste un potenziale risparmio energetico, un risparmio che può essere concretizzato utilizzando le moderne e collaudate tecnologie.

Il tema della *sostenibilità ambientale* è entrato in maniera forte ed integrale nell'ambito dell'edilizia per due motivi fondamentali : da un lato il settore edile risulta essere il principale responsabile di impatti sull'ambiente, come già accennato precedentemente, e dall'altro l'uomo abita gli edifici e in questi pretende di trovare un luogo confortevole e salubre. L'attività edificatoria genera impatti sull'ambiente non solo all'atto della costruzione, ma anche lungo tutto il percorso, dall'approvvigionamento delle materie prime, produzione e trasporto fino alla demolizione dell'edificio e smaltimento delle macerie. Inoltre l'edificio genera impatti per poter garantire condizioni di confort agli abitanti e determinare un ambiente vivibile e adeguato alle attività che negli edifici si svolgono.

Il concetto di *qualità ambientale* è un concetto molto usato, ma spesso oggetto di interpretazioni differenti. Una prima interpretazione definibile macro-ambientale è legata al rapporto tra il costruire e l'ambiente circostante, la qualità ambientale diventa così la ricerca di una diminuzione degli impatti nei confronti dell'ambiente da parte del costruito e la necessità di confrontarsi con l'ambiente circostante al momento della progettazione, ponendo attenzioni su questioni come il clima, l'orientamento, il rapporto della costruzione con il sole. Una seconda interpretazione definibile micro-ambientale è legata alla percezione che gli utenti hanno degli spazi, caratterizzata da una complessità di fattori e parametri difficilmente valutabili in quanto legata al livello di soddisfazione confort dei singoli. Questo livello di qualità ambientale si basa sull'individuazioni delle caratteristiche fisico-tecniche : benessere termigrometrico, acustico, luminoso, qualità dell'aria, ma non solo, riguarda anche

la conformazione degli spazi e la loro modificabilità. Il tema della qualità ambientale è dunque oggetto di due livelli di indagine, quello macro-ambientale che studia il rapporto tra edificio e ambiente e quello micro-ambientale che affronta il rapporto tra uomo ed edificio.

L'esistenza di questi due livelli di applicazione dimostra la necessità di andare oltre ai parametri microclimatici (temperatura, umidità dell'aria, ventilazione, rumore, illuminazione, inquinamento elettromagnetico, qualità dell'aria interna) in quanto non sono sufficienti a definire la qualità ambientale di uno spazio.

### 1.2.2 Progettazione di edifici a basso consumo energetico

La presa di coscienza degli sprechi energetici determinati da edifici in cui il benessere abitativo viene garantito dall'uso di impianti tecnologici, sta spostando l'attenzione dei progettisti da una dotazione impiantistica sempre più pervasiva e sofisticata a una progettazione dove l'edificio è inteso come filtro di flussi di energia. Il ruolo del progettista diventa quello di operare scelte di conformazione, di orientamento, di sistemi di involucro e di impianti dell'edificio, ai fini della riduzione dei consumi energetici, garantendo il confort abitativo. La progettazione volta al risparmio energetico deve controllare contemporaneamente tre livelli: *ambientale*, *tipologico* e *tecnico-costruttivo*. Le modalità di controllo *ambientale* per garantire il confort climatico inteso come climatizzazione degli ambienti interni, si distinguono in due orientamenti fondamentali :

- “*metodi passivi*” puntano sugli aspetti costruttivi capaci da un lato di isolare l'edificio dall'esterno, utilizzando componenti della costruzione caratterizzati da elevata massa termica (in grado di conservare in inverno il calore diurno durante la notte e d'estate il fresco notturno durante il giorno) e dall'altro in grado di lasciare entrare il calore attraverso le parti vetrate d'inverno, proteggendo l'edificio in estate tramite aggetti e schermature.
- “*metodi attivi*” si affidano prevalentemente all'uso di impianti che creino le condizioni di confort adeguando la propria fornitura in relazione alle dinamiche climatiche esterne.

Per quanto attiene al controllo degli aspetti relativi al rapporto tra edifici e ambiente, occorre considerare: il clima locale e le diverse condizioni stagionali, le condizioni microclimatiche del sito e le caratteristiche dell'area.

Nel controllo degli aspetti *tipologici* i fattori che incidono sul comportamento energetico dell'edificio sono:

- la forma più vantaggiosa intesa come rapporto tra superficie e volume rispetto alle dispersioni termiche;
- l'orientamento e la distribuzione interna delle unità abitative;
- l'orientamento delle superfici trasparenti, in relazione allo sfruttamento degli apporti solari diretti nel periodo invernale e al controllo dell'irraggiamento nel periodo estivo e alla distribuzione di tali superfici al fine di garantire un adeguato livello di illuminazione naturale.

Per quanto attiene agli aspetti *tecnico-costruttivi*, i fattori che incidono sul comportamento energetico dell'edificio sono:

- la presenza di un efficace isolamento termico e di finestre ad alte prestazioni termiche;
- l'uso passivo dell'energia solare tramite lo sfruttamento degli apporti solari in maniera diretta (finestre) o indiretta (accumulatori di calore);
- la presenza di una adeguata massa capacitiva (e inerzia termica) per conservare il calore degli apporti solari in inverno ( la captazione solare senza inerzia è inefficace, poiché le ore di captazione d'inverno sono poche e le superfici trasparenti durante le ore in cui non vengono irraggiate sono molto disperdenti) e smorzare i picchi di temperatura in estate;
- l'integrazione di tecnologie solari attive (pannelli fotovoltaici, collettori solari..)
- l'uso di tecnologie ad alto rendimento (pompe di calore, impianti di cogenerazione, corpi d'illuminazione ed elettrodomestici a basso consumo energetico, etc.).

Dunque orientamento dell'edificio, forma dell'edificio, caratteristiche dell'involucro e scelte impiantistiche sono gli aspetti su cui si deve concentrare maggiormente il progettista. Un edificio che sfrutta le caratteristiche al contorno è un edificio "passivo", da distinguersi rispetto a quegli edifici che costruiscono artificialmente il confort all'interno degli ambienti in modo così definito "attivo". I sistemi di climatizzazione attivi si rendono necessari quando

le misure di controllo passivo della climatizzazione non sono sufficienti a garantire il confort degli ambienti interni.

Occorre a questo punto integrare il progetto con gli impianti. Per cercare di contenere i consumi e gli impatti prodotti dagli impianti è opportuno ricorrere a fonti energetiche rinnovabili.

### 1.2.3 Comportamento energetico dell'involucro

Le caratteristiche che definiscono il comportamento energetico dell'involucro sono :

- ❖ “*Interramento*”, indica il grado di contatto delle superfici dell'involucro dell'edificio con il terreno, un edificio interrato ha una maggiore inerzia termica poiché si trova a contatto con il terreno, il quale è dotato di grande stabilità termica. Di contro però ha una bassa capacità di captare la radiazione solare e uno scarso grado di ventilazione che porta un aumento di umidità.
- ❖ “*Addossamento*”, rappresenta il grado di contatto dell'edificio con altre costruzioni, un edificio addossato ad altri gode di una protezione termica invernale rispetto all'esterno, ma presenta un numero ridotto di superfici captanti e una minor ventilazione. Gli orientamenti nord, sono i più indicati per proteggere termicamente l'edificio senza diminuirne la capacità captante.
- ❖ “*Pesantezza*”, è legata al tipo di materiali ed elementi costruttivi scelti per realizzare l'involucro, viene associata al concetto di massa termica, che determina l'inerzia termica, ossia la capacità della parete di attenuare all'interno dell'edificio i picchi di temperatura esterna, ritardando nel tempo gli effetti termici che si hanno all'esterno. Le superfici pesanti dovrebbero essere orientate a sud, est, ovest e sulla copertura.
- ❖ “*Isolamento*”, si riferisce alla resistenza dell'involucro al passaggio di calore e si calcola come coefficiente di trasmissione termica ( $W/m^2K$ ).

In generale valori di trasmissione inferiori a  $0,5 W/m^2K$  corrispondono a involucri opachi ben isolati, mentre valori superiori a  $1 W/m^2K$  corrispondono a involucri opachi poco isolati. Per quanto riguarda i serramenti (media tra vetro e telaio) valori di trasmittanza termica globale

inferiore a  $2 \text{ W/m}^2\text{K}$  corrisponde a serramenti ben isolati, mentre valori superiori a  $3 \text{ W/m}^2\text{K}$  corrispondono a serramenti poco isolati. Lo scambio energetico interno-esterno in un edificio molto isolato è ridotto, ciò garantisce poche dispersioni di calore durante l'inverno. L'isolamento dell'edificio deve essere differente in relazione agli orientamenti, occorre un maggiore isolamento delle facciate esposte a nord e della copertura, e in rapporto alla zona climatica e ai gradi-giorno.

- ❖ “*Permeabilità*”, si riferisce alla presenza di aperture nell'involucro che permettono il passaggio dell'aria, varia con le dimensioni e dalla posizione delle aperture. Le aperture verso sud, sud-est, sud-ovest consentono il passaggio dell'aria più calda mentre quelle a nord dell'aria più fredda, se le aperture vengono collocate su facciate opposte favoriscono la ventilazione incrociata. Sempre più spesso si progettano edifici impermeabili, per evitare dispersioni termiche, in questo modo si riducono i ricambi d'aria all'interno degli ambienti, per questo la normativa UNI 10344 impone, per motivi igienici, un ricambio d'aria minimo pari a  $0,5 \text{ vol/h}$  che possono essere garantiti in edifici impermeabili da sistemi di ventilazione meccanica controllata.
- ❖ “*Trasparenza*”, è legata al passaggio della luce. Un edificio trasparente permette il passaggio della luce e delle radiazioni termiche, si viene a creare l'effetto serra, la radiazione termica che attraversa il vetro viene assorbita dai materiali collocati nell'ambiente interno e viene rimessa con lunghezze d'onda maggiori, non più in grado di attraversare il vetro. Un edificio opaco impedisce il passaggio della luce ma può permettere il passaggio delle radiazioni termiche. Le superfici trasparenti dell'edificio devono essere orientate a sud, sud-est, sud-ovest per favorire i guadagni termici d'inverno, gli orientamenti a est, ovest sono da evitare in estate, poiché il sole basso al mattino e al tramonto, colpisce in maniera diretta la superfici trasparenti. Le coperture trasparenti sono da evitare per il surriscaldamento estivo e uno scarso apporto termico invernale poiché il sole è basso e non colpisce direttamente la superficie che diventa disperdente anche di giorno. Un edificio trasparente può captare grandi quantità di energia radiante, di contro però è un edificio poco isolato per cui la perdita di calore per trasmissione è

elevata, vi è il rischio che di notte venga disperso tutto il calore guadagnato durante il giorno.

- ❖ “*La protezione dal sole*”, è necessaria per ridurre gli effetti indesiderati della radiazione solare attraverso le superfici trasparenti. Le superfici trasparenti devono essere dotate di dispositivi di schermatura e oscuramento. Tali schermature devono garantire l’irraggiamento invernale e il totale ombreggiamento estivo.
- ❖ “*Rugosità*”, si riferisce alla presenza di volumi che sporgono o rientrano dalla facciata, un edificio rugoso presenta un aumento della superficie a contatto con l’esterno aumentando la possibilità di esposizione dell’involucro alla radiazione solare, favorevole per gli orientamenti a sud e un aumento delle zone d’ombra vantaggioso in estate.
- ❖ “*Colore*”, riferito agli involucri opachi, è legato all’assorbimento superficiale, al trasferimento di energia ricevuta per irraggiamento, i colori scuri hanno un elevato coefficiente di assorbimento (da evitare nei climi caldi), mentre i colori chiari hanno un basso valore di assorbimento poiché riflettono la radiazione solare. Nel clima Mediterraneo la variabilità di temperature tra estate e inverno rende difficile la scelta di strategie progettuali e di sistemi di involucro.

#### 1.2.4 Prestazioni termiche dell’involucro edilizio

---

L’obbiettivo del risparmio energetico ha una prima risposta progettuale nell’ottimizzazione degli elementi che compongono la costruzione. La funzione del chiudere e quindi del proteggere l’interno dall’esterno è svolta dalle chiusure (involucro edilizio e serramenti), a queste è principalmente riconosciuto il ruolo di migliorare la prestazione termica dell’edificio. La ricerca è volta dunque all’individuazione di modelli funzionali, materiali e componenti, capaci di fornire prestazioni elevate dal punto di vista dell’isolamento termico, allo scopo di evitare dispersioni e dunque consumi. Il risparmio energetico non può avere solo l’obbiettivo della salvaguardia dell’ambiente ma deve rispondere anche all’esigenza di realizzare un ambiente interno agli edifici che garantisca il benessere termoigrometrico. Ne deriva che non è sufficiente porsi l’obbiettivo di isolare, allo scopo di ridurre i consumi e

l'inquinamento dell'ambiente, ma occorre anche trovare soluzioni progettuali, modelli funzionali e *tipologie di involucro edilizio* che creino spazi abitabili e confortevoli.

La coibentazione dell'edificio consente di mantenere all'interno degli ambienti una temperatura adeguata nel contribuire al benessere termico. L'isolamento termico si basa sulla presenza di una barriera (costituita da un componente edilizio) che impedisce al calore di disperdersi verso l'esterno durante il periodo invernale o di entrare durante il periodo estivo. L'elemento tecnico che maggiormente contribuisce alla riduzione della trasmissione termica è l'*isolante*.

La scelta nel collocare l'isolante influisce sulla risposta inerziale dell'edificio: se lo strato isolante viene collocato all'interno, la massa della chiusura viene estromessa come massa d'accumulo e dunque la risposta alle variazioni di temperatura interna è più rapida (adatta a locali usati parzialmente nell'arco delle 24 ore, esempio uso uffici); se lo strato isolante viene collocato all'esterno la massa della chiusura costituisce massa di accumulo e dunque la risposta alle variazioni di temperatura interna è più lenta (adatta agli edifici residenziali). Importante risulta anche la discontinuità di prestazione termica che può generare *ponti termici*, con formazione di condensa, macchie di umidità e muffe. Dunque soluzioni tecniche legate all'uso di maggiori spessori di materiale isolate sono anche soluzioni che richiedono un maggiore controllo progettuale e soprattutto esecutivo.

### 1.2.5 Legislazione nazionale

A seguito della prima crisi energetica degli anni '70 il primo provvedimento sul tema del risparmio energetico pubblicato in Italia fu la **legge 30 aprile 1976 n.373**, ed i suoi strumenti applicativi, il DPR 28 giugno 1977 n. 1052 ed il DM 10 marzo 1977 che fissavano i limiti alla potenza degli impianti di riscaldamento senza però fornire metodi di calcoli da utilizzare per la verifica. Di fatti questa legge dava prescrizioni sull'isolamento termico dell'edificio, dimenticandosi dell'efficienza termica dell'impianto.

Il 16 gennaio 1991 fu poi pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale la **legge 9 gennaio 1991 n.10** “ *Norme per l'attuazione del Piano Energetico Nazionale*

*in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e sviluppo di fonti rinnovabili di energia", sul risparmio energetico.*

Gli obiettivi della legge erano i seguenti:

- Risparmio energetico (intervento dell'edificio, sugli impianti di controllo del microclima e di illuminazione);
- Uso consapevole dell'energia;
- Salvaguardia dell'ambiente;
- Benessere degli individui;
- Incentivazione dell'uso di fonti rinnovabili di energia;
- Incentivazione dell'uso di sistemi impiantistici alternativi.

Gli aspetti salienti della legge possono essere riassunti in:

- Fissare le caratteristiche climatiche di ogni comune, con l'indicazione della temperatura minima esterna a cui riferirsi in fase di progettazione; inoltre in funzione della destinazione d'uso, si definiscono le temperature massime e l'umidità minima interna e le temperature dei locali confinanti non riscaldati;
- Stabilire la permeabilità massima dei serramenti ed i limiti di dispersione delle componenti opache: fornisce i valori di ricambi d'aria richiesti, i metodi di calcolo delle dispersioni attraverso ponti termici, componenti opache e trasparenti, i flussi termici attraverso il terreno e verso i locali non riscaldati;
- Impone che il fabbisogno energetico normalizzato di un edificio (FEN = rapporto tra il fabbisogno convenzionale stagionale di energia primaria dell'edificio nel periodo invernale e il numero di gradi giorno per il volume dell'edificio stesso) sia inferiore ad un valore prestabilito.

Nell'ottobre 1993, si pubblicò il *D.P.R. 26 agosto 1993 n.412* attuativo della legge stessa, *"Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art.4 comma 4 della legge n.10/91"*. Tale decreto, fissava limiti di fabbisogno energetico per i nuovi edifici e di quelli ristrutturati e limiti di rendimento degli impianti rimandando alle norme UNI le metodologie di calcolo e verifica. Con esso si suddivide il territorio nazionale in sei zone climatiche in funzione dei "gradi-giorno", indipendentemente dalla

ubicazione geografica; dove per “gradi giorno” di una località si definisce la somma estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell’ambiente (convenzionalmente fissata a 20°C) e la temperatura media esterna giornaliera. Il territorio nazionale è così suddiviso in 6 zone climatiche:

Zona A	comuni che presentano meno di 600 gradi-giorno
Zona B	comuni che presentano 600-900 gradi-giorno
Zona C	comuni che presentano 900-1400 gradi-giorno
Zona D	comuni che presentano 1400-2100 gradi-giorno
Zona E	comuni che presentano 2100-3000 gradi-giorno
Zona F	comuni che presentano più di 3000 gradi-giorno

La sua attuazione fu rimandata ad una serie di decreti:

➤ *D.M. 13 Dicembre 1993, “ Approvazione dei modelli tipo per la compilazione della relazione tecnica di cui all’art.28 della legge 10/91, attestante la rispondenza alle prescrizioni in materia di contenimento del consumo energetico degli edifici”*

➤ *D.lgs 31 Marzo 1998 n.112, “Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle Regioni e agli Enti locali, in attuazione del capo I della legge 59/97”, che al Capo V art.30 della legge n.10/91, concernente la certificazione energetica fatta salva la funzione di indirizzo dello Stato, ed assegna alle medesime amministrazioni funzioni di coordinamento dei compiti attribuiti degli enti locali per l’attuazione del D.P.R. 412/93, nonché i compiti di assistenza agli stessi per le attività di informazione al pubblico e di formazione degli operatori pubblici e privati nel campo della progettazione, installazione esercizio e manutenzione degli impianti termici, nonché i compiti di controllo sul risparmio energetico e l’uso razionale dell’energia.*

➤ *D.M. 2 Aprile 1998 , “Modalità di certificazione delle caratteristiche e delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti ad essi connessi”, attuativo dell’art. 32 della legge n.10/91.*

➤ *D.P.R. 21 Dicembre 1999, n.551, “Modifiche al D.P.R. 412/1993, regolamento recante norme per la progettazione, l’installazione, l’esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell’Art.4, comma 4 della legge 10/1991”.*

- *LEGGE COSTITUZIONALE 18 Ottobre 2001, n. 3, “Modifiche al titolo V della parte seconda della Costituzione”*, che pone la produzione, il trasporto e la distribuzione di energia tra le materie di legislazione concorrente per le quali, salvo la determinazione di principi fondamentali riservata allo Stato, la podestà legislativa spetta alle Regioni.
- *LEGGE 31 Ottobre 2003, n. 306, “Disposizioni per l’adempimento degli obblighi derivante dall’appartenenza dell’Italia alla Comunità Europea”*. Legge Comunitaria 2003, che prevede che il recepimento di direttive comunitarie sia effettuato tramite decreti legislativi e che, in relazione a quanto disposto dall’art. 117, quinto comma della Costituzione, i decreti legislativi eventualmente adottati in materie di competenze delle regioni e delle Province autonome di Trento e di Bolzano, entra in vigore, per le Regione e le Province autonome nelle quali non sia ancora in vigore la propria normativa di attuazione, adottato nel rispetto dei vincoli derivante dell’ordinamento comunitario o dai principi fondamentali stabiliti dalla legislazione dello Stato.
- *D.M. 17 Marzo 2003, “Aggiornamenti agli allegati F e G del D.P.R. 412/1993, recante norme per la progettazione, l’installazione, l’esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia”*, riportante un aggiornamento ai libretti di centrale e d’impianto.
- *LEGGE 23 Agosto 2004, n.239, “ Riordino del settore energetico, nonché delega al Governo per il riassetto delle disposizioni vigenti in materia di energia”*, pone i principi fondamentali in materia di energia al fine di assicurare l’unità giuridica ed economica dello Stato pur nel rispetto delle autonomie locali e della normativa comunitaria, stabilisce che gli obiettivi e le linee della politica energetica nazionale, non che i criteri generali per la sua attuazione a livello territoriale, siano elaborati e definiti dallo Stato, che si avvale anche dei meccanismi di raccordo e cooperazione con le autonomie locali.
- *D.M. 27 Luglio 2005, “Norma concernente il regolamento di attuazione della legge 10/91(art.4, comma 1 e 2 )recante : norme per l’attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell’energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia”*, che definisce i criteri generali tecnico costruttivi e le tipologie per l’edilizia

sovvenzionata e convenzionata nonché per l'edilizia pubblica e privata, anche riguardo alla ristrutturazione degli edifici esistenti, al fine di favorire ed incentivare l'uso razionale dell'energia, il contenimento del consumo dell'energia nella produzione o nell'utilizzo di manufatti.

Negli ultimi anni l'Europa ha iniziato il suo percorso verso il futuro energeticamente sostenibile con l'emanazione della Direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico degli edifici. Con tale direttiva l'Unione Europea prescrive una serie di misure ed interventi necessari per il conformarsi al protocollo di Kyoto. L'edificio, gli impianti di riscaldamento, di condizionamento, di illuminazione ed di aerazione devono essere progettati ed esercitati con un basso consumo di energia nel rispetto del benessere degli occupanti. La direttiva, inoltre sottolinea come gli edifici occupati dalle pubbliche autorità o aperti al pubblico dovrebbero assumere un approccio esemplare nei confronti dell'ambiente e dell'energia, assoggettandosi alla certificazione energetica ad intervalli regolari ed affiggendo sull'edificio l'attestato di certificazione oltre ad adottare misure di sensibilizzazione degli occupanti verso l'uso consapevole dell'energia. La Direttiva riporta questione riguardanti:

- Metodologia generale per il calcolo del rendimento energetico "integrato" negli edifici (art.3);
- Requisiti minimi di rendimento energetico degli edifici distinguendo tra edifici nuovi e ristrutturazioni e fra differenti categorie di edifici (art.4, art.5, art.6);
- Certificazione energetica degli edifici (art.7);
- Ispezione periodica degli impianti termici e di condizionamento (art.8 e art.9);
- Misure necessarie per informare gli utilizzatori di edifici sui diversi metodi e sulle diverse prassi che contribuiscono a migliorare il rendimento energetico (art.12).

La Direttiva 2002/91/CE è stata recepita in Italia con diversi decreti:

➤ *D.Lgs. 19 Agosto 2005, n.192, "Norme per l'attuazione del Piano energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia"*. Nel decreto sono riportati:

- I valori correttivi per il coefficiente  $C_d$  (coefficiente che rappresenta la potenza termica dispersa per trasmissione per ogni unità di volume riscaldata per ogni grado centigrado di differenza tra la temperatura interna e quella esterna di progetto) al fine di tener conto dell'inerzia delle strutture dell'edificio;
- Trasmittanza massima consentita di componenti opachi e finestrati in funzione della zona termica. La necessità di imporre limiti di trasmittanza deriva dalla constatazione che la nostra tradizione costruttiva prevede scarsi livelli di isolamento termico e questo ha determinato la costruzione di edifici altamente disperdenti.
- Valori minimi di ricambi d'aria.

Inoltre vengono richiesti con tale decreto:

- Verifica termo igrometrica e ponti termici;
- Verifica componenti finestrati ai fini dell'illuminazione naturale;
- Contenimento climatizzazione estiva imponendo la presenza di schermature fisse o mobili delle superfici vetrate allo scopo di ridurre l'apporto di calore per irraggiamento solare durante l'estate.

Il decreto è dunque rivolto a stabile criteri, condizioni e modalità per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici dal fine di favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili e la diversificazione energetica, contribuire a conseguire gli obiettivi nazionali di limitazione delle emissioni di gas a effetto serra posti dal protocollo di Kyoto e promuovere la competitività dei comparti più avanzati attraverso lo sviluppo tecnologico.

Il decreto disciplina:

- Metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche integrate degli edifici (si ricorda che la prestazione energetica di un edificio esprime la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi con l'uso standard degli edifici).
- Requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici. Vengono indicati i valori del fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale espresso in kWh/m<sup>2</sup> annuo, definiti in rapporto alla zona climatica e in rapporto al fattore di forma dell'edificio (S/V, S superficie dell'involucro, V volume dell'edificio). Impone rigidi valori limite di

trasmissione termica (U), definita in rapporto alla zona climatica e con due soglie temporali di entrata in vigore.

- Ispezioni periodiche degli impianti di climatizzazione;
- I criteri per garantire la qualificazione e l'indipendenza degli esperti incaricati della certificazione energetica e dell'ispezione degli impianti;
- Raccolta informazioni ed esperienze, elaborazioni e studi necessari all'orientamento della politica energetica del settore;
- Promozione dell'uso razionale dell'energia anche attraverso l'informazione e la sensibilizzazione degli utenti finali, la formazione e l'aggiornamento degli operatori del settore.

➤ *D.Lgs. Dicembre 2006, n.311, "Disposizione correttive ed integrativa al D.Lgs. 192/05, recante attuazione della Direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia".* Le novità apportate rispetto al D.Lgs. 192/05:

- Certificazione energetica oltre che per gli edifici nuovi anche per gli edifici oggetto di compravendita;
- Dal 1° luglio 2007 diventa obbligatoria, nel caso di compravendita dell'intero immobile, l'attestazione di certificazione energetica per gli edifici esistenti o in fase di costruzione all'8 ottobre 2006, data di entrata in vigore del D.Lgs. 192/05, superiori a 1000 m<sup>2</sup>;
- Dal primo luglio del 2008 lo stesso obbligo entra in vigore per tutti gli edifici (sempre nel caso di compravendita);
- Dal 1° luglio 2009, l'attestato di certificazione energetica diventa invece obbligatorio anche per la compravendita del singolo appartamento esistente;
- Certificazione energetica degli edifici - patrimonio edilizio pubblico dal 1° luglio 2007, diventa obbligatoria l'attestazione di certificazione energetica nel caso di contratti, nuovi o rinnovati, relativi alla gestione degli impianti termici o di climatizzazione degli edifici pubblici, o nel quale figura comunque come committente un soggetto pubblico. Inoltre va predisposta ed esposta al pubblico la targa energetica;
- Fonti rinnovabili per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria. In tutti i nuovi edifici è previsto che almeno il 50% del fabbisogno energetico per la produzione di acqua calda sanitaria (20% nei centri storici) sia coperto utilizzando fonti rinnovabili o assimilate, salvo problemi di natura tecnica;

- Impianti fotovoltaici. In tutti i nuovi edifici è previsto l'obbligo di installazione di pannelli solari di tipo fotovoltaico secondo le modalità definite in apposito decreto. La Legge Finanziaria 2007 (art. 1, comma 350) prevede l'obbligo di una produzione non inferiore a 0,2 kW per unità abitativa.
  - Obbligo di schermature solari esterne per i nuovi edifici. Per gli immobili nuovi e in caso di ristrutturazioni di edifici di superficie utile superiore a 1000 m<sup>2</sup>, viene resa obbligatoria la installazione di sistemi schermanti esterni, finalizzati a ridurre i consumi di energia per la climatizzazione estiva (visto l'incremento costante della domanda estiva di energia elettrica per i condizionatori d'aria);
  - Programma di qualificazione energetica del patrimonio immobiliare. Le regioni dovranno predisporre entro il 31 dicembre 2008 un programma di qualificazione energetica del parco immobiliare basato su campagne informative, attivazione di accordi, diagnosi energetiche, promozione di strumenti di finanziamento e definizione di regole coerenti con i principi del decreto legislativo per eventuali sistemi di incentivazione locali. I comuni potranno richiedere ai proprietari e agli amministratori degli immobili elementi atti alla costruzione di un sistema informativo relativo agli usi energetici degli edifici che comprenderà dati quali: il volume lordo climatizzato, la superficie utile corrispondente e i relativi consumi di combustibile e di energia elettrica. Tali elementi potranno essere utilizzati dalla pubblica amministrazione esclusivamente ai fini dei programmi di riqualificazione energetica degli edifici.
- *D.Lgs. 30 maggio 2008 , n. 115, “ Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE”.*
- Al fine di contribuire al miglioramento della sicurezza dell'approvvigionamento energetico e alla tutela dell'ambiente attraverso la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, stabilisce un quadro di misure volte al miglioramento dell'efficienza degli usi finali dell'energia sotto il profilo costi e benefici, il decreto definisce quindi:
- gli obiettivi indicativi, i meccanismi, gli incentivi e il quadro istituzionale, finanziario e giuridico necessari ad eliminare le barriere e le imperfezioni esistenti sul mercato che ostacolano un efficiente uso finale dell'energia;

- crea le condizioni per lo sviluppo e la promozione di un mercato dei servizi energetici e la fornitura di altre misure di miglioramento dell'efficienza energetica agli utenti finali.

Pone, inoltre nelle disposizioni finali “*Titolo III DISPOSIZIONI FINALI - Allegato III*” le metodologie di calcolo e requisiti dei soggetti per l'esecuzione delle diagnosi energetiche e la certificazione energetica degli edifici. Si adottano le seguenti norme tecniche nazionali e loro successive modificazioni:

- **UNI TS 11300 Prestazioni energetiche degli edifici:**

**Parte 1:** determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;

**Parte 2-1:** determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e la produzione di acqua calda sanitaria nel caso di utilizzo dei combustibili fossili;

**Parte 2-2:** determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e la produzione di acqua calda sanitaria nel caso di:

- 1) utilizzo di energie rinnovabili (solare-termico, solare fotovoltaico, bio-masse);
- 2) utilizzo di altri sistemi di generazione (cogenerazione, teleriscaldamento, pompe di calore elettriche e a gas).

Le parti sopra citate sono già in vigore, mentre non sono state ancora pubblicate **la Parte 3 e Parte 4.**

➤ *D.P.R. 10 Giugno 2009, n.59.*

Da attuazione ad alcuni dei punti previsti dall'articolo 4 del DLgs 192/05. Ed in particolare introduce un nuovo quadro di disposizioni obbligatorie entrate in vigore il 25 Giugno 2009, che sostituiscono le indicazioni “transitorie” dell'Allegato I del D.Lgs. 311/06.

Anche nella suddetta norma vengono indicate come linee guida di utilizzo le norme UNI inoltre viene indicato che gli strumenti di calcolo commerciali (software) applicativi delle metodologie descritte dalle UNI/TS 11300 devono garantire uno scostamento massimo di più o meno il 5% rispetto ai corrispondenti parametri determinati con l'applicazione dello strumento nazionale di riferimento predisposto dal Comitato termotecnico italiano (CTI).

La predetta garanzia è fornita attraverso una verifica e dichiarazione resa da CTI o dall'Ente nazionale italiano di unificazione (UNI).

Le software house che hanno attivato una procedura di verifica per i propri strumenti di calcolo presso CTI o UNI, nell'attesa della validazione ufficiale possono sostituire la dichiarazione di conformità con un'autodichiarazione in cui compare il riferimento della richiesta di verifica.

### 1.2.6 Legislazione regionale

---

*Legge Regionale 23 Dic. 2003 n. 26 “ Disciplina della Programmazione Energetica Territoriale ed altre disposizioni in materia di energia”*. Tale legge prevede:

- Promozione attività di ricerca applicata sull'uso efficiente dell'energia;
- Sviluppo e qualificazione dei servizi energetici di interesse regionale;
- Concessione di contributi per il miglioramento della efficienza energetica degli edifici pubblici;
- Accertamenti della osservanza delle norme sul risparmio energetico degli edifici pubblici;
- Promozione attività di informazione e orientamento degli utenti finale riguardo alla tecniche e ai sistemi di risparmio energetico;
- Programmi di formazione dei tecnici preposti alle diverse fasi di progettazione, installazione, gestione, manutenzione, controllo e verifica degli edifici e degli impianti;
- Predisposizione linee guida e standard prestazionale per la progettazione di edifici ed impianti

Partendo da questa legge sono state sviluppate:

Legge Regionale n. 141 del 14 Novembre 2007 (Piano Energetico Regionale) e la legge n.156 del 4 Luglio 2008.

➤ *Legge Regionale n. 141 del 14 Novembre 2007*. Tale legge è volta a perseguire nello scenario regionale gli obiettivi imposti dal trattato di Kyoto. Gli strumenti di intervento per il PER riguardano innanzitutto l'emanazione di nuove norme sul rendimento energetico degli edifici, con standard più stringenti rispetto al passato nonché di un sistema di incentivi per l'accelerazione degli interventi di razionalizzazione energetica, per la

promozione di servizi avanzati, di formazione e informazione. Si prevede inoltre di introdurre la certificazione energetica degli edifici e si stabilisce che negli insediamenti pubblici, l'approvvigionamento energetico avvenga valorizzando al massimo le fonti rinnovabili.

I punti fondamentali possono essere riassunti in:

- Riduzione in Emilia Romagna del 6 % delle emissioni del 1990 (6 milioni di tonnellate di emissioni di CO<sub>2</sub> “equivalenti”);
  - Stanziamenti regionali pari a circa 90 milioni di euro in tre anni per la realizzazione di interventi che riguardano il risparmio energetico e la valorizzazione delle fonti rinnovabili negli edifici, negli insediamenti produttivi e nei trasporti;
  - Risparmio di 1.7 Mtep di energia consumata con interventi riguardanti gli edifici, l'industria, i trasporti e l'agricoltura;
  - Valorizzazione delle fonti rinnovabili nel territorio regionale (fotovoltaico, eolico, idroelettrico, geotermica, biomassa) per ottenere una potenza aggiuntiva di circa 400 MW da FER;
  - Diffusione di piccoli impianti di produzione di energia legati alle esigenze dell'utenza finale (generazione distribuita ad alta efficienza) attraverso la diffusione della tecnologia della cogenerazione e delle reti di riscaldamento urbano (+ 600 MW);
  - Sviluppo di aree “ecologicamente attrezzate” (APEA), dotate di impianti e servizi comuni mentre, per il settore agricolo viene previsto un nuovo programma l'”agro energia” a partire dalle esigenze poste dalla riconversione del settore bieticolo-saccarifero;
  - Sviluppo di politiche per la razionalizzazione energetica del settore dei trasporti, a partire dalla sostituzione del trasporto su gomma con il trasporto su ferro;
  - Processi di innovazione delle imprese affinché collaborino con le Università e centri di ricerca per la realizzazione di servizi ad alta efficienza.
- *Legge Regionale n.156 del 4 Luglio 2008. Atto di indirizzo e coordinamento sui requisiti di rendimento energetico e sulle procedure di certificazione energetica degli edifici. Comprende:*
- Applicazione dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli impianti energetici in essi installati;

- Metodologie per la prestazione energetica degli edifici e degli impianti;
- Rilascio dell’attestato di certificazione energetica degli edifici;
- Sistema di accreditamento degli operatori preposti alla certificazione energetica degli edifici;
- L’esercizio e la manutenzione degli edifici e degli impianti;
- Sistema informativo regionale per il monitoraggio della efficienza energetica degli edifici e degli impianti;
- Misure di sostegno e di promozione finalizzate all’incremento dell’efficienza energetica ed alla riduzione delle emissioni climalteranti.

## Capitolo 2

# UNI/TS 11300-1-2 e UNI/EN 12831

In questo capitolo si riassumono i punti principali delle norme UNI/TS 11300 e UNI/EN 12831 in modo da comprendere meglio i calcoli che verranno eseguiti, sul caso in esame, tramite i software di calcolo.

### 2.1 UNI/TS 11300-1/2

---

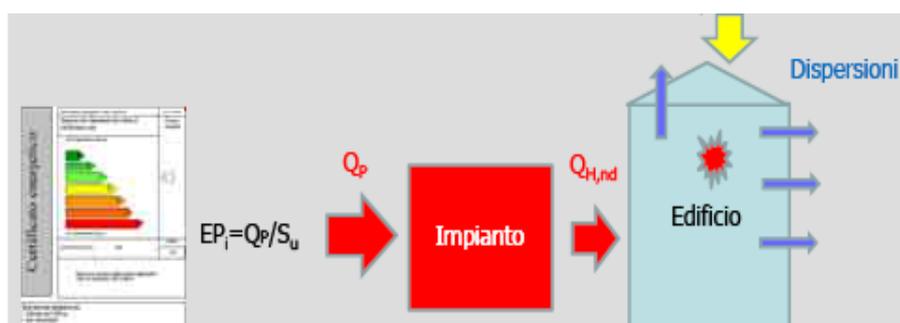
L'energia primaria consumata da un edificio per il condizionamento invernale nel periodo considerato può essere calcolata distinguendo due fasi di calcolo:

- Calcolo del fabbisogno netto di energia termica <sup>nota 1</sup>  $Q_{H,nd}$  dell'edificio nel periodo considerato (UNI/TS 11300-1 2008);
- Calcolo del fabbisogno di energia primaria necessaria a fornire l'energia termica richiesta dall'edificio (UNI/TS 11300-2 2008).

---

Nota 1.

*Il fabbisogno netto di energia termica (utile) rappresenta la quantità di calore fornita o sottratta ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo.*


**Figura 2.1- Schema semplificato.**

Per quanto riguarda la verifica di legge previste dall'attuale normativa italiana:

➤ *Indice di prestazione energetica*

$$EP_i < EP_{pi,lim} \quad (2.1)$$

i valori limite sono riferiti alla sola climatizzazione invernale. Nel caso di edifici dotati di impianto di climatizzazione invernale combinato con la produzione di ACS, i valori limite sono da ritenersi riferiti a prestazione energetica complessiva.

Rapporto di forma dell'edificio S/V	Zona climatica				
	D		E		F
	da 1401 GG	a 2100 GG	da 2101 GG	a 3000 GG	oltre 3000GG
	EPi (kWh/m <sup>2</sup> anno)				
≤ 0,2	21,3	34,0	34,0	46,8	46,8
≥ 0,7	54,7	72,6	72,6	96,2	96,2

**Figura 2.2- Tab. A1- Valori limite dell'indice di prestazione energetica EPi per edifici residenziali di nuova costruzione della classe E1, esclusi collegi, case di pena e caserme.**

➤ *Rendimento globale medio stagionale dell'impianto termico*

$$\eta_g \geq \eta_{g,lim} \quad (2.2)$$

Valore limite del rendimento medio stagionale è espresso dalla formula:

$$\eta_{g,lim} = (75 + 3\log P_0)\% \quad (2.3)$$

dove il  $\log P_0$  è il logaritmo in base 10 della potenza utile nominale del generatore o dei generatori di calore al servizio del singolo impianto termico, espressa in kW.

Per valori di  $P_0 > 1000 \text{ kW}$  la formula precedente non si applica, ma si considera un rendimento medio stagionale pari a 84%.

Mentre  $\eta_g$  è calcolabile come prodotto di diversi rendimenti:

$$\eta_g = \eta_e \cdot \eta_r \cdot \eta_d \cdot \eta_p \quad (2.4)$$

Dove:

$\eta_e$  rendimento di emissione

$\eta_r$  rendimento di regolazione

$\eta_d$  rendimento di distribuzione

$\eta_p$  rendimento di produzione

➤ *Indice di prestazione energetica <sup>nota 2</sup> per la climatizzazione invernale e la Classe energetica*

$$EP_i + EP_{acs} = EP_{tot} \quad (2.5)$$

<b>A<sup>+</sup></b>	$EP_{tot} \text{ inf } 25$
<b>A</b>	$EP_{tot} \text{ inf } 40$
<b>B</b>	$40 < EP_{tot} < 60$
<b>C</b>	$60 < EP_{tot} < 90$
<b>D</b>	$90 < EP_{tot} < 130$
<b>E</b>	$130 < EP_{tot} < 170$
<b>F</b>	$170 < EP_{tot} < 210$
<b>G</b>	$EP_{tot} > 210$

**Figura 2.3- Tabella certificazione energetica.**

### 2.1.1 UNI/TS 11300-1 2008

Questa parte della norma definisce le linee guida per l'applicazione nazionale della norma UNI EN ISO 13790:2008 con riferimento al metodo mensile quasi stazionario per il calcolo dei fabbisogni netti di energia per il riscaldamento e per il raffrescamento.

La procedura di calcolo è definita dai seguenti passi:

1. Definizione dei confini degli ambienti climatizzati e non;
2. Definizione dei confini delle diverse zone di calcolo, se richiesta;
3. Definizione delle condizioni interne di calcolo e dei dati di ingresso relativi al clima esterno;
4. Calcolo per ogni mese e per ogni zona dei fabbisogni di energia termica per il riscaldamento ( $Q_{H,nd}$ ) e per il raffrescamento ( $Q_{C,nd}$ );
5. Aggregazione dei risultati relativi ai diversi mesi ed alle diverse zone servite dagli stessi impianti.

Il fabbisogno di energia termica per il **riscaldamento** è:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (2.6)$$

Dove:

$Q_{H,nd}$  fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per il riscaldamento

$Q_{H,ht}$  scambio termico totale

$\eta_{H,gn}$  fattore di utilizzazione degli apporti termici

$Q_{gn}$  apporti termici totali

---

#### Nota 2.

*La prestazione energetica dell'edificio rappresenta la quantità annua di energia primaria effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio: la climatizzazione invernale, la climatizzazione estiva, la preparazione di ACS per usi igienico sanitari, la ventilazione e l'illuminazione.*

$Q_{H,tr}$  scambio termico per trasmissione

$Q_{H,ve}$  scambio termico per ventilazione

$Q_{int}$  apporti termici interni

$Q_{sol}$  apporti termici solari

Mentre il fabbisogno di energia termica per il **raffrescamento** è:

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,hi} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (2.7)$$

Dove:

$Q_{C,nd}$  fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per il raffrescamento

$Q_{gn}$  apporti termici totali

$\eta_{C,ls}$  fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche

$Q_{C,hi}$  scambio termico totale

$Q_{int}$  apporti termici interni

$Q_{sol}$  apporti termici solari

$Q_{C,tr}$  scambio termico per trasmissione

$Q_{C,ve}$  scambio termico per ventilazione

#### 2.1.1.1 Dati in ingresso per i calcoli

---

I dati in ingresso per i calcoli si suddividono in diverse categorie:

##### ❖ **Dati relativi alle caratteristiche tipologiche dell'edificio:**

- Volume lordo dell'ambiente climatizzato;
- Volume interno (o netto) dell'ambiente climatizzato;
- Superficie utile dell'ambiente climatizzato;
- Superfici di tutti i componenti dell'involucro e della struttura edilizia
- Tipologie e dimensioni dei ponti termici (norma EN ISO 14683:2008);
- Orientamenti di tutti componenti dell'involucro edilizio;
- Caratteristiche geometriche di tutti gli elementi esterni che ombreggiano i componenti trasparenti dell'involucro edilizio.

❖ **Dati relative alle caratteristiche termiche e costruttive dell'edificio:**

- Trasmittanze termiche dei componenti dell'involucro edilizio ( $U$ ) e relative superfici;
- Capacità termiche aeree dei componenti della struttura dell'edificio ( $\kappa$ );
- Trasmittanze di energia solare totale dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio ( $g$ );
- Fattori di assorbimento solare delle facce esterne dei componenti opachi dell'involucro edilizio ( $\alpha$ );
- Emissività delle facce esterne dei componenti dell'involucro edilizio ( $\varepsilon$ );
- I fattori di riduzione della trasmittanza di energia solare totale dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio in presenza di schermature mobili ( $F_{sh}$ );
- Il fattore di riduzione dovuto al telaio dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio ( $1 - F_F$ );
- I coefficienti di trasmissione lineare dei ponti termici ( $\psi$ ) e relative lunghezze.

❖ **Dati climatici (conformi alla norma UNI 10349: 2003)**

- Medie mensili delle temperature esterne ( $\theta_e$ );
- Irradianza solare totale media mensile sul piano orizzontale ( $I_{sol,h}$ );
- Irradianza solare totale media mensile per ciascun orientamento ( $I_{sol}$ ).

❖ **Dati relativi alle modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio (valutazioni standard)**

- Temperatura interna di regolazione per il riscaldamento ( $\theta_{int,set,H}$ ). Per tutte le categorie di edifici ad esclusione delle categorie E.6(1), E.6(2) e E.8, si assume una temperatura interna costante pari a 20°C.
- Temperatura interna di regolazione per il raffrescamento ( $\theta_{int,set,C}$ ). Per tutte le categorie di edifici ad esclusione delle categorie E.6(1) e E.6(2) si assume una temperatura interna costante pari a 26°C.
- Numero di ricambi d'aria ( $n$ ). Nel caso di ventilazione naturale per edifici residenziali si assume un numero di ricambi d'aria pari a 0.3 vol/h;
- Tipo di ventilazione (naturale o forzata);
- Tipo di regolazione della portata di ventilazione (costante, variabile);

- Durata del periodo di riscaldamento ( $N_H$ ). Tale durata è determinata dalla zona climatica di appartenenza:

<b>Zona climatica</b>	<b>Inizio</b>	<b>Fine</b>
A	1° dicembre	15 marzo
B	1° dicembre	31 marzo
C	15 novembre	31 marzo
D	1° novembre	15 aprile
E	15 ottobre	15 aprile
F	4 ottobre	22 aprile

**Tabella 2.1- Periodi di riscaldamento.**

Nel caso di diagnosi energetiche o previsione dei consumi può essere adottata la stagione di riscaldamento reale ovvero il periodo durante il quale è necessario fornire calore attraverso l'impianto di riscaldamento per mantenere all'interno dell'edificio una temperatura interna non inferiore a quella di progetto. Il primo e l'ultimo giorno del periodo di riscaldamento reale vengono calcolati come i giorni in cui la somma degli apporti termici interni e solari eguaglia le perdite di calore ovvero quando:

$$\theta_{e,day} < \theta_{i,set,C} - \frac{Q_{gn,day}}{H \cdot t_{day}} \quad (2.8)$$

Dove:

- $\theta_{e,day}$  rappresenta la temperatura esterna media giornaliera;
- $\theta_{i,set,C}$  rappresenta la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento;
- $Q_{gn,day}$  rappresentano gli apporti interni e solari medi giornalieri;
- $H$  è il coefficiente globale di cambio termico dell'edificio, in W/K, pari alla somma dei coefficienti globali di scambio termico per trasmissione e ventilazione, corretti per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno;
- $t_{day}$  è la durata del giorno.

Gli apporti termici solari giornalieri sono ricavati dai valori di irraggiamento solare giornaliero medio mensile secondo quanto riportato nella UNI 10349.

- Durata del periodo di raffrescamento ( $N_C$ ). La stagione di raffrescamento è il periodo durante il quale è necessario un apporto dell'impianto di climatizzazione per mantenere all'interno dell'edificio una temperatura interna non superiore a quella di progetto:

$$\theta_{e,day} > \theta_{i,set,C} - \frac{Q_{gn,day}}{H \cdot t_{day}} \quad (2.9)$$

- Regime di funzionamento dell'impianto di climatizzazione;
- Modalità di gestione delle chiusure oscuranti;
- Modalità di gestione delle schermature mobili;
- Apporti solari interni.

#### 2.1.1.2 Calcolo scambio termico per ventilazione e per trasmissione

Per quanto riguarda il **riscaldamento invernale** il calcolo degli scambi termici si calcola attraverso la formula seguente:

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + \{\sum_k F_{r,k} \cdot \phi_{r,mn,k}\} \cdot t \quad (2.10)$$

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t \quad (2.11)$$

Dove:

$H_{tr,adj}$  rappresenta il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione;

$H_{ve,adj}$  rappresenta il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione;

$\theta_{int,set,H}$  rappresenta la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento;

$\theta_e$  rappresenta la temperatura media mensile dell'ambiente esterno;

$F_{r,k}$  rappresenta il fattore di forma tra il componente edilizio e la volta celeste;

$\phi_{r,mn,k}$  rappresenta l'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste dal componente;

$t$  rappresenta la durata del mese considerato.

Nel caso di **raffrescamento** invece:

$$Q_{C,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + \left\{ \sum_k F_{r,k} \cdot \phi_{r,mn,k} \right\} \cdot t \quad (2.12)$$

$$Q_{C,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \cdot t \quad (2.13)$$

Dove:

$H_{tr,adj}$  rappresenta il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno;

$H_{ve,adj}$  rappresenta il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno;

$\theta_{int,set,H}$  rappresenta la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata;

$\theta_{int,set,C}$  rappresenta la temperatura interna di regolazione per il raffrescamento della zona considerata;

$\theta_e$  rappresenta la temperatura media mensile dell'ambiente esterno;

$F_{r,k}$  rappresenta il fattore di forma tra il componente edilizio  $k$ -esimo e la volta celeste;

$\phi_{r,mn,k}$  rappresenta l'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste dal componente edilizio  $k$ -esimo, mediato sul tempo;

$t$  è la durata del mese considerato.

I coefficienti globali di scambio termico si ricavano come:

$$H_{tr,adj} = H_D + H_G + H_U + H_A \quad (2.14)$$

$$H_{ve,adj} = \rho_a \cdot c_a \cdot \sum_k b_{ve,k} \cdot q_{ve,k,mn} \quad (2.15)$$

Dove:

$H_D$  rappresenta il coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno;

$H_G$  rappresenta il coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno;

$H_U$  rappresenta il coefficiente di scambio termico per trasmissione attraverso gli ambienti non climatizzati;

$H_A$  rappresenta il coefficiente di scambio termico per trasmissione verso altre zone (interne o meno all'edificio) climatizzate a temperatura diversa;

$\rho_a \cdot c_a$  rappresenta la capacità termica volumica dell'aria, pari a  $1\,200 \text{ J}/(\text{m}^3\text{K})$ ;

$q_{ve,k,mn}$  rappresenta la portata mediata sul tempo del flusso d'aria  $k$ -esimo;

$b_{ve,k}$  rappresenta il fattore di correzione della temperatura per il flusso d'aria  $k$ -esimo ( $b_{ve,k} \neq 1$  se la temperatura di mandata non è uguale alla temperatura dell'ambiente esterno, come nel caso di pre-riscaldamento, pre-raffrescamento o di recupero termico dell'aria di ventilazione).

Il calcolo dei coefficienti di scambio termico per trasmissione  $H_D$ ,  $H_G$ ,  $H_U$ ,  $H_A$  è effettuato secondo le UNI EN ISO 13789:2008 e UNI EN ISO 13370. Inoltre per un calcolo dettagliato e preciso agli scambi termici per trasmissione degli elementi opachi, va aggiunto il contributo dovuto agli scambi termici dei componenti trasparenti e quello dovuto ai ponti termici.

Il calcolo di  $F_{r,k}$  e  $\phi_{r,mn,k}$  è effettuato secondo quanto riportato nella UNI EN ISO 13790:2008 e secondo le indicazioni del punto 11.4 della norma.

Infine la portata mediata sul tempo del flusso d'aria  $k$ -esimo,  $q_{ve,k,mn}$ , espressa in  $\text{m}^3/\text{s}$ , si ricava come:

$$q_{ve,k,mn} = f_{ve,t,k} \cdot q_{ve,k} \quad (2.16)$$

Dove:

$q_{ve,k}$  rappresenta la portata sul tempo del flusso d'aria  $k$ -esimo;

$f_{ve,t,k}$  rappresenta la frazione di tempo in cui si verifica il flusso d'aria  $k$ -esimo (per una situazione permanente:  $f_{ve,t,k} = 1$ ).

La determinazione di  $q_{ve,k}$ ,  $b_{ve,k}$  e  $f_{ve,t,k}$  è effettuata secondo la UNI EN ISO 13790:2008.

### 2.1.1.3 Calcolo apporti termici interni e solari

Per ogni zona dell'edificio e per ogni mese, gli apporti interni si calcolano nel modo seguente:

$$Q_{int} = \left\{ \sum_k \phi_{int,mn,k} \right\} \cdot t + \left\{ \sum_I (1 - b_{tr,I}) \cdot \phi_{int,mn,u,I} \right\} \cdot t \quad (2.17)$$

Mentre gli apporti solari:

$$Q_{sol} = \left\{ \sum_k \phi_{sol,mn,k} \right\} \cdot t + \left\{ \sum_I (1 - b_{tr,I}) \cdot \phi_{sol,mn,u,I} \right\} \cdot t \quad (2.18)$$

Dove:

le due sommatorie si riferiscono rispettivamente ai flussi entranti/generati nella zona climatizzata e negli ambienti non climatizzati;

$b_{tr,I}$  rappresenta il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente la sorgente di calore interna i-esima oppure il flusso termico i-esimo di origine solare;

$\phi_{int,mn,k}$  rappresenta il flusso termico prodotto dalla k -esima sorgente di calore interna, mediato sul tempo;

$\phi_{int,mn,u,I}$  rappresenta il flusso termico prodotto dalla i-esima sorgente di calore interna nell'ambiente u non climatizzato adiacente, mediato sul tempo;

$\phi_{sol,mn,k}$  rappresenta il flusso termico k -esimo di origine solare, mediato sul tempo;

$\phi_{sol,mn,u,I}$  rappresenta il flusso termico i-esimo di origine solare nell'ambiente u non climatizzato adiacente, mediato sul tempo.

Ai fini della valutazione di progetto o di valutazione standard gli apporti interni vengono espressi, per edifici diversi dall'abitazione, in funzione delle destinazioni d'uso.

Per gli edifici di categoria E.1(1) E.1(2) (abitazioni) gli apporti interni vengono ricavati mediante la formula:

$$\phi_{int} = 5,294 \cdot A_f - 0,01557 \cdot A_f^2 \quad (2.19)$$

Se, però,  $A_f$  risulta superiore a  $170 \text{ m}^2$  il valore di  $\phi_{int}$  viene considerato pari a  $450 \text{ W}$ .

Invece, il flusso termico di origine solare, espresso in  $\text{W}$ , si calcola con la seguente formula:

$$\phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k} \quad (2.20)$$

Dove:

$F_{sh,ob,k}$  rappresenta il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie  $k$ -esima;

$A_{sol,k}$  rappresenta l'area di captazione solare effettiva della superficie  $k$ -esima con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, nella zona o ambiente considerato;

$I_{sol,k}$  rappresenta l'irradianza solare media mensile, sulla superficie  $k$ -esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale.

L'area effettivamente soleggiata di un componente vetrato dell'involucro (per esempio una finestra),  $A_{sol,k}$ , viene calcolata attraverso la formula seguente:

$$A_{sol} = F_{sh,gl} \cdot g \cdot (1 - F_F) \cdot A_w \quad (2.21)$$

Dove:

$F_{sh,gl}$  rappresenta il fattore di riduzione degli apporti solari relativo all'utilizzo di schermature mobili;

$g$  rappresenta la trasmittanza di energia solare della parte trasparente del componente;

$F_F$  rappresenta la frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato;

$A_w$  rappresenta l'area proiettata totale del componente vetrato (l'area del vano finestra).

Invece per quanto riguarda l'area di captazione solare effettiva di una parte opaca dell'involucro edilizio,  $A_{sol,k}$ , è calcolata come:

$$A_{sol} = \alpha \cdot R_{se} \cdot U \cdot A \quad (2.22)$$

Dove:

$\alpha$  rappresenta il fattore di assorbimento solare del componente opaco;

$R_{se}$  rappresenta la resistenza termica superficiale esterna del componente opaco, determinato secondo la UNI EN ISO 6946;

$U$  rappresenta la trasmittanza termica del componente opaco;

$A$  rappresenta l'area proiettata totale del componente opaco.

Per i componenti opachi in assenza di dati di progetto attendibili o comunque di informazioni più precise, il fattore di assorbimento solare di un componente opaco può essere assunto pari a 0,3 per colore chiaro della superficie esterna, 0,6 per colore medio e 0,9 per colore scuro.

Invece i valori della trasmittanza di energia solare totale degli elementi vetrati ( $g$ ) possono essere ricavati moltiplicando i valori di trasmittanza di energia solare totale per incidenza normale ( $g_n$ ) per un fattore di esposizione ( $F_w$ ) assunto pari a 0,9.

I valori della trasmittanza di energia solare totale per incidenza normale degli elementi vetrati possono essere determinati attraverso la UNI EN 410. In assenza di dati documentati, si deve far riferimento alla tabella sottostante.

<b>Tipo di vetro</b>	<b><math>g_n</math></b>
Vetro singolo	0,85
Doppio vetro normale	0,75
Doppio vetro con rivestimento basso-emissivo	0,67
Triplo vetro normale	0,70
Triplo vetro con doppio rivestimento basso emissivo	0,50
Doppia finestra	0,75

**Tabella 2.2- Trasmittanza di energia solare totale  $g_n$  di alcuni tipi di vetro.**

Si deve tener conto anche di un fattore di correzione dovuto al telaio ( $1 - F_F$ ) che è pari al rapporto tra l'area trasparente e l'area totale dell'unità vetrata del serramento.

In assenza di dati di progetto attendibili o comunque di informazioni più precise, si può assumere un valore convenzionale del fattore telaio pari a 0,8.

#### 2.1.1.4 Parametri dinamici

##### **Fattore di utilizzazione**

Per quanto riguarda il riscaldamento il fattore di utilizzazione per gli apporti termici per il calcolo del fabbisogno di riscaldamento si calcola come:

$$\text{se } \gamma_H > 0 \text{ e } \gamma_H \neq 0 : \eta_{H,gn} = \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{a_H+1}} \quad (2.23)$$

$$\text{se } \gamma_H = 1 : \eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H+1} \quad (2.24)$$

Dove:

$$\gamma_H = \frac{Q_{gh}}{Q_{H,ht}} \quad (2.25)$$

$$a_H = a_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} \quad (2.26)$$

Dove  $\tau$  è la costante di tempo termina cella zona espressa in ore, calcolata come rapporti tra la capacità termica interna della zona termica considerata e il suo coefficiente globale di scambio termico, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno (vedi UNI EN 13790:2008) Con riferimento al periodo di calcolo mensile si può assumere  $a_{H,0} = 1$  e  $\tau = 15 h$ .

Per il raffrescamento il fattore di utilizzazione risulta:

$$\text{se } \gamma_C > 0 \text{ e } \gamma_C \neq 0 : \eta_{C,ls} = \frac{1 - \gamma_C^{-a_C}}{1 - \gamma_C^{-(a_C+1)}} \quad (2.27)$$

$$\text{se } \gamma_H = 1 : \eta_{C,ls} = \frac{a_C}{a_C+1} \quad (2.28)$$

Dove:

$$\gamma_C = \frac{Q_{gh}}{Q_{C,ht}} \quad (2.29)$$

$$a_C = a_{C,0} + \frac{\tau}{\tau_{C,0}} + k \frac{A_w}{A_t} \quad (2.30)$$

Con riferimento al periodo di calcolo mensile si assume  $a_{C,0} = 8.1$ ,  $\tau_{C,0} = 17 h$  e  $k = 13$ .

### Capacità termica

La capacità termica dell'edificio deve essere calcolata preliminarmente per calcolare la costante di tempo dell'edificio e il fattore di utilizzazione. Per il calcolo della capacità termica si fa riferimento alla UNI EN ISO 13786.

#### 2.1.2 UNI/TS 11300-2: 2008

---

Questa parte della norma fornisce dati e metodi per la determinazione di:

- fabbisogno di energia elettrica degli ausiliari dei sistemi di riscaldamento e produzione di ACS;
- rendimenti e dei fabbisogni di energia elettrica degli ausiliari dei sistemi di riscaldamento e produzione di ACS;
- dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione invernale e per la produzione dell'ACS.

Qui nel seguito verranno riportate le specifiche descritte dalla norma solamente per quanto riguarda il riscaldamento.

Ai fini del calcolo dei rendimenti e delle perdite, gli impianti si considerano suddivisi in sottosistemi e la determinazione del rendimento medio stagionale di un impianto di riscaldamento e del fabbisogno di energia primaria deve essere effettuata in base ai rendimenti (o alle perdite) dei sottosistemi che lo compongono.

Per ciascun sottosistema, si deve determinare:

- il fabbisogno di energia richiesto in ingresso del sottosistema  $Q_{in,x}$ ;
- le perdite  $Q_{l,x}$ ;
- le perdite recuperate  $Q_{lrh,x}$

Conoscendo:

- energia utile da fornire in uscita  $Q_{out,x}$ ;
- caratteristiche del sottosistema e condizioni di funzionamento dell'impianto.

Quindi per ciascun sottosistema vale il seguente bilancio termico:

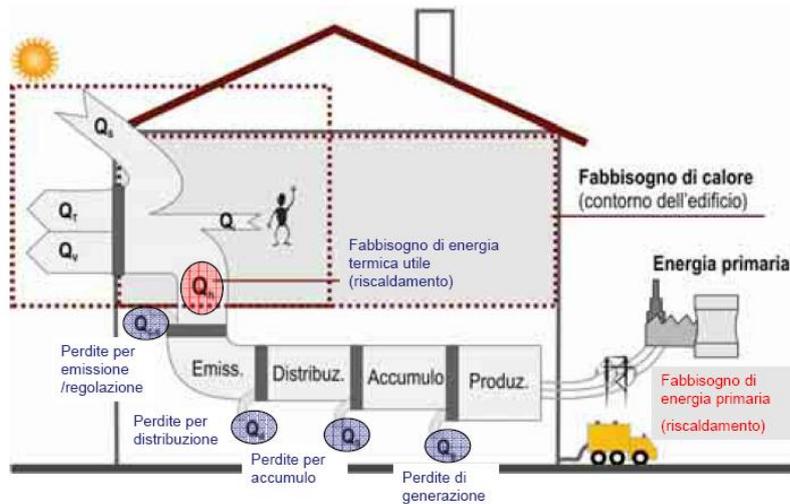
$$Q_{in,x} = Q_{out,x} + (Q_{l,x} - Q_{lrh,x}) - Q_{aux,lrh,x} \quad [Wh] \quad (2.31)$$

Dove:

$Q_{aux,lrh,x}$  rappresenta l'energia termica recuperata degli ausiliari elettrici.

I sottosistemi considerati sono:

- *sottosistema di emissione;*
- *sottosistema di regolazione dell'emissione di calore in ambiente;*
- *sottosistema di distribuzione;*
- *eventuale sottosistema di accumulo;*
- *sottosistema di generazione.*



**Figura 2.6- fabbisogno di energia primaria.**

### 2.1.2.1 Sottosistemi per l'impianto di riscaldamento

L'adozione del metodo utilizzato dipende dal tipo di valutazione energetica previsto dal prospetto 15 della norma:

Sottosistema	Valutazioni di calcolo			
	A1 e A2		A3	
Emissione	H ≤ 4 m	H > 4 m	H ≤ 4 m	H > 4 m
		Tabelle	Tabelle con condizioni al contorno verificate altrimenti calcolo analitico	Tabelle
Regolazione	Tabelle			
Distribuzione	A1	A2	A3	
	calcolo analitico	Tabelle con condizioni al contorno verificate altrimenti calcolo analitico		
Generazione	Tabelle con condizioni al contorno verificate altrimenti calcolo analitico			

Figura 2.7- Valori e metodi da adottare per i diversi tipi di valutazione e di calcolo (riscaldamento).

#### 1. Sottosistema di emissione

Il rendimento del sottosistema di emissione tiene conto della maggior energia richiesta per mantenere il valore della temperatura di progetto al centro della stanza nelle condizioni reali, rispetto al caso ideale di distribuzione uniforme.

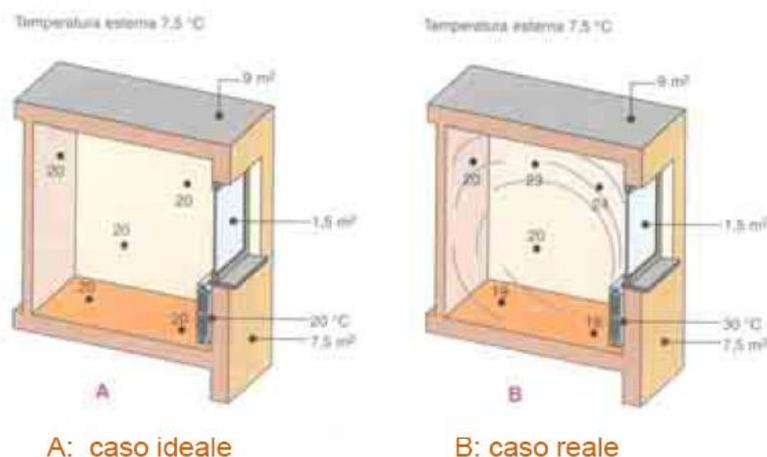


Figura 2.8- Sottosistema di emissione.

La determinazione delle perdite di emissione è notevolmente influenzata dalle caratteristiche del locale e, in modo particolare dalla sua altezza. I prospetti 17 e 18 della norma forniscono i rendimenti di emissione per le varie altezze. In mancanza però delle condizioni da essi elencate la norma definisce un'apposita formula per il calcolo del rendimento.

#### Rendimenti di emissione ( $\eta_e$ ) in locali di altezza minore di 4 m

Tipo di terminale di erogazione	Carico termico medio annuo W/m <sup>3 a)</sup>		
	<4	4-10	>10
	$\eta_e$		
Radiatori su parete esterna isolata (*)	0,95	0,94	0,92
Radiatori su parete interna	0,96	0,95	0,92
Ventilconvettori (**) valori riferiti a $t_{media}$ acqua = 45 °C	0,96	0,95	0,94
Termoconvettori	0,94	0,93	0,92
Bocchette in sistemi ad aria calda (***)	0,94	0,92	0,90
Pannelli isolati annegato a pavimento	0,99	0,98	0,97
Pannelli annegati a pavimento (****)	0,98	0,96	0,94
Pannelli annegati a soffitto	0,97	0,95	0,93
Pannelli a parete	0,97	0,95	0,93

a) Il carico termico medio annuo, espresso in W/m<sup>3</sup> è ottenuto dividendo il fabbisogno annuo di energia termica utile espresso in Wh, calcolato secondo la UNI EN ISO 13790, per il tempo convenzionale di esercizio dei terminali di emissione, espresso in ore, e per il volume lordo riscaldato del locale o della zona espresso in metri cubi.

\*) Il rendimento indicato è riferito ad una temperatura di mandata dell'acqua di 85 °C.  
Per parete riflettente, si incrementa il rendimento di 0,01.  
In presenza di parete esterna non isolata ( $U > 0,8$  W/m<sup>2</sup> K) si riduce il rendimento di 0,04.  
Per temperatura di mandata dell'acqua  $\leq 65$  °C si incrementa il rendimento di 0,03.

\*\*\*) I consumi elettrici non sono considerati e devono essere calcolati separatamente.

\*\*\*\*) Per quanto riguarda i sistemi di riscaldamento ad aria calda i valori si riferiscono a impianti con:

- griglie di ripresa dell'aria posizionate ad un'altezza non maggiore di 2,00 m rispetto al livello del pavimento;
- bocchette o diffusori correttamente dimensionati in relazione alla portata e alle caratteristiche del locale;
- corrette condizioni di funzionamento (generatore di taglia adeguata, corretto dimensionamento della portata di aspirazione;
- buona tenuta all'aria dell'involucro e della copertura.

(\*\*\*\*) I dati forniti non tengono conto delle perdite di calore non recuperate dal pavimento verso il terreno; queste perdite devono essere calcolate separatamente ed utilizzate per adeguare il valore del rendimento.

Figura 2.9- Prospetto 17 della norma dove si riportano i rendimenti di emissione per vari terminali.

## 2. Sottosistema di regolazione

Il rendimento di regolazione tiene conto della maggior energia richiesta da un sistema di regolazione reale (cioè che agisce con un certo ritardo) rispetto al caso di sistema ideale che agisce istantaneamente.

Nel prospetto 20 della norma vengono riportati i rendimenti di regolazione per varie tipologie di terminali di erogazione.

**Rendimenti ( $\eta_{reg}$ ) di regolazione<sup>12)</sup>**

Tipo di regolazione	Caratteristiche	Sistemi ad elevata inerzia termica		
		Sistemi a bassa inerzia termica	Pannelli integrati nelle strutture edilizie e disaccoppiati termicamente	Pannelli annegati nelle strutture edilizie e non disaccoppiati termicamente
Solo Climatica (compensazione con sonda esterna)		$1 - (0,6 \eta_u \gamma)$	$0,98 - (0,6 \eta_u \gamma)$	$0,94 - (0,6 \eta_u \gamma)$
Solo ambiente con regolatore	On off	0,94	0,92	0,88
	PI o PID	0,99	0,97	0,93
	P banda prop. 0,5 °C	0,98	0,96	0,92
	P banda prop. 1 °C	0,97	0,95	0,91
	P banda prop. 2 °C	0,95	0,93	0,89
Climatica + ambiente con regolatore	On off	0,97	0,95	0,93
	PI o PID	0,995	0,99	0,97
	P banda prop. 0,5 °C	0,99	0,98	0,96
	P banda prop. 1 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 2 °C	0,97	0,96	0,94
Solo zona con regolatore	On off	0,93	0,91	0,87
	PI o PID	0,995	0,99	0,97
	P banda prop. 0,5 °C	0,99	0,98	0,96
	P banda prop. 1 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 2 °C	0,94	0,92	0,88
Climatica + zona con regolatore	On off	0,96	0,94	0,92
	PI o PID	0,995	0,98	0,96
	P banda prop. 0,5 °C	0,98	0,97	0,95
	P banda prop. 1 °C	0,97	0,96	0,94
	P banda prop. 2 °C	0,96	0,95	0,93

Nota  $\gamma$  rapporto apporti/perdite.  
 $\eta_u$  fattore di utilizzo degli apporti definito nella UNI/TS 11300-1.

**Figura 2.10- Prospetto 20 della norma dove si riportano i rendimenti di regolazione.****3. Sottosistema di distribuzione**

La determinazione delle perdite per distribuzione può avvenire seguendo diversi metodi:

- *metodo tabellare*: ricorso a dati precalcolati ricavati sulla base delle caratteristiche principali del sottosistema (prospetto 21);
- *metodo analitico*.

Il metodo tabellare viene usato solamente nel caso in cui non è possibile in nessun modo ottenere i dati costruttivi della rete di distribuzione.

Per valutare il rendimento di distribuzione in *maniera analitica* si procede con quanto verrà accennato qui di seguito.

Il rendimento globale medio stagionale del sottosistema si calcola con formula:

$$\eta_d = \frac{Q_{d,out}}{Q_{d,in} + W_{d,aux} \cdot f_{el}} \quad (2.32)$$

Dove:

$Q_{d,out}$  rappresenta l'energia in uscita dal sottosistema di distribuzione;

$Q_{d,in}$  rappresenta l'energia in ingresso al sottosistema di distribuzione;

$W_{d,aux}$  rappresenta la potenza elettrica degli organi ausiliari del sottosistema di distribuzione;

$f_{el}$  fattore di riduzione dell'energia primaria in energia ausiliaria elettrica

Esplicitando in maniera più dettagliata i vari termini:

*Energia in uscita al sistema di distribuzione* risulta pari a :

$$Q_{d,out} = \frac{Q_{rh}}{\eta_{reg} \cdot \eta_{em}} \quad [W \cdot h] \quad (2.33)$$

Dove:

$Q_{rh}$  rappresenta il fabbisogno termico utile dell'edificio;

$\eta_{reg}$  rappresenta il rendimento di regolazione;

$\eta_{em}$  rappresenta il rendimento di emissione.

*Energia in ingresso al sottosistema di distribuzione* è definita tramite la formula (A.13) della UNI 11300-2:

$$Q_{d,in} = Q_{d,out} + Q_{d,lrh} - 0.85 \cdot Q_{aux,d} \quad [W \cdot h] \quad (2.34)$$

Dove:

$Q_{aux,d}$  rappresenta l'energia ausiliaria.

$Q_{d,Irh}$  rappresenta la perdita di energia termica utile recuperata. Tale perdita si calcola tramite la formula:

$$Q_{d,Irh} = \sum_i L_i \cdot U_i \cdot (\theta_{w,avg,i} - \theta_{a,i}) \cdot t_i \cdot k_{rl,i} \quad (2.35)$$

Dove:

$\theta_{w,avg,i}$  rappresenta la temperatura media del circuito [ $^{\circ}C$ ];

$\theta_{a,i}$  rappresenta la temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ];

$L_i$  rappresenta la lunghezza degli elementi della rete [ $m$ ];

$U_i$  rappresenta la trasmittanza della rete [ $W/mK$ ];

$t_i$  rappresenta il tempo di attivazione della rete nel periodo di calcolo considerato [ $h$ ];

$k_{rl,i}$  rappresenta il fattore di riduzione delle perdite totali.

#### 4. Sottosistema di generazione

Anche in tal caso il rendimento di generazione può essere calcolato mediante:

- prospetti contenenti valori precalcolati per le tipologie più comuni di generatori di calore in base al dimensionamento e alle condizioni d'installazione;
- metodi analitico.

Qualora non si identifichi la tipologia del generatore tra quelle dei prospetti seguenti o quando le condizioni al contorno non siano comprese tra quelle indicate, si deve ricorrere al metodo analitico.

Una volta determinati i rendimenti dei vari sottosistemi è possibile valutare il rendimento medio stagionale dell'impianto di riscaldamento come:

$$\eta_g = \eta_e \cdot \eta_r \cdot \eta_p \cdot \eta_d \quad (2.36)$$

Oppure anche come:

$$\eta_g = \frac{Q_h}{Q_{p,H}} \quad (2.37)$$

Dove:

$Q_{p,H}$  rappresenta il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento;

$Q_h$  rappresenta il fabbisogno di energia termica utile per il riscaldamento.

## 2.2 UNI EN 12831

---

La norma UNI EN 12831 fornisce diversi metodi di calcolo delle dispersioni termiche di progetto e del calcolo termico in condizioni di progetto. Essa può essere utilizzata per tutti gli edifici con altezza interna minore di 5 m.

Le ipotesi che si fanno alla base del metodo considerato dalla norma sono:

- distribuzione uniforme della temperatura (temperatura dell'aria e temperatura di progetto);
- dispersioni termiche calcolate in condizioni di regime permanente, presupponendo proprietà costanti come valori di temperatura, caratteristiche degli elementi dell'edificio, ecc.

### 2.2.1 Dispersioni termiche in uno spazio riscaldato

---

Per il calcolo delle dispersioni termiche di progetto di uno spazio riscaldato, devono essere considerate le seguenti componenti:

- ***dispersione termica di progetto per trasmissione***, ciò significa la dispersione termica verso l'esterno determinata dalla conduzione termica attraverso le superfici circostanti, e lo scambio termico tra spazi riscaldati che possono essere a temperature diverse.
- ***dispersione termica di progetto per ventilazione***, ciò significa la dispersione termica verso l'esterno dovuta alla ventilazione o infiltrazione attraverso l'involucro dell'edificio, o il calore trasferito per ventilazione tra spazi riscaldati in modo differente.

#### 2.2.1.1 Procedimento di calcolo

---

Le fasi del procedimento di calcolo sono:

- determinare la temperatura esterna di progetto e la temperatura media annuale;

- specificare lo stato di ogni spazio (riscaldato o non) e i valori della temperatura interna di progetto;
- determinazione delle caratteristiche dimensionali e termiche dell'edificio;
- calcolare il coefficiente di dispersione termica e moltiplicarlo per la differenza di temperatura di progetto in modo tale da ottenere la dispersione termica di progetto per trasmissione;
- calcolare il coefficiente di dispersione termica per ventilazione e moltiplicarlo per la differenza di temperatura di progetto in modo tale da ottenere la dispersione termica di progetto per ventilazione;
- calcolare la potenza termica aggiuntiva per compensare gli effetti di riscaldamento intermittente;
- calcolare il carico termico totale sommando i tre punti precedenti.

Oltre a questo metodo esiste anche un metodo semplificato in cui i passi sono analoghi a quanto illustrato precedentemente ma si effettua un calcolo semplificato dei coefficienti di dispersione.

#### 2.2.1.2 Dati richiesti

---

I dati richiesti per il calcolo del carico di progetto sono elencati nell'appendice D della norma e riguardano:

##### ❖ **Dati climatici**

- Temperatura esterna di progetto, per il calcolo della dispersione termica verso l'esterno  $\theta_e$  [ $^{\circ}C$ ];
- Temperatura esterna media annuale, per il calcolo della dispersione termica verso il terreno  $\theta_{m,e}$  [ $^{\circ}C$ ].

##### ❖ **Temperatura interna di progetto**

Per edificio residenziale si considera 20  $^{\circ}C$  e 24  $^{\circ}C$  nei bagni, come indicato dall'appendice D.2.

##### ❖ **Dati dell'edificio**

- volume d'aria interno di ogni ambiente  $V_i$  ( $m^3$ );
- area di ciascun elemento  $A_k$  ( $m^2$ );
- trasmittanza termica di ciascun elemento  $U_k$  ( $W/m^2K$ );
- trasmittanza termica lineare di ciascun ponte termico  $\Psi_i$  ( $W/mK$ );

- lunghezza di ciascun ponte termico  $l_i$  (m).

### 2.2.1.3 Calcolo dispersione termica totale di progetto

La dispersione termica totale di progetto è calcolata come segue:

$$\Phi_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} \quad (2.38)$$

Dove:

$\Phi_{T,i}$  rappresenta la dispersione termica di progetto per trasmissione per uno spazio riscaldato [W];

$\Phi_{V,i}$  rappresenta la dispersione termica di progetto per ventilazione per uno spazio riscaldato [W].

La dispersione termica di progetto per trasmissione per uno spazio riscaldato si calcola:

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) \quad (2.39)$$

Dove:

$H_{T,ie}$  rappresenta il coefficiente di dispersione termica per trasmissione dallo spazio riscaldato verso l'esterno attraverso l'involucro edilizio [W/K];

$H_{T,iue}$  rappresenta il coefficiente di dispersione termica per trasmissione dallo spazio riscaldato verso l'esterno attraverso lo spazio non riscaldato [W/K];

$H_{T,ig}$  rappresenta il coefficiente di dispersione termica per trasmissione verso il terreno in condizioni di regime permanente, dallo spazio riscaldato verso il terreno [W/K];

$H_{T,ij}$  rappresenta il coefficiente di dispersione termica per trasmissione dallo spazio riscaldato ad uno spazio adiacente riscaldato ad una temperatura significativamente diversa [W/K];

$\theta_{int,i}$  rappresenta la temperatura di progetto dello spazio riscaldato [°C];

$\theta_{int,i}$  rappresenta la temperatura esterna [°C].

Per il calcolo dei singoli coefficienti di dispersione si rimanda alla norma.

La dispersione termica per ventilazione per uno spazio riscaldato viene calcolata come:

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e) \quad (2.40)$$

Dove:

$H_{V,i}$  rappresenta il coefficiente di dispersione termica di progetto per ventilazione [W/K];

$\theta_{int,i}$  rappresenta la temperatura di progetto dello spazio riscaldato [°C];

$\theta_e$  rappresenta la temperatura esterna [°C].

In particolare  $H_{V,i}$  si calcola secondo la formula:

$$H_{V,i} = \dot{V}_l \cdot \rho \cdot c_p \quad (2.41)$$

Dove:

$\dot{V}_l$  rappresenta la portata d'aria dello spazio riscaldato che dipende dal sistema considerato (con o senza ventilazione) [m<sup>3</sup>/s];

$\rho$  rappresenta la densità dell'aria [kg/m<sup>3</sup>];

$c_p$  rappresenta la capacità termica specifica dell'aria [kJ/kgK].

E' da aggiungere che gli **spazi riscaldati in modo intermittente** richiedono una **potenza di ripresa**, per ottenere la temperatura interna di progetto richiesta, dopo il periodo di inattività dell'impianto entro un tempo determinato. La potenza di ripresa dipende dai seguenti fattori:

- capacità termica degli elementi dell'edificio;
- tempo di ripresa del riscaldamento;
- calo di temperatura durante il periodo di inattività;
- caratteristiche del sistema di regolazione.

Essa non risulta necessaria nel caso in cui il sistema di regolazione è in grado di eliminare il periodo di inattività nei giorni più freddi e nel caso in cui sia

possibile ridurre le dispersioni termiche (perdite per ventilazione) durante il periodo di inattività.

Deve essere calcolata attraverso un tipo di calcolo dinamico ma nei casi che verranno elencati qui di seguito è possibile utilizzare un metodo semplificato:  
per edifici residenziali

- periodo di inattività non è maggiore di 8 h
  - costruzione dell'edificio non è leggera
- per edifici non residenziali:
- periodo di inattività non è maggiore di 48 h
  - periodo di occupazione durante i giorni lavorativi è maggiore di 8 h al giorno
  - temperatura interna di progetto è compresa tra i 20 e i 22 °C

Quindi la potenza di ripresa attraverso il metodo semplificato è valutabile attraverso la formula:

$$\Phi_{RH,i} = A_i + f_{RH} \quad (2.42)$$

Dove:

$A_i$  rappresenta l'area del pavimento dello spazio riscaldato ( $m^2$ );

$f_{RH}$  rappresenta il fattore di correzione dipendente dal tempo di riscaldamento successivo e dal calo della temperatura interna previsto durante il periodo di inattività ( $W/m^2$ ).

## Capitolo 3

# Pompa di Calore e sonde geotermiche

Solitamente l'impianto geotermico è composto da una pompa di calore accoppiata ad una "sorgente geotermica". La funzione di un impianto geotermico risulta quella di produrre acqua (o aria) calda o fredda a seconda delle necessità. L'aria come fonte termica ha costituito per molto tempo la scelta preponderante. Tuttavia negli ultimi anni è cominciata una ricerca verso altre fonti termiche stabili durante l'anno e aventi un livello termico più elevato. Il terreno soddisfa a pieno queste caratteristiche garantendo una elevata efficienza e condizioni ideali di esercizio.

Il terreno contiene una inesauribile sorgente di calore:

- la temperatura, man mano che si scende sotto terra, aumenta grazie all'energia geotermica che dal nucleo terrestre si dirige verso la superficie;
- assorbe quasi la metà dell'energia che riceve dal sole.

È per questi motivi che il terreno può essere considerato una fonte di energia inesauribile, costantemente disponibile e soprattutto rinnovabile.

A pochi metri di profondità dalla superficie terrestre il terreno mantiene una temperatura quasi costante per tutto l'anno, e questo ci permette di estrarre calore d'inverno per riscaldare un ambiente, e di cedere calore in estate per raffrescare lo stesso ambiente.

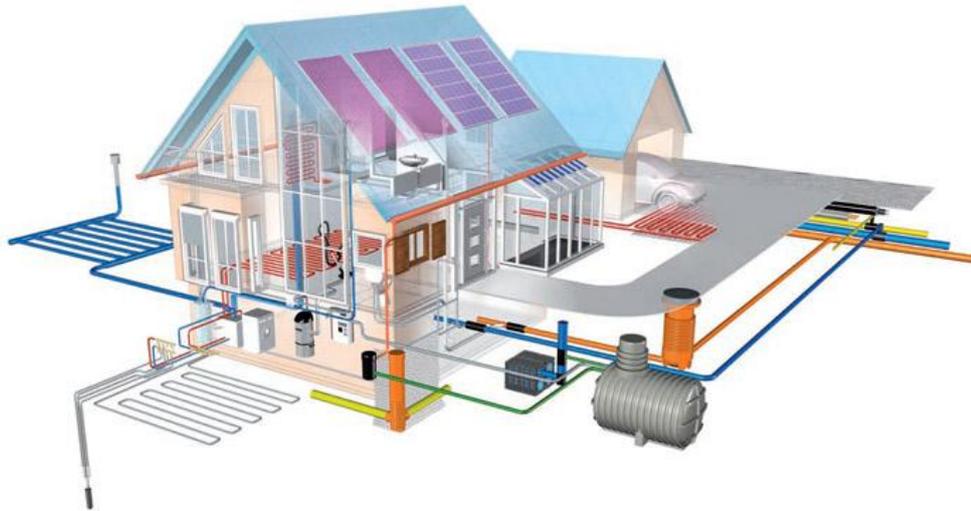
In Italia la temperatura del sottosuolo oscilla tra i 12 e i 14°C (con eventuali oscillazioni periodiche di 4-5°C), valori che rimangono costanti per una profondità che va dai 10 ai 100 metri.

Questo tipo di tecnologia viene denominata “*geotermia a bassa entalpia*” in quanto sfrutta la bassa entalpia del sottosuolo ai fini di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria.

Lo scambio di calore viene realizzato attraverso pompe di calore abbinata a sonde geotermiche che sfruttano questo principio permettendo di riscaldare e raffrescare l'edificio con un unico impianto.

L'impianto è composto da:

- ❖ SONDA GEOTERMICA inserita in profondità per scambiare calore con il terreno;
- ❖ POMPA di CALORE installata all'interno dell'edificio (ma non necessariamente);
- ❖ SISTEMA di DISTRIBUZIONE del calore "a bassa temperatura" all'interno dell'ambiente (impianti a pavimento, pannelli radianti, bocchette di ventilazione, ecc.)



**Figura 3.1- Sistema Pompa di calore sonde geotermiche.**

### 3.1 Pompe di Calore

La pompa di calore é una macchina in grado di trasferire calore da un corpo (sorgente) a temperature piú bassa ad un corpo a temperatura piú alta. Questo processo è l'inverso di quello che succede in natura, per cui non può avvenire in maniera spontanea altrimenti sarebbe violato il secondo principio della termodinamica. Per ottenere tale risultato occorre fornire e lavoro dall'esterno. Risulta quindi immediata l'analogia idraulica: una pompa di calore risulta analoga ad una pompa idraulica che trasporta l'acqua da un serbatoio ad un altro posto ad un'altezza superiore.

Il principio di funzionamento che sta alla base della pompa di calore è un ciclo termodinamico chiamato ciclo frigorifero o ciclo a motore inverso. Per cui le pompe di calore sono dette macchine operatrici inverse ed operano a due livelli di temperatura.

La differenza tra pompa di calore e frigorifero sta nelle finalità che si propongono:

1. Nel frigorifero si vuole mantenere il livello termico del sistema a temperatura inferiore;
2. Nella pompa di calore si vuole mantenere e controllare il livello termico del sistema a temperatura piú alta.

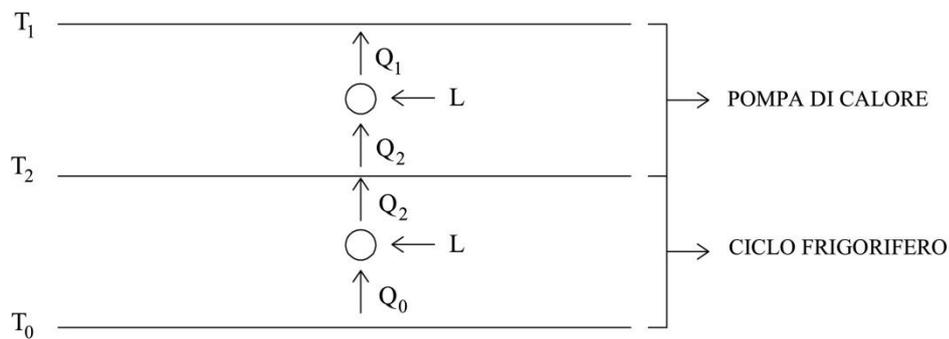
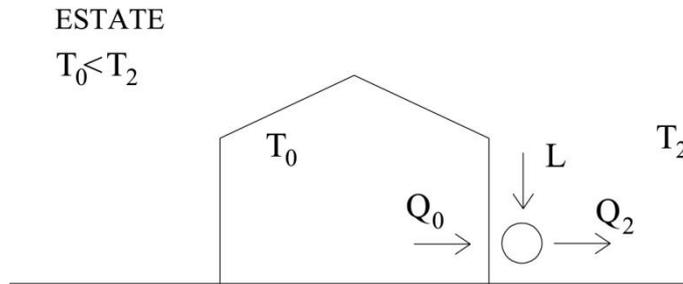


Figura 3.2-Schema pompa di calore, ciclo frigorifero.

L'idea di base è la seguente:

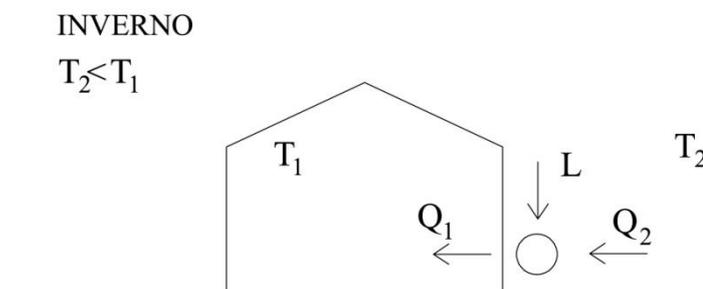
Si consideri una macchina frigorifera che raffresca l'ambiente alla temperatura  $T_0 < T_1$  in estate:



**Figura 3.3- Schema macchina frigorifera.**

Tale macchina preleva calore  $Q_0$  dall'edificio, consumando il lavoro  $L$  e scaricando nell'ambiente il calore  $Q_1$ . La macchina, impiegata per controllare la temperatura del sistema a temperatura inferiore, (rispetto a quella ambiente) è detta FRIGORIFERO.

Se ora si considera il caso invernale, l'obiettivo diventa quello di controllare la temperatura all'interno dell'edificio mantenendola ad un valore più elevato rispetto la temperatura esterna.



**Figura 3.4- Schema pompa di calore.**

Tale macchina trasferisce calore dall'esterno all'interno ed è quindi una POMPA DI CALORE.

La classificazione delle pompe di calore può avvenire in base a diversi aspetti:

- ✓ Sulla base del *ciclo termodinamico*: a compressione di vapore, a compressione termica, ad assorbimento/assorbimento;

- ✓ Sulla base del *tipo di alimentazione*: elettrica, a gas, a calore di recupero;
- ✓ Sulla base della *sorgente termica*: aria, acqua superficiale o sotterranea, terreno, solare termico, calore di recupero;

Si tratta naturalmente di categorie tra loro interdipendenti.

Qui di seguito verranno illustrate solamente le pompe di calore elettriche a compressione.

### 3.1.1 Pompa di calore elettrica a compressione

Le pompe di calore elettriche a compressione sono basate su di un ciclo termodinamico molto semplice: un ciclo frigorifero inverso a compressione.

Quindi dal punto di vista teorico non esiste nessuna differenza tra la macchina frigorifera e una pompa di calore; risulta così possibile realizzare una pompa di calore utilizzando gli stessi componenti che caratterizzano una macchina frigorifera:

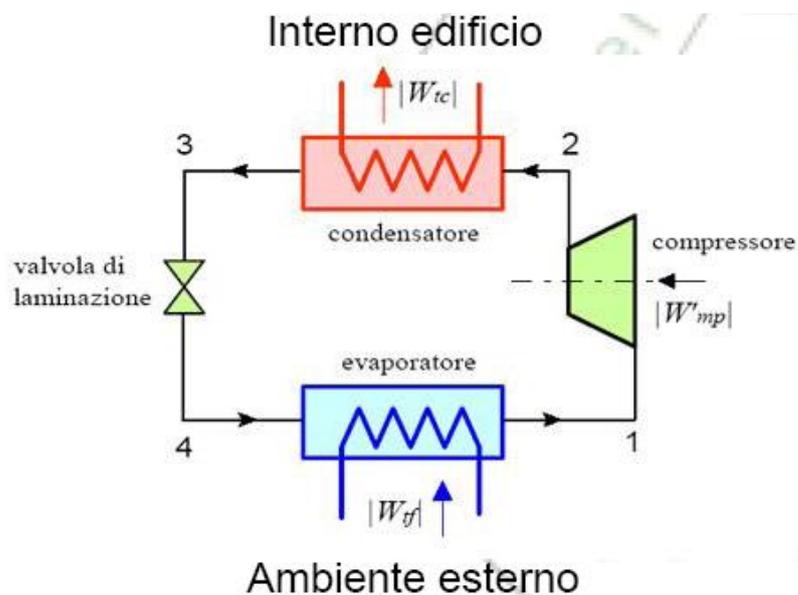


Figura 3.5- Pompa di calore.

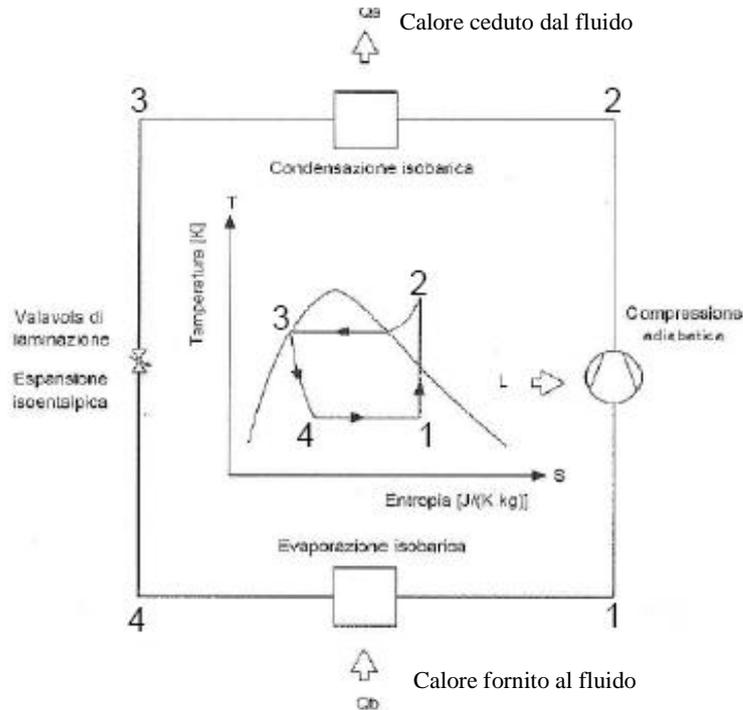


Figura 3.6- Ciclo della pompa di calore sul diagramma temperatura-entropia.

Il ciclo opera sfruttando due trasformazioni in cambiamento di fase, evaporazione e condensazione mentre le altre due trasformazioni sono necessarie per completare il ciclo, passando da un livello di pressione inferiore a quello superiore e viceversa.

1. **Evaporazione (4-1)**: all'interno di uno scambiatore di calore il fluido evapora assorbendo il calore fornito dalla sorgente esterna;
2. **Compressione (1-2)**: il vapore prodotto dall'evaporazione entra nel compressore e viene portato alla pressione di condensazione; durante questa fase si verifica un aumento di temperatura; in uscita dal compressore il vapore è surriscaldato, è cioè a temperatura più elevata di un vapore saturo alla stessa pressione;
3. **Condensazione (2-3)**: il vapore surriscaldato entra all'interno di uno scambiatore di calore, detto condensatore che scambiando energia termica con l'acqua dell'impianto si raffredda cedendo calore. Si ha una prima fase in cui il vapore surriscaldato raggiunge la condizione di vapor saturo (corrispondente alla temperatura di condensazione) e una seconda, che avviene a temperatura costante, in cui si realizza il cambiamento di fase fino ad ottenere all'uscita liquido saturo;

4. **Espansione (3-4)**: per chiudere il ciclo a questo punto il liquido si deve abbassare la pressione e tornare alla pressione di evaporazione; ciò avviene, per i fluidi tradizionali, tramite un processo di laminazione, nel quale oltre all'espansione si verifica una diminuzione di temperatura.

### 3.1.2 Prestazioni energetiche

---

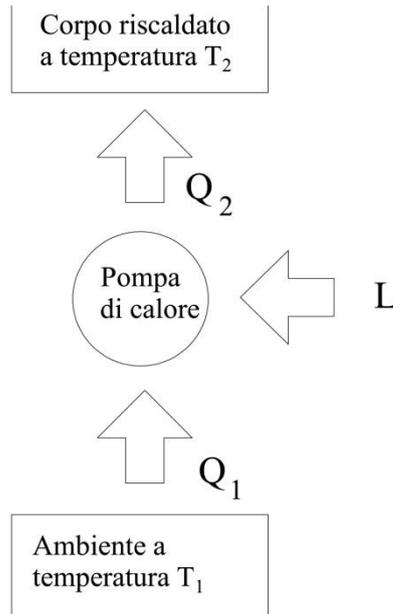
Come detto in precedenza la pompa di calore è caratterizzata da un ciclo termodinamico che opera a due livelli di temperatura  $T_1$  e  $T_2$ , con  $T_2 > T_1$ .

La pompa di calore nel caso in cui sia adottata sia per il riscaldamento che per il raffreddamento è detta reversibile. È possibile definire un coefficiente di prestazione energetica che valuta il rapporto tra energia utile e energia consumata.

Si definisca  $Q_1$ , il calore scambiato con la sorgente a temperatura  $T_1$ ,  $Q_2$  quello scambiato con la sorgente a temperatura  $T_2$  e  $L$  il lavoro meccanico in ingresso.

In *inverno*, la pompa di calore cede calore al corpo da riscaldare a temperatura  $T_2$  spendendo il lavoro  $L$ . Si definisce, quindi, COP (*Coefficient of performance*) il rapporto tra l'energia utile e l'energia spesa (ovvero il rapporto tra potenza termica e elettrica espresse in W):

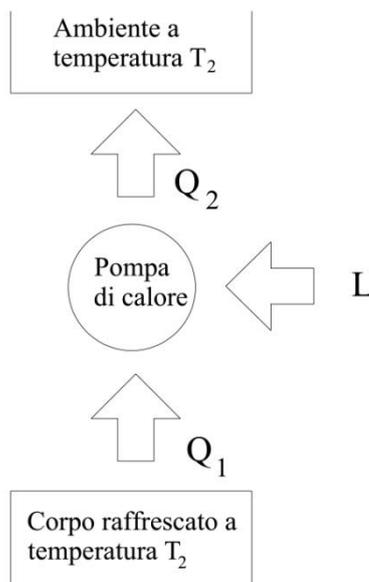
$$COP_H = \frac{Q_2}{L} \quad (3.1)$$



**Figura 3.7- Produzione di caldo mediante pompa di calore.**

In *estate*, è possibile definire un analogo COP per il raffrescamento, in questo caso si sottrae calore dal corpo a temperatura  $T_1$  spendendo una quantità di lavoro  $Q_1$  (rapporto tra potenza frigorifera e potenza elettrica espresse in W):

$$COP_c = \frac{Q_1}{L} \quad (3.2)$$



**Figura 3.8- Produzione freddo mediante pompa di calore.**

In realtà nei dati di catalogo il coefficiente di prestazione in termini di raffrescamento viene indicato con la sigla EER (Energy Efficiency Ratio).

Non essendo un rendimento il COP può assumere valori superiori all'unità. Il sistema nel suo complesso soddisfa sempre il primo principio della termodinamica, cioè:

$$Q_2 = Q_1 + L \quad (3.3)$$

Il calore  $Q_2$  ceduto al sistema a temperatura più alta è pari alla somma del calore assorbito dalla sorgente fredda e del lavoro necessario a compiere il ciclo.

Il secondo principio della termodinamica definisce un limite al valore massimo del COP teoricamente raggiungibile da una macchina termica operante tra due temperature  $T_1$  e  $T_2$ ; questo limite è calcolabile e dipende unicamente dalle temperature  $T_1$  e  $T_2$  (Teorema di Carnot).

Nel caso invernale il  $COP_{H\_CARNOT}$  è:

$$COP_{H\_CARNOT} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad (3.4)$$

Nel caso estivo  $COP_{C\_CARNOT}$  è:

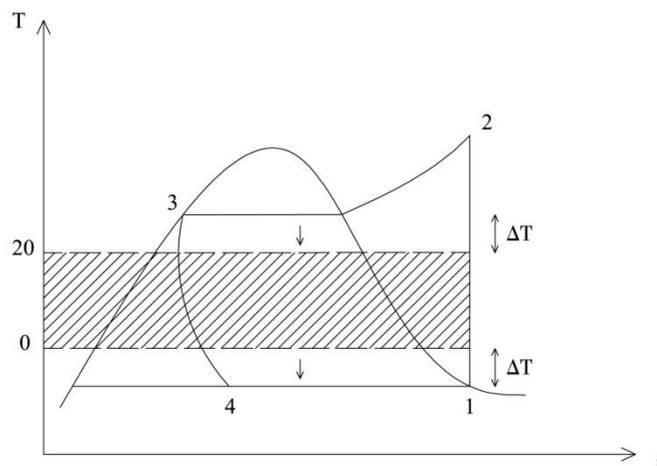
$$COP_{C\_CARNOT} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (3.5)$$

Naturalmente il COP reale risulta sempre inferiore al COP di Carnot (solitamente, per il riscaldamento, si arriva a valori che raggiungono il 50% del ciclo ideale) a causa dell'irreversibilità del ciclo. La più importante irreversibilità deriva da un fattore esterno al ciclo stesso: essa è dovuta dalla differenza finita di temperatura necessaria affinché il condensatore possa cedere calore al serbatoio esterno e la sorgente fredda all'evaporatore, in tempi accettabili e compatibili con l'efficienza di scambio termico che caratterizzano gli scambiatori di calore utilizzati.

Per cui, si noti come una pompa di calore è strettamente correlata alla temperatura della sorgente che quella del serbatoio termico: tanto più vicini sono i livelli di temperatura tanto maggiore sarà il COP ottenibile. Quindi esaminando un catalogo sulle pompe risulta di fondamentale importanza leggere non solo il COP, ma verificare le temperatura di riferimento.

Per sottolineare meglio questo fatto si consideri il seguente esempio:

Si vuole utilizzare una pompa di calore per mantenere in ambiente l'aria alla temperatura di 20°C ( $T_H$ ) con una temperatura esterna pari a 0°C ( $T_L$ ). Al fine di prelevare calore dall'aria esterna il fluido presente all'interno del ciclo si dovrà trovare ad una temperatura inferiore a  $T_L$  ( $T < T_L$  di  $\Delta T$  gradi), ugualmente per scaricare calore all'ambiente interno il fluido si dovrà trovare ad una temperatura maggiore a  $T_H$  ( $T > T_H$  di  $\Delta T$  gradi).



**Figura 3.9- Diagramma temperatura entropia.**

Questi  $\Delta T$  costituiscono proprio delle irreversibilità esterne che abbassano l'efficienza (ovvero il COP) della macchina. La differenza tra le curve diminuisce se si abbassano i salti termici al condensatore e all'evaporatore. Dato che il calore scambiato si può esprimere come:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (3.6)$$

Dove:

A rappresenta l'area di scambio [ $m^2$ ];

U rappresenta la trasmittanza [ $W/m^2K$ ];

$\Delta T$  rappresenta l'intervallo di temperatura [ $^{\circ}C$ ].

Se si abbassa  $\Delta T$  per ottenere la stessa potenza termica scambiata occorre aumentare la superficie di scambio (quindi costi e ingombri maggiori); nelle pompe di calore per fare questo e quindi per elevare il  $COP_H$  si maggiorano le superfici degli scambiatori che fungono da evaporatore e/o condensatore.

Il valore del COP per tali macchine può essere calcolato usando la relazione approssimata:

$$COP_H = \frac{T_2}{T_2 - \phi T_1} \quad (3.7)$$

	<b>T1 (°C)</b>	<b>T2 (°C)</b>
<i>RISCALDAMENTO</i>	7	20
<i>RAFFREDDAMENTO</i>	27	35

**Tabella3.1- Condizioni operative a cui tipicamente si riferiscono i dati di catalogo.**

	<i>RISCALDAMENTO</i>	
	<b>COPH</b>	<b><math>\phi</math></b>
<b>Potenza piccole &lt; 2 kW</b>	1.5-2	0.35-0.5
<b>Medie potenza &lt; 15 kW</b>	3-3.5	0.7-0.75
<b>Grandi potenza</b>	4-5	0.78-0.85

**Tabella 3.2- COP e  $\phi$  al variare delle potenze.**

Un altro modo per calcolare il COP istantaneo di una pompa di calore è quello di esprimerlo come segue:

$$COP_H = \alpha \cdot \frac{T_2}{T_2 - T_1 + \Delta T} \quad (3.8)$$

Dove:

- $\alpha$  efficienza del ciclo termodinamico reale ed ideale (solitamente  $0.5 < \alpha < 0.7$ );
- $\Delta T$  salto termico negli scambi termici al condensatore e all'evaporatore.  
Funzione del tipo di serbatoi termici tra cui opera la pompa di calore.

Se vogliamo però calcolare l'efficienza di una pompa di calore e capire effettivamente quanto si andrà a consumare in termini di energia elettrica ed energia primaria è necessario calcolare le prestazioni energetiche stagionali della pompa stessa. Tale valore può essere solamente determinato attraverso un calcolo basato su un metodo di calcolo normativo o attraverso una simulazione numerica. L'efficienza di una pompa dipende principalmente da:

- dalla pompa di calore scelta;
- dal fabbisogno termico e dai carichi dell'edificio;
- dalla sorgente termica scelta e dal clima della zona in cui si è realizzato il sistema edificio-impianto.

Questo dato indica le prestazioni medie stagionali raggiungibili da una pompa di calore e rappresenta il valore più importante per l'utente finale. Solitamente viene chiamato **SPF** (Seasonal Performance Factor) o **SEER** (Seasonal Energy Efficiency Ratio), a seconda dei riferimenti considerati.

Un ruolo importante nella determinazione delle prestazioni energetiche di una pompa di calore è dato dalla scelta della sorgente termica; più il livello termico si avvicina a quello dell'impianto di riscaldamento maggiore sarà il rapporto tra energia primaria che si riuscirà a conseguire.

Le principali sorgenti termiche sono:

- ✓ **Aria esterna:** di gran lunga utilizzata per la sua facile reperibilità. Tuttavia essa risulta la meno adatta in quanto:
  - ad una diminuzione della temperatura dell'aria esterna aumenta il carico termico dell'edificio e di conseguenza diminuiscono sia il COP che la capacità della pompa;
  - per temperature intorno agli  $0^{\circ}\text{C}$  e umidità relativa elevata si ha la formazione di brina sulla superficie dell'evaporatore che si trova ad una

temperatura inferiore rispetto all'aria esterna. Tale brina riduce la sezione di passaggio ostacolando lo scambio termico e quindi sarebbe necessario rimuoverla con opportune tecniche.

- ✓ **Acqua:** *di falda, di fiume, di lago.* Garantisce migliori prestazioni della pompa di calore senza risentire delle condizioni climatiche esterne; tuttavia richiede un costo maggiore dovuto al sistema di adduzione dell'acqua.
- ✓ **Suolo:** vengono inserite a profondità variabile delle specifiche tubazioni relative all'evaporatore (tubazioni dette sonde geotermiche). Il vantaggio rispetto all'aria è quello di subire minori sbalzi termici.

In funzione della natura della sorgente fredda e del pozzo caldo (sono detti pozzo caldo l'aria o l'acqua da scaldare) si possono distinguere le seguenti tipologie di sistemi:

**Acqua-acqua:** la pompa di calore preleva calore dalla sorgente fredda costituita da acqua (di lago, fiume o falda) e la cede ad un pozzo caldo costituito da un circuito d'acqua (di riscaldamento degli ambienti).

**Acqua-aria:** la pompa di calore preleva calore dalla sorgente fredda costituita da acqua (di lago, fiume o falda) e la cede ad un pozzo caldo costituito da aria (quella dell'ambiente riscaldato).

**Suolo- acqua:** la pompa di calore preleva calore dalla sorgente fredda e la cede al pozzo caldo costituito da un circuito d'acqua (di riscaldamento degli ambienti).

**Aria- acqua:** la pompa di calore preleva calore dalla sorgente fredda costituita dall'aria (esterna) e la cede al pozzo caldo costituito da un circuito d'acqua (di riscaldamento degli ambienti).

**Aria-aria:** la pompa di calore preleva calore dalla sorgente fredda costituita dall'aria (esterna) e cede al pozzo caldo costituito ancora da aria (quella dell'ambiente riscaldato).

## 3.2 Sonde geotermiche

Le sonde geotermiche possono essere di vario tipo.

Le sonde geotermiche rappresentano un circuito chiuso in cui avviene lo scambio di calore con il terreno mediante un fluido che circola al loro interno. Si differenziano dai sistemi ad acqua di falda in quanto sono circuiti chiusi in cui non vi è scambio di liquido con le falde acquifere. Le sonde geotermiche si possono differenziare in diverse tipologie:

- orizzontali
- verticali
- a spirale
- pali energetici di fondazione
- circuiti annegati
- sonde in trincea

### 3.2.1 Sonde geotermiche verticali

Le **tipologie di scambiatori** verticali possono essere :

- ❖ *Ad U*: singolo U  
doppio U

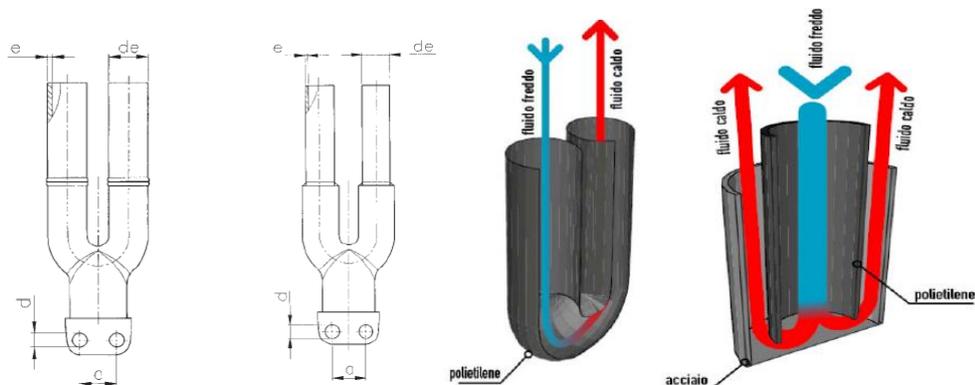


Figura 3.10– Sonde geotermiche a singolo U.

- ❖ *Coassiali*: tubi semplici  
tubi complessi .



Figura 3.11– Sonde geotermiche coassiali complesse e semplici.

La soluzione quasi sempre adottata è la soluzione ad U per la facilità di maneggevolezza e la praticità d'impiego. In particolare nella maggior parte dei casi vengono utilizzate le sonde a doppio U, presentando diversi vantaggi:

- in caso di occlusione di uno dei due tubi l'altro continua a lavorare al 70-85% della potenza originaria dando il tempo di intervenire;
- diminuendo il diametro e lo spessore delle pareti della sonda, rispetto ad una a semplice U si raggiungono coefficienti di scambio termico più elevati;
- con la scelta di opportuni diametri si possono avere minori perdite di carico a parità di portata.

### ***Caratteristiche***

#### ***1. Materiali utilizzati***

Riguardo i **materiali** utilizzati, i primi scambiatori a terreno venivano realizzati in metallo, solitamente in rame, che pur avendo buone proprietà di scambio termico era soggetto a fenomeni di corrosione. Per cui negli ultimi anni sono due le categorie di tubi utilizzati:

- tubi in polietilene
- tubi in polibutilene

In particolare si è notato da alcune installazioni, realizzate in Europa, utilizzando tubi di polietilene reticolato ad alta pressione, un miglioramento

dello scambio termico, una maggiore resistenza sia alle crepe che al propagarsi di fenditure dovute al carico, rispetto al HDPE (polietilene ad alta densità).

## 2. Diametri e spessori

Per un dimensionamento ottimale si dovrebbe tenere in considerazione:

- spessore più piccolo possibile per favorire lo scambio termico
- diametro grande abbastanza per limitare la potenza di pompaggio ma al contempo sufficientemente piccolo da assicurare un regime turbolento.

### ***Inserimento delle sonde***

L'inserimento si differenzia in base al tipo di terreno. Nelle *rocce compatte* lo scambiatore viene inserito nel pozzo spinto dal suo stesso peso. La roccia dura è molto adatta ad installazioni di sonde geotermiche verticali grazie a veloci martelli che garantiscono diametri dei fori più piccoli. In terreni *sabbiosi o argillosi* solitamente per l'inserimento di sonde si applica una zavorra di peso opportuno all'estremità della sonda stessa.

Una volta che le sonde sono calate nel foro, questo viene riempito con baiocca cemento-betonitica a partire dal fondo. Il materiale viene immesso a partire dalla base del fondo fino al piano campagna. Questa fase è molto delicata in quanto influenza in maniera determinante la resa della sonda.

E' bene considerare nel momento dell'inserimento degli scambiatori l'interferenza termica tra gli stessi. La distanza minima per ridurre l'interferenza, compatibilmente alla superficie occupata, è:

$$\begin{array}{ll} \text{distanza minima} \geq 4.6 \text{ m} & \text{per un clima freddo} \\ \text{distanza minima} \geq 6,1 \text{ m} & \text{per un clima caldo} \end{array}$$

### ***Fluido termovettore***

Prima di essere collegate alla pompa di calore le sonde vanno riempite di un fluido termovettore che permetta lo scambio di energia con il sottosuolo. Tale fluido dovrà consentire di prelevare calore dal sottosuolo in inverno e cederlo in estate.

Tutti i fluidi geotermici sono generalmente soluzioni di acqua e di un determinato composto chimico in bassa percentuale in modo da assicurare un punto di congelamento intorno ai  $-10^{\circ}\text{C}$ .

I fluidi più comunemente utilizzati sono:

- glicole etilico,
- glicole propilenico,
- metanolo, etanolo,
- cloruro di sodio,
- cloruro di calcio,
- acetato di potassio.

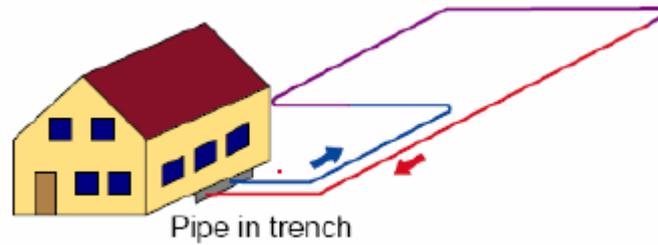
Attualmente l'anticongelante di più vasto utilizzo è senz'altro il *glicole propilenico*: non tossico, buone proprietà di trasferimento di calore, bassa tensione di vapore ma tuttavia più viscoso degli altri fluidi (fattore che determina un aumento dei consumi di pompaggio e ne riduce l'utilizzo a basse temperature).

### 3.2.2 Sonde geotermiche orizzontali

---

Gli scambiatori orizzontali a terreno rappresentano il primo tipo di scambiatori utilizzati come sorgente termica per pompe di calore. La maggior parte di installazioni di questo tipo si trova in Nord America; in Europa (ad esclusione della Francia) soluzioni con sonde orizzontali non hanno avuto una gran diffusione sia a causa della conformazione dei terreni che della scarsa disponibilità di superficie.

Di norma le sonde orizzontali arrivano ad una profondità di 1,5-2,5 m. Risulta quindi chiaro come le sonde siano influenzate da variazione stagionale di temperatura dell'aria esterna. E' importante inoltre sottolineare che questo tipo di sistema utilizza un flusso termico proveniente dalla superficie, determinato in modo diretto o indiretto dall'energia solare e dallo scambio termico con l'aria stessa. Diventa allora importante installare gli scambiatori orizzontali su terreno libero e preferibilmente su aree soleggiate.



**Figura 3.12- Sonde geotermiche orizzontali.**

Si distinguono per

1. Tipologia di scambio termico
2. Modalità di installazione.

Per quanto riguarda lo scambio termico esistono due tipologie: scambio diretto o indiretto. Lo *scambio diretto* prevede l'espansione diretta del fluido frigorifero della pompa di calore negli scambiatori orizzontali (si utilizzano tubi in rame rivestiti con materiale polimerico che assicura la protezione da corrosione); mentre la seconda soluzione, *scambio indiretto*, prevede l'interposizione di uno scambiatore intermedio (solitamente realizzato con materiale polimerico, tipicamente polietilene ad alta densità o reticolato) tra il loop a terreno e gli scambiatori della pompa di calore.

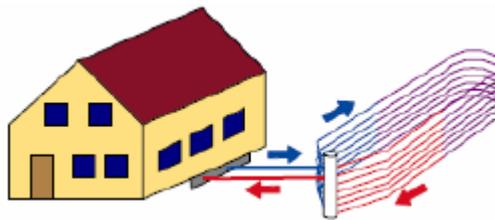
Per la modalità di installazione si prevede principalmente lo sbancamento o scavo di una trincea. Lo *sbancamento* consiste nell'asportazione, tramite una macchina movimento terra, di una ampia superficie per una profondità di circa 1 m. L'installazione delle serpentine avviene manualmente per tutto il circuito, sopra viene posizionato uno strato di 20 cm di sabbia e poi si ricopre il tutto con il materiale rimosso in precedenza.

Le configurazioni possono essere di vario tipo:

- serpentino di tubo lineare, con collegamenti in serie e in parallelo;
- disposizione a spirale;
- pannello orizzontale in materiale polimerico.

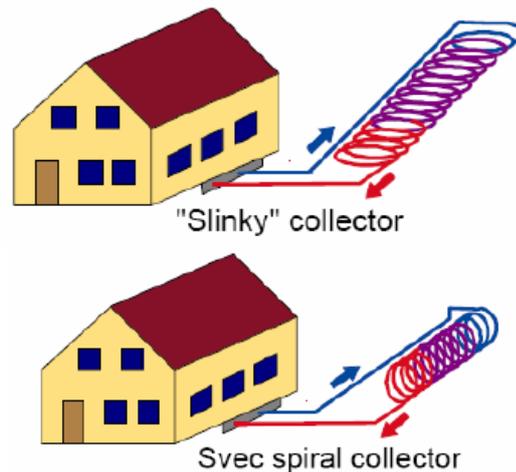
Lo *scavo in trincea*, invece, prevede la posa degli scambiatori all'interno di trincee generalmente larghe circa 60 cm (con conseguente vantaggio di diminuire notevolmente il materiale di scavo e quindi avere un minor impatto di cantiere) e profonde circa 1,2-3,0 m. Nella stessa trincea possono essere

installati da uno a sei scambiatori che possono essere disposti su piani orizzontali paralleli o su piani verticali paralleli. Esiste un limite di installazione dei tubi nella stessa trincea poiché ad un certo punto non vi è più alcun vantaggio a causa dell'interferenza termica reciproca tra i tratti di tubazione posti l'uno vicino all'altro. Quindi la resa termica specifica per unità di lunghezza di tubo non è costante, ciò significa che inserendo due tubi, anziché uno, non si otterrà una resa del doppio ma di circa 1,5 volte superiore e man mano che aumento il numero di tubi l'incremento sarà sempre minore fino a che non si arriva addirittura a un decremento.



**Figura 3.13 - Sonde orizzontali su più piani paralleli.**

Negli ultimi tempi in Nord America ha preso piede una soluzione diversa dai sistemi a tubo multiplo, le sonde cosiddette SLINKY che possono essere utilizzate sia per pose in trincea che per quelle in sbancamento. Si tratta di scambiatori a terreno in polietilene distesi formando cerchi sovrapposti. In tal modo si diminuisce ulteriormente l'area necessaria e quindi i costi di sbancamento del terreno. Possono essere: compatti o estesi. Quelli compatti hanno un passo di 25 cm e sono equivalenti a 35 m di tubo, per piede di fossa. Riducono la lunghezza della fossa stessa di due terzi rispetto a un classico sistema orizzontale con due tubi, uno a 1,5 m e l'altro a 2,0 m. Quelli estesi con un passo di un metro, sono equivalenti a 1,5 m di tubo per piede di fossa, e riducono la lunghezza di scavo di un terzo. Naturalmente le lunghezze necessarie verranno calcolate sulla base del sito in cui l'impianto sarà installato.



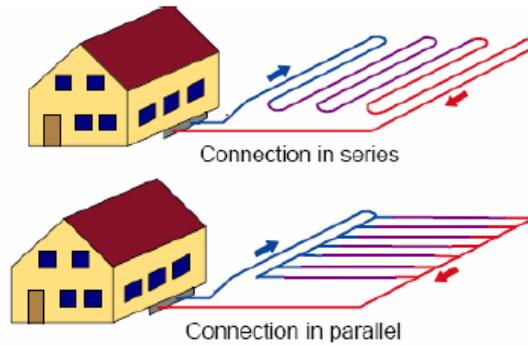
**Figura 3.14- Sistema SLINKY installati orizzontalmente e verticalmente all'interno della fossa.**

Gli scambiatori andranno posizionati al di sopra di uno strato di sabbia o limo di 60-120 cm e poi verranno ricoperti di uno strato altrettanto spesso dello stesso tipo di terreno. Oltre a suoli sabbiosi esistono delle mescole opportunamente studiate per incrementare lo scambio termico e assicurare un ottimo contatto fra suolo e scambiatore. Solitamente si tratta di miscele di cemento, acqua, sabbia e ceneri sottili; il suo aspetto finale è simile a quello del calcestruzzo.

In conclusione riguardo le modalità dell'installazione si può affermare senza alcun dubbio che la posa su trincea è più conveniente rispetto alla soluzione a sbancamento per due motivi

- minori costi a causa del minor impatto di cantiere;
- nella posa a trincea si raggiungono profondità maggiori a tutto vantaggio delle prestazioni della pompa di calore.

Un'ulteriore distinzione può essere fatta sul tipo di collegamento: in serie o parallelo. In generale per i sistemi a trincea ciascuna trincea è collegata in parallelo alle altre mentre nei sistemi a sbancamento i collegamenti possono essere in serie o in parallelo.



**Figura 3.15- Collegamenti in serie e parallelo.**

### 3.2.3 Altri tipi di sonde

- ❖ *Sistema ad espansione diretta:*  
La pompa di calore viene installata direttamente all'interno del terreno.
- ❖ *Sistema GRD: Geothermal Radial Drilling:*  
Il principio consiste nel distribuire gli scambiatori a terreno come raggi a diversa inclinazione nel suolo. Variando inclinazione e lunghezza si cerca di ridurre l'interferenza degli scambiatori sfruttando il più possibile il gradiente termico del terreno.
- ❖ *Fondazioni fredde:*  
Sono formate da qualsiasi elemento strutturale in calcestruzzo a contatto con il terreno come: pareti di sostegno, protezione di scavi, solette di fondazione, platee, pali infissi; può diventare uno scambiatore geotermico se all'interno dello stesso si cementa un circuito chiuso costituito da tubi di polietilene.
- ❖ *Micropali energetici:*  
I micropali utilizzati in edilizia per la stabilizzazione di pendii, il rinforzo di banchine, la protezione di scavi e la riduzione dei cedimenti possono essere utilizzati come fonti di scambio termico. Il principio è lo stesso delle fondazioni fredde
- ❖ *Sfruttamento termico delle fognature:*

Le acque reflue sono risultate interessanti per lo scambio termico grazie alla loro temperatura allo scarico che risulta circa di 12-15°C in inverno e circa 20°C in estate.

❖ *Bacini idrici:*

Il bacino idrico può essere utilizzato, analogamente a quanto avviene con il terreno, come un serbatoio termico.

Da sottolineare il fatto che fino ad ora si è parlato di sistemi “*closed-loop*”, sistemi cioè che sfruttano un fluido termovettore. Esistono, però, anche sistemi “*open-loop*”, che utilizzano acqua di falda locale o acqua di superficie come mezzo di scambio termico diretto. Solitamente questo ultimo tipo di sistemi ad acqua di falda utilizza due pozzi, uno di estrazione e uno di iniezione attraverso il quale l’acqua viene rimessa in falda.

## Capitolo 4

### Sistema a pannelli radianti

I pannelli radianti (detti *radianti* in quanto buona parte dello scambio termico avviene per irraggiamento) rappresentano quei corpi scaldanti che caratterizzano particolari impianti nei quali l'emissione del calore avviene da attraverso una superficie più o meno grande del locale da riscaldare: il soffitto, il pavimento o alcune pareti laterali. In questi impianti il fluido termovettore è l'acqua a temperature differenti a seconda del tipo di pannello.

Gli impianti a pannelli oltre ad essere utilizzati per il riscaldamento dei locali possono essere anche utilizzati per il loro raffrescamento, tuttavia utilizzandoli per quest'ultimo scopo sono vincolati da due limiti:

- ❖ la limitata resa frigorifera: non è possibile abbassare oltremodo la temperatura del pavimento in quanto si potrebbero provocare fenomeni di condensa;
- ❖ incapacità di deumidificare: deriva dalla natura intrinseca dei pannelli i quali non possono far condensare ed evacuare parte dell'acqua contenuta nell'aria.

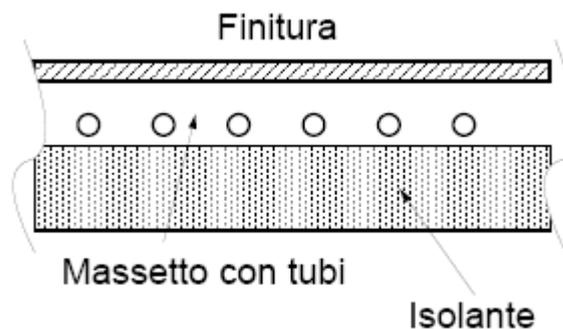
Per questo solitamente il loro utilizzo è rivolto unicamente al riscaldamento invernale.

In tutti i casi gli impianti a pannello possono essere utilizzati per singole case, alloggi di edifici a più piani, asili, scuole, palestre, piscine, musei, biblioteche, ospedali, alberghi, magazzini, capannoni, ecc.

## 4.1 Pannelli a pavimento

La tipologia sicuramente più diffusa è rappresentata dai **pannelli a pavimento** in quanto la loro realizzazione non richiede tecnologie particolari e può portare a risparmi energetici elevati.

I pannelli a pavimento sono realizzati disponendo nel massetto del pavimento, prima del getto, un tubo a spirale o a serpentina (è consigliabile per il massetto l'utilizzo di materiali con buona resistenza meccanica ed alta conduttività termica, come ad esempio il calcestruzzo (cls)). L'obiettivo, nella realizzazione del pavimento contenente i pannelli, è quello di favorire lo scambio termico verso l'alto e di limitare quello verso il basso, utilizzando uno strato compatto di isolante (va bene il polistirolo o il poliuretano espanso, non la lana di vetro o simili). Quindi sopra il solaio portante si dispone lo strato di isolante, i cui spessori devono rispettare i valori di resistenza minima previsti nella normativa attuale, cioè la UNI EN 1264-4. L'isolante è poi protetto con un foglio di polietilene o equivalente. Al di sopra si posa solitamente una rete metallica che serve sia a evitare crepe nel massetto che per l'ancoraggio dei tubi mediante ganci. I tubi utilizzati sono raramente di rame, di solito sono di materiale plastico quale polietilene (PE) o polipropilene (PP) con una guaina per bloccare la diffusione dell'ossigeno che trasportato poi dall'acqua andrebbe ad intaccare le parti ossidabili dell'impianto. Il passo di posa dei tubi viene stabilito in fase di progettazione.



**Figura 4.1- Pavimento per sistema radiante.**

Tale schema non è l'unico utilizzabile. La norma UNI EN 1264-2 definisce 3 tipi di configurazioni possibili.

## 4.2 Pannelli a parete

---

Le superfici verticali, soprattutto negli ambienti di piccole e medie dimensioni, costituiscono una percentuale molto elevata della superficie totale interna, pertanto si prestano molto bene ad essere utilizzate come superfici radianti. Rispetto ai sistemi a soffitto, ai fini dello scambio radiante, esse consentono un ottimo fattore di vista con gli occupanti se questi sono operativi (in piedi o seduti).

L'assenza di contatto diretto tra l'occupante e l'elemento radiante permette di raggiungere temperature superficiali più elevate rispetto ad altre disposizioni. Dal punto di vista prestazionale, quindi, un pannello a parete presenta un potenziale di resa molto più elevato rispetto a quelli a pavimento, sia in riscaldamento che in raffrescamento.

Tuttavia alcuni vincoli di non secondaria importanza ne limitano l'impiego come, ad esempio, la presenza di finestrate, la presenza di arredi, la necessità di foratura per la sospensione di quadri, pensili, ecc.

Le soluzioni possibili offerte dal mercato sono oggi numerose e di fatto le forature possono essere facilmente realizzate senza difficoltà con utensili e modalità appropriati.

Una preliminare e fondamentale distinzione deve essere fatta tra le pareti perimetrali, disperdenti, e quelle divisorie, tendenzialmente adiabatiche.

Le pareti perimetrali sono quelle più direttamente esposte alle variazioni delle condizioni climatiche esterne.

Esse sono quindi soggette a variazioni della temperatura superficiale interna che causano l'instaurarsi di asimmetrie termiche. L'eventuale presenza di pannelli radianti le trasforma in elementi attivi in grado di realizzare un effetto barriera rispetto al flusso che per conduzione si viene a instaurare fra l'interno e l'esterno. Tale flusso conduttivo riduce il suo campo di azione tra la superficie esterna e il piano dei tubi che, contenendo il fluido termovettore, trasferiscono il differenziale energetico direttamente al generatore lasciando così la temperatura superficiale interna simile a quella delle altre superfici con una conseguente elevata simmetria radiante. Diversamente dai pannelli a pavimento, i pannelli a parete, se installati sulle superfici disperdenti,

introducono l'importante vantaggio dell'effetto barriera attiva che consente il raggiungimento di più elevati livelli di comfort.

Per quanto riguarda, invece, l'installazione dei pannelli radianti nelle pareti interne è consigliabile nel caso in cui questi siano di integrazione ai pannelli a pavimento oppure quando è possibile sfruttare entrambi i lati di una parete divisoria.

Dal punto di vista costruttivo i pannelli a parete possono avere due differenti tipi di posa:

- ❖ la posa sotto intonaco
- ❖ la posa a secco, generalmente con lastre di gesso rivestito

Nel primo caso la tubazione viene ancorata direttamente alla parete grezza, un tamponamento in laterizio forato o una muratura piena esistente, mediante apposite barre di fissaggio o tasselli. L'intonaco viene effettuato a mano con un impasto di sabbia e calce naturale e presenta uno spessore finale di circa 3-3,5 cm posato in due mani. Dopo la stesura della prima mano si frattazza una rete da intonaco su cui si può quindi applicare la finitura.

Nei pannelli radianti il circuito idraulico può essere sia in rame che in materiale plastico (ad esempio il PE-Xa) e si presenta con due principali configurazioni di posa:

- a serpentino
- in parallelo

Per l'utilizzo nel caso di raffrescamento estivo con pannelli di gesso rivestito, è fondamentale che il circuito sia coeso con il pannello in modo che lo scambio tra i due avvenga esclusivamente per conduzione.

Un grande vantaggio offerto dall'utilizzo di sistemi radianti a parete è offerto nei confronti della prevenzione dall'umidità. L'installazione delle tubazioni riscaldanti in rame nella muratura, specie se a ridosso del terreno, crea una barriera termica nel tratto di muro ove l'umidità risale, favorendo così la progressiva asciugatura spontanea del muro.

Come si è visto, la posizione ideale di un pannello a parete è sulle superfici disperdenti; in questo caso è però necessaria la presenza di un adeguato strato isolante sul retro del circuito idraulico in modo da indirizzare il flusso termico solo sul lato utile. Nel caso di pannelli sotto intonaco, lo strato isolante può essere quello previsto generalmente per le pareti perimetrali, cioè a

intercapedine o a cappotto. In alternativa può essere posto immediatamente sotto le tubazioni delle quali costituisce il supporto.

Le due modalità si differenziano, sul piano prestazionale, per la differente massa che il pannello assume e che ne influenza sensibilmente il fattore di risposta.

### 4.3 Vantaggi dei pannelli radianti

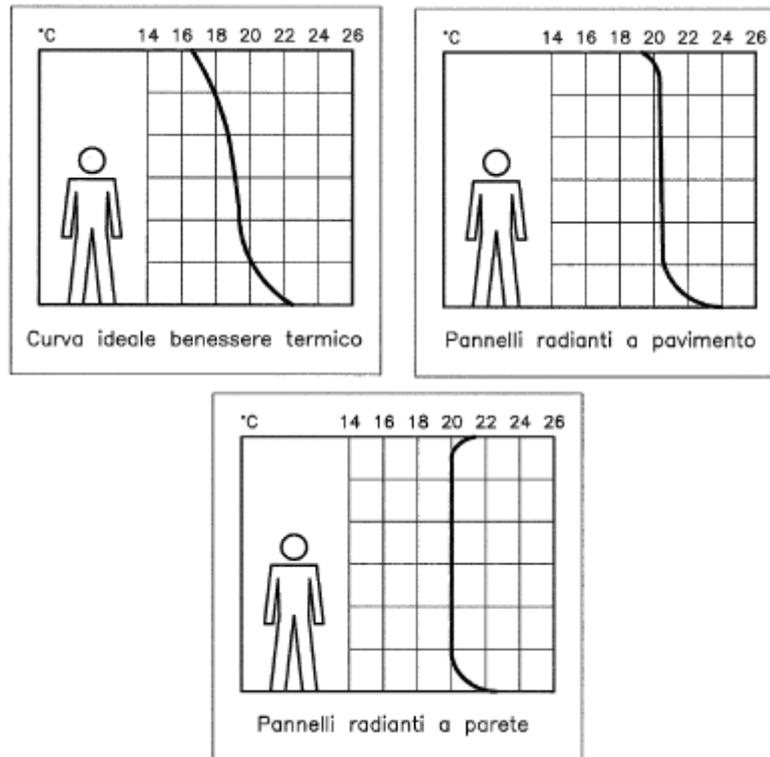
---

I principali vantaggi offerti dagli impianti a pannelli riguardano:

**1. Benessere termo igrometrico :**

Per mantenere un certo benessere termico si devono mantenere zone leggermente più calde a pavimento e più fredde a soffitto. Quindi gli impianti che si prestano meglio a questo sono i pannelli a pavimento per due motivi:

- la specifica posizione dei pannelli;
- il fatto che cedono calore soprattutto per irraggiamento, evitando il formarsi di correnti convettive d'aria calda a soffitto e fredda a pavimento.



**Figura 4.2- Curva del benessere termo igrometrico, Pannelli radianti a pavimento, Pannelli radianti a parete.**

**2. Qualità dell'aria:**

I pannelli a pavimento sono tali da evitare due inconvenienti tipici degli impianti scaldanti:

- ❖ La combustione del pulviscolo atmosferico che può causare senso di arsuratura e irritazione alla gola;
- ❖ Elevata circolazione di polvere, che può essere sede di allergie e difficoltà respiratorie.

**3. Condizione igieniche:**

Gli impianti a pannelli esercitano un'azione positiva nel mantenimento di buone condizioni igieniche ambientale, in quanto evitano:

- ❖ Il formarsi di zone umide a pavimento, eliminando l'ambiente ideale per acari e batteri;
- ❖ L'insorgere di muffe sulle pareti che confinano con pavimenti caldi.

**4. L'impatto ambientale:**

Gli impianti a pannelli sono impianti a minor impatto ambientale perché:

- ❖ Non pongono vincoli di natura estetica: la non visibilità permette che il loro utilizzo possa avvenire anche in edifici di pregio storico nei quali la presenza di corpi scaldanti comprometterebbe le forme originali;
- ❖ Consentono di razionalizzare lo spazio;
- ❖ Non contribuiscono al degrado di intonaci, pavimenti in legno e serramenti in quanto non sporcano le pareti di neurofuno, non consentono il formarsi di umidità a pavimento, limitano sensibilmente i casi di condensa interna (in quanto aumentano la temperatura delle pareti vicine alle solette con pannelli).

##### **5. Calore utilizzabile a bassa temperatura:**

Per merito della elevata superficie disperdente gli impianti a pannelli possono riscaldare con basse temperature del fluido termovettore. Questa caratteristica rende conveniente il loro utilizzo con sorgenti di calore la cui resa aumenta al diminuire della temperatura richiesta come:

- ❖ Pompe di calore
- ❖ Caldaie a condensazione
- ❖ Pannelli solari
- ❖ Sistema di recupero di calore
- ❖ Sistema di teleriscaldamento

##### **6. Risparmio energetico:**

Rispetto ai sistemi di riscaldamento tradizionale gli impianti a pannello consentono apprezzabili risparmi energetici essenzialmente per due motivi:

- ❖ Maggior temperatura operante che consente (a parità di temperatura ambiente) risparmi medi variabili dal 5 al 10 %;
- ❖ Minor gradiente termico tra pavimento e soffitto che comporta risparmi energetici tanto più elevati tanto maggiore è l'altezza del locale

In definitiva rispetto ai sistemi di riscaldamento tradizionale l'utilizzo di un impianto a pannelli consente un risparmio del 10-15 %.

## 4.4 Limiti legati ai pannelli

Naturalmente gli impianti a pannelli possiedono anche alcuni svantaggi. Tipicamente i più rilevanti sono:

- ❖ temperatura superficiale del pavimento
- ❖ elevata inerzia termica dell'impianto
- ❖ la difficoltà d'ordine progettuale.

### **1. Limiti connessi alla temperatura superficiale del pavimento**

Per evitare condizioni di malessere la temperatura superficiale del pavimento deve essere inferiore al limite imposto dalla norme UNI EN 1264 di 29°C nelle zone abitualmente frequentate e di 35°C in zone perimetrali e in bagno. Questo può far sì che calcolando la potenza termica massima cedibile dal pannello,  $Q_{max}$ , e la potenza richiesta  $Q$  si verifichi che:

- ❖  $Q_{max} < Q$  in pochi locali: si può pensare di cedere la potenza restante con radiatori
- ❖  $Q_{max} < Q$  in tutti o nella maggior parte dei locali: conviene adottare un impianto tradizionale.

### **2. Limiti legati all'inerzia termica e al tipo di utilizzo dell'impianto**

Gli impianti a pannelli sono legati ad una grande inerzia termica in quanto per cedere calore utilizzano la struttura in cui solitamente si trovano annegati. In ambienti con continuità d'inerzia termica non vi è alcun problema riguardo al loro perfetto funzionamento; in ambienti, invece, riscaldati per brevi periodi l'inerzia termica comporta sfasamenti tra i tempi di avviamento e i tempi di utilizzo risultando più conveniente utilizzare un sistema di riscaldamento differente dai pannelli radianti.

### **3. Svantaggi legati ad aspetti progettuali**

Tali impianti a differenza di quelli tradizionali comportano:

- ❖ Un maggior impiego per la determinazione dei parametri di progetto in quanto è necessario conoscere in maniera dettagliata il pacchetto di cui è composto il pavimento
- ❖ Calcoli più complessi e laboriosi

- ❖ Minor adattamento a varianti in corso d'opera o ad impianto ultimato

## 4.5 Quadro normativo

---

La rapida diffusione di questi sistemi ha reso opportuna la definizione di uno standard in cui riportare le caratteristiche e le prestazioni principali in modo da avere un riferimento che potesse aiutare il mercato e i suoi operatori.

Le norme tecniche in vigore sui sistemi radianti possono essere classificate in due sottogruppi:

- ❖ **Norme UNI EN 1264:**

- *UNI EN 1264-1: 1999.* Riscaldamento a pavimento-Impianti e componenti- Definizioni e simboli;
- *UNI EN 1264-2: 2009.* Sistemi radianti alimentati ad acqua per il riscaldamento ed il raffrescamento integrati nelle strutture- Riscaldamento a pavimento: metodi per la determinazione della potenza termica mediante metodi di calcolo e prove;
- *UNI EN 1264-3: 1999.* Riscaldamento a pavimento-Impianti e componenti- Dimensionamento;
- *UNI EN 1264-4: 2003.* Riscaldamento a pavimento-Impianti e componenti- Installazione;
- *UNI EN 1264-5: 2009.* Sistemi radianti alimentati ad acqua per il riscaldamento ed il raffrescamento integrati nelle strutture. Superfici per il riscaldamento e il raffrescamento integrate nei pavimenti, nei soffitti e nelle pareti. Determinazione della potenza termica.

- ❖ **Norme UNI EN 15377:**

- *UNI EN 15377-1: 2008.* Determinazione della potenza termica di progetto per il riscaldamento e il raffrescamento;
- *UNI EN 15377-2: 2008.* Progettazione, dimensionamento e installazione
- *UNI EN 15377-3: 2008.* Ottimizzazione per l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile.

Le UNI EN 15377 sono affini e complementari alle UNI EN 1264 e fin da subito nacquero per tutti i sistemi radianti (pavimento, soffitti, pareti) e non solo per i pavimenti come la versione del '99 delle UNI EN 1264.

#### 4.5.1 UNI EN 1264

---

Come detto nel paragrafo precedente per gli impianti a pannelli radianti si fa riferimento alla norma: UNI EN 1264.

La norma è suddivisa in 5 parti:

➤ **Parte 1**

Definisce il campo di applicazione della norma e indica che ci si riferisce ad edifici di uso residenziale o similari, in cui il fluido vettore può essere acqua o altro tipo di fluido. Definisce quindi i simboli e le definizioni specificate nella norma.

➤ **Parte 2**

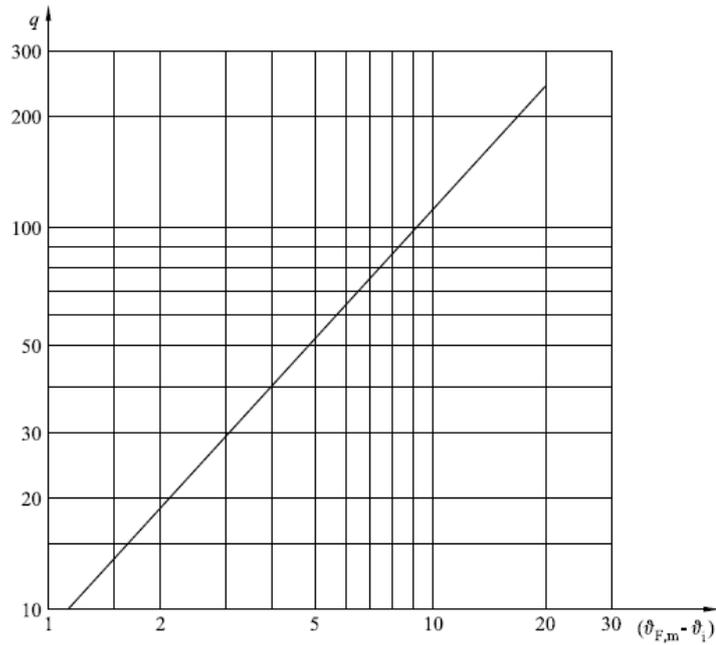
Prende in esame la determinazione della potenza termica di un impianto a pavimento; cioè fornisce le indicazioni sui procedimenti da seguire per la determinazione dell'emissione aerica nominale: permette in altre parole di calcolare la quantità di calore per unità di superficie ceduta dal pavimento verso l'ambiente da riscaldare. Prima di fornire la formula che permette di calcolare la suddetta emissione aerica, la norma afferma che questa, indipendentemente dal tipo di impianto a pannelli realizzato, segue una curva caratteristica di base, che considerando un massetto sopra i tubi di 45 mm, una conducibilità di 1.2 W/mK, e un passo minimo di 10 cm, in formula:

$$q = 8,92 \cdot (\vartheta_{F,m} - \vartheta_i)^{1,1} \quad (4.1)$$

Dove:

$\vartheta_{F,m}$  rappresenta la temperatura media superficiale del pavimento;

$\vartheta_i$  rappresenta la temperatura ambientale nominale;



**Figura 4.2- Curva caratteristica di base.**

A partire da questa espressione e considerando i limiti che la stessa norma impone riguardo la temperatura massima del pavimento in relazione al tipo di locale, si può definire la seguente tabella:

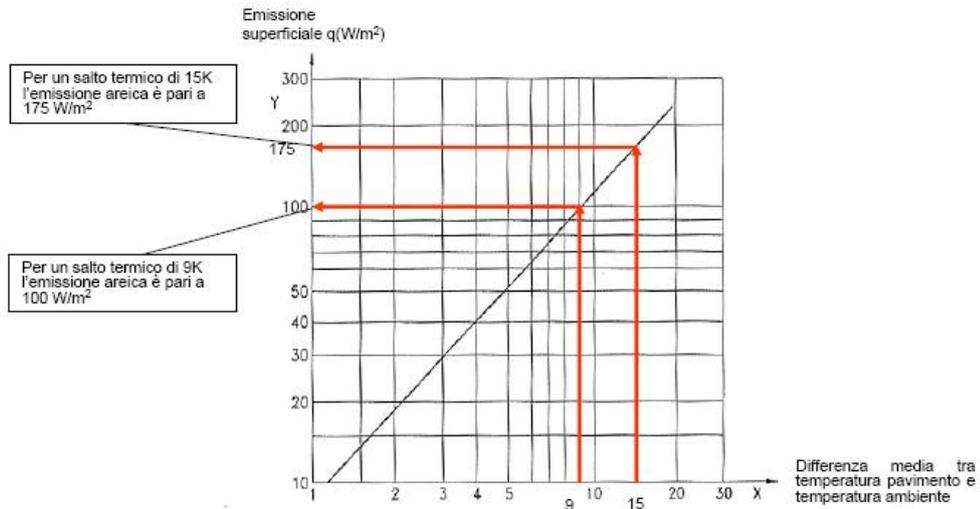
$T_{f,max}$ [°C]	Tipo di locale/area
29	Zona di soggiorno abituale
33	Bagni o similari
35	Zona periferica

**Tabella 4.1- Temperatura massime del pavimento nei diversi ambienti.**

E considerando le seguenti temperature ambiente nei vari locali si possono valutare i corrispondenti valori limite di emissione:

Tipo di locale/area	$T_i$ [°C]	$T_{f,max}$ [°C]	Flusso termico [W/m <sup>2</sup> ]
Zona di soggiorno abituale	20	29	100
Bagni o similari	24	33	100
Zona periferica	20	35	175

**Tabella 4.2- Massimi flussi di emissione.**



**Figura 4.3-Curva caratteristica di base: fornisce la relazione tra flusso termico areico  $q_G$  ed il salto termico medio della temperatura di superficie applicabile a tutti gli impianti di riscaldamento a pannelli.**

In generale, considerando spessori del massetto differenti, oppure diverse conducibilità del tubo o differenti passi minimi, la norma riporta che la potenza massima raggiungibile da un pannello si può valutare attraverso la formula:

$$q_G = \varphi \cdot B_G \cdot \left[ \frac{\Delta\vartheta_{H,G}}{\varphi} \right]^{n_G} \tag{4.2}$$

Dove:

$\varphi$  rappresenta il fattore di conversione tra la temperatura ambiente e la temperatura superficiale del pavimento massima;

$B_G$  rappresenta un coefficiente riportato nella normativa in funzione del passo e del rapporto spessore massetto sopra i tubi/conducibilità massetto;

$n_G$  rappresenta un coefficiente riportato nella normativa in funzione del passo e del rapporto spessore massetto sopra i tubi/conducibilità massetto;

$\Delta\vartheta_{H,G}$  rappresenta la massima media logaritmica ammissibile.

$B_G$  e  $n_G$  sono riportati nella norma mentre  $\varphi$  e  $\Delta\vartheta_{H,G}$  sono valutabili tramite le formule:

$$\varphi = \left[ \frac{\vartheta_{F,max} - \vartheta_i}{\Delta\vartheta_0} \right]^{1.1} \text{ con } \Delta\vartheta_0 = 9 \text{ K} \quad (4.3)$$

Dove:

$\vartheta_{F,max}$  rappresenta la temperatura superficiale massima;

$\vartheta_i$  rappresenta la temperatura ambiente.

$$\Delta\vartheta_{H,G} = \varphi \cdot \left[ \frac{B_G}{B \cdot \prod_i a_i^{mi}} \right]^{\frac{1}{1-n_G}} \quad (4.4)$$

Dove:

$\prod_i a_i^{mi}$  rappresenta la produttoria tra i coefficienti che verranno riportati qui di seguito.

Quando il flusso termico richiesto dal sistema di riscaldamento a pavimento non è sufficiente a riscaldare i locali a forte dispersione termica, per evitare che la temperatura del pavimento ecceda i limiti imposti, si deve integrare l'impianto con una sorgente di calore addizionale come per esempio i radiatori.

Il calcolo dell'**emissione aerea** per uno specifico impianto a pannelli radianti viene effettuato secondo la seguente relazione:

$$q = B \cdot a_B \cdot a_T^{mt} \cdot a_u^{mu} \cdot a_D^{mD} \cdot \Delta\vartheta_H \quad (4.5)$$

Dove:

$q$  rappresenta il flusso di calore emesso verso l'alto dal pannello, [W]

$\Delta\vartheta_H$  rappresenta la media logaritmica fra la temperatura del fluido e la temperatura dell'ambiente, [°C]

$B$  rappresenta il fattore relativo alle caratteristiche del tubo, [W/m<sup>2</sup>K]

$a_B$  rappresenta il fattore relativo alla resistenza termica del pavimento, adimensionale

$a_T$  rappresenta il fattore relativo all'interasse dei tubi, adimensionale

$a_u$  rappresenta il fattore relativo allo spessore del massetto sopra i tubi, adimensionale

$a_D$  rappresenta il fattore relativo al diametro esterno del tubo, adimensionale

Vediamo nel particolare ciascun termine:

### 1. Media logaritmica tra temperatura del fluido e temperatura ambiente

$$\Delta t = \frac{(\vartheta_V - \vartheta_R)}{\ln \frac{(\vartheta_V - \vartheta_i)}{(\vartheta_R - \vartheta_i)}} \quad (4.6)$$

Dove:

$\vartheta_V$  temperatura di entrata del fluido termovettore, [ $^{\circ}C$ ]

$\vartheta_R$  temperatura di uscita del fluido termovettore, [ $^{\circ}C$ ]

$\vartheta_i$  temperatura dell'aria dell'ambiente, [ $^{\circ}C$ ]

### 2. Fattore relativo alle caratteristiche del tubo

Si indica con il simbolo B e si considera come:

$B = 6,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  per tubi con spessore  $s_{t0} = 0,002 \text{ m}$  e conducibilità termica

$\lambda_{t0} = 0,350 \text{ W/mK}$

Mentre in caso di diverso spessore e di diversa conducibilità il fattore B si calcola attraverso la seguente formula:

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{B_0} + \frac{1,1}{\pi} \cdot a_B \cdot a_T \cdot a_u \cdot a_D \cdot I \cdot \left( \frac{1}{2\lambda_t} \ln \frac{D_e}{D_e - 2s_t} - \frac{1}{2\lambda_{t0}} \ln \frac{D_e}{D_e - 2s_{t0}} \right) \quad (4.7)$$

Dove:

$a_B$  rappresenta il fattore relativo alla resistenza termica del pavimento, adimensionale

$a_T$  rappresenta il fattore relativo all'interasse dei tubi, adimensionale

$a_u$  rappresenta il fattore relativo allo spessore del massetto sopra i tubi, adimensionale

$F_D$  rappresenta il fattore relativo al diametro esterno del tubo, adimensionale

$l$  interasse di posa del pannello, [m]

$D_e$  diametro esterno del tubo, [m]

$\lambda_t$  conducibilità termica del tubo, [ $W/mK$ ]

$s_t$  spessore del tubo, [m]

### 3. Fattore relativo alla resistenza termica del pavimento

Viene valutato in funzione della seguente tabella:

Conducibilità massetto  W/mK	Resistenza termica del pavimento, $m^2K/W$			
	0,00	0,05	0,10	0,15
2,0	1,196	0,833	0,640	0,519
1,5	1,122	0,797	0,618	0,505
1,2	1,058	0,764	0,598	0,491
1,0	1,000	0,734	0,579	0,478
0,8	0,924	0,692	0,553	0,460
0,6	0,821	0,632	0,514	0,433

Tabella 4.3- Valori dei fattori  $a_B$ .

Oppure utilizzando la seguente formula:

$$a_B = \frac{\frac{1+s_{m0}}{\alpha} + \frac{s_{m0}}{\lambda_{m0}}}{\frac{1+s_{m0}}{\alpha} + \frac{s_{m0}}{\lambda_m} + R_P} \quad (4.8)$$

Dove:

$$\alpha = 10,8 \text{ } W/m^2K$$

$$s_{m0} = 0,045 \text{ } m$$

$$\lambda_{m0} = 1,0 \text{ } W/mK$$

$\lambda_m$  rappresenta la conducibilità del massetto [ $W/mK$ ]

$R_P$  rappresenta la resistenza termica del pavimento, [ $m^2K/W$ ]

#### 4. Fattore relativo all'interasse dei tubi

Si indica con il simbolo  $a_T$  e si calcola attraverso la formula:

$$a_T = A_I^x \quad (4.9)$$

Dove il fattore  $A_I$  è determinabile attraverso la tabella sottostante e l'esponente  $x$  è valutabile attraverso la relazione:

$$x = 1 - \frac{T}{0,075} \quad (4.10)$$

Con  $T$  interasse di posa del pannello, [m]

$R_p = 0,00$	$R_p = 0,05$	$R_p = 0,10$	$R_p = 0,15$
$A_I = 1,230$	$A_I = 1,188$	$A_I = 1,156$	$A_I = 1,134$

Tabella 4.4- Valori del fattore  $A_I$ .

Dove:

$R_p$  rappresenta la resistenza termica del pavimento,  $\left[ m^2 K / W \right]$

$A_I$  fattore adimensionale

#### 5. Fattore relativo allo spessore del massetto sopra i tubi

Si indica con il simbolo  $a_u$  e si calcola con la formula:

$$a_u = A_M^y \quad (4.11)$$

Dove il fattore  $A_M$  è valutabile tramite la tabella seguente e l'esponente  $y$  (per spessore del massetto sopra i tubi di 0,015 m) è calcolabile con la relazione:

$$y = 100 \cdot (0,045 - s_m) \quad (4.12)$$

Con  $s_m$  spessore del massetto sopra i tubi, [m]

Interasse m	Resistenza termica del pavimento, m <sup>2</sup> K/W			
	0,00	0,05	0,10	0,15
0,050	1,0690	1,056	1,0430	1,0370
0,075	1,0660	1,053	1,0410	1,0350
0,100	1,0630	1,050	1,0390	1,0335
0,150	1,0570	1,046	1,0350	1,0305
0,200	1,0510	1,041	1,0315	1,0275
0,225	1,0480	1,038	1,0295	1,0260
0,300	1,0395	1,031	1,0240	1,0210
0,375	1,0300	1,024	1,0180	1,0160

**Tabella 4.5- Valori del fattore  $A_M$ .**

## 6. Fattore relativo al diametro esterno del tubo

Tale fattore si indica con il simbolo  $a_D$  e si calcola con la formula:

$$a_D = A_D^z \quad (4.13)$$

Dove il fattore è determinabile con la tabella.. e l'esponente  $z$  (per diametri compresi tra 0,010 e 0,030) è calcolabile con la seguente formula:

$$z = 250 \cdot (D_e - 0,020) \quad (4.14)$$

Essendo  $D_e$  il diametro esterno del tubo, [m]

Interasse m	Resistenza termica del pavimento, m <sup>2</sup> K/W			
	0,00	0,05	0,10	0,15
0,050	1,013	1,013	1,012	1,011
0,075	1,021	1,019	1,016	1,014
0,100	1,029	1,025	1,022	1,018
0,150	1,040	1,034	1,029	1,024
0,200	1,046	1,040	1,035	1,030
0,225	1,049	1,043	1,038	1,033
0,300	1,053	1,049	1,044	1,039
0,375	1,056	1,051	1,046	1,042

Tabella 4.6- Valori del fattore  $A_D$ .

*Nota:* Per interassi superiori a 0,375 m, il flusso di calore ( $Q$ ) può essere calcolato con la formula:

$$Q = Q_{(0,375)} \cdot \frac{0,375}{l} \quad (4.15)$$

Ci sono dunque diversi **fattori che influenzano la potenza scambiata** (di cui si tiene conto attraverso i termini  $a_i$ ):

- passo tra i tubi,  $T$
- spessore del supporto,
- conduttività termica del supporto,
- resistenza termica del rivestimento,  $R_p$
- diametro esterno dei tubi,  $D_e$
- elementi conduttivi addizionali,
- contatto tra i tubi e il pavimento.

Mediante quindi la Formula (4.5) il produttore del pannello (o il progettista) al variare dei parametri costruttivi determina le curve caratteristiche del pannello in funzione di  $\Delta\vartheta_H$  per i valori del passo  $T$  che si intendono utilizzare.

Oltre al calcolo dell'emissione aerica specifica verso l'alto la norma consente di valutare l'**emissione aerica specifica verso il basso**:

$$q_U = \frac{1}{R_U} \cdot (R_0 \cdot q + \vartheta_i - \vartheta_u) \quad (4.16)$$

Dove:

$R_U$  rappresenta la resistenza termica parziale verso il basso di un pavimento riscaldante [ $m^2K/W$ ] <sup>nota 2</sup>

$R_0$  rappresenta la resistenza termica verso l'alto di un pavimento riscaldante, [ $m^2K/W$ ] <sup>nota 1</sup>

$q$  rappresenta la potenza termica specifica verso l'alto, [ $W/m^2$ ]

$\vartheta_i$  rappresenta la temperatura dell'ambiente nominale, [ $^{\circ}C$ ]

$\vartheta_u$  rappresenta la temperatura dell'ambiente sottostante l'ambiente riscaldato a pavimento, [ $^{\circ}C$ ]

---

Nota 1.

La resistenza termica verso l'alto  $R_0$  si calcola attraverso la formula:  $R_0 = \frac{s_p}{\lambda_p} + \frac{s_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha}$

Dove:

$s_p$  rappresenta lo spessore del pavimento, [m]

$\lambda_p$  rappresenta la conducibilità termica del pavimento, [ $W/mK$ ]

$s_m$  rappresenta lo spessore del massetto sopra il pannello, [m]

$\lambda_m$  rappresenta la conducibilità termica del massetto, [ $W/mK$ ]

$\alpha = 10,4 \text{ } W/mK$

Nota 2.

La resistenza termica sotto il pavimento  $R_u$  si calcola attraverso la formula:

$$R_u = \frac{s_d}{\lambda_m} + \frac{s_{is}}{\lambda_{is}} + R_{sl} + \frac{s_{in}}{\lambda_{in}} + \frac{1}{\alpha}$$

Dove:

$\alpha = 5,9 \text{ } W/m^2K$

$s_d$  rappresenta la distanza tra la tangente superiore dei tubi e l'isolante, [m]

$\lambda_m$  rappresenta la conducibilità termica del massetto, [ $W/mK$ ]

$s_{is}$  rappresenta lo spessore del materiale isolante, [m]

$\lambda_{is}$  rappresenta la conducibilità termica del materiale isolante, [ $W/mK$ ]

$R_{sl}$  rappresenta la resistenza termica del solaio, [ $m^2K/W$ ]

$s_{in}$  rappresenta lo spessore dell'intonaco, [m]

$\lambda_{in}$  rappresenta la conducibilità termica dell'intonaco, [ $W/mK$ ]

La **potenza totale emessa dal pannello** si determina attraverso:

$$q_{HC} = q_U + q \quad (4.17)$$

Dove:

$q_U$  potenza specifica verso il basso,  $[W/m^2]$

$q$  potenza specifica verso l'alto,  $[W/m^2]$

### ➤ **Parte 3**

La terza parte della norma entra nel vivo degli elementi relativi alla progettazione, fornendo le direttive inerenti le curve caratteristiche (curve che rappresentano per un dato impianto, la relazione tra il flusso termico areico ed il salto termico di temperatura) dell'impianto con le curve limite (curve che delimitano il campo di flusso termico areico, in funzione del salto termico medio di temperatura e delle caratteristiche del rivestimento del pavimento). Viene quindi fornita la formula dell'emissione areica di progetto che è data dal rapporto tra le dispersioni nominali di calore dell'ambiente e l'area della superficie riscaldante:

$$q_{des} = \frac{Q_{N,f}}{A_f} \quad (4.18)$$

Procede infine a fornire le formule di calcolo della temperatura di alimentazione dell'impianto e della portata di progetto (*si rimanda per maggiori informazioni al paragrafo che segue*).

### ➤ **Parte 4**

Nella parte quattro della norma non si affrontano più le argomentazioni inerenti il calcolo degli impianti a pannelli radianti, ma vengono trattate le direttive principali da seguire in fase di esecuzione. Oltre a ciò vengono stabiliti i requisiti minimi dei materiali da utilizzare e le procedure da seguire per il collaudo e la messa a regime dell'impianto.

➤ **Parte 5**

Nella parte cinque la norma fornisce le direttive per il calcolo di sistemi radianti a soffitto e parete. Inoltre, fissa i metodi di calcolo per le applicazioni in raffrescamento di sistema a pannelli radianti a pavimento, soffitto e parete.

**4.6 Dimensionamento dei pannelli radianti a pavimento**

Il dimensionamento dei pannelli a pavimento per i diversi ambienti viene effettuato utilizzando un diagramma su cui sono riportate le curve caratteristiche calcolate con la formula (4.5), che in ascissa presenta la differenza di temperatura media logaritmica  $\Delta\vartheta_H$  tra ambiente e acqua dei tubi, mentre in ordinata il flusso termico specifico  $q$  per diversi valori del passo  $T$  e della resistenza del rivestimento  $R_{\lambda,B}$ .

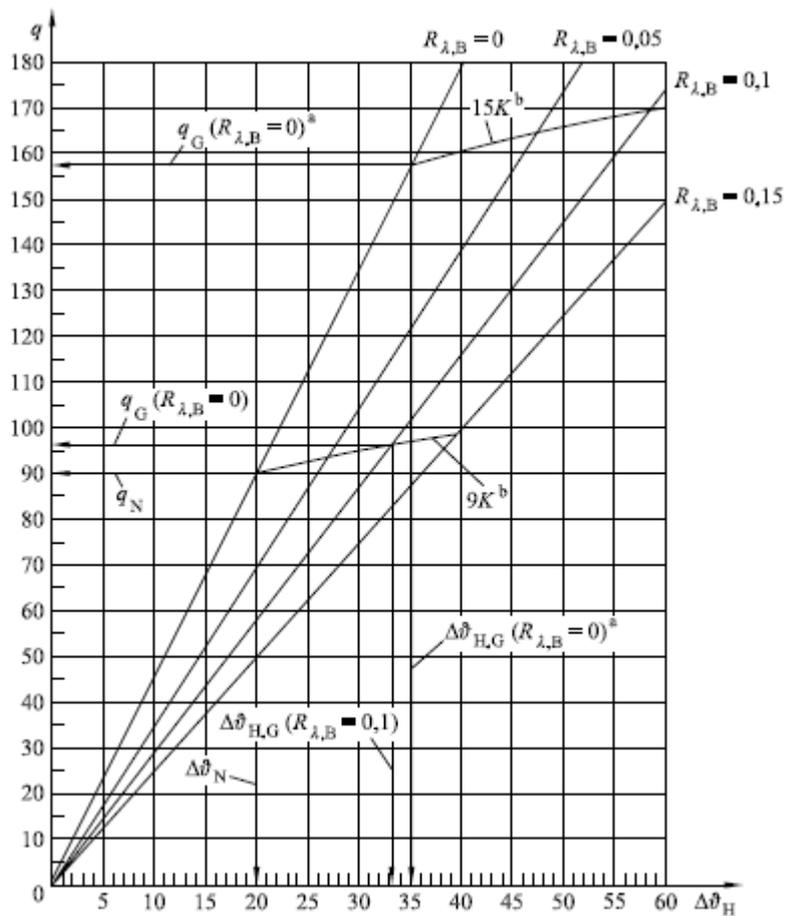


Figura 4.4- Curve caratteristiche.

Per il dimensionamento dell'impianto il punto di partenza è sempre la potenza fornita ad ogni singolo locale, che nella norma viene indicata con il simbolo  $Q_{N,f}$  che deve essere opportunamente depurata dalla dispersione del pavimento verso il basso (nella determinazione delle curve caratteristiche, quando si valuta la prestazione del pannello, la dispersione verso il basso viene assunta pari al 10% di quella verso l'alto) in quanto questa viene compensata da una maggior portata d'acqua, senza influire sulla temperatura della superficie superiore. Si valuta, a questo punto, per ogni stanza la richiesta di potenza per unità di superficie utile di pavimento:

$$q_{des} = \frac{Q_{N,f,j}}{A_{f,j}} \quad (4.19)$$

Dove:

$A_{f,j}$  rappresenta la superficie utile per disporre i tubi del pannello nella  $j$ -esima stanza.

Si individua la stanza più sfavorita, che è quella che richiede la massima emissione:

$$q_{max} = \max\{q_j\} \quad (4.20)$$

Da questo calcolo sono esclusi i bagni in quanto vengono considerati con  $\vartheta_i = 24^\circ C$  e quindi con un  $\Delta\vartheta_H = 9^\circ C$ .

Si passa così alla scelta del passo tra i tubi da utilizzare nella stanza più sfavorita mediante l'uso delle curve caratteristiche dei pannelli per i diversi valori del passo tra i tubi.

Per la scelta del passo tra i tubi e della temperatura di mandata dell'acqua la norma prevede l'utilizzo delle curve caratteristiche valutate con  $R_{\lambda,B} = 0,1 \text{ m}^2 K/W$ . Si ottengono così sul grafico due curve limite, la più bassa per la zona calpestabile e i bagni con  $\Delta\vartheta_H = 9^\circ K$  e la più alta per le zone perimetrali con  $\Delta\vartheta_H = 15^\circ K$ . Si tratta quindi di trovare grazie all'ausilio del grafico il passo dei tubi in funzione della  $q_{max}$  e della resistenza del rivestimento, scelta a priori dal committente. Naturalmente minore è il passo, maggiore sarà

l'emissione a parità di massima temperatura del pavimento, in quanto si ha maggior uniformità della temperatura superficiale. In pratica si entra nel diagramma sull'asse delle ordinate con il valore di  $q_{max}$  e muovendosi in orizzontale si individuano le intersezioni tra il valore di  $q_{max}$  e le curve caratteristiche per i diversi passi. L'intersezione dovrà avvenire al di sotto della curva limite inferiore. Nel caso non sia possibile individuare nessuna intersezione al di sotto di tale curva si procede con la suddivisione della superficie del pavimento in zona perimetrale e zona calpestabile. Individuata la fascia che si vuole utilizzare come perimetrale, con larghezza massima di un metro se ne calcola l'area  $A_R$  alla quale competerà il flusso specifico  $q_R$  scelto tra quelli ottenibili dal pannello al di sotto della curva limite superiore. Scelto il passo  $T_R$ , che fornisce  $q_R$ , si calcola la potenza termica residua da soddisfare con il pannello nella zona occupata (calpestabile) di area  $A_A = A_F - A_R$  come:

$$Q_A = Q_{N,f} - q_R A_R \quad (4.21)$$

Quindi l'emissione richiesta su tale area sarà:

$$q_A = \frac{Q_A}{A_A} \quad (4.22)$$

Se questa non rappresenta più la zona con più alta emissività si ripete il procedimento con  $q_j = q_{max}$ .

Se nemmeno suddividendo le zone in zona perimetrale e in zona calpestabile si riesce a stare al di sotto della curva limite inferiore si dovrà considerare l'inserimento di un terminale aggiuntivo come un ventilconvettore o un radiatore.

#### 4.6.1 Determinazione della temperatura di mandata

Il passo successivo riguarda la determinazione della temperatura di mandata dell'acqua. Si definisce la media logaritmica tra acqua e ambiente  $\Delta\vartheta_H$  come:

$$\Delta\vartheta_H = \frac{(\vartheta_V - \vartheta_R)}{\ln\left(\frac{(\vartheta_V - \vartheta_i)}{(\vartheta_R - \vartheta_i)}\right)} \quad (4.23)$$

Dove:

$\vartheta_V$  rappresenta la temperatura di entrata del fluido termovettore, [ $^{\circ}C$ ]

$\vartheta_R$  rappresenta la temperatura di uscita del fluido termovettore, [ $^{\circ}C$ ]

$\vartheta_i$  rappresenta la temperatura dell'aria dell'ambiente, [ $^{\circ}C$ ]

L'acqua subisce dunque un salto termico tra la temperatura di mandata  $\vartheta_V$  e quella di ritorno  $\vartheta_R$ :

$$\sigma = \vartheta_V - \vartheta_R \quad (4.24)$$

Per impianti semplici è preferibile che  $\vartheta_V$  sia la stessa per tutti i circuiti anche per impianto con più zone controllate separatamente. Quindi oltre al passo dei tubi la temperatura di mandata rappresenta l'altra incognita da determinare nella fase di progettazione. Si definisce temperatura di mandata di progetto  $\vartheta_{V,des}$  quella calcolata partendo dal locale più sfavorito, cioè quello con flusso termico specifico più alto. Si definisce quindi la differenza tra questo valore e la temperatura dell'ambiente come:

$$\Delta\vartheta_{V,des} = \vartheta_{V,des} - \vartheta_i \quad (4.25)$$

Per il locale più sfavorito si fissa come riferimento  $\sigma \leq 5 K$ .

La norma propone due espressioni approssimate per il calcolo di  $\Delta\vartheta_V$  a seconda del rapporto  $\sigma/\Delta\vartheta_H$ :

- Se  $\sigma/\Delta\vartheta_H \leq 0,5$  se si assume  $\sigma = 5 K$  allora  $\Delta\vartheta_H \geq 10 K$  e si utilizza la formula:

$$\Delta\vartheta_{V,des} \leq \Delta\vartheta_{H,des} + \frac{\sigma}{2} \quad (4.26)$$

- Se  $\sigma/\Delta\vartheta_H > 0,5$  e se  $\sigma = 5 K$  e  $\Delta\vartheta_H \leq 10 K$  si utilizza la formula:

$$\Delta\vartheta_{V,des} \leq \Delta\vartheta_{H,des} + \frac{\sigma}{2} + \frac{\sigma^2}{12 \cdot \Delta\vartheta_{H,des}} \quad (4.27)$$

La norma inoltre permette di utilizzare al posto della differenza  $\Delta\vartheta_{H,des}$  corrispondente alla emissione in condizioni di progetto  $q_{des}$  la differenza  $\Delta\vartheta_{H,G}$  corrispondente alla emissione limite  $q_G$  per lo stesso passo, sempre con la limitazione:

$$\Delta\vartheta_{V,des} \leq \Delta\vartheta_{H,G} + \frac{\sigma}{2} \quad (4.28)$$

con  $\sigma \leq 5 \text{ K}$ .

Dove si ricorda che  $\Delta\vartheta_{H,G}$  si calcola attraverso la formula (4.4):

$$\Delta\vartheta_{H,G} = \varphi \cdot \left[ \frac{B_G}{B \cdot \prod_i a_i^{mi}} \right]^{\frac{1}{1-n_G}}$$

Dal diagramma si ottengono la  $\Delta\vartheta_{H,des}$  a partire dalla  $q_{max}$  e dalla curva caratteristica del pannello scelto per il locale e la  $\Delta\vartheta_{H,G}$  in corrispondenza della intersezione tra la stessa curva caratteristica e la curva limite inferiore.

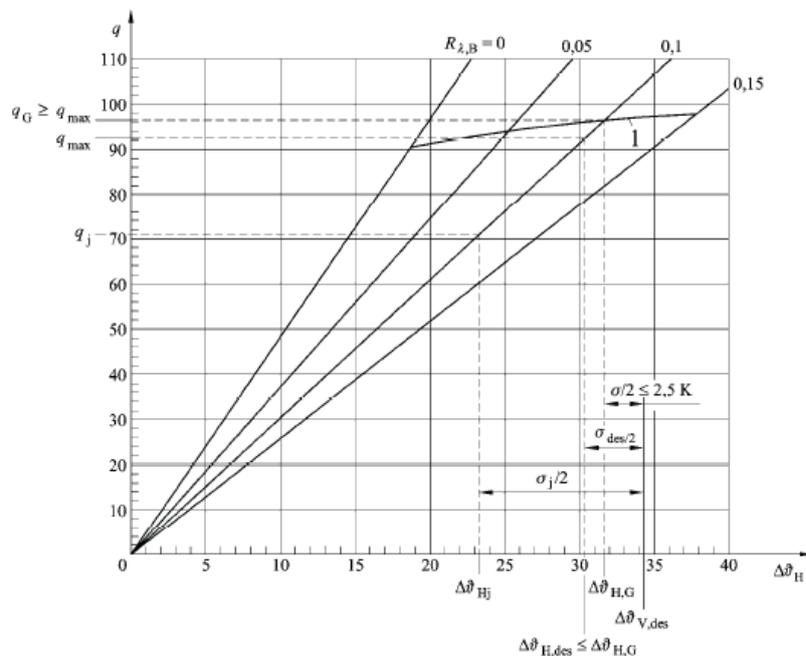


Figura 4.5- Uso del diagramma per la scelta della temperatura di mandata dell'acqua.

Per gli altri ambienti alimentati con la stessa temperatura di mandata e quindi con lo stesso  $\Delta\vartheta_{V,des}$ , il valore della differenza di temperatura media logaritmica acqua-ambiente  $\Delta\vartheta_{H,j}$ , si ricava dal diagramma delle curve caratteristiche in corrispondenza della emissione  $q_j$  richiesta per il locale j-esimo. Si calcola il salto termico sull'acqua come:

$$\sigma_j = 2 \cdot (\Delta\vartheta_{V,des} - \Delta\vartheta_{H,j}) \quad (4.29)$$

Tale valore risulta accettabile se soddisfa la limitazione  $(\sigma_j/\Delta\vartheta_{H,j}) < 0,5$  altrimenti deve essere calcolato con la seguente formula:

$$\sigma_j = 3 \cdot \Delta\vartheta_{H,j} \left[ \left( 1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{\Delta\vartheta_{V,des} - \Delta\vartheta_{H,j}}{\Delta\vartheta_{H,j}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (4.30)$$

#### 4.6.2 Determinazione della portata

Una volta fissato il salto termico nei circuiti rimane da determinare la portata d'acqua nei circuiti stessi. Ogni circuito deve fornire una potenza termica verso l'alto  $Q_{N,f,j}$  al locale da riscaldare e contemporaneamente disperde una potenza termica verso il basso  $Q_{u,j}$  in funzione delle condizioni al contorno inferiori e della resistenza termica della struttura al di sotto dei tubi. Quindi per il j-esimo locale la potenza totale che l'acqua deve fornire sarà pari a :

$$Q_{w,j} = Q_{N,f,j} + Q_{u,j} = \dot{m}_{H,j} \cdot c_w \cdot \sigma_j = \dot{m}_{H,j} \cdot c_w \cdot (\vartheta_V - \vartheta_R) \quad (4.31)$$

Dove:

$Q_{w,j}$  rappresenta il flusso di calore totale emesso da un pannello, [W]

$\vartheta_V$  rappresenta la temperatura di entrata del fluido termovettore, [°C]

$\vartheta_R$  rappresenta la temperatura di uscita del fluido termovettore, [°C]

$\dot{m}_{H,j}$  rappresenta la portata del pannello, [l/h]

$c_w = 4186 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Sapendo che:

- La potenza specifica verso il basso si calcola attraverso l'espressione:

$$q_{u,j} = \frac{1}{R_U} \cdot (R_0 \cdot q + \vartheta_i - \vartheta_u) \quad (4.32)$$

- La resistenza termica sotto il pavimento  $R_U$  si calcola attraverso la formula:

$$R_U = \frac{s_d}{\lambda_m} + \frac{s_{is}}{\lambda_{is}} + R_{sl} + \frac{s_{in}}{\lambda_{in}} + \frac{1}{\alpha} \quad (4.33)$$

- La resistenza termica verso l'alto  $R_0$  si calcola attraverso la formula:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha} + R_P + \frac{s_m}{\lambda_m} \quad (4.34)$$

La relazione della **portata** si può anche riscrivere come:

$$\dot{m}_{H,j} = \frac{Q_j}{(\vartheta_V - \vartheta_R) \cdot 1,16} \cdot \left[ 1 + \frac{\frac{1}{\alpha} + R_P + \frac{s_m}{\lambda_m}}{R_U} + \frac{A \cdot (\vartheta_i - \vartheta_U)}{Q_j \cdot R_U} \right] \quad (4.35)$$

Dove:

$\dot{m}_{H,j}$  rappresenta la portata del pannello, [l/h]

$Q_j$  rappresenta il flusso di calore emesso verso l'alto dal pannello, [W]

$\vartheta_V$  rappresenta la temperatura di entrata del fluido termovettore, [°C]

$\vartheta_R$  rappresenta la temperatura di uscita del fluido termovettore, [°C]

$R_U$  rappresenta la resistenza termica sotto il pannello  $\left[ m^2 K / W \right]$

$\vartheta_i$  rappresenta la temperatura dell'aria ambiente, [°C]

$\vartheta_U$  rappresenta la temperatura del locale o del terreno sottostante, [°C]

### 4.6.3 Determinazione della lunghezza del circuito

La lunghezza del pannello si calcola attraverso la relazione:

$$L = L_a + \frac{A_F}{T} \quad (4.36)$$

Dove:

$L$  rappresenta la lunghezza del pannello, [m]

$L_a$  rappresenta la lunghezza di adduzione tra collettore e pannello, [m]

$T$  rappresenta l'interasse di posa del pannello, [m]

$A_F$  rappresenta la superficie coperta dal pannello, [m<sup>2</sup>]

Di solito è preferibile che la lunghezza dei circuiti cada nel seguente intervallo:

$$30 \text{ m} < L < 100 \text{ m}$$

In quanto percorsi molto lunghi danno perdite di carico molto elevate.

### 4.6.4 Specifiche sui parametri richiesti

#### ➤ INTERASSI

Possono variare dai 7.5 cm ai 30 cm per uso civile mentre possono arrivare anche a 40 cm per applicazioni di tipo industriale. La serie di supporti possibili dipende dai supporti di fissaggio o dai pannello preformati che si intendono adottare.

#### ➤ PREVALENZA PRESTABILITA

La prevalenza prestabilita rappresenta la prevalenza disponibile agli estremi del pannello. Generalmente conviene che questo valore sia variabile tra:

- 1200 a 1500 mm c.a per gruppi termici murari, in quanto dotati di circolatori a limitata prevalenza
- 1500 a 2500 mm c.a per caldaie a terra, scambiatori o pompe di calore.

➤ TEMPERATURA MASSIMA DI PROGETTO

La temperatura massima di progetto rappresenta la temperatura massima del fluido scaldante che circola nei pannelli. Per questa grandezza conviene adottare valori variabili da:

- 40 a 55° con caldaie tradizionali,
- 40 a 45° con teleriscaldamento, caldaie a condensazione, pompe di calore,
- 32 a 38° con pannelli solari.

Tali valori consentono di :

- Limitare la lunghezza dei pannelli e quindi di ridurre il costo,
- Ottimizzare il rendimento della sorgente di calore.

Il fatto di considerare una temperatura massima di 55°C consente di evitare:

- Crepe nel pavimento
- Fessurazioni nei parquet
- Avvallamenti nelle pavimentazioni in gomma o altri materiali
- Temperatura del pavimento ad onde cioè con sensibile alternanza di caldo e freddo.

➤ TEMPERATURA DEL LOCALE SOTTOSTANTE

La temperatura del locale sottostante rappresenta la temperatura del locale o del terreno posti sotto la struttura di contenimento dei pannelli.

➤ PORTATA DEL PANNELLO

La portata di un pannello si determina attraverso la formula (...) vista in precedenza. E' possibile determinare in via approssimata la potenza termica ( $Q_{max}$ ) che un pannello può cedere in relazione al suo diametro interno.

Considerando un salto termico di 8°C, risulta:

$$Q_{max} = (200 \div 220) \cdot 8 \cdot 1,16 = 1856 \div 2042 \text{ W per } D_i = 16 \text{ mm}$$

$$Q_{max} = (120 \div 130) \cdot 8 \cdot 1,16 = 1114 \div 1206 \text{ W per } D_i = 13 \text{ mm}$$

Tali valori possono essere utilizzati come linee guida per stabilire il numero di pannelli che deve servire un locale.

➤ SALTO TERMICO DEL FLUIDO SCALDANTE

Il salto termico del fluido scaldante è dato dalla differenza tra la temperatura di entrata e quella di uscita del fluido scaldante. E' consigliabile che il suo valore

non sia troppo elevato per non abbassare troppo la resa termica del pannello e per evitare temperature superficiali troppo diverse tra loro.

Di norma non si supera un salto termico di 12°C.

➤ VELOCITA' DEL FLUIDO

E' consigliabile non accettare soluzione con velocità del fluido troppo basse in modo da impedire il ristagno di bolle d'aria ed evitare che il flusso del fluido avvenga in regime laminare, dato che le formule di emissione dei pannelli sono valide per regime turbolento.

Quindi di norma non sono accettabili velocità inferiori a 0,1 m/s.

➤ ASPETTI ECONOMICI

E' praticamente impossibile stabilire, per questi impianti, costi di realizzazione generalizzabili.

Troppe, infatti, sono le variabili da prendere in esame: quali la tipologia costruttiva, la qualità e il relativo costo dei tubi, il sistema di regolazione, ecc...

. Si può comunque ritenere che mediamente un impianto a pannelli costi circa il 20-30% in più di un impianto a radiatori. Per quanto riguarda invece i costi di gestione, il riscaldamento a pannelli consente un certo risparmio (valutabile dal 10 al 15%) rispetto agli altri sistemi, in quanto garantisce una miglior distribuzione del calore.

# Capitolo 5

## Caso studio

La trattazione che seguirà è effettuata su di un edificio residenziale realmente esistente situato nella periferia di Bologna a San Lazzaro.



**Figura 5.1 Edificio analizzato.**

L'unità immobiliare è abbastanza complessa, comprensiva di due appartamenti si erge su tre piani:

- *piano interrato*, superficie = 270,50 m<sup>2</sup>
- *piano terra*, superficie = 158,16 m<sup>2</sup>
- *piano primo*, superficie = 129,47 m<sup>2</sup>

L'altezza interna risulta variabile nei diversi locali tra 280, 270, 240 fino a raggiungere un valore di 179 cm nella zona soppalcata.

Nel dettaglio l'unità immobiliare è composta da:

<b>Vano</b>	<b>Destinazione</b>	<b>Superficie (m2)</b>	<b>Altezza (m)</b>
1	Garage	37,86	2,80
2	Bagno	7,26	2,80
3	Bagno	7,75	2,80
4	Lavanderia	35,58	2,80
5	Disimpegno	4,97	2,80
6	Ripostiglio	1,30	2,23
7	Vano scala	6,69	-
8	Cantina	58,93	2,70-2,80
9	Vano scala	15,57	-
10	Vano tecnico	5,80	2,80
11	Cantina	90,75	2,70- 2,80
12	Bagno	4,73	2,63
13	Portico	8,92	2,80
14	Ingresso soggiorno	43,28	2,80
15	Cucina	13,48	2,80
16	Disimpegno	4,88	2,40
17	Camera	14,54	2,80
18	Ingr./sogg./cucina	22,28	2,80
19	Bagno	9,83	2,80

20	Deposito attrezzi	23,07	2,40
21	Autorimessa	22,71	2,40
22	Portico	0,80	2,80
23	Camera	22,53	2,80
24	Bagno	5,49	2,80
25	Camera	32,73	1,79
26	Soppalco	69,52	1,79

**Tabella 5.1 Vani edificio.**

Il primo appartamento è comprensivo di 23 vani e si estende su tre piani mentre il secondo appartamento, più piccolo comprende i vani 11, 12, 18, 20 e 21 e si sviluppa su piano interrato e piano terra.

L'intero fabbricato viene servito da unico generatore. La zona termica comprende tutti i vani ad esclusione del vano 1, 2 cioè del garage e del bagno adiacente considerati non riscaldati.

## 5.1 Principali dati costruttivi dell'involucro edilizio

Per quanto riguarda l'involucro costruttivo l'edificio è costituito da diversi pacchetti murari.

Le pareti perimetrali del **piano interrato** sono costituite in maggior parte da Poroton più intonaco interno per uno spessore totale di 32 cm a meno delle pareti che si affacciano sul patio interno dove al pacchetto precedentemente illustrato si è aggiunto uno strato di intonaco esterno pari a 3 cm portando il pacchetto totale ad un valore di 35 cm. I pilastri, invece, sono in calcestruzzo con intonaco interno per un totale di 32 cm di spessore.

Le pareti interne risultano differenti a seconda che si consideri la separazione tra i due appartamenti oppure la semplice separazione tra vani adiacenti appartenenti al medesimo appartamento o ancora la separazione tra zone riscaldate e non. Per quanto concerne la separazione tra i due appartamenti (parete che separa vano 11 dal vano 8) è costituita da un pacchetto murario comprensivo di uno strato di 3 cm di isolante (sughero), pacchetto indicato con

il codice M9 nella tabella seguente. La separazione tra il garage ( locale non riscaldato) e i locali riscaldati avviene tramite uno spessore del muro pari a 34 cm di cui 30 cm di Poroton e 4 cm tra intonaco esterno ed interno. La parete di separazione tra il vano scala e il locale 4 ha uno spessore di 25 cm ed è composta da mattoni leggeri mentre le altre pareti di separazione interna sempre in mattoni leggeri possiedono uno spessore di 8 cm e rifinite su ambo i lati con intonaco.

Nel **piano terra** le pareti perimetrali, invece, sono costituite dal pacchetto M9 e i pilastri, a differenza del piano interrato sono dotati di un isolante, pannelli in lana di legno con leganti organici, pacchetto M10. Le separazioni interne sono costituite tra tramezzi di 10, 12, 12.5, 23.5 cm di spessore sempre realizzati in mattone leggero e rifiniti con intonaco.

L'ultimo piano, il **piano primo**, possiede come muri perimetrali lo stesso pacchetto M9 utilizzato anche nel piano terra a meno della parete del vano 26 rivolta a sud est costituita dal pacchetto murario M7. Le pareti di separazione hanno uno spessore di 8 cm rifinite con intonaco.

Per quanto riguarda le ripartizioni orizzontali il pavimento del piano interrato possiede uno spessore di 41 cm comprensivo di uno spessore di 2 cm di polistirene espanso (vedi pacchetto P2).

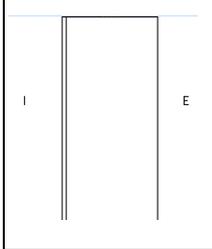
Il pavimento del piano terra, invece, è costituito di un pacchetto di 41 cm di spessore comprensivo di 1 cm di pavimento di legno, 5 cm di massetto ripartitore, 2 cm di polistirene espanso sinterizzato, 8 cm di calcestruzzo alleggerito, 4 cm di massetto in calcestruzzo, 20 cm di soletta in laterizio e 1 cm di intonaco. Analogo risulta il pavimento del piano primo.

Infine il piano primo è dotato di un controsoffitto in cartongesso mentre il soffitto esterno è definito dal pacchetto S4.

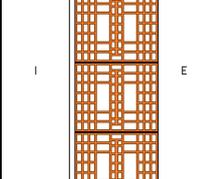
Di seguito viene riportata la stratigrafia dei componenti opachi e le loro proprietà utilizzati del caso in esame. Le proprietà elencate qui di seguito saranno:

- s, spessore (m)
- $\lambda$  conducibilità termica (W/mK)
- ct calore specifico (kJ/hm<sup>2</sup>K)
- $\rho$  densità (kg/m<sup>3</sup>)

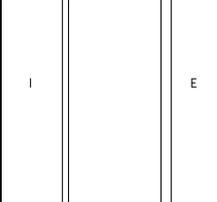
**M1**

	MATERIALI	s	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400
	parete in cls	0.300	1.910	6.876	0.850	2400

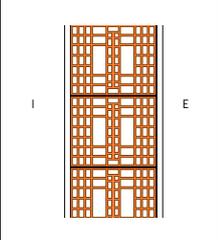
**M2**

	MATERIALI	s	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.020	0.700	2.520	0.910	1400
	poroton	0.300	0.400	1.440	0.840	650

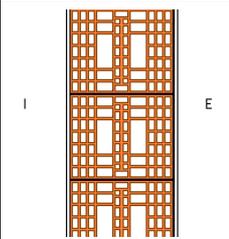
**M3**

	MATERIALI	s	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.020	0.700	2.520	0.910	1400
	pilastro in cls	0.300	1.910	6.876	0.850	2400

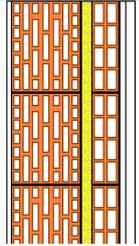
**M4**

	MATERIALI	s	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.020	0.700	2.520	0.910	1400
	poroton	0.300	0.400	1.440	0.840	650
	intonaco interno	0.020	0.700	2.520	0.910	1400

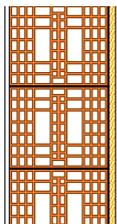
**M5**

	MATERIALI	s	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400
	poroton	0.300	0.400	1.440	0.840	650
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400

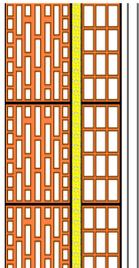
**M7**

	<b>MATERIALI</b>	<b>s</b>	<b><math>\lambda</math></b>		<b>ct</b>	<b><math>\rho</math></b>
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>3</sup> ]
	intonaco interno	0.015	0.700	2.520	0.910	1400
	termolaterizio Eurobrik	0.200	0.330	1.188	0.840	650
	sughero	0.030	0.052	0.187	1.800	200
	termolaterizio Eurobrik	0.080	0.330	1.188	0.840	650
	intonaco esterno	0.015	0.900	3.240	0.910	1800
	pietra leccese	0.030	1.000	3.600	0.810	2000

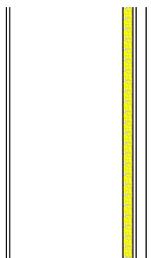
**M8**

	<b>MATERIALI</b>	<b>s</b>	<b><math>\lambda</math></b>		<b>ct</b>	<b><math>\rho</math></b>
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>3</sup> ]
	intonaco interno	0.015	0.700	2.520	0.910	1400
	poroton	0.300	0.400	1.440	0.840	650
	legno di pino flusso parallelo alle fibre	0.020	0.220	0.792	1.380	550

**M9**

	<b>MATERIALI</b>	<b>s</b>	<b><math>\lambda</math></b>		<b>ct</b>	<b><math>\rho</math></b>
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>3</sup> ]
	intonaco interno	0.020	0.700	2.520	0.910	1400
	termolaterizio Eurobrik	0.200	0.330	1.188	0.840	650
	sughero	0.030	0.052	0.187	1.800	200
	termolaterizio Eurobrik	0.012	0.330	1.188	0.840	650
	intonaco esterno	0.020	0.900	3.240	0.910	1800
	pietra leccese	0.030	1.000	3.600	0.810	2000

**M10**

	<b>MATERIALI</b>	<b>s</b>	<b><math>\lambda</math></b>		<b>ct</b>	<b><math>\rho</math></b>
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>3</sup> ]
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400
	pilastro in cls	0.340	1.910	6.876	0.850	2400
	pannelli lana di legno con leganti organici	0.030	0.085	0.306	1.590	300
	intonaco esterno	0.010	0.900	3.240	0.910	1800
	pietra leccese	0.030	1.000	3.600	0.810	2000

**Tramezzo 10**

	MATERIALI	s*	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400
	termolaterizio Eurobrik	0.08	0.330	1.188	0.840	650
	intonaco esterno	0.010	0.900	3.240	0.910	1800

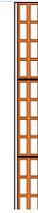
**Tramezzo 12**

	MATERIALI	s*	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400
	termolaterizio Eurobrik	0.10	0.330	1.188	0.840	650
	intonaco esterno	0.010	0.900	3.240	0.910	1800

**Tramezzo 12.5**

	MATERIALI	s*	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400
	termolaterizio Eurobrik	0.10	0.330	1.188	0.840	650
	intonaco esterno	0.015	0.900	3.240	0.910	1800

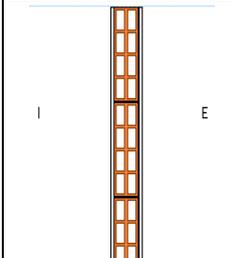
**Tramezzo 15**

	MATERIALI	s*	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.015	0.700	2.520	0.910	1400
	termolaterizio Eurobrik	0.12	0.330	1.188	0.840	650
	intonaco esterno	0.015	0.900	3.240	0.910	1800

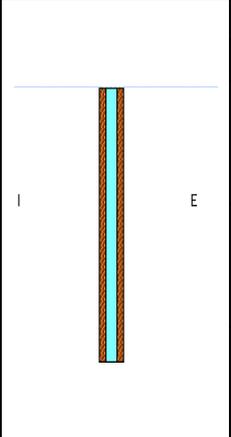
**Tramezzo 23.5**

	MATERIALI	s*	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.020	0.700	2.520	0.910	1400
	termolaterizio Eurobrik	0.20	0.330	1.188	0.840	650
	intonaco esterno	0.015	0.900	3.240	0.910	1800

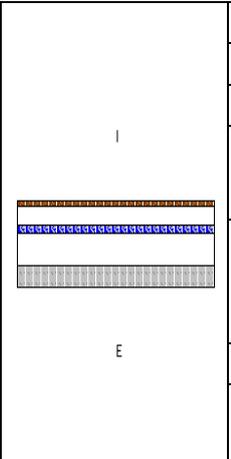
**Tramezzo 27**

	MATERIALI	s*	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400
	termolaterizio Eurobrik	0.250	0.330	1.188	0.840	650
	intonaco esterno	0.010	0.900	3.240	0.910	1800

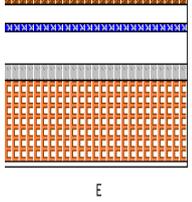
**M11**

	MATERIALI	s	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	legno di abete flusso perpendicolare alle fibre	0.020	0.120	0.432	1.380	450
	aria non ventilata flusso orizzontale (300 °K)	0.030	0.167	0.601	1.005	1.17
	legno di abete flusso perpendicolare alle fibre	0.020	0.120	0.432	1.380	450

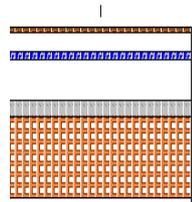
**P2**

	MATERIALI	s	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	parquet	0.010	1.000	3.600	0.840	2300
	massetto ripartitore in cls con rete	0.050	1.490	5.364	0.850	2200
	polistirene espanso sinterizzato 20 kg/m3	0.020	0.038	0.137	1.450	35
	cls alleggerito	0.080	0.170	0.612	0.850	500
	massetto in cls armato con retina metallica	0.050	1.900	6.840	0.850	2400

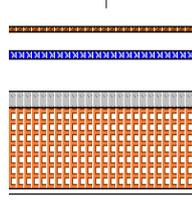
**P3**

	<b>MATERIALI</b>	<b>s</b>	<b><math>\lambda</math></b>		<b>ct</b>	<b><math>\rho</math></b>
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>3</sup> ]
	parquet	0.010	1.000	3.600	0.840	2300
	massetto ripartitore in cls con rete	0.050	1.490	5.364	0.850	2200
	polistirene espanso sinterizzato 20 kg/m <sup>3</sup>	0.020	0.038	0.137	1.450	35
	cls alleggerito	0.080	0.170	0.612	0.850	500
	caldana in cls	0.040	1.900	6.840	0.850	2400
	soletta in laterizio	0.020	0.500	1.800	0.840	1450
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400

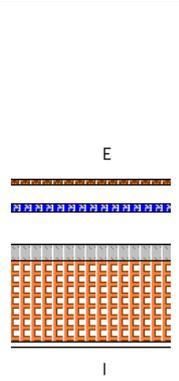
**P4**

	<b>MATERIALI</b>	<b>s</b>	<b><math>\lambda</math></b>		<b>ct</b>	<b><math>\rho</math></b>
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>3</sup> ]
	parquet	0.010	1.000	3.600	0.840	2300
	massetto ripartitore in cls con rete	0.050	1.490	5.364	0.850	2200
	polistirene espanso sinterizzato 20 kg/m <sup>3</sup>	0.020	0.038	0.137	1.450	35
	cls alleggerito	0.100	0.170	0.612	0.850	500
	caldana in cls	0.040	1.900	6.840	0.850	2400

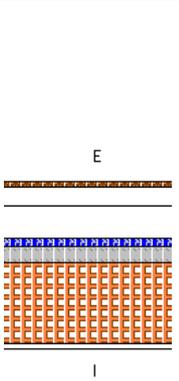
**P5**

	<b>MATERIALI</b>	<b>s</b>	<b><math>\lambda</math></b>		<b>ct</b>	<b><math>\rho</math></b>
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>3</sup> ]
	parquet	0.010	1.000	3.600	0.840	2300
	massetto ripartitore in cls con rete	0.050	1.490	5.364	0.850	2200
	polistirene espanso sinterizzato 20 kg/m <sup>3</sup>	0.020	0.038	0.137	1.450	35
	cls alleggerito	0.080	0.170	0.612	0.850	500
	caldana in cls	0.040	1.900	6.840	0.850	2400
	soletta in laterizio	0.200	0.500	1.800	0.840	1450
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400

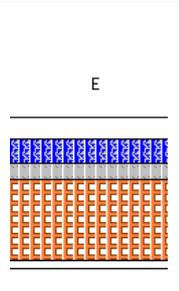
**S1**

	<b>MATERIALI</b>	<b>s</b>	<b><math>\lambda</math></b>		<b>ct</b>	<b><math>\rho</math></b>
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	parquet	0.010	1.000	3.600	0.840	2300
	massetto ripartitore in cls con rete	0.050	1.490	5.364	0.850	2200
	polistirene espanso sinterizzato 20 kg/m3	0.020	0.038	0.137	1.450	35
	cls alleggerito	0.080	0.170	0.612	0.850	500
	caldana in cls	0.040	1.900	6.840	0.850	2400
	soletta in laterizio	0.200	0.500	1.800	0.840	1450
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400

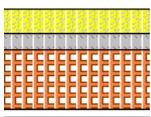
**S2**

	<b>MATERIALI</b>	<b>s</b>	<b><math>\lambda</math></b>		<b>ct</b>	<b><math>\rho</math></b>
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	parquet	0.010	1.000	3.600	0.840	2300
	massetto ripartitore in cls con rete	0.050	1.490	5.364	0.850	2200
	cls alleggerito	0.080	0.170	0.612	0.850	500
	polistirene espanso sinterizzato 20 kg/m3	0.020	0.038	0.137	1.450	35
	caldana in cls	0.040	1.900	6.840	0.850	2400
	soletta in laterizio	0.200	0.500	1.800	0.840	1450
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400

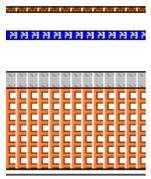
**S3**

	<b>MATERIALI</b>	<b>s</b>	<b><math>\lambda</math></b>		<b>ct</b>	<b><math>\rho</math></b>
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	massetto ripartitore in cls con rete	0.050	1.490	5.364	0.850	2200
	lastre termoisolanti	0.060	0.045	0.162	1.450	30
	caldana in cls	0.040	1.900	6.840	0.850	2400
	soletta in laterizio	0.200	0.500	1.800	0.840	1450
	intonaco interno	0.020	0.700	2.520	0.910	1400

**S4**

 E  I	MATERIALI	s	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400
	soletta in laterizio	0.160	0.500	1.800	0.840	1450
	caldana in cls	0.040	1.900	6.840	0.850	2400
	soletta in laterizio	0.200	0.500	1.800	0.840	1450
	sughero	0.060	0.052	0.187	1.800	200

**S5**

 E  I	MATERIALI	s	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm2K]	[kg/m3]
	parquet	0.010	1.000	3.600	0.840	2300
	massetto ripartitore in cls con rete	0.050	1.490	5.364	0.850	2200
	polistirene espanso sinterizzato 20 kg/m3	0.020	0.038	0.137	1.450	35
	cls alleggerito	0.080	0.170	0.612	0.850	500
	caldana in cls	0.040	1.900	6.840	0.850	2400
	soletta in laterizio	0.200	0.500	1.800	0.840	1450
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400

**Tabella 5.2- Pacchetti murari componenti l'unità immobiliare.**

L'edificio è costituito di 44 componenti finestrate, di cui solamente 6 si ripetono per dimensioni. Il tipo di vetro utilizzato è però il medesimo ed è un doppio vetro 3.9-12-4 con intercapedine di krypton. Per quanto riguarda i telai utilizzati sono di 2 tipi: il telaio esterno avente uno spessore di 115 mm e il telaio interno con uno spessore di 70 mm. Entrambi i telai hanno un coefficiente di assorbimento pari a 0.70.

Essendo 38 le finestre diverse risulta interessante trascriverne le caratteristiche nella tabella seguente.

Si ricordi che le caratteristiche che verranno elencate sono state ricavate dalle schede tecniche delle superfici finestrate di cui si era in possesso.

<b>Infisso</b>	<b>Larghezza (m)</b>	<b>Altezza (m)</b>	<b>Aw (m2)</b>	<b>Ag (m2)</b>	<b>% telaio</b>	<b>Uw (W/mK)</b>	<b>Uf (W/mK)</b>
<b>1</b>	4.85	0.84	4.06	2.97	0.27	1.70	2.06
<b>2</b>	2.29	0.84	1.91	1.25	0.35	1.76	2.06
<b>3</b>	3.62	0.84	3.03	2.17	0.28	1.73	2.06
<b>4</b>	2.48	2.43	6.02	5.36	0.11	1.46	2.06
<b>5</b>	1.49	0.83	1.24	0.76	0.39	1.80	2.06
<b>6</b>	0.89	1.44	1.28	0.79	0.38	1.78	2.06
<b>7</b>	0.89	2.42	2.15	1.70	0.21	1.63	2.06
<b>8</b>	0.89	2.42	2.15	1.44	0.33	1.72	2.06
<b>9</b>	1.29	1.44	1.85	1.28	0.31	1.69	2.06
<b>10</b>	0.89	2.42	2.15	1.44	0.33	1.72	2.06
<b>11</b>	2.28	2.42	5.50	4.86	0.12	1.47	2.06
<b>12</b>	1.29	1.42	1.83	1.26	0.31	1.70	2.06
<b>15</b>	3.62	0.84	3.03	2.36	0.22	1.68	2.06
<b>18</b>	0.88	1.43	1.27	0.79	0.38	1.78	2.06
<b>19</b>	1.49	0.83	1.24	0.76	0.39	1.80	2.06
<b>20</b>	1.39	0.74	1.02	0.59	0.43	1.85	2.06
<b>21</b>	0.89	1.77	1.57	1.01	0.36	1.75	2.06
<b>22</b>	2.65	0.84	2.22	1.47	0.34	1.75	2.06
<b>23</b>	1.49	0.84	1.25	0.76	0.39	1.80	2.06
<b>24</b>	5.04	0.83	4.20	2.79	0.34	1.75	2.06
<b>25</b>	3.65	2.41	8.80	7.97	0.09	1.43	2.06
<b>26</b>	2.86	2.41	6.89	6.18	0.10	1.45	2.06
<b>27</b>	3.63	2.41	8.75	7.41	0.15	1.51	2.06
<b>28</b>	3.90	2.41	9.38	8.00	0.15	1.50	2.06
<b>29</b>	8.45	2.08	17.54	15.41	0.12	1.46	2.06
<b>30</b>	4.35	2.00	8.70	7.83	0.10	1.44	2.06
<b>30-a</b>	1.50	2.00	3.00	1.88	0.37	1.59	2.06

<b>30-b</b>	0.70	1.08	0.76	0.53	0.30	1.80	2.06
<b>34</b>	3.62	0.59	2.13	1.52	0.29	1.80	2.06
<b>35</b>	4.12	0.59	2.43	1.55	0.36	1.85	2.06
<b>36</b>	2.30	0.59	1.36	0.75	0.45	1.90	2.06
<b>37</b>	2.30	0.59	1.36	0.97	0.28	1.79	2.06
<b>38</b>	1.86	0.59	1.10	0.59	0.47	1.91	2.06
<b>39</b>	3.56	0.59	2.10	1.50	0.29	1.81	2.06
<b>40</b>	5.05	0.59	2.98	1.93	0.35	1.84	2.06
<b>41</b>	1.77	0.59	1.04	0.55	0.47	1.92	2.06
<b>42</b>	1.72	0.59	1.01	0.54	0.47	1.92	2.06
<b>43</b>	2.08	0.59	1.23	0.67	0.46	1.91	2.06

Tabella 5.3- Infissi edificio.

La superficie finestrate ricopre, dunque, un totale di 146.74 m<sup>2</sup> di cui 85.11 appartenenti all'appartamento più grande e i restanti 61.63 appartenenti all'altro.

In particolare è possibile distinguere le finestre associate ai vari vani dell'edificio:

Piano	Vano	Orientamento parete	Tipo di infisso
<i>Piano interrato</i>	<b>8</b>	sud-est	36-37-43
		nord-ovest	27
	<b>4</b>	nord-est	40
		sud-est	38-39
	<b>3</b>	nord-est	42
	<b>11</b>	nord ovest	34-34
		sud-ovest	3535
		nord-est	26
		sud-est	25
	<b>12</b>	nord-ovest	34
	<b>1</b>	nord-est	41-43
<i>Piano terra</i>	<b>14</b>	sud-est	4,8
		sud-ovest	30
		nord-ovest	30-a
		nord-est	30-b
		nord ovest	7-11
	<b>15</b>	sud-est	12
	<b>17</b>	sud-est	10
		nord-est	10-18

	<b>19</b> <b>(WC)</b>	nord-est	19
	<b>19</b>	nord-est	4
		sud-ovest	9
	<b>20</b>	nord-est	15
		nord-ovest	1
	<b>21</b>	nord-ovest	3-3
		sud-est	3-3
		sud-ovest	28
<b><i>Primo piano</i></b>	<b>25</b>	nord-est	6
		sud-ovest	20-21
	<b>24</b>	nord-est	5
	<b>23</b>	nord-est	22
		sud-est	23
	<b>26</b>	nord-ovest	24
		sud-est	24-2
		sud-ovest	29

**Tabella 5.4- Finestre associate ai vari vani.**

Si riportano qui di seguito piante e prospetti dell'edificio oggetto del presente studio.

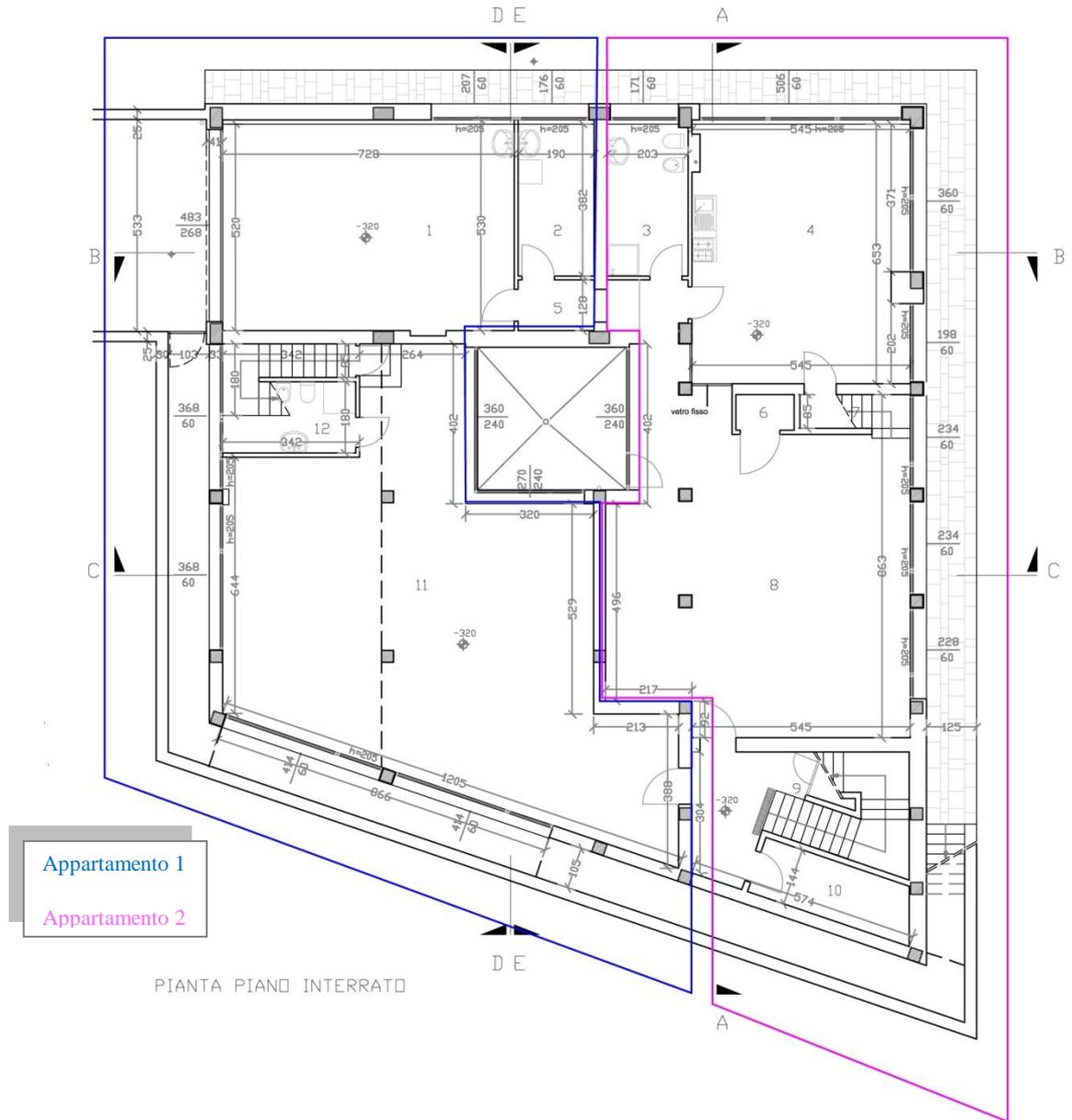


Figura 5.2- Piano interrato.

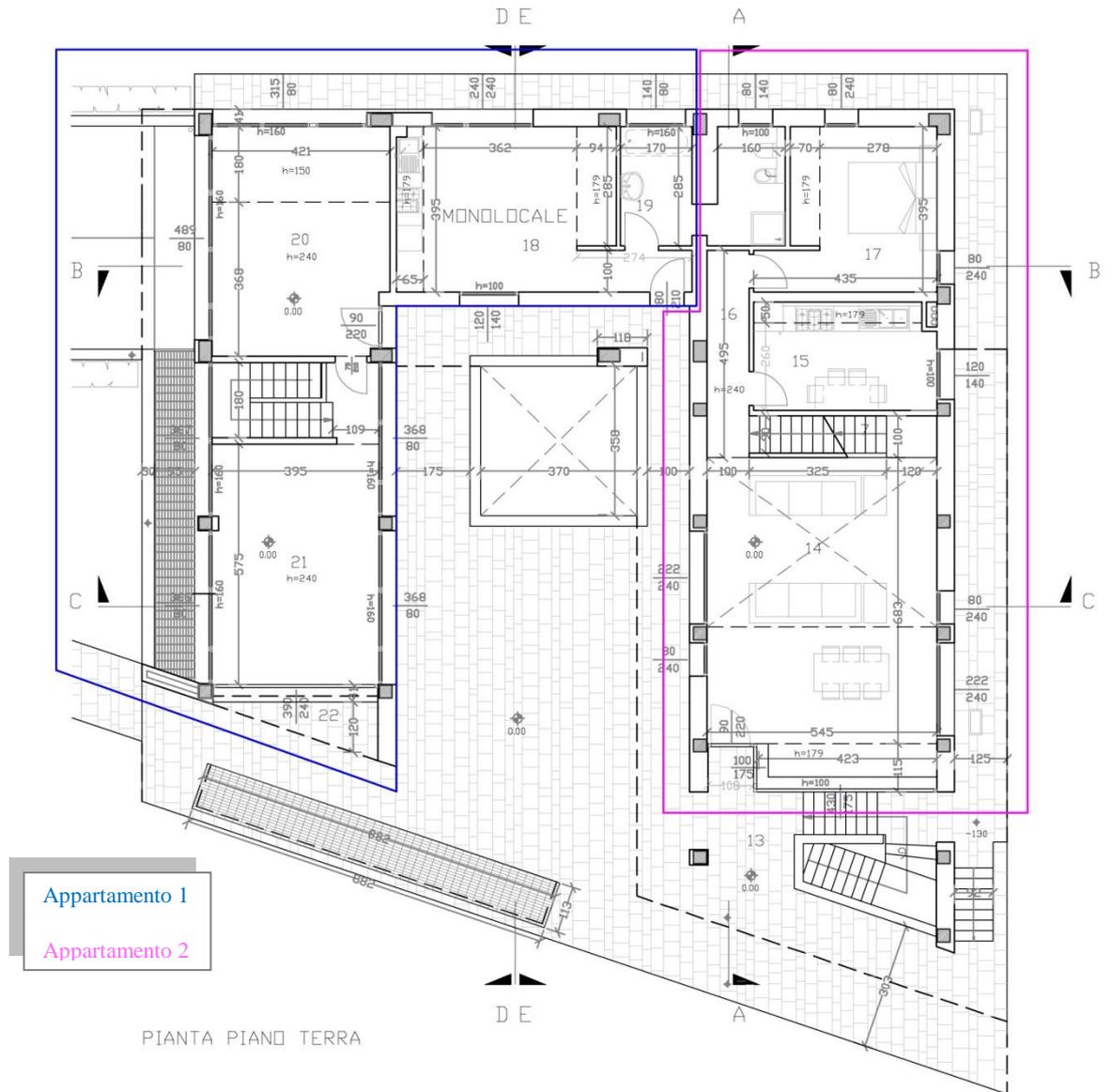


Figura 5.3- Piano terra.

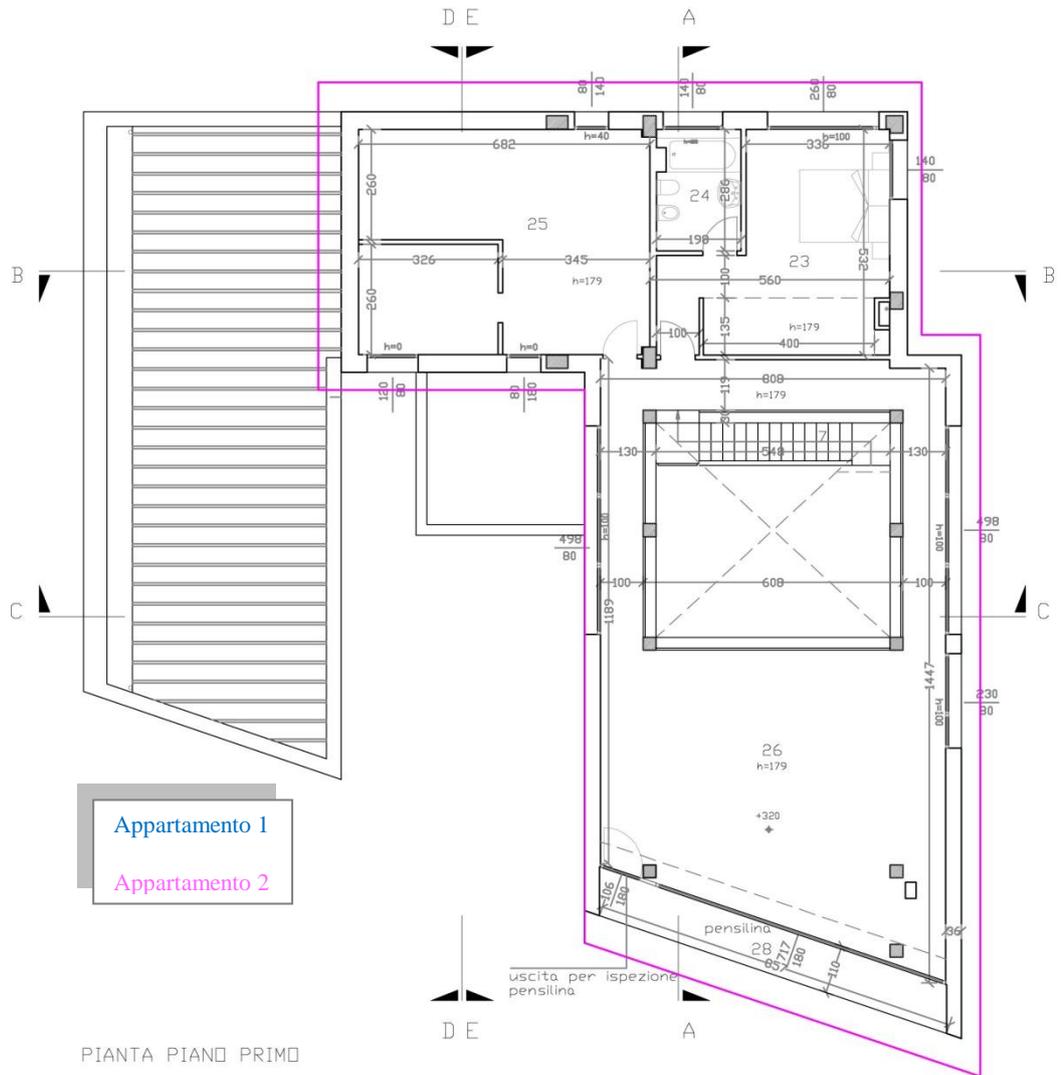
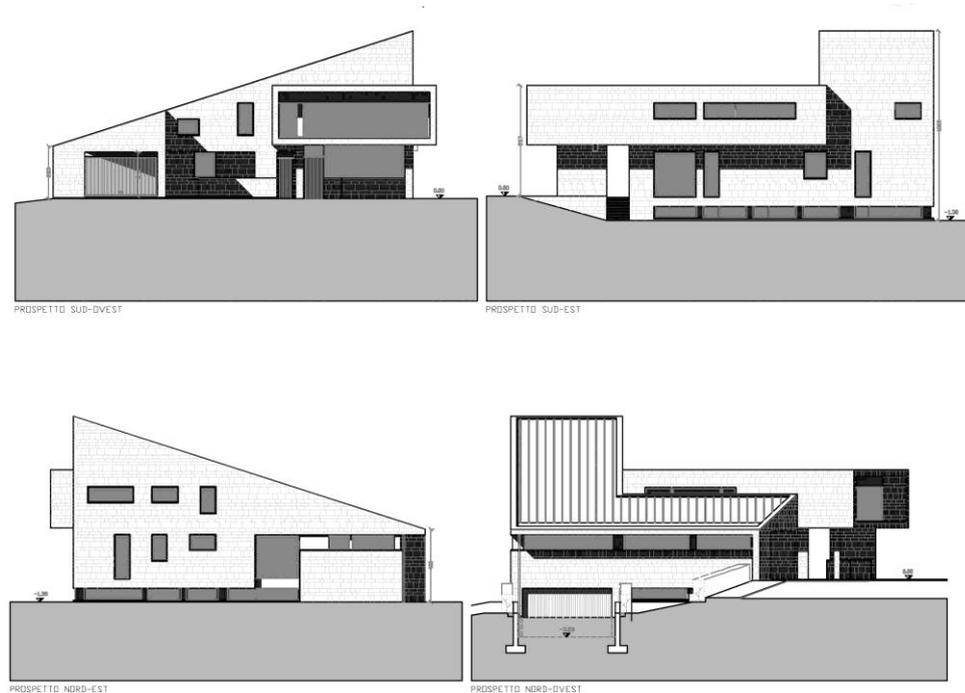


Figura 5.4- Piano primo.



**Figura 5.5- Prospetti.**

## 5.2 Impianto

Si riporta qui di seguito una breve descrizione dell' impianto realmente installato nell'unità immobiliare distinguendo entro l'impianto di riscaldamento e quello di acqua calda sanitaria.

### 5.2.1 Impianto di riscaldamento

L'impianto di riscaldamento si avvale di un sistema Pompa di Calore- Sonde geotermiche e Caldaia.

La Pompa di Calore viene alimentata da un circuito proveniente da due dissipatori geotermici costituiti da un fascio di tubi orizzontali posti in prossimità dell'edificio ad una profondità di 1.5 m.

Sulla tubazione di ritorno, del circuito Pompa di calore- Dissipatori geotermici è posta una valvola deviatrice V1 che provvede al preriscaldamento dell'ACS contenuta in un accumulatore.

All'interno della Pompa di Calore avviene lo scambio tra il circuito suddetto, PdC- Dissipatori geotermici, e il circuito PdC- Volano termico dal quale

avviene l'invio dell' acqua calda al Volano termico per l'alimentazione ai collettori.

La circolazione dell'acqua calda viene garantita da una pompa P4, posta sulla tubazione di ritorno.

In caso di non funzionamento o insufficienza della PdC occorre in aiuto la Caldaia. Ciò avviene attraverso una valvola deviatrice V2 che devia parte dell'acqua calda in uscita dalla caldaia e destinata al riscaldamento dell'ACS.

Dal volano termico l'acqua calda viene successivamente inviata, attraverso il sistema di distribuzione, ai pannelli radianti situati all'interno dei vari ambienti costituenti l'unità immobiliare.

L'attivazione e la regolazione di ogni componente dell'impianto di riscaldamento si avvale di termostati, sonde di temperatura esterna e di una centralina elettrica.

Si elencano qui di seguito i diversi sistemi:

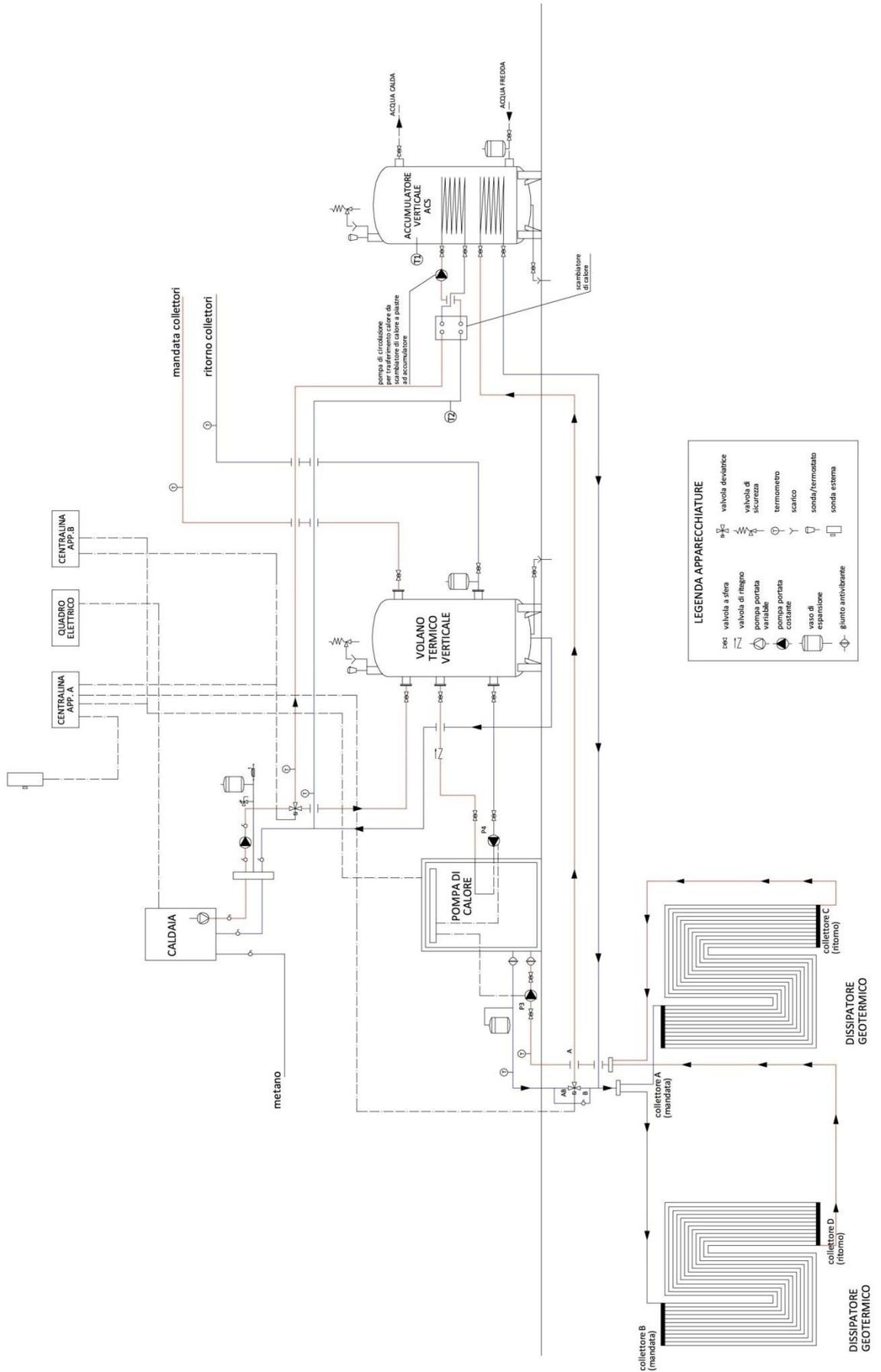
- Valvola deviatrice V1: in inverno la valvola viene aperta secondo la via B: acqua fredda che ha ceduto all'alloggio in quanto prelevata calda dal sottosuolo e che ritorna al terreno per ripetere il ciclo. In estate valvola aperta secondo la via A quando il termostato bollitore rileva una temperatura  $T < 25$  °C. Se invece il termostato rileva una temperatura  $T > 25$  °C è aperta secondo la via B. La temperatura in uscita dalla PdC è circa di 30 °C l'acqua calda che ha prelevato l'alloggio è mandata nel dissipatore.
- Valvola deviatrice V2: provvede ad inviare il calore dalla caldaia all'ACS (condizione normale di riposo), aperte le vie AB e B (chiusa la via A). E' la centralina elettrica che determina l'apertura delle vie.
- Accensione- spegnimento Pompa di Calore: la pompa di calore viene regolata dalla centralina elettrica.

### 5.2.2 Impianto di Acqua Calda Sanitaria

---

L'acqua fredda in arrivo all'acquedotto è inviata ad un accumulatore verticale. Al suo interno sono poste due serpentine appartenenti a due distinti circuiti. Il primo è quello alimentato dalla caldaia, che attraverso uno scambiatore a fasci tubieri mantiene una temperatura costante  $T_1$  all'interno dell'accumulatore. Il secondo circuito viene attivato solamente nel periodo estivo quando l'impianto

di riscaldamento è spento. L'alimentazione avviene attraverso la tubazione di ritorno del circuito "Dissipatore geotermico- PdC", sulla quale è posta la valvola deviatrice V1.





## Capitolo 6

### Analisi in regime stazionario

In questo capitolo si tratterà del sistema *EDIFICIO-IMPIANTO* attraverso l'utilizzo di un software commerciale MC4 Suite 2009, con l'obiettivo di determinare il **carico termico invernale** (secondo la UNI EN 12831), cioè la *massima potenza termica* che l'edificio, univocamente definito, disperde verso l'ambiente esterno. Una volta determinata questa grandezza è quindi possibile dimensionare l'impianto di riscaldamento per soddisfare condizioni confortevoli all'interno degli ambienti. Infine in accordo con la norma UNI EN 11300-1-2 sarà valutato il fabbisogno energetico dell'edificio e il fabbisogno di energia primaria facendo un confronto tra l'utilizzo di diversi tipi di generatori. Il programma utilizzato si affida ad un calcolo in **REGIME STAZIONARIO**.

Un sistema termodinamico è "stazionario" quando non dipende dal tempo: cioè che per il calcolo dei carichi invernali si decide di considerare costanti grandezze fisiche che non subiscono variazioni nel tempo. Difatti come si può ben immaginare i parametri climatici, caratteristici dell'ambiente esterno, hanno un andamento variabile nel tempo (si pensi alla temperatura dell'aria esterna o all'andamento della radiazione solare con le escursioni tipiche giornaliere).

Il motivo di un'ipotesi così lontana dalla realtà si spiega attraverso due considerazioni:

- l'obiettivo di indagare una situazione che abbia una durata temporale significativa (tale per cui il sistema si porti ad un regime "quasi stazionario");
- l'enorme semplificazione dei calcoli. Considerando variabili indipendenti dal tempo è possibile determinare l'entità del flusso termico con formule algebriche evitando le problematiche del regime dinamico.

Lo studio degli scambi termici in regime stazionario è proponibile per il regime invernale considerando anche alcune circostanze favorevoli. In inverno e alle nostre latitudini la radiazione solare (la principale grandezza climatica che ha la capacità di produrre un regime dinamico nell'edificio) è di entità poco rilevante perciò si ritiene trascurabile; in secondo luogo i carichi interni, che sono delle sollecitazioni termiche in forma di apporto di calore dovuto a lampade, attrezzature elettriche e persone, sono presi in considerazione solo raramente e quando si dimostri che tali apporti siano continui durante tutto il periodo di riscaldamento.

L'ipotesi di regime stazionario si può quindi ragionevolmente assumere nel calcolo invernale e così facendo molte proprietà tipiche dell'involucro edilizio che sono rilevanti quando si analizzano fenomeni di trasmissione del calore in regime dinamico possono essere trascurate come l'analisi di fenomeni di accumulo del calore nelle pareti nel tempo e la sfasamento temporale dell'onda termica tra esterno ed interno: Risulta quindi possibile trascurare l'inerzia termica e la capacità termica delle strutture.

## 6.1 Strumento di calcolo utilizzato: MC4 Suite 2009

Per lo studio dell'edificio si è utilizzato il programma MC4 Suite 2009 che come indicato precedentemente prevede un calcolo in regime stazionario dell'edificio.

Il software Mc4Suite 2009 consente la progettazione di un edificio permettendo di valutare l'impatto dei materiali, degli impianti e delle tecniche di costruzione e tramite esso è possibile stampare direttamente la relazione di Legge conforme al modello ufficiale comprensiva della targa energetica (UNI EN 15217) e l'Attestato di Qualificazione Energetica.

Il programma è completamente compatibile con AutoCAD 2009, perciò è possibile importare dei file .dwg contenenti le piante dell'edificio oggetto di studio o disegnare direttamente l'oggetto di valutazione tramite i comandi di disegno.

In ogni caso è sempre possibile apportare delle modifiche alle piante importate e inserire o togliere nuovi elementi.

Nella creazione di un nuovo progetto è opportuno quindi seguire specifici passi che portano a definire le condizioni al contorno dell'edificio su cui il programma si affiderà per i calcoli e le verifiche.

Prima di procedere con la vera e propria descrizione della modellazione dell'edificio è opportuno precisare che direttamente dall'input grafico il programma è in grado di leggere:

- superficie calpestabile,
- superficie disperdente,
- volume lordo e rapporto S/V (superficie/volume),
- l'entità delle dispersioni invernali per trasmissione e ventilazione,
- la trasmittanza termica delle strutture opache e finestrate,
- il fabbisogno di energia utile relativo all'involucro edilizio e di energia primaria del sistema edificio-impianto sulla base della norma UNI EN ISO 13790 e delle norme tecniche UNI/TS 11300-1 e 2.

E' inoltre possibile inserire all'interno degli archivi posseduti dal software:

- caratteristiche dei ponti termici secondo l'approssimazione lineare prevista dalla norma UNI EN ISO 14683;
- esposizioni contro terra di pavimenti e pareti secondo la norma UNI EN ISO 13370;
- scambio termico con ambienti non climatizzati secondo il calcolo del fattore di riduzione previsto dalla norma UNI EN ISO 13789;
- sistema di pannelli radianti sia a pavimento che a parete come indicato dalla norma UNI EN 1264;

L'inserimento dei **dati di input** avviene mediante il richiamo di specifiche schede ed archivi. Nel paragrafo successivo verranno elencati brevemente i passi effettuati per la modellazione dell'edificio in esame.

## 6.2 Modellazione edificio

---

I dati in ingresso necessari ai fini dei calcoli possono essere raggruppati in 4 famiglie:

➤ *Dati relativi alle caratteristiche tipologiche dell'edificio:*

volume lordo e volume netto dell'ambiente climatizzato; superfici di tutti i componenti dell'involucro e della struttura edilizia; tipologie e dimensionamento dei ponti termici; orientamenti di tutti i componenti trasparenti.

➤ *Dati relativi alle caratteristiche termiche e costruttive dell'edificio:*

trasmissione termica dei componenti dell'involucro edilizio; capacità termica aerea dei componenti della struttura; trasmittanza di energia solare totale dei componenti trasparenti; coefficienti di trasmissione lineare dei ponti termici.

➤ *Dati climatici:*

medie mensili di temperatura esterna e irraggiamento solare totale per ciascun orientamento.

➤ *Dati relativi alle modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio:*

ricambi d'aria, durata dei periodi di raffrescamento e riscaldamento; regime di funzionamento dell'impianto di climatizzazione, assunto continuo per le valutazioni di progetto e standard; apporti di calore interni.

Per comprendere meglio i passi che si sono effettuati per la modellazione dell'edificio oggetto di studio si riportano qui di seguito i vari passaggi.

### **Passo 1:**

Il primo passo che occorre effettuare è rappresentato dall' *inserimento della località di progetto*. Tale inserimento avviene nell'ambito di un'apposita

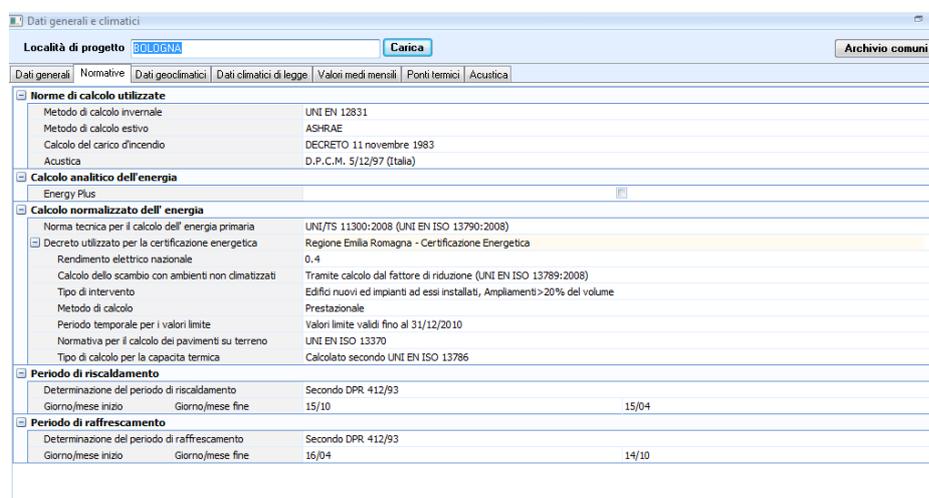
maschera che prevede l'accesso ad una database ove sono raccolti i dati geoclimatici di tutti i comuni italiani, suddivisi per regione.

Nel caso in esame si è definita come località di progetto la città di Bologna dove è situato l'edificio oggetto di studio.

I dati climatici di legge sono i seguenti:

<i>Località</i>	<i>Altitudine</i>	<i>Zona</i>	<i>Gradi giorno</i>	<i>Temperatura esterna</i>	<i>Temperatura terreno</i>
Bologna	54	E	2259	-5	14.2

**Tabella 6.1 – Dati di legge (UNI 10349).**



**Figura 6.1- Scheda normativa.**

**Passo 2:**

Occorre ora definire all'interno del programma la *composizione delle stratigrafie delle superfici opache e finestrate*. La definizione e caratterizzazione dei materiali avviene nell'Archivio Materiali e la composizione delle stratigrafie avviene nell'Archivio Strutture. Allo stesso modo avviene la definizione e la caratterizzazione dei componenti finestrati tramite l'Archivio Finestre (in quest'ultimo è possibile, inoltre, definire le caratteristiche costruttive, dimensionali, termiche e solari del serramento).

Man mano che si procede all'inserimento degli strati, il software procede al calcolo della trasmittanza termica (secondo UNI EN ISO 6946) e della massa

superficiale visualizzati in appositi box collocati nella parte superiore dell'archivio.

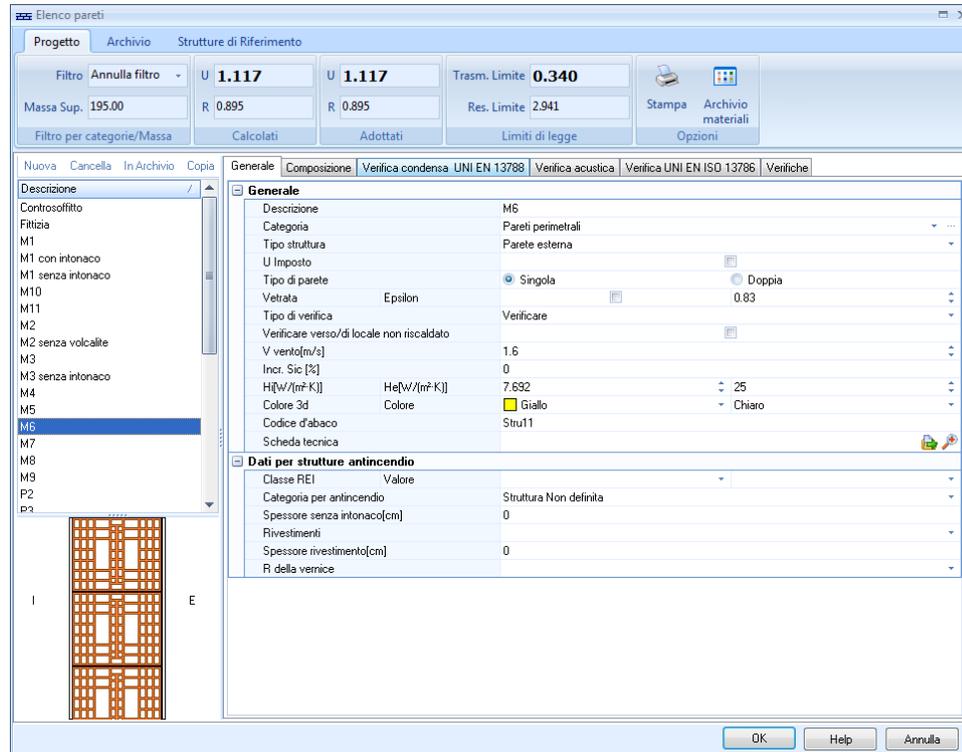


Figura 6.2- Schermata di costruzione stratigrafica di pareti e finestre.

Sono stati, dunque, inseriti tutti i pacchetti sia murari che delle superfici finestrate elencati precedentemente (vedi Capitolo 5 par. 5.1) con le relative caratteristiche, spessori e dimensioni. Alcuni dei materiali utilizzati per la definizione stratigrafica dei diversi elementi sono stati creati a doc mentre altri erano già presenti all'interno dell'Archivio materiali.

### Passo 3:

Si passa dunque alla definizione delle *caratteristiche dei piani dell'edificio* in termini di altezza netta e stratigrafie dei pavimenti e dei soffitti. Tale passo avviene all'interno dell'Elenco piani la cui compilazione è un'operazione preliminare nell'ambito della procedura di input grafico dell'edificio.

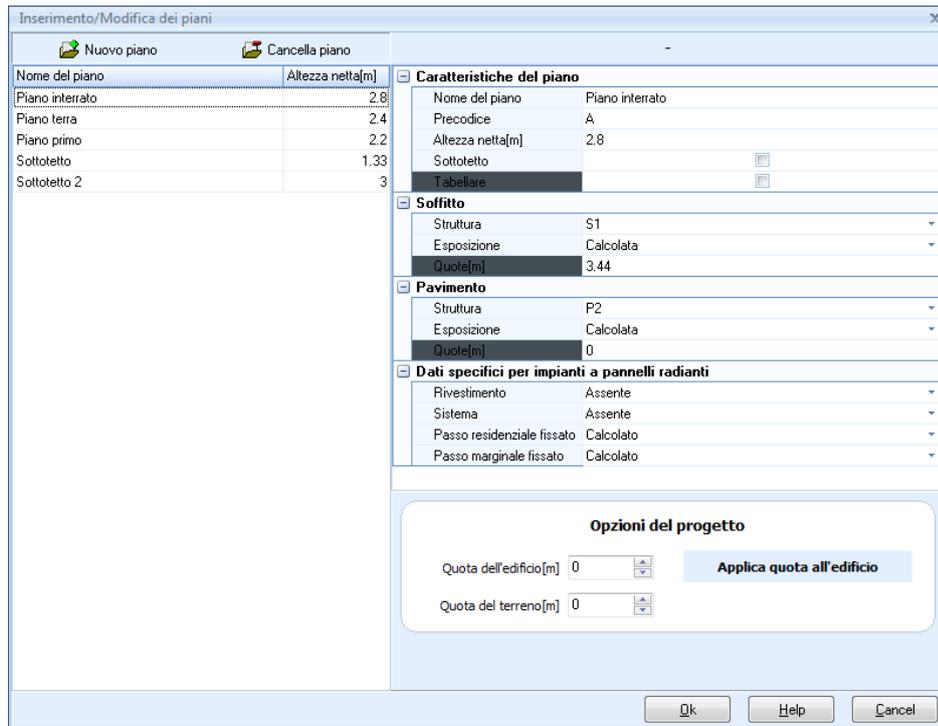


Figura 6.3- Schermata del numero di piani.

Sono state quindi creati 3 piani corrispondenti al :

- piano interrato
- piano terra
- primo piano
- sottotetto 1
- sottotetto 2

Per ognuno dei quali è stata indicata l'altezza netta, il tipo di soffitto e pavimento e le specifiche sull'impianto a pannelli.

<i>Piano</i>	<i>Altezza netta</i>	<i>Soffitto</i>	<i>Pavimento</i>
Piano interrato	2.80	S1	P2
Piano terra	2.40	S5	P3
Piano primo	2.20	Controsoffitto	P3

Tabella 6.2- Caratteristiche imposte in MC4 per ogni piano.

**Passo 4:**

La definizione delle zone avviene tramite l'Elenco Unità Immobiliari.

Sono state create 13 zone 6 delle quali non riscaldate. Per ognuna di esse si è definita:

- la temperatura interna di progetto
- l'umidità relativa
- numero di ricambi d'aria

<b>Zona</b>	<b>Riscaldata/non riscaldata</b>	<b>Temperatura interna di progetto (°C)</b>	<b>Numero di ricambi d'aria (Vol/h)</b>
Sottotetto 1	No	-	-
Sottotetto 2	No	-	-
Sottotetto 3	No	-	-
Garage	No	-	0.5
Vano scale	No	-	-
Locale impianto	No	-	0.5
Patio	No	-	-
Cucina	Si	20	1.5
Bagni	Si	24	2.0
Camera matrimoniale	Si	20	0.5
Camera singola	Si	20	0.5
1° appartamento	Si	20	0.5
2° appartamento	Si	20	0.5

**Tabella 6.3- Elenco delle zone con relative impostazioni.**

E' stato necessario suddividere l'edificio in bagni, cucine e altri locali in quanto come è visibile dalla tabella sovrastante è necessario impostare per ognuno di essi differenti valori dei ricambi d'aria per il *calcolo delle dispersioni*.

Invece per valutare il *fabbisogno energetico* dell'edificio è stato creato un ulteriore progetto dividendo l'unità immobiliare solamente in due zone (costituenti i due appartamenti) fissando un numero di ricambi d'aria pari a 0.3

Vol/h, una temperatura di 20 °C in tutti i locali e un valore per gli apporti interni pari a 450 W per ciascun appartamento (dato preso dalla norma UNI EN 11300-1).

**Passo 5:**

In questa fase si ha la *generazione dell'intero edificio*.

Occorre quindi procedere con la creazione dei vari piani in forma grafica.

Essendo il progetto esistente è stato sufficiente importare le piante da Autocad ad MC4.

**Passo 6:**

Una volta importate le planimetrie occorre *posizionare le murature esterne ed interne e gli infissi* utilizzando l'apposito comando.

Inserite tutte le pareti verticali si è proceduto al posizionamento delle superfici finestrate e delle porte esterne ed interne.



Figura 6.4- Comandi per inserire muri, finestre, porte, ecc.

**Passo 7:**

Create tutte le strutture appartenenti al nostro edificio si procede con *l'inserimento dei ponti termici*.

L'inserimento dei ponti termici può avvenire secondo due modalità: in modalità automatica, oppure con modalità manuale che prevede l'inserimento del ponte termico, mediante comando dedicato.

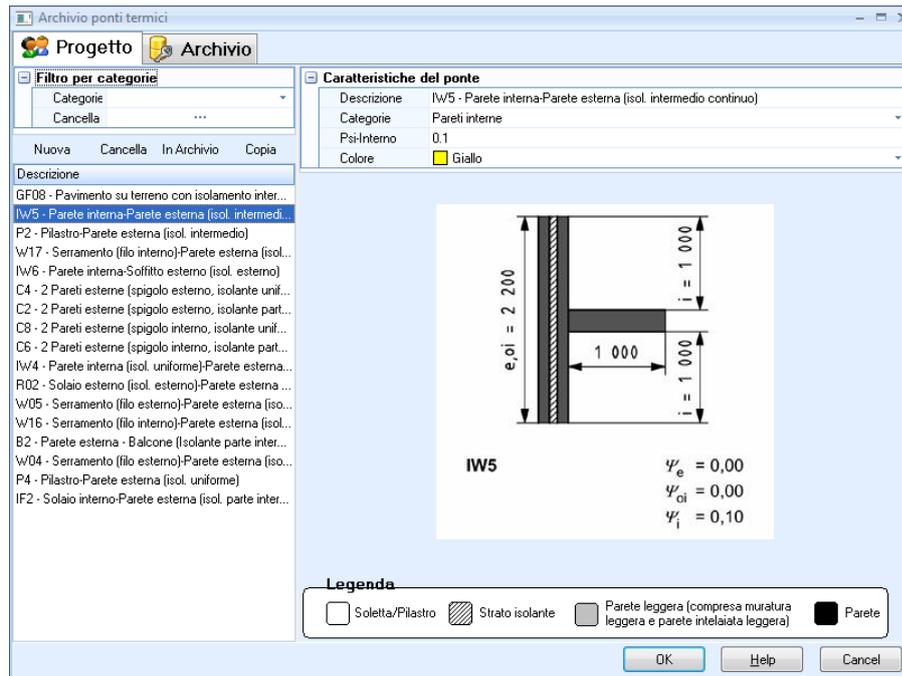
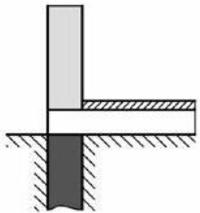
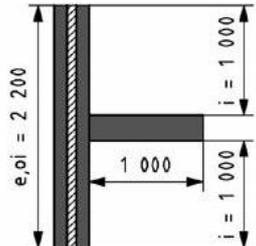
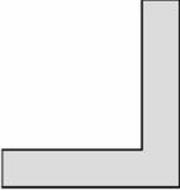
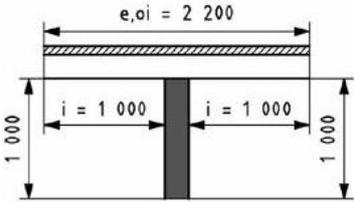
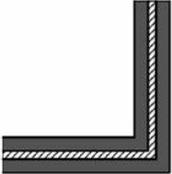
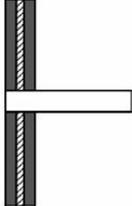
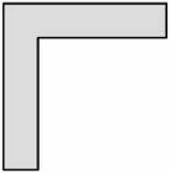


Figura 6.5- Schermata sull’inserimento dei ponti termici.

I ponti termici nel nostro caso sono stati immessi in maniera manuale. Andando a scegliere dall’Archivio di MC4 sono stati inseriti all’interno della struttura i seguenti ponti termici:

Ponte termico		Descrizione
 <p><b>GF8</b></p> $\psi_e = 0,05$ $\psi_{oi} = 0,20$ $\psi_i = 0,20$	GF08	Pavimento su terreno con isolamento interno
 <p><b>IW5</b></p> $\psi_e = 0,00$ $\psi_{oi} = 0,00$ $\psi_i = 0,10$	IW5	Parete interna-parete esterna isolamento intermedio

 <p><b>W17</b></p> <p> <math>\psi_e = 0,40</math>  <math>\psi_{oi} = 0,40</math>  <math>\psi_i = 0,40</math> </p>	<p>W17</p>	<p>Serramento (filo interno) parete esterna</p>
 <p><b>C8</b></p> <p> <math>\psi_e = 0,10</math>  <math>\psi_{oi} = -0,10</math>  <math>\psi_i = -0,10</math> </p>	<p>C8</p>	<p>Pareti esterne</p>
 <p><b>P2</b></p> <p> <math>\psi_e = 1,20</math>  <math>\psi_{oi} = 1,20</math>  <math>\psi_i = 1,20</math> </p>	<p>P2</p>	<p>Pilastro-parete esterna (isolamento intermedio);</p>
 <p><b>IW6</b></p> <p> <math>\psi_e = 0,00</math>  <math>\psi_{oi} = 0,00</math>  <math>\psi_i = 0,10</math> </p>	<p>IW6</p>	<p>Parete interna- soffitto esterno (isolamento esterno),</p>

 <p><b>W5</b></p> $\psi_e = 0,40$ $\psi_{oi} = 0,40$ $\psi_i = 0,40$	<p><b>W5</b></p>	<p>Serramento (filo esterno)- parete esterna</p>
 <p><b>C6</b></p> $\psi_e = 0,15$ $\psi_{oi} = -0,10$ $\psi_i = -0,10$	<p><b>C6</b></p>	<p>2 Pareti esterne</p>
 <p><b>IF2</b></p> $\psi_e = 0,95$ $\psi_{oi} = 0,95$ $\psi_i = 1,05$	<p><b>IF2</b></p>	<p>2 Pareti esterne</p>
 <p><b>W16</b></p> $\psi_e = 0,15$ $\psi_{oi} = 0,15$ $\psi_i = 0,15$	<p><b>W16</b></p>	<p>Serramento (filo interno)- parete esterna</p>
 <p><b>C4</b></p> $\psi_e = -0,15$ $\psi_{oi} = 0,10$ $\psi_i = 0,10$	<p><b>C4</b></p>	<p>2 Pareti esterne</p>

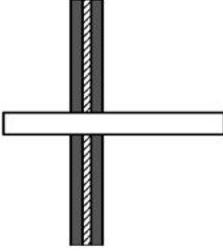
 <p><b>W4</b></p> $\psi_e = 0,15$ $\psi_{oi} = 0,15$ $\psi_i = 0,15$	<p>W4</p>	<p>Serramento (filo esterno)-parete esterna</p>
 <p><b>B2</b></p> $\psi_e = 0,95$ $\psi_{oi} = 0,95$ $\psi_i = 1,05$	<p>B2</p>	<p>Parete esterna-balcone</p>

Tabella 6.4- Ponti termici.

**Passo 8:**

Definizione dell'*esposizione*, la scheda relativa all'esposizioni è fondamentale ai fini del calcolo del carico termico di un ambiente perché con essa si definiscono le condizioni al contorno del locale analizzato.

L'esposizioni si suddividono in tre diverse tipologie:

- *esterne*: riguardano sia le strutture verticali che orizzontali in cui la temperatura di confine è quella della località di progetto;
- *interne*: in cui si considera lo scambio termico verso degli ambienti a diversa temperatura;
- *contro terra*: come pavimenti e pareti di piani interrati in cui si ha lo scambio di calore con il terreno posto ad una temperatura diversa.

**Passo 9:**

L'ultima operazione da compiere risulta quella di *creare i vari ambienti* di cui l'edificio stesso è composto. Tale operazione consiste nel selezionare un punto

interno dell'edificio e attribuirgli una zona creata precedentemente nell'elenco unità immobiliari.

Sono stati creati, quindi, tanti ambienti quanti risultano i locali dell'edificio esaminato.

Si riporta qui di seguito l'elenco dei vari ambienti con il corrispondente numero del vano elencato nel Capitolo 5.

D'ora in avanti (per il dimensionamento dei pannelli radianti) si farà riferimento alla dicitura della colonna a sinistra.

<b>Nome ambienti</b>	<b>Locale</b>	<b>Vano corrispondente</b>
AU1-1	Salone	8
AU1-9	Camera	4
AU1-3	Salone	11
BU1-2	Cucina	18
BU1-4	Camera	20
BU1-3	Camera	21
BU1-1	Salone	14-6
BU1-8	Camera	17
BU1-7	Cucina	15
CU1-4	Salone	26
CU1-2	Camera singola	25
CU1-3	Camera matrimoniale	23
AU1-10	Bagno piano interrato	3
AU1-6	Bagno piano interrato	12
BU1-5	Bagno piano terra	19
BU1-6	Bagno piano terra	17
CU1-5	Bagno piano primo	24
AU1-13	Locale impianto	10
AU1-14	Vano scale	6
AU1-11	Bagno garage	2
AU1-5	Garage	1

**Tabella 6.5- Elenco ambienti considerati.**

Inoltre suddividendo l'unità immobiliare nei due appartamenti si riportano qui di seguito gli ambienti associati ad ognuno di essi:

<i>Appartamento 1</i>		<i>Appartamento 2</i>	
<i>Nome ambiente</i>	<i>Vano</i>	<i>Nome ambiente</i>	<i>Vano</i>
AU1-3	11	AU1-1	8
AU1-6	12	AU1-5	1
BU1-2	18	AU1-11	2
BU1-3	21	AU1-9	4
BU1-4	20	AU1-10	3
BU1-5	19	BU1-1	14-6
		BU1-8	17
		BU1-7	15
		BU1-6	17
		CU1-4	26
		CU1-3	23
		CU1-2	25
		CU1-5	24

**Tabella 6.6-** Associazione dei vari locali ai due appartamenti.

**Passo 9:**

Conclusa questa operazione si è completato il progetto con la creazione verosimile del *tetto* e la *morfologia del suolo* che lo circonda attraverso il tracciamento delle linee di livello.

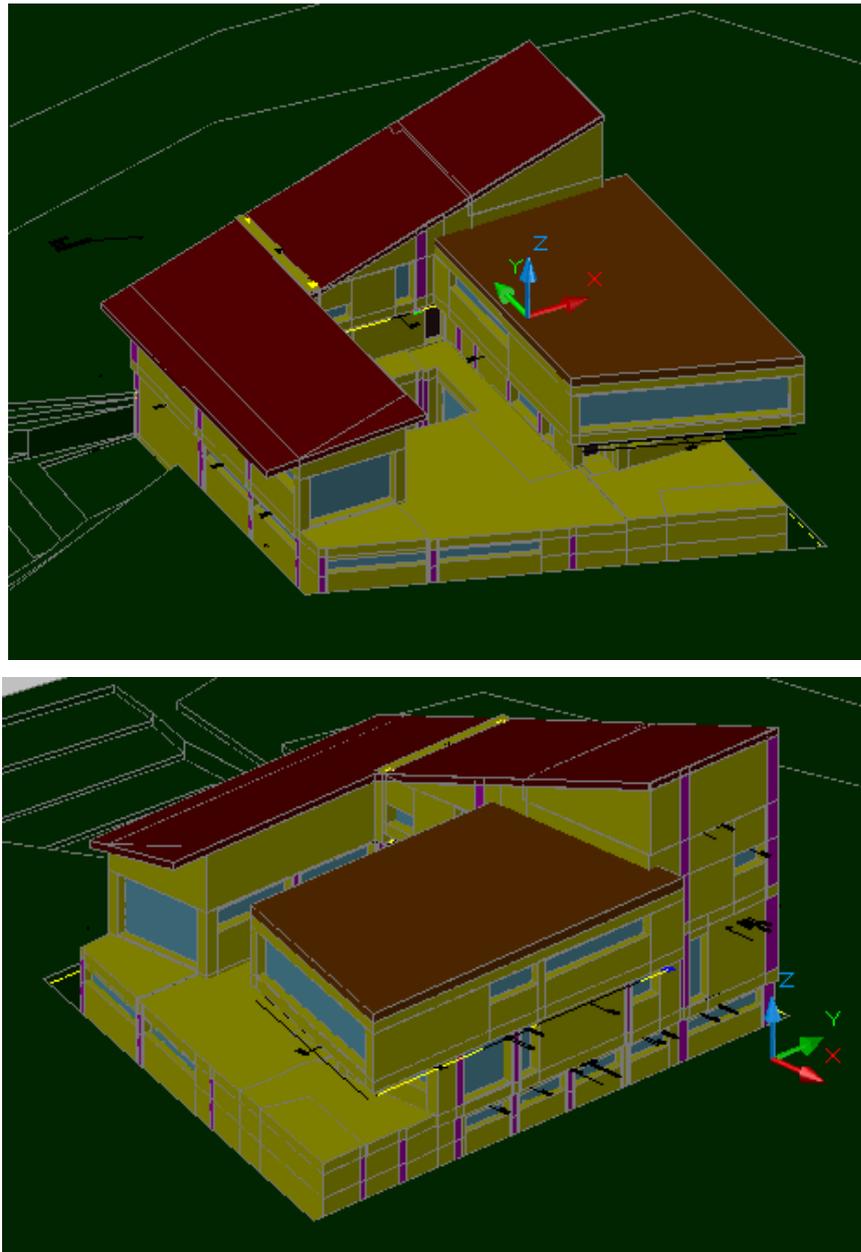


Figura 6.6- 3D creato da MC4 dell'edificio oggetto di studio.

### 6.3 Calcolo dispersioni invernali

La norma a cui si fa riferimento per i calcoli del carico termico di progetto (riscaldamento) è la UNI EN 12831. Vale la pena prima di elencare le dispersioni calcolate per ciascun ambiente ricordare i punti base già citati nel Capitolo 2.

Il metodo di calcolo a cui si farà riferimento è quello per edifici con altezza limitata degli ambienti ( $h \leq 5 m$ ) e per i quali è previsto il riscaldamento “ a

regime permanente” nelle condizioni di progetto. Le *ipotesi* su cui si basa tale metodo sono:

- Distribuzione uniforme della temperatura;
- Dispersioni termiche calcolate in condizioni di regime permanente;
- Proprietà termofisiche costanti e caratteristiche degli elementi dell’edificio immutabili;
- Temperatura interna dell’aria = temperatura operante;
- Edifici scarsamente isolati e/o durante i periodi di “ripresa” del riscaldamento con sistemi di emissione ad elevato scambio convettivo (riscaldamento ad aria);
- Edifici con ampie superfici riscaldanti con significativa componente radiante (pannelli radianti a soffitto o a pavimento);
- Edifici con scarsa uniformità della temperatura nell’ambiente.

I *dati di input* che servono per il calcolo delle dispersioni sono:

- Temperatura esterna di progetto per il calcolo della dispersione termica di progetto verso l’esterno [ $^{\circ}C$ ];
- Temperatura esterna media annuale per il calcolo della dispersione termica verso il terreno [ $^{\circ}C$ ];
- Temperatura interna [ $^{\circ}C$ ];
- Volume d’aria interna per ogni ambiente [ $m^3$ ];
- Area di ciascun elemento dell’edificio [ $m^2$ ];
- Trasmittanza termica di ciascun elemento dell’edificio [ $W/m^2K$ ];
- Trasmittanza termica lineare di ciascun ponte termico lineare [ $W/mK$ ];
- Lunghezza di ciascun ponte termico lineare [ $m$ ].

Per quanto riguarda i *coefficienti di dispersione termica per ventilazione*, si utilizzano le seguenti quantità:

- Tasso di ventilazione esterna minimo orario [ $h^{-1}$ ];
- Tasso orario di ventilazione con una differenza di pressione di 50 Pa tra interno ed esterno [ $h^{-1}$ ];
- Portata d’aria per infiltrazione dovuta alla mancanza di tenuta dell’involucro dell’edificio, tenendo conto del vento e dell’effetto camino [ $m^3/s$ ];
- Portata d’aria di rinnovo [ $m^3/s$ ];

- Portata d'aria di estrazione [ $m^3/s$ ];
- Rendimento di recupero del sistema di recupero del calore sull'aria di estrazione.

Tutte caratteristiche che è stato possibile impostare all'interno del programma, o che in automatico il programma considerava.

Quindi, sapendo che la dispersione termica totale di un edificio o di una zona termica riscaldata a temperatura interna uniforme  $\theta_i$  risulta pari a <sup>nota 1</sup> :

$$\Phi_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} \quad (6.1)$$

Dove:

$\Phi_{T,i}$  rappresenta la dispersione termica di progetto per trasmissione per uno spazio riscaldato [ $W$ ];

$\Phi_{V,i}$  rappresenta la dispersione termica di progetto per ventilazione per uno spazio riscaldato [ $W$ ].

---

Nota 1.

Si rimanda al capitolo 2 par.2.2.1.3 per maggiori informazioni.

Grazie al software utilizzato è stato possibile, una volta inserite le specifiche dell'edificio, in conformità con quanto afferma la UNI EN 12381, procedere direttamente con il calcolo delle dispersioni attraverso l'apposito comando.

I risultati ottenuti sono stati:

<b>Locale</b>	<b>Superficie (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Altezza (m)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Dispersioni (W)</b>
AU1-1	63.95	2.77	177.16	3456
AU1-9	36.16	2.80	101.25	2066
AU1-3	87.49	2.77	242.35	4552
AU1-6	6.27	2.80	17.56	1212
AU1-10	7.86	2.80	22.01	1064
BU1-2	22.43	2.80	62.80	2389
BU1-4	22.69	2.40	54.46	1761
BU1-3	30.41	2.40	73.00	3429
BU1-1	48.99	2.80	137.18	3278
BU1-8	14.61	2.80	40.91	931
BU1-7	11.31	2.80	31.67	686
BU1-6	5.26	2.80	14.74	644
BU1-5	4.93	2.80	13.80	634
CU1-4	103.68	1.80	186.63	5964
CU1-2	35.02	1.80	63.04	2031
CU1-3	22.78	3.55	80.86	2006
CU1-5	5.65	3.55	20.70	1163
<b>Totale</b>			<b>1739</b>	<b>38031</b>

**Tabella 6.7- Dispersioni ambienti.**

## 6.4 Dimensionamento dei pannelli radianti

Il punto di partenza per il dimensionamento dei pannelli radianti è costituito, come già accennato nel paragrafo 4.4 dalla determinazione delle potenze richieste da ogni singolo locale.

Nel caso in esame tale risoluzione analitica è stata tralasciata essendo nota la potenza richiesta da ogni locale, direttamente dal programma MC4 Suite 2009.

Le potenze da soddisfare per ogni singolo locale dell'edificio vengono così elencate nella tabella seguente.

Si specifica che dalle dispersioni totali sono state eliminate le dispersioni verso il terreno/ pavimento.

Locale		Potenza richiesta (W)	Area pannellabile (m <sup>2</sup> )	Potenza specifica (W/m <sup>2</sup> )
AU1-1	salone	2861	63.92	45
AU1-9	salone	1721	35.04	49
AU1-3	salone	4217	85.67	49
BU1-2	cucina	2238	22.43	100
BU1-4	camera	2289	24.89	92
BU1-3	camera	3429	20.42	168
BU1-1	salone	3278	49.24	67
BU1-8	camera	931	14.53	66
BU1-7	cucina	685	11.06	63
CU1-4	camera	5409	69.29	78
CU1-2	camera	1935	34.93	55
CU1-3	salone	2006	22.77	87
AU1-10	bagno	951	7.36	129
AU1-6	bagno	1126	5.98	188
BU1-5	bagno	634	3.91	162
BU1-6	bagno	644	4.3	150
CU1-5	bagno	1163	4.49	259

**Tabella 6.8- Potenze richieste da ciascun locale.**

Prima di procedere con il vero e proprio dimensionamento occorre, verificare le condizioni di benessere fisiologico.

Bisogna, cioè accertarsi che la potenza termica ceduta dal pannello,  $Q$ , non superi la potenza massima,  $Q_{max}$ :

$$Q < Q_{max} \quad (6.2)$$

Dove:

$Q$  rappresenta la potenza termica richiesta al pannello,  $[W]$  <sup>nota 2</sup>

$Q_{max} = A \cdot q_{max}$ , rappresenta la potenza massima cedibile dal pannello,  $[W]$

$A$  rappresenta la superficie coperta dal pannello,  $[m^2]$

$q_{max}$  la potenza specifica massima cedibile dal pannello,  $[W/m^2]$

Tale verifica risulta importante in quanto se  $Q > Q_{max}$  occorre fornire una potenza termica integrativa a quella ceduta dal pannello tramite un corpo scaldante aggiuntivo.

Confrontando i valori di potenza raggiungibili da un pannello (che nel caso in esame è pari a  $85 \text{ W/m}^2$  come vedremo in seguito) con i flussi termici riportati nella tabella precedente si nota come i locali BU1-2, BU1-3 e BU1-4 non soddisfino la disuguaglianza. Sarà quindi necessario posizionare oltre al sistema a pannelli radianti a pavimento un ulteriore dispositivo.

#### 6.4.1 Determinazione temperature di mandata e potenza massima emessa dal pannello

La prima cosa da fare per il dimensionamento dei pannelli risulta la determinazione della temperatura di mandata dell'acqua.

Per valutare la temperatura di mandata si procede nel modo seguente:

Si valuta dapprima la massima media logaritmica che è possibile considerare conoscendo il passo minimo che andrà ad essere utilizzato, lo spessore del massetto sopra i tubi e la conducibilità del massetto.

---

##### Nota 2.

*La potenza richiesta rappresenta la potenza a cui deve far fronte il pannello per soddisfare il fabbisogno termico del locale da riscaldare*

Considerando :

- spessore massetto sopra i tubi = 3 cm;
- conducibilità massetto = 1.49 [W/mK]
- passo minimo = 10 cm

e utilizzando la formula riportata in normativa:

$$\Delta\vartheta_{H,G} = \varphi \cdot \left[ \frac{B_G}{B \cdot \prod_i a_i^{m_i}} \right]^{\frac{1}{1-n_G}} \quad (6.3)$$

Si ottiene una differenza di temperatura minima pari a:

$$\Delta\vartheta_{H,G} = 16.72 \text{ K}$$

Dove:

$$\varphi = 1$$

$$B_G = 75$$

$$\prod_i a_i^{m_i} = 0.76$$

$$B = 6.7$$

$$n_G = 0.045$$

A questo punto fissando un  $\sigma = 5 \text{ K}$  risulta  $\sigma/\Delta\vartheta_H \leq 0,5$  e quindi utilizzando la formula da normativa:

$$\Delta\vartheta_{V,des} = \Delta\vartheta_{H,des} + \frac{\sigma}{2} \quad (6.4)$$

Si determina  $\Delta\vartheta_{V,des} = 19 \text{ K}$

È quindi possibile definire la temperatura di mandata del fluido termovettore pari a :

$$\vartheta_{V,des} = 20 + 19 \cong 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

In definitiva è possibile affermare che il massimo valore di  $\Delta\vartheta_{H,G}$  ammesso è quello riportato precedentemente. Quindi nel dimensionamento si dovranno

avere, per ciascun locale, valori di  $\Delta\vartheta_H$  minori o uguali a quello calcolato precedentemente.

Inoltre, conoscendo la media logaritmica massima è possibile definire la potenza massima emessa dal pannello. Sempre utilizzando la formula da normativa:

$$q_G = \varphi \cdot B_G \cdot \left[ \frac{\Delta\vartheta_{H,G}}{\varphi} \right]^{n_G} \quad (6.5)$$

Si ottiene nel caso in esame un  $q_G = 85 \text{ W/m}^2$ .

#### 6.4.2 Dimensionamento dei pannelli radianti tramite un software commerciale (software Pannelli radianti Caleffi s.p.a.)

Invece di procedere con il dimensionamento tramite i diagrammi forniti dal produttore si è utilizzato il software, “Pannelli radianti”, liberamente scaricabile dal sito internet Caleffi ([www.caleffi.it](http://www.caleffi.it)). I dati generali in input al programma sono stati:

- Temperatura massima di progetto = 40 °C;
- Temperatura ambiente = 20°C;
- Resistenza termica del pavimento = 0,05  $\text{m}^2\text{K/W}$  (essendo il pavimento un parquet di 10 mm di spessore);
- Spessore massetto sopra i tubi = 3 cm
- Tipo di tubi PEX 17x2

Utilizzando, così, 6 collettori , si sono dimensionati i pannelli relativi ai vari locali. Per ciascun locale si specifica di volta in volta:

- Potenza da soddisfare [W];
- Superficie pannellabile [ $\text{m}^2$ ]; <sup>nota 3</sup>
- Temperatura ambiente [°C]; <sup>nota 4</sup>
- Temperatura ambiente sottostante [°C];
- Resistenza termica sotto i pannelli [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ];

- Spessore del massetto sopra i tubi [m].

Scegliendo tra le diverse opzioni fornite dal programma nei riguardi del passo, della velocità del fluido e del salto termico:

Figura 6.7- Scelta pannelli tramite Software Caleffi.

I risultati ottenuti, tramite il software sono riportati nella tabella che segue.

Nota 3.

Nel dimensionamento dei pannelli è possibile suddividere il locale in zona periferica e zona calpestabile, così come indicato dalla norma. Nel caso in esame si è preferito mantenere un passo fisso per lo stesso ambiente.

Nota 4.

Per i locali del piano interrato la temperatura del terreno è stata considerata pari a 14,2 °C.

Locali	Passo (cm)	Dt (°C)	Portata (l/h)	Potenza richiesta (W)	Temperatura (°C)	Lunghezza (m)	Potenza verso il basso (W)
AU1-1	30.0	10.0	324	2861	24.3	212	916
AU1-9	30.0	7.5	260	1721	24.6	116	542
AU1-3	20.0	13.0	432	4217	24.7	364	1292
BU1-2	10.0	6.5	308	2238	27.7	228	420
BU1-4	10.0	8.0	276	2289	27.3	258	540
BU1-3	10.0	8.5	180	3429	27.2	208	188
BU1-1	10.0	12.0	264	3278	26.3	488	384
BU1-8	20.0	7.5	70	931	26.0	74	109
BU1-7	20.0	8.5	78	685	25.7	57	81
CU1-4	10.0	8.5	690	5409	27.2	696	1410
CU1-2	20.0	10.5	178	1935	25.2	176	228
CU1-3	10.0	5.0	387	2006	28.0	231	237
AU1-10	7.5	3.0	206	951	31.2	98	140
AU1-6	7.5	2.5	218	1126	31.3	80	154
BU1-5	7.5	1.0	326	634	31.7	52	50
BU1-6	7.5	1.0	324	644	31.7	58	55
CU1-5	7.5	2.0	184	1163	31.5	60	56

Tabella 6.9- Risultati ottenuti tramite il software Caleffi.

Come evidenziato precedentemente per i locali BU1-2, BU1-3 e BU1-4 non è stato possibile soddisfare il fabbisogno termico solo attraverso i pannelli radianti a pavimento. Il dimensionamento è quindi riferito a un soddisfacimento di una potenza pari rispettivamente a 1972, 1669 W e 1891 W. Per quanto riguarda i bagni, in nessuno di essi è stato possibile soddisfare la potenza richiesta solo attraverso i pannelli a pavimento. Considerando un passo di 7.5 cm infatti si ha un soddisfacimento di potenza pari ai dati riportati nella tabella sottostante.

Rimangono quindi da soddisfare le seguenti potenze :

<b>Locali</b>	<b>Potenza soddisfatta (W)</b>	<b>Potenza residua (W)</b>
<b>BU1-3</b>	1669	1760
<b>BU1-2</b>	1972	266
<b>BU1-4</b>	1969	1398
<b>AU1-10</b>	628	323
<b>AU1-6</b>	520	606
<b>BU1-5</b>	358	276
<b>BU1-6</b>	394	250
<b>CU1-5</b>	397	766

**Tabella 6.10- Potenza da soddisfare e Potenza soddisfatta nei vari locali.**

#### 6.4.2.1 Confronto foglio Excel - risultati software Caleffi

Prima di compensare tale fabbisogno residuo, si è ritenuto opportuno verificare tali risultati con quelli dalla norma UNI EN 1264 parte 2 e 3. La verifica è stata condotta riportando in un foglio EXEL le formule citate precedentemente nel par.4.6; formule riguardanti la potenza aerica emessa verso l'alto, la potenza emessa verso il basso dal pannello e la portata.

Quindi a parità di passo e di dt utilizzato è stato possibile ottenere un confronto nei riguardi della potenza aerica emessa verso l'alto, potenza emessa verso il basso dal pannello e la portata.

Si ricorda che tali grandezze sono funzioni della:

- resistenza del pavimento;
- conducibilità del massetto;
- resistenza verso il basso;
- interasse dei tubi;
- superficie pannellabile;
- media logaritmica;
- spessore massetto sopra e sotto i tubi.

	<b>Scarto % della portata</b>	<b>Scarto % della potenza verso il basso</b>
<b>AU1-1</b>	3%	0%
<b>AU1-9</b>	4%	1%
<b>AU1-3</b>	3%	1%
<b>BU1-2</b>	3%	-1%
<b>BU1-4</b>	-8%	0%
<b>BU1-3</b>	4%	0%
<b>BU1-1</b>	3%	0%
<b>BU1-8</b>	2%	-1%
<b>BU1-7</b>	4%	0%
<b>CU1-4</b>	-1%	-3%
<b>CU1-2</b>	4%	0%
<b>CU1-3</b>	4%	0%
<b>AU1-10</b>	9%	2%
<b>AU1-6</b>	3%	-2%
<b>BU1-5</b>	4%	-1%
<b>BU1-6</b>	4%	-1%
<b>CU1-5</b>	2%	-1%

**Tabella 6.11 a) – Scarti percentuale tra Excel e software Caleffi.**

	Passo (cm)	Dt (°C)	Portata (l/h)		Potenza richiesta (W)	Potenza (W)		Potenza verso il basso (W)	
			<i>EXEL</i>	<i>software</i>		<i>EXEL</i>	<i>software</i>	<i>EXEL</i>	<i>software</i>
<b>AU1-1</b>	30.0	10.0	335	324	2861	2965	-	920	916
<b>AU1-9</b>	30.0	7.5	268	260	1721	1797	-	535	528
<b>AU1-3</b>	20.0	13.0	377	432	4217	4381	-	1305	1292
<b>BU1-2</b>	10.0	6.5	317	308	2238	1972	-	416	420
<b>BU1-4</b>	10.0	8.0	256	276	2289	1891	-	484	482
<b>BU1-3</b>	10.0	8.5	188	180	1600	1669	-	188	188
<b>BU1-1</b>	10.0	12.0	273	264	3278	3414	-	384	384
<b>BU1-8</b>	20.0	7.5	122	70	801	957	-	108	109
<b>BU1-7</b>	20.0	8.5	81	78	684	717	-	81	81
<b>CU1-4</b>	10.0	8.5	680	690	5409	5341	-	1365	1410
<b>CU1-2</b>	20.0	10.5	186	178	1935	2034	-	229	228
<b>CU1-3</b>	10.0	5.0	404	387	2006	2106	-	237	237
<b>AU1-10</b>	7.5	3.0	227	206	580	604	-	184	180
<b>AU1-6</b>	7.5	2.5	225	218	480	500	-	151	154
<b>BU1-5</b>	7.5	1.0	340	326	329	344	-	50	50
<b>BU1-6</b>	7.5	1.0	373	324	363	379	-	55	55
<b>CU1-5</b>	7.5	2	189	184	370	382	-	55	56

**Tabella 6.11 b)- Confronto con foglio di calcolo Excel riportante le formule della norma UNI EN 1264.**

Si analizzano le singole grandezze facendo alcune osservazioni:

- **Portata:** la non perfetta uguaglianza tra i risultati ottenuti applicando la formula (3.31) e i risultati del software Caleffi si attribuiscono alle semplificazioni effettuate da quest'ultimo;
- **Potenza:** non si riportano i dati ottenuti dal programma in quanto esso non fornisce l'esatto valore di potenza emessa verso l'alto. Tuttavia applicando la formula (3.2) della normativa, una volta noto il salto termico e il passo (output del software) è possibile valutare la potenza. E' quindi possibile notare come in tutti i locali il fabbisogno sia soddisfatto a meno dei locali BU1-3, BU1-2, BU1-4 e nei bagni in cui non risulta possibile soddisfare l'intera potenza con solo il sistema di pannelli radianti a pavimento.
- **Potenza verso il basso:** i valori sono del tutto confrontabili con quelli ottenuti applicando la formula (3.28).

Inoltre si sottolinea che la **Lunghezza circuito** è stata valutata attraverso la formula (4.32).

In definitiva è possibile affermare che il software rispetta la norma UNI EN 1264 e quindi i passi e il salto termico tra temperatura di mandata e uscita del fluido possono essere considerati validi nel dimensionamento del sistema a pannelli radianti dell'edificio in esame.

#### 6.4.2.2 Compensazione potenza residua

---

Per quanto riguarda i locali in cui non è stato possibile soddisfare la potenza solo attraverso i pannelli radianti a pavimento occorre inserire dei corpi integrativi. Tra tutte le possibili scelte adottabili (pannelli radianti a parete, radiatori, ventilconvettori, etc.) si è fatta la scelta di utilizzare i corpi scaldanti integrativi. Per quanto concerne i bagni si è preferito soddisfare l'intera potenza tramite i soli corpi scaldanti mentre nei due locali, BU1-2, BU1-3 e BU1-4, si sono utilizzati i corpi scaldanti solamente per compensare la potenza residua. Utilizzando il programma scaricabile gratuitamente dal sito Caleffi, "Impianti a collettori" è stato possibile soddisfare tutte le potenze in gioco.

Considerando una temperatura massima di progetto pari a 70 °C, una temperatura ambiente differente a seconda che si considerassero i bagni (24°C) oppure gli altri due locali (20°C), e un salto termico pari a 20°C, dei radiatori già presenti all'interno del programma sono stati selezionati i radiatori visibili nella Tabella 6.12.

<b>Locale</b>	<b>Potenza (W)</b>	<b>Tipo di radiatore</b>	<b>Numero di elementi</b>	<b>Portata (l/h)</b>
<b>BU1-3</b>	1323	ALFA 870/4	10	208
	1323	ALFA 870/4	10	208
<b>BU1-2</b>	359	ALFA 300/8	4	206
<b>BU1-4</b>	274	ALFA 680/2	5	206
<b>AU1-10</b>	1531	GAMMA 1800/1000	-	210
<b>AU1-6</b>	1212	GAMMA 1800/1000	-	210
<b>BU1-5</b>	634	GAMMA 1190/650	-	208
<b>BU1-6</b>	650	GAMMA 1190/600	-	208
<b>CU1-5</b>	1511	GAMMA 1800/1000	-	208

**Tabella 6.12- Tipo di radiatori utilizzati.**

Si sottolinea che per i locali BU1-2, BU1-3, BU1-4 sono stati adottati radiatori componibili, mentre per i bagni sono stati utilizzati dei termo arredo.

### 6.4.3 Dimensionamento dei pannelli radianti tramite MC4

Con il programma MC4 Suite 2009 è possibile inserire all'interno dell'edificio in esame il sistema di riscaldamento a pannelli radianti. Prima di iniziare il vero e proprio dimensionamento del sistema radiante si è proceduto alla definizione delle generalità del sistema:

➤ Sistema Pannello:

Pannello: PIANO PSE 30

Tipo tubo: PE 17x2

Diametro nominale: 17 mm

Spessore massetto sopra i tubi : 30 cm

Rivestimento: Parquet

Passi consentiti: 100, 150, 200, 250, 300.

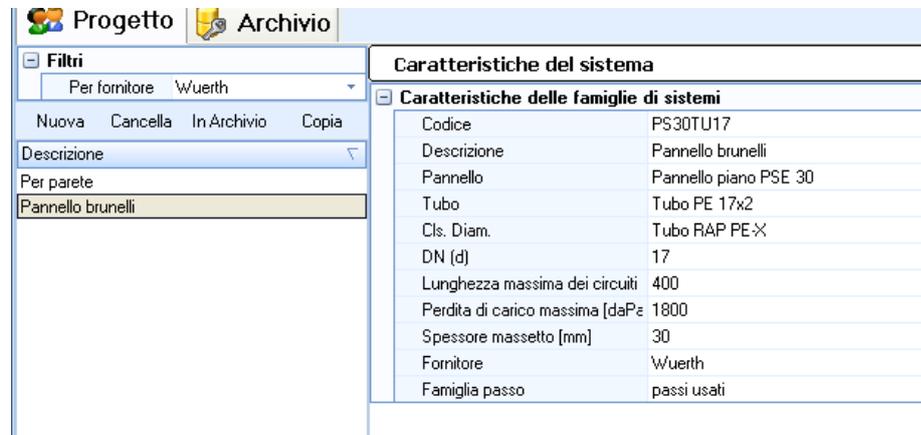


Figura 6.8- Schermata della definizione del tipo di pannello utilizzato.

➤ Dati circuito:

Minimo salto termico: 5 °C

Massimo salto termico acqua: 12°C

Temperatura dell'acqua in uscita dal collettore: 40°C

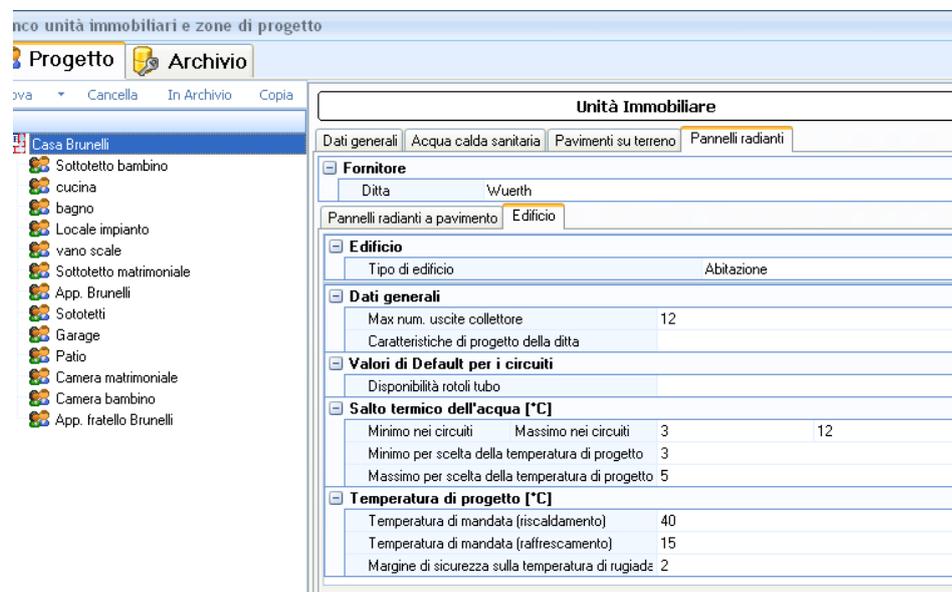


Figura 6.9– Schermata generale sui dati di input.

Una volta definite le generalità dei pannelli che andranno a essere utilizzati si procede all'inserimento degli stessi nell'edificio attraverso l'apposito tasto:

Live serpentine .

Nell'inserimento di ciascun pannello il programma lascia all'utente la possibilità di definire:

- *passo*: si può decidere di utilizzare passi differenti a seconda che ci si trovi nella zona marginale o nella zona residenziale. Nel caso in esame si è scelto di utilizzare passo costante per il singolo locale,
- *tipo di pannello utilizzato*: possono essere utilizzati pannelli con diverse caratteristiche a seconda dell'ambiente,
- *numero minimo di circuiti richiesti*: si può richiedere un numero di circuiti che andranno a occupare la zona in esame. In caso contrario MC4 definisce da solo il numero.
- *spessore massetto*: nel nostro caso il massetto è uguale in tutte le zone,
- *rivestimento*: tipo di rivestimento del pavimento. In tutti i locali è stato scelto il parquet.

In ciascun locale sono stati inseriti i circuiti aventi un passo pari a quello valutato precedentemente tramite il programma Caleffi.

Si riportano nelle seguenti tabelle i risultati ottenuti.

Locali	Passo (cm)	Dt (°C)	Potenza richiesta (W)	Numero circuiti	Potenza circuiti (W)*	Potenza verso il basso (W)****	Temperatura (°C)	Lunghezza interna (m)
AU1-1	30.0	10.2	2861	2	2118	517	24.4	154
AU1-9	30.0	8.8	1721	3	1767	430	24.6	117
AU1-3	20.0	12.0	4217	2	4876	1031	25.0	400
BU1-2	10.0	5.0	2238	3	2020	1388	28.7	215
BU1-4	10.0	5.0	2289	3	2044	531	28.3	210
BU1-3	10.0	5.0	3429	1	1840	193	28.2	200
BU1-1	10.0	12.0	3278	2	3362	327	26.3	159
BU1-8	20.0	11.2	931	1	985	105	25.2	72
BU1-7	20.0	9.0	685	1	696	267	25.7	56
CU1-4	10.0	7.0	5409	2	5397	1700	27.2	624
CU1-2	20.0	11.0	1935	2	1935	522	25.4	176
CU1-3	10.0	5.8	2006	3	2006	224	28.2	215
AU1-10	10.0	11.8	951	1	547	142	30.5	76
AU1-6	10.0	11.8	1126	1	416	108	30.5	58
BU1-5	10.0	11.8	634	1	259	27	30.5	35
BU1-6	10.0	11.8	644	1	350	37	30.5	44
CU1-5	10.0	11.8	1163	1	346	36	30.5	44

Tabella 6.13- Risultati MC4.

Locali	Passo (cm)	Dt (°C)	Potenza richiesta (W)	Numero circuiti	Potenza acquisita (W)**	Potenza circuiti (W)*	Potenza totale (W)***	Portata (l/h)	Lunghezza interna (m)	Lunghezza adduzione (m)
AU1-1	30.0	10.2	2861	2	745	2118	2862	214	135	20
AU1-9	30.0	8.8	1721	2	0	1767	1767	174	117	50
AU1-3	20.0	12.0	4217	3	0	4876	4876	423	400	18
BU1-2	10.0	5.0	2238	3	0	2020	2020	347	215	9
BU1-4	10.0	5.0	2289	3	0	2044	2044	498	210	35
BU1-3	10.0	6.5	3429	1	322	1840	2162	349	200	1
BU1-1	10.0	12.0	3278	2	38	3362	3400	247	432	0
BU1-8	20.0	11.2	931	1	0	985	985	124	72	3
BU1-7	20.0	9.0	685	1	0	696	696	94	56	3
CU1-4	10.0	12.0	5409	2	12	5397	5409	444	624	2
CU1-2	20.0	11.0	1935	2	0	1935	1935	192	176	5
CU1-3	10.0	5.8	2006	3	0	2006	2006	335	215	8
AU1-10	10.0	5.0	951	1	0	547	547	39	70	-
AU1-6	10.0	5.0	1126	1	0	416	416	32	59	-
BU1-5	10.0	5.0	634	1	0	259	259	18	40	-
BU1-6	10.0	5.0	644	1	0	350	350	22	45	-
CU1-5	10.0	5.0	1163	1	0	346	346	21	44	-

Tabella 6.14- Risultati MC4.

Per chiarezza dei termini utilizzati si specifica:

\* *Potenza circuiti*: rappresenta la potenza emessa verso l'alto dai circuiti immessi nei singoli locali. In questo valore non è compresa la potenza ceduta dall'adduzione proveniente da altri circuiti.

\*\* *Potenza acquisita*: rappresenta la potenza ceduta dalla rete di adduzione passante per quel locale.

\*\*\* *Potenza totale*: rappresenta la somma della potenza emessa verso l'alto dai circuiti occupanti il locale in esame e quella della rete di adduzione.

\*\*\*\* *Potenza verso il basso*: rappresenta la potenza ceduta da tutto il circuito verso il basso.

#### 6.4.3.1 Confronto foglio EXCEL- risultati software MC4

---

Come nel caso precedente anche in questo caso è stato effettuato un confronto tra tali risultati e quelli dalla norma UNI EN 1264 parte 2 e 3 riportati in un foglio EXCEL. A parità di passo e di dt utilizzato è possibile fare un confronto dei risultati ottenuti riguardanti la potenza aerica emessa verso l'alto dal pannello e la portata.

Come è possibile notare dalla tabella che segue le differenze riscontrate sono minime.

Locali	Passo (cm)	dt (°C)	Portata (l/h)		Potenza richiesta (W)	Potenza (W)		Potenza verso il basso (W)	
			EXCEL	software		EXCEL	software	EXCEL	software
AU1-1	30.0	10.2	326	214	2861	2939	2862	916	517
AU1-9	30.0	8.8	218	174	1721	1709	1767	519	430
AU1-3	20.0	12.0	430	423	4217	4633	4876	1349	1031
BU1-2	10.0	5.0	431	347	2238	2074	2020	427	388
BU1-4	10.0	5.0	449	498	2289	2098	2044	508	531
BU1-3	10.0	5.0	440	349	3429	2293	2162	258	193
BU1-1	10.0	12.0	273	247	3278	3414	3400	384	327
BU1-8	20.0	11.2	70	124	931	818	985	92	105
BU1-7	20.0	9.0	94	94	684	703	696	283	267
CU1-4	10.0	7.0	887	880	5409	5405	5409	1795	1700
CU1-2	20.0	11.0	200	192	1935	1987	1935	569	522
CU1-3	10.0	5.8	339	335	2006	2052	2006	231	224
AU1-10	10.0	5.0	119	94	951	523	547	170	142
AU1-6	10.0	5.0	97	90	1126	425	416	138	108
BU1-5	10.0	5.0	53	45	634	278	259	31	27
BU1-6	10.0	5.0	59	60	644	305	350	34	37
CU1-5	10.0	5.0	61	44	1163	319	346	36	36

Tabella 6.15- Confronto con foglio Excel riportante le formule della norma UNI EN 1264.

6.4.3.2 Compensazione potenza residua

Come nel caso precedentemente, anche in questo caso non è stato possibile soddisfare l'intero fabbisogno con solo il sistema di pannelli radianti a pavimento del locale BU1-2, BU1-4 e BU1-3, oltre che nei bagni. Rimane dunque da soddisfare una potenza pari a:

<i>Locali</i>	<i>Potenza da soddisfare (W)</i>
<b>BU1-3</b>	1267
<b>BU1-2</b>	218
<b>BU1-4</b>	245
<b>AU1-6</b>	710
<b>AU1-10</b>	405
<b>BU1-5</b>	376
<b>BU1-6</b>	295
<b>CU1-5</b>	817

**Tabella 6.16- Potenza residua da soddisfare.**

Avendo già utilizzato il passo minimo consentito, dal sistema a pannelli a pavimento scelto, occorre soddisfare le potenze rimanenti tramite un sistema di riscaldamento integrativo. E' possibile procedere secondo due strade: utilizzare i pannelli a parete o utilizzare corpi scaldanti. Per quanto riguarda i locali BU1-3, BU1-2 e BU1-4 si è scelto un sistema integrativo costituito dai pannelli a parete. Per quanto riguarda i bagni, invece, si è preferito scartare l'opzione di pannelli a pavimento e inserire dei termoarredo.

➤ ***Integrazione tramite pannelli a parete:***

Integrando il sistema di pannelli a pavimento con quelli a parete è stato possibile soddisfare tutte le potenze in gioco.

Il tipo di pannello utilizzato è tubi in rame 17x2. La disposizione dei pannelli è stata una disposizione a serpentina.

Locale	Passo (cm)	Dt (°C)	Portata (l/h)	Potenza richiesta (W)	Potenza ceduta (W)	Temp (°C)	Lunghezza (cm)
BU1-3	10.0	12.0	140	1267	1276	28.6	273
BU1-2	10.0	12.0	31	218	224	28.6	31
BU1-4	10.0	12.0	37	245	329	28.6	67

Tabella 6.17- Potenza soddisfatta tramite pannelli a parete.

In realtà un'ulteriore alternativa che si potrebbe utilizzare in questi locali, dove la potenza non risulta soddisfatta, sarebbe quella di aumentare il passo nella zona marginale, rispetto alla zona residenziale. In tal modo si avrebbe un aumento della temperatura superficiale oltre che un aumento di potenza emessa.

➤ **Integrazione mediante corpi scaldanti:**

Per la complessità di immissione dei pannelli radianti nei bagni, in cui è necessario fare attenzione a tubazioni di altra natura nel momento della installazione, nella pratica progettuale tale soluzione viene raramente utilizzata. Si è quindi preferito procedere con una integrazione che preveda i radiatori. Si ricorda che, scegliendo un'integrazione a radiatori la temperatura dell'acqua di mandata dal generatore dovrà essere necessariamente più elevata a scapito del rendimento.

Per quanto riguarda l'impianto a radiatori è stata scelta una temperatura media dell'acqua di 70 °C e un delta T di 20 °C.

Le caratteristiche dei radiatori selezionati dall'archivio del programma utilizzati nel progetto sono state riassunte nella seguente tabella:

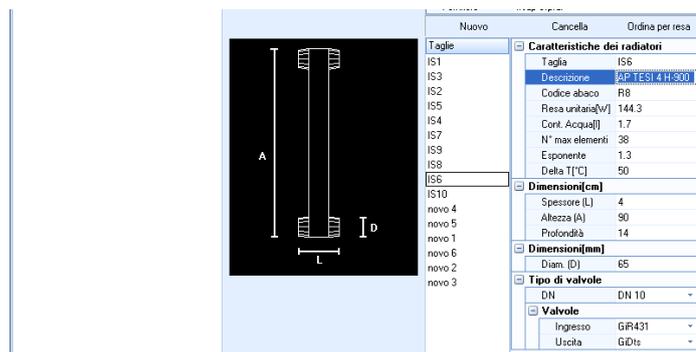


Figura 6.10- Schermata relativa all'inserimento dei radiatori.

<b>Descrizione</b>	<b>Resa unitaria (W)</b>	<b>Contenuto d'acqua (l)</b>	<b>N° max di elementi</b>	<b>Esponente</b>	<b>Delta T (°C)</b>	<b>Altezza (cm)</b>	<b>Profondità (cm)</b>	<b>Spessore (cm)</b>
<b>IRSAP NOVO G100-01</b>	1797	19.6	1	1.167	50	180.8	100	3
<b>IRSAP NOVO M100-01</b>	1204	12.9	1	1.189	50	119.6	100	3
<b>IRSAP NOVO MO75-01</b>	908	10.0	1	1.190	50	119.6	75	3

**Tabella 6.18- Caratteristiche dei radiatori utilizzati per soddisfare la potenza dei bagni.**

E quindi i termoarredo inseriti nei diversi bagni sono stati:

<b>Locale</b>	<b>Potenza (W)</b>	<b>Tipo di radiatore</b>	<b>Numero di elementi</b>	<b>Portata (l/s)</b>
<b>AU1-10</b>	1385	IRSAP NOVO G100-01	-	0.015
<b>AU1-6</b>	1385	IRSAP NOVO G100-01	-	0.015
<b>BU1-5</b>	923	IRSAP NOVO M100-01	-	0.009
<b>BU1-6</b>	923	IRSAP NOVO M100-01	-	0.009
<b>CU1-5</b>	1395	IRSAP NOVO G100-01	-	0.015

**Tabella 6.19- Radiatori utilizzati.**

## 6.5 Calcolo fabbisogno invernale

Grazie al software MC4 è possibile valutare il fabbisogno energetico invernale dell'edificio in maniera automatica. Seguendo quanto riportato dalla norma UNI EN 11300-1 (vedi Capitolo 2) sul calcolo del fabbisogno invernale i risultati ottenuti nei due diversi appartamenti sono riportati nei grafici e nelle tabelle sottostanti. Si ricorda che il periodo di riscaldamento è compreso tra il 15/04 al 15/10.

In particolare è bene ricordare i dati di legge riguardanti le temperature esterne ed interne utilizzate nel calcolo.

<b>Città di BOLOGNA</b>		
	<b><math>\theta_i</math></b>	<b><math>\theta_e</math></b>
Gennaio	20	2.1
Febbraio	20	4.6
Marzo	20	9.4
Aprile 1-15	20	14.2
Aprile 16-30	26	14.2
Maggio	26	18.2
Giugno	26	22.9
Luglio	26	25.4
Agosto	26	24.9
Settembre	26	21.2

Ottobre 1-15	26	14.9
Ottobre 16-31	20	14.9
Novembre	20	8.7
Dicembre	20	4.0

Tabella 6.20- Temperature esterne ed interne considerate nel calcolo stazionario.

Suddividendo l'unità immobiliare nei due appartamenti:

<b>Appartamento 1</b>						
	$Q_{heat}$	$Q_{trasm}$	$Q_{vent}$	$\eta$	$Q_{int}$	$Q_{sol}$
<i>gen</i>	32387	32416	4179	1.0000	1205	3003
<i>feb</i>	23449	24943	3595	1.0000	1089	4000
<i>mar</i>	15366	19524	2475	0.9900	1205	5495
<i>apr'</i>	2265	5346	655	0.9100	583	3523
<i>mag</i>	0	0	0	0.0000	0	0
<i>giu</i>	0	0	0	0.0000	0	0
<i>lug</i>	0	0	0	0.0000	0	0
<i>ago</i>	0	0	0	0.0000	0	0
<i>set</i>	0	0	0	0.0000	0	0
<i>ott'</i>	2923	5420	614	0.9500	661	2614
<i>nov</i>	18083	20006	2638	1.0000	1166	3395
<i>dic</i>	28812	29060	3735	1.0000	1205	2778
<b>MJ</b>	<b>123284</b>	<b>136715</b>	<b>17891</b>		<b>7114</b>	<b>24808</b>

Tabella 6.21- Fabbisogno energetico invernale appartamento 1.

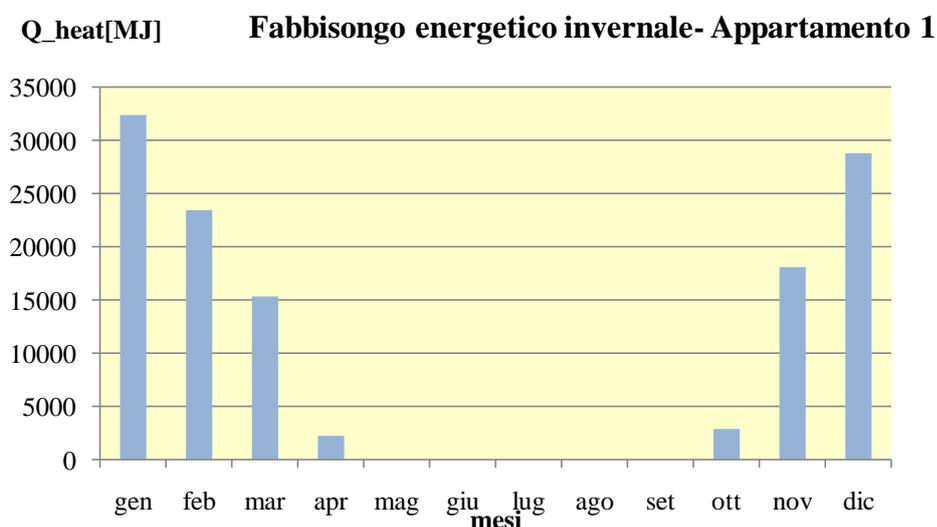


Grafico 6.1- Fabbisogno energetico invernale Appartamento 1.

<b>Appartamento 2</b>						
	$Q_{heat}$	$Q_{trasm}$	$Q_{vent}$	$\eta$	$Q_{int}$	$Q_{sol}$
gen	22672	23380	2237	1.0000	1205	1740
feb	16551	18106	1925	0.9800	1089	2462
mar	10815	14248	1325	0.9700	1205	3700
apr	1641	3989	351	0.8700	583	2519
mag	0	0	0	0.0000	0	0
giu	0	0	0	0.0000	0	0
lug	0	0	0	0.0000	0	0
ago	0	0	0	0.0000	0	0
set	0	0	0	0.0000	0	0
ott	2207	4061	329	0.9300	661	1686
nov	12862	14591	1412	1.0000	1166	1975
dic	20217	21003	2000	1.0000	1205	1581
<b>MJ</b>	<b>86966</b>	<b>99379</b>	<b>9578</b>		<b>7114</b>	<b>15663</b>

Tabella 6.22- Fabbisogno energetico invernale appartamento 2.

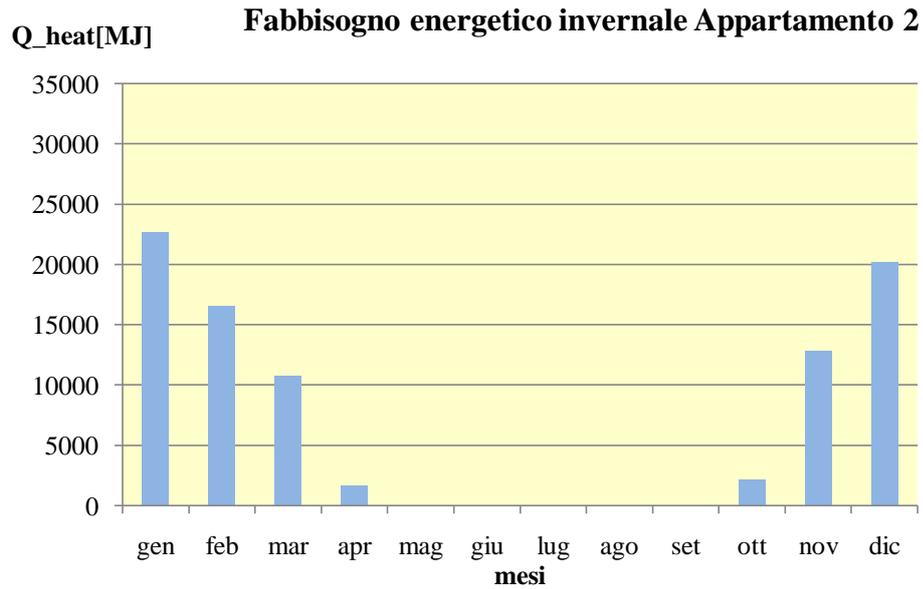


Grafico 6.2- Fabbisogno energetico invernale Appartamento 2.

Dove per chiarezza dei simboli utilizzati:

$Q_{heat}$  rappresenta il fabbisogno energetico invernale [MJ];

$Q_{trasm}$  rappresenta gli scambi termici per trasmissione [MJ];

$Q_{vent}$  rappresenta gli scambi termici per ventilazione [MJ];

$\eta$  rappresenta il fattore di utilizzazione degli apporti termici totali;

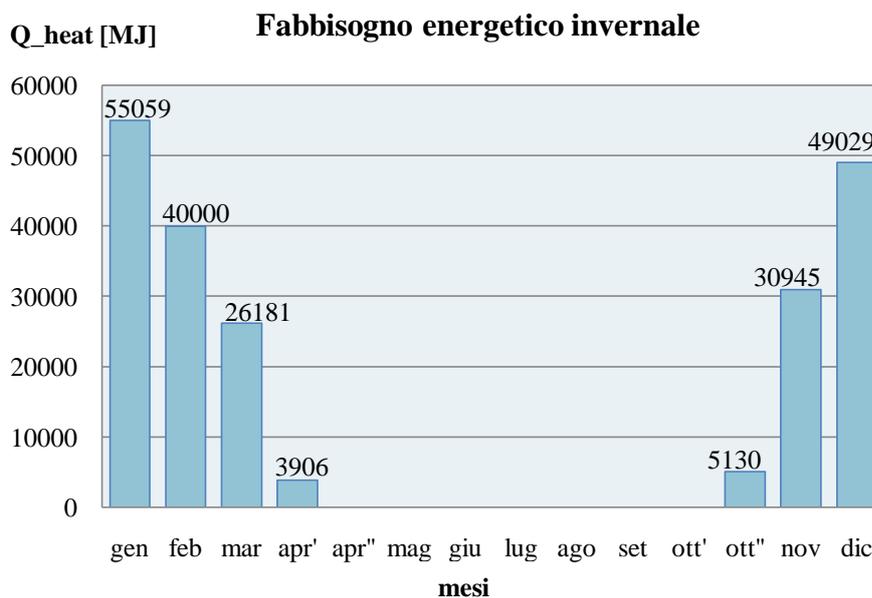
$Q_{int}$  rappresenta gli apporti termici interni [MJ];

$Q_{sol}$  rappresenta gli apporti termici solari [MJ];

E' evidente dai risultati riportati sopra che il fabbisogno energetico del 1 appartamento è maggiore rispetto al secondo, cosa del tutto normale avendo la prima abitazione un'estensione maggiore.

Dai dati ottenuti si vede, inoltre, come ci sia un'incidenza maggiore degli scambi per trasmissione su quelli per ventilazione sia nel caso estivo che in quello invernale. Per quanto riguarda poi gli apporti termici si noti come gli apporti termici solari danno un contributo maggiore di quelli interni, rimanendo quest'ultimi costanti su tutto l'anno.

E' bene riportare anche il fabbisogno energetico dell'intero edificio, avendo affrontato fino a questo momento l'unità immobiliare nel suo complesso.



**Grafico 6.3- Fabbisogno energetico invernale dell'intera unità immobiliare.**

E quindi il fabbisogno totale annuo risulta **210251 MJ** per l'intero edificio.

## 6.6 Inserimento generatore

---

Per poter valutare il fabbisogno di energia primaria e quindi l'indice di prestazione energetica è necessario collegare l'impianto di riscaldamento al generatore.

Il sistema di tubazioni costituente i tratti dal generatore ai collettori e dai collettori ai vari terminali è un sistema di "Tubi in rame serie ASTM B 88 tipo K" con isolante in poliuretano espanso di spessore pari a 50 mm.

Il diametro di ciascun tubo viene calcolato in maniera automatica dal software, una volta effettuati i collegamenti ai terminali.

Il generatore realmente installato è una pompa di calore geotermica avente un COP pari a 5. Qui di seguito, però, oltre all'inserimento di un generatore di questo tipo verranno discussi l'inserimento di una caldaia tradizionale e di una caldaia a condensazione. Tali confronti permetteranno di sottolineare le differenze riguardanti il fabbisogno stagionale, l'indice di prestazione e il rendimento medio stagionale che si ottengono nei diversi casi. Un ulteriore confronto verrà fatto con un edificio gemello in cui, però, vengono soddisfatti i valori di trasmittanza imposti dalla normativa attuale.

Il programma permette, inoltre, il confronto tra i parametri  $EP_i$  ed rendimento medio stagionale con i limiti imposti dalla normativa attuale. Si ricorda che la costruzione dell'edificio è antecedente all'entrata in vigore della legge.

In riferimento ai passi effettuati con il software MC4 Suite 2009 lanciando il calcolo di "legge 10" è stato possibile valutare il rendimento medio stagionale  $\eta_g$  e l'energia primaria per il riscaldamento invernale  $EP_i$  in conformità con quanto espresso dalla norma UNI/TS 11300-Parte 2.

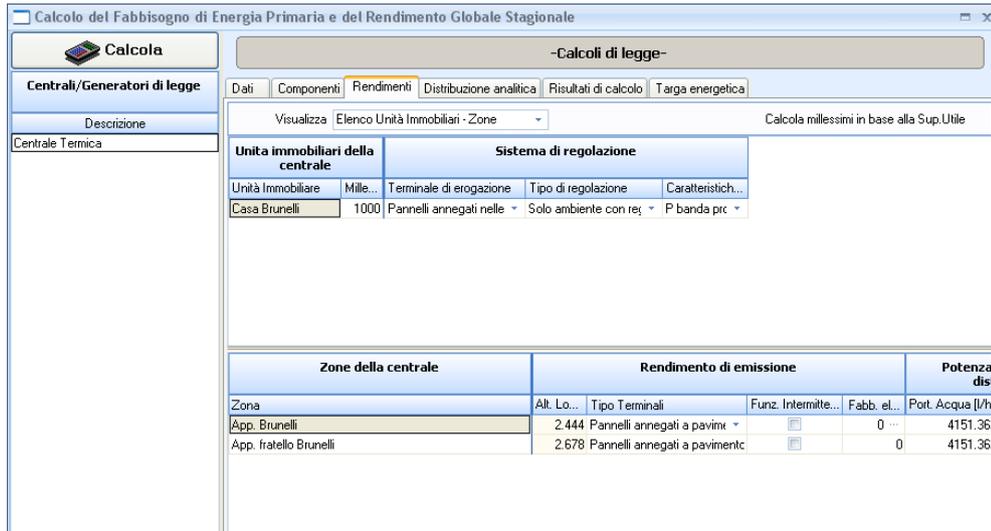


Figura 6.11- Schermata di calcolo EP<sub>i</sub> e rendimento medio stagionale.

Per la valutazione del rendimento medio stagionale è stato necessario definire, nella schermata di calcolo:

- *Temperatura del locale dove è inserito l'impianto*: impostata a 15 °C
- *Sistema di regolazione*: in modo tale da valutare il rendimento di regolazione (vedi tabella sottostante).

<i>Terminale di erogazione</i>	<i>Tipo di erogazione</i>	<i>Caratteristiche</i>
Pannelli annegati nelle strutture edilizie e non disaccoppiati termicamente	Climatica + ambiente con regolatore	P banda prop. 1°C

Dal prospetto 20 presente nella norma (figura 2.10) a questo tipo di sistema corrisponde un valore del rendimento di regolazione pari a 0.95.

- *Sistema di emissione*: in modo da valutare il rendimento di emissione è necessario scegliere il tipo di terminali. Scegliendo come terminali i pannelli annegati a pavimento con altezza < di 4 cm il rendimento di emissione corrispondente (figura 2.9) è pari a 0.96.

Per un piccolo approfondimento sul rendimento medio stagionale e sull'EP<sub>i</sub> si rimanda al paragrafo successivo.

### 6.6.1 Rendimento medio stagionale e Indicatore di prestazione

Prima di procedere con il calcolo del caso studio si è ritenuto opportuno precisare in questa sezione, in maniera sintetica, alcuni parametri che verranno poi di seguito calcolati. Per maggiori informazioni si rimanda al Capitolo 2.

**Rendimento medio stagionale**: per rendimento medio stagionale si intende il rapporto tra il fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione invernale e l'energia primaria delle fonti energetiche ivi compresi l'energia elettrica.

Tale rendimento risulta il prodotto del:

1. *Rendimento di produzione  $\eta_p$ .*

Definito come rapporto tra l'energia termica  $Q_p$  fornita dal sistema (generatore più ausiliari) all'utilizzatore e l'energia primaria del periodo considerato. Il periodo è la stagione di riscaldamento consentita, che nella zona E (in cui ricade Bologna) va dal 15 ottobre al 15 aprile. Il rendimento di produzione dipende da:

- Caratteristiche del generatore di calore.
- Dal suo dimensionamento rispetto al fabbisogno dell'edificio.
- Dalla modalità di installazione.
- Dalla temperatura dell'acqua (media e/o ritorno dal generatore) nelle condizioni di esercizio (medie mensili).

2. *Rendimento di regolazione  $\eta_r$ .*

Definito come rapporto tra l'energia richiesta in condizioni ideali e l'energia richiesta in condizioni reali.

3. *Rendimento di distribuzione  $\eta_d$ .*

Tiene conto delle perdite di distribuzione verso l'esterno, e quindi non utilizzabile dagli ambienti. Per valutare tale rendimento è necessario conoscere tutto lo sviluppo della rete, le caratteristiche della relativa

coibentazione, le temperature dei locali o delle zone non riscaldate attraverso la rete, la temperatura del fluido convogliato, ecc.

4. *Rendimento di emissione  $\eta_e$ .*

Definito dal rapporto tra la quantità di energia termica richiesta in condizioni ideali e l'energia termica fornita dal terminale in condizioni reali.

Il valore rilevato del  $\eta_g$  dovrà essere confrontato con il D.Lgs. 192 del 19 Agosto 2005 che fissa un limite pari a:

$$\eta_g = (75 + 3 \cdot \log P_n) \% \quad (6.6)$$

Dove  $P_n$  è il logaritmo in base 10 della potenza utile nominale (cioè potenza dichiarata e garantita dal costruttore in regime di funzionamento continuo) del generatore o del complesso dei generatori a servizio del singolo impianto. Per Potenza utile si intende quella trasferita nell'unità di tempo al fluido termovettore, pari, quindi, alla potenza termica al focolare diminuita delle perdite al camino e attraverso l'involucro del generatore.

Tale rendimento dipende dalla:

- Temperatura media di progetto del fluido termovettore.
- Isolamento termico della parete retrostante il terminale.

**Energia primaria per il riscaldamento invernale** esprime il consumo totale di energia primaria per il riscaldamento invernale (in regime continuo degli impianti) riferito all'unità di superficie utile o di volume lordo. E' quindi definito nella forma:

$$EP_i = \frac{Q_L - \eta_H \cdot Q_g}{\eta_g} \quad [Kwh/m^2] \quad (6.7)$$

Dove:

$Q_L$  rappresenta l'energia dispersa per trasmissione e ventilazione;

$\eta_H$  rappresenta il fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti;

$Q_g$  rappresenta gli apporti gratuiti;

$\eta_g$  rappresenta il rendimento medio stagionale.

Può anche essere espressa come:

$$EP_i = \frac{Q}{3.6 \cdot S} \quad [Kwh/m^2] \quad (6.8)$$

Dove:

Q rappresenta il fabbisogno totale stagionale ( espresso in MJ);

S rappresenta la superficie dell'edificio.

## 6.6.2 Inserimento di una Caldaia

Essendo la potenza richiesta al generatore pari a 38031 W, la caldaia selezionata per soddisfare l'edificio è stata scelta con una potenza nominale del sistema di produzione pari a 50 kW.

### 6.6.2.1 Caldaia tradizionale

Come primo caso è stato analizzato un sistema costituito da una caldaia tradizionale avente una potenza utile pari alla pompa di calore.

La caldaia scelta è stata selezionata tra la varia gamma di caldaie presente all'interno dell'archivio di MC4. Le sue caratteristiche sono:

*Combustibile:* metano

*Potenza nominale utile del sistema di produzione:* 50 kW

*Tipo:* generatore monostadio

*Rendimento al 100% di Pn:* 92.2 %

*Rendimento al 30% di Pn:* 93.1 %

*Fluido vettore:* acqua

*Potenza nominale al focolare:* 54.9 Kw

*Tipo di bruciatore:* bruciatori ad aria soffiata con chiusura dell'aria comburente

*Perdite termiche al camino con bruciatore spento %:* 0.3 %

*Perdite termiche al camino con bruciatore acceso %: 6.3 %*

*Perdite dell'involucro: 1.5 %*

*Dati utili ai fini dei risultati :*

Temperatura di mandata acqua: 70 °C

Temperatura di ritorno acqua: 50 °C

Volume lordo [ $m^3$ ]: 1783.87

Volume netto [ $m^3$ ]: 1338.25

Superficie lorda [ $m^2$ ]: 1382.24

Superficie utile netta [ $m^2$ ]: 530.86

S/V [ $1/m$ ]: 0.77

Q = fabbisogno totale stagionale [MJ]: 248702

Dtm = differenza di temperatura media stagionale [°C]: 12.70

N = numero giorni di riscaldamento: 183

*Risultati:*

$$EP_i = 130.35 \text{ kWh}/m^2 \text{ anno}$$

$$\eta_g = 84.54$$

*Confronto con normativa attuale:*

$$EP_i < EP_{lim} \quad \rightarrow \quad 130.35 \text{ kWh}/m^2 \text{ anno} > 76.668 \text{ kWh}/m^2 \text{ anno}$$

$$\eta_g > \eta_{g,min} \quad \rightarrow \quad 84.54 > 80.10$$

Il confronto con il limite imposto dalla normativa attuale riguardo l'indice di prestazione energetica non risulta soddisfatto al contrario di quello riguardante il rendimento medio stagionale.

### 6.6.2.2 Caldaia a condensazione

Solitamente, però, associato ad un sistema di riscaldamento a pannelli radianti si predispone una caldaia a condensazione piuttosto che una caldaia tradizionale. E' quindi interessante valutarne il confronto.

La caldaia scelta ha le seguenti caratteristiche:

*Combustibile:* metano

*Potenza nominale utile del sistema di produzione:* 50 kW

*Tipo:* generatore a condensazione monostadio

*Rendimento al 100% di Pn:* 106 %

*Rendimento al 30% di Pn:* 107.2 %

*Fluido vettore:* acqua

*Potenza nominale al focolare:* 50.8 Kw

*Potenza elettrica assorbita dal bruciatore:* 174 W

*Tipo di bruciatore:* bruciatori ad aria soffiata con chiusura dell'aria

*Perdite termiche al camino con bruciatore spento %:* 0.02 %

*Perdite termiche al camino con bruciatore acceso %:* 1.25 %

*Perdite dell'involucro:* 1.5 %

Si sono ottenuti i seguenti risultati:

*Dati utili ai fini dei risultati :*

Temperatura di mandata: 70 °C

Temperatura di ritorno: 30 °C

Volume lordo [ $m^3$ ]: 1783.87

Volume netto [ $m^3$ ]: 1338.25

Superficie lorda [ $m^2$ ]: 1382.24

Superficie utile netta [ $m^2$ ]: 530.86

S/V [ $1/m$ ]: 0.77

Q = fabbisogno totale stagionale [MJ]: 229979

Dtm = differenza di temperatura media stagionale [°C]: 12.70

N = numero giorni di riscaldamento: 183

Risultati:

$$EP_i = 120.53 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$$

$$\eta_g = 91.42$$

Confronto con normativa attuale:

$$EP_i < EP_{lim} \quad \rightarrow \quad 120.53 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno} > 76.668 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$$

$$\eta_g > \eta_{g,min} \quad \rightarrow \quad 91.42 > 80.10$$

Come nel caso precedente anche in questo la verifica sull' $EP_i$  non risulta soddisfatta.

Se si riportano i singoli rendimenti che vanno a comporre il rendimento medio stagionale si nota come passando da una caldaia tradizionale a una a condensazione si ottenga un aumento del rendimento di produzione, che fa sì di far aumentare il rendimento medio stagionale. Per quanto riguarda l' $EP_i$ , essendo il fabbisogno totale stagionale minore rispetto all'utilizzo della caldaia tradizionale tale indice risulta più basso.

		<b>Caldaia</b>	<b>Caldaia a condensazione</b>
DEFINIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE	VALORE
<b>Rendimento di produzione</b>	[%]	<b>93.35</b>	<b>100.95</b>
Rendimento di distribuzione	[%]	99.30	99.30
Rendimento di regolazione	[%]	95.00	95.00
Rendimento di emissione	[%]	96.00	96.00
<b>Rendimento globale = <math>\Sigma Q_h / \Sigma Q</math></b>	[%]	<b>84.54</b>	<b>91.52</b>

**Tabella 6.23- Confronto dei rendimenti tra Caldaia tradizionale e caldaia a condensazione.**

Di fatti la differenza tra le due sta nel fatto che la caldaia tradizionale sfrutta solo il calore del gas combusto e i fumi della combustione vengono espulsi sotto forma di vapore anche se contengono ancora molto calore (i fumi possono arrivare a 150 °C). Nelle caldaie a condensazione, invece, il calore dei fumi viene recuperato e riutilizzato per scaldare l'acqua dell'impianto, con un notevole risparmio di combustibile. E' quindi normale che il fabbisogno stagionale e di conseguenza l' $EP_i$  calino mentre aumenti l' $\eta_g$ . Nella tecnica della condensazione viene recuperato il calore latente di vaporizzazione facendo condensare i fumi. Questo si ottiene abbassando la temperatura dei fumi di combustione, sotto il valore della temperatura di rugiada del combustibile utilizzato. Più le temperature di lavoro di un impianto sono basse, rispetto alla temperatura di rugiada del combustibile, più è possibile condensare i fumi e recuperare calore latente di vaporizzazione. La temperatura dei fumi però, non può scendere sotto il valore di temperatura del fluido termovettore di ritorno in caldaia. In queste condizioni i fumi non potrebbero cedere calore al fluido stesso. È per questo motivo che il maggiore vantaggio in termini di risparmio è riscontrabile sugli impianti a pannelli radianti, dove le

temperature di lavoro dell'impianto sono basse, mediamente comprese tra i 40/30°C. Nel nostro caso si ricorda che nei bagni sono stati scelti dei radiatori, per cui la temperatura di mandata dal generatore è stata fissata a 70 °C mentre la temperatura di ritorno a 30 °C. Quindi se avessimo un impianto solamente a pannelli radianti le differenze riscontrate sarebbero sicuramente maggiori.

### 6.6.3 Inserimento di una pompa di calore

Un modo per la verifica è quello di considerare una pompa di calore.

La pompa di calore scelta possiede le seguenti caratteristiche:

*Tipo:* a ciclo inverso a compressione di gas, azionata da motore elettrico

*Fluido termo vettore:* acqua

*Temperatura nominale della sorgente esterna:* 0 °C

*Potenza nominale utile del sistema di produzione:* 50 kW

*COP:* 5

*Dati utili ai fini dei risultati :*

Volume lordo [ $m^3$ ]: 1783.87

Volume netto [ $m^3$ ]: 1338.25

Superficie lorda [ $m^2$ ]: 1382.24

Superficie utile netta [ $m^2$ ]: 530.86

S/V [ $1/m$ ]: 0.77

Q = fabbisogno totale stagionale [ $MJ$ ]: 105505

Dtm = differenza di temperatura media stagionale [ $^{\circ}C$ ]: 12.67

N = numero giorni di riscaldamento: 183

*Risultati:*

$$EP_i = 55.30 \text{ kWh}/m^2 \text{ anno}$$

$$\eta_g = 199.28$$

Confronto con normativa attuale:

$$EP_i < EP_{lim} \quad \rightarrow \quad 55.30 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno} < 76.67 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$$

$$\eta_g > \eta_{g,min} \quad \rightarrow \quad 199.28 > 76.75$$

In questo caso i confronti con i limiti imposti dalla normativa attuale risultano soddisfatti.

---

Nota 5.

Dal Manuale di MC4 Suite 2009 la temperatura nominale della sorgente esterna rappresenta la temperatura alla quale la Pompa di Calore lavora al COP di targa. Se la PdC è di tipo geotermico (o comunque l'evaporatore scambia con una sorgente a temperatura costante)

allora il COP è fisso in tutti i mesi dell'anno, in questo caso occorre inserire un valore nullo di temperatura.

Inoltre, per quanto riguarda il *rendimento globale medio stagionale* dalla tabella seguente è possibile notare, esplicitando i risultati ottenuti dai vari termini componenti  $\eta_g$ , come varia il rendimento medio stagionale. Il termine che incide su questo aumento è il rendimento di produzione. Si passa da un  $\eta_p = 101$  per la caldaia a condensazione ad un  $\eta_p = 220$  per la pompa di calore (si considera un valore del rendimento elettrico nazionale pari a 0.36).

		<b>Caldaia a condensazione</b>	<b>Pompa di calore</b>
DEFINIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE	VALORE
<b>Rendimento di produzione</b>	[%]	<b>100.95</b>	<b>220.05</b>
Rendimento di distribuzione	[%]	99.30	99.30
Rendimento di regolazione	[%]	95.00	95.00
Rendimento di emissione	[%]	96.00	96.00
<b>Rendimento globale = <math>\Sigma Qh / \Sigma Q</math></b>	<b>[%]</b>	<b>91.42</b>	<b>199.28</b>

**Tabella 6.24- Confronto rendimenti tra Caldaia a condensazione e Pompa di calore.**

L'utilizzo di una Pompa di calore ha quindi portato a ridurre il fabbisogno totale stagionale, ad aumentare il rendimento globale e di conseguenza ha portato ad una diminuzione dell' $EP_i$ .

A confronto del fabbisogno di energia primaria necessario ad una pompa di calore installata in un edificio avente le caratteristiche già discusse in precedenza è stato creato un edificio gemello avente pacchetti murari che rispettano la normativa attuale:

“Dal 1-1-10 per la ZONA E dovranno essere rispettati i seguenti limiti:

$U < 0.34 \text{ W/m}^2\text{K}$  per strutture opache verticali

$U < 0.33 \text{ W/m}^2\text{K}$  per pavimenti verso locali non riscaldati o esterno

$U < 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$  per strutture opache orizzontali

$U < 0.80 \text{ W/m}^2\text{K}$  per pareti verticali e orizzontali”

In tal modo sarà possibile vedere come varia il fabbisogno di energia primaria in un edificio che rispetta i criteri progettuali odierni.

I risultati si sono modificati nella maniera seguente:

Volume lordo [ $\text{m}^3$ ]: 1882.68

Volume netto [ $\text{m}^3$ ]: 12563.69

Superficie lorda [ $\text{m}^2$ ]: 1217

Superficie utile netta [ $\text{m}^2$ ]: 529.53

S/V [ $1/\text{m}$ ]: 0.67

Q = fabbisogno totale stagionale [ $\text{MJ}$ ]: 53492

Dtm = differenza di temperatura media stagionale [ $^{\circ}\text{C}$ ]: 12.70

N = numero giorni di riscaldamento: 183

Risultati:

$$EP_i = 28.03 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$$

$$\eta_g = 209.00$$

Confronto con normativa attuale:

$$EP_i < EP_{lim} \quad \rightarrow \quad 28.03 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno} < 76.748 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$$

$$\eta_g > \eta_{g,min} \quad \rightarrow \quad 209.00 > 80.097$$

Anche in questo caso il confronto con i limiti imposti dalla normativa attuale verrebbe soddisfatto.

In particolare i rendimenti si sono modificati nella maniera seguente:

		<b>Aumento spessori</b>
DEFINIZIONE	UNITA' DI MISURA	VALORE
Rendimento di produzione	[%]	233.00
Rendimento di regolazione	[%]	96.00
Rendimento di distribuzione	[%]	98.60
Rendimento di emissione	[%]	95.00
<b>Rendimento globale = <math>\frac{\sum Qh}{\sum Q}</math></b>	<b>[%]</b>	<b>209.00</b>

**Tabella 6.26- Rendimenti ottenuti avendo aumentato lo spessore di determinati muri.**

E' immediato notare la diminuzione in termini di  $EP_i$  rispetto al caso di pompa di calore installata in un edificio in cui non vengano rispettati i limiti di trasmittanza imposti dalla normativa vigente.

In definitiva riassumendo i risultati ottenuti:

<i>Tipo di generatore</i>	<i>Fabbisogno totale stagionale (MJ)</i>	<i>EPI (kWh/m<sup>2</sup> anno)</i>	<i>Rendimento medio stagionale</i>
<b>Caldaia tradizionale</b>	248702	130.35	84.54
<b>Caldaia a condensazione</b>	229979	120.53	91.42
<b>Pompa di calore</b>	105505	55.30	199.28
<b>Pompa di calore nell'edificio in cui vengono rispettati i limiti imposti dalla normativa attuale</b>	53492	28.03	209.00

**Tabella 6.27- Confronto risultati.**

#### 6.6.4 Considerazioni

- La norma UNI 11300-2 afferma che per calcolare il *fabbisogno termico utile dell'edificio*, ossia la quantità di energia termica utile che deve essere immessa negli ambienti riscaldati, si deve tener conto di fattori negativi, quali:
  - perdite verso l'esterno dovute ad una distribuzione non uniforme della temperatura dell'aria all'interno degli ambienti riscaldati,
  - perdite verso l'esterno dovute alla presenza di corpi scaldanti annegati nelle strutture;
  - perdite dovute a una non perfetta regolazione dell'emissione del calore;
  - eventuale mancato sfruttamento di apporti gratuiti conteggiati nel calcolo, che si traducono in maggiori temperature ambiente anziché riduzione dell'emissione di calore;
  - squilibrio dell'impianto e fattori positivi, quali la trasformazione in calore dell'energia elettrica impiegata nelle unità terminali.

Tutto questo tradotto in formula, formula (valida per zone con terminali diversi) utilizzata per la valutazione dell'energia fornita al sottosistema distribuzione risulta dunque:

$$Q_{hr} = \sum_i^n (Q'_{h,j} + Q_{l,e,j} + Q_{l,rg,j} - Q_{aux,e,lrh,j}) \quad (6.9)$$

Dove:

$Q'_{h,j}$  rappresenta il fabbisogno ideale netto;

$Q_{l,e,j}$  rappresenta le perdite di emissione;

$Q_{l,rg,j}$  rappresenta le perdite di regolazione;

$Q_{aux,e,lrh,j}$  rappresenta l'energia termica recuperata dall'energia elettrica del sottosistema di emissione.

Essendo il fabbisogno ideale netto la quantità di calore che deve essere fornita o sottratta agli ambienti climatizzati in modo da mantenere costanti le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo, si

intuisce che passando da una caldaia tradizionale a una pompa di calore il fabbisogno totale stagionale diminuisce aumentando il rendimento medio stagionale.

- $EP_i$  cioè l'indice di prestazione energetica per climatizzazione invernale diminuisce diminuendo il fabbisogno totale stagionale.
- Il rendimento medio stagionale aumenta. L'aumento di tale fattore è determinato dall'aumento del rendimento di produzione che avviene passando da una semplice caldaia a una pompa di calore.  
In particolare si riporta qui di seguito la tabella riassuntiva dei vari fattori che intervengono nel calcolo di tale rendimento.

Per quanto riguarda i singoli rendimenti:

	$\eta_p$	$\eta_r$	$\eta_d$	$\eta_e$	$\eta_g$
<b>Caldaia</b>	93.35	95.00	99.30	96.00	<b>84.54</b>
<b>Caldaia a condensazione</b>	101.95	95.00	99.30	96.00	<b>91.42</b>
<b>Pompa di calore</b>	220.05	95.00	99.30	96.00	<b>199.28</b>
<b>Pompa di calore + rispetto trasmittanza</b>	233.00	95.00	98.60	96.00	<b>209.00</b>

**Tabella 6.28- Rendimenti a confronto.**

- ✓ *Rendimento di produzione*: come ci si aspettava il rendimento di produzione aumenta notevolmente passando da una caldaia tradizionale ad una pompa di calore essendo tale rendimento dipendente dall'energia termica fornita dal sistema.
- ✓ *Rendimento di regolazione*: essendo il rendimento di regolazione dipendente dalla regolazione del sistema di riscaldamento e rimanente esso identico in tutti i casi analizzati (si ricorda che nel caso specifico è stata scelta una regolazione ambiente P banda proporzionale 1°C ) rimane costante.
- ✓ *Rendimento di emissione*: nei primi tre casi analizzati il rendimento di emissione è lo stesso essendo uguali il tipo di terminali di erogazione, l'altezza dei locali e il carico termico medio annuo (ottenuto dividendo il fabbisogno annuo di energia termica utile per il tempo convenzionale di esercizio e per il volume lordo riscaldato).
- ✓ *Rendimento di distribuzione*: Va sottolineato che il rendimento di distribuzione calcolato nei vari casi analizzati è stato ottenuto tramite la formula :

$$\eta_d = \frac{Q_{d,out}}{Q_{d,in} + W_{d,aux} \cdot f_{el}} \quad (6.10)$$

Dove:

$Q_{d,out}$  rappresenta l'energia in uscita dal sottosistema di distribuzione;

$Q_{d,in}$  rappresenta l' energia in ingresso al sottosistema di distribuzione;

$W_{d,aux}$  rappresenta la potenza elettrica degli organi ausiliari del sottosistema di distribuzione;

$f_{el}$  fattore di riduzione dell'energia primaria in energia ausiliaria elettrica

In particolare è possibile intendere il sottosistema di distribuzione attraverso il seguente schema:

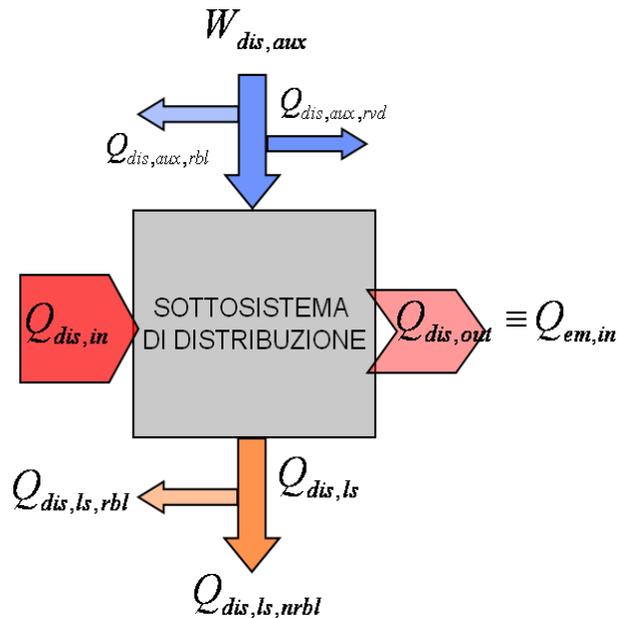


Figura 6.12- Schema sottosistema di distribuzione.

Per maggiori informazioni riguardo ai vari termini fare riferimento al Capitolo 2 (par. 2.1.2).

Inoltre si nota come il rendimento di distribuzione aumenti nel caso di edificio in cui vengano rispettati i limiti di trasmittanza. Questo è dovuto al fatto che il fabbisogno (termine a numeratore nella formula 6.10) diminuisce.

- Un'ultima considerazione che risulta interessante sviluppare è rappresentata dal calcolo di combustibile e di energia elettrica necessari a far funzionare rispettivamente, caldaia a condensazione e tradizionale e pompa di calore.

#### ***Caldaia a condensazione e caldaia tradizionale***

Conoscendo il fabbisogno medio stagionale dell'edificio e il valore del pci (potere calorifico inferiore) del metano (combustibile che si ipotizza utilizzare nelle due caldaie) è possibile risalire al calcolo della quantità di combustibile utilizzato in un anno. Inoltre conoscendo il costo del combustibile al m<sup>3</sup> è possibile valutare economicamente la spesa annua.

	<i>Caldaia tradizionale</i>	<i>Caldaia a condensazione</i>
Fabbisogno medio stagionale (MJ)	248703	229979
Pci metano (MJ/m <sup>3</sup> )	34.37	34.37
Costo combustibile al m <sup>3</sup> (euro al m <sup>3</sup> )	0.63	0.63

<i>Fabbisogno annuo combustibile (m<sup>3</sup>)</i>	<b>7235</b>	<b>6690</b>
<i>Spesa annua (euro)</i>	<b>11484</b>	<b>4215</b>

**Tabella 6.29- Spesa annua con caldaia tradizionale e caldaia a condensazione.**

Sapendo che ogni m<sup>3</sup> di gas naturale emette 1.15 kg di CO<sub>2</sub>, passando dall'utilizzo di una caldaia tradizionale ad una a condensazione si ha una diminuzione dell' 8% di emissioni, passando da 8.32 tonnellate di CO<sub>2</sub> a 7.69.

### ***Pompa di calore***

Anche in questo caso conoscendo il fabbisogno medio stagionale è possibile, attraverso una facile conversione, calcolare l'energia elettrica utilizzata in un anno dalla pompa di calore. A questo punto moltiplicando tale valore per il costo al kWh dell'energia si trova in maniera immediata la spesa in termini economici.

	<i>Pompa di calore</i>
Fabbisogno medio stagionale (MJ)	105505
Costo energia elettrica (euro al kWh)	0.12

<i>Fabbisogno annuo combustibile (kWh)</i>	<b>5861</b>
<i>Spesa annua (euro)</i>	<b>773</b>

**Tabella 6.30- Spesa annua con caldaia tradizionale e caldaia a condensazione.**

E' quindi immediato vedere un risparmio in termini di spesa sui consumi annui.

Anche in questo caso è possibile stimare l'emissione di CO<sub>2</sub> derivante da kW elettrici. Sapendo che 1 kWh produce 0.43 kg di CO<sub>2</sub> si ha una corrispondente emissione di 1.66 tonnellate di CO<sub>2</sub>. Il risparmio in termini di CO<sub>2</sub> emessi è del 362% rispetto ad una caldaia a condensazione.

Se poi si considerasse l'utilizzo della pompa di calore in un edificio dove vengono rispettati i valori di trasmittanza imposti dall'attuale normativa la spesa si ridurrebbe ulteriormente fino a raggiungere i 360 euro.

## 6.7 Carichi termici e fabbisogno estivo

---

### 6.7.1 Carichi termici estivi

---

Il calcolo dei carichi termici estivi, rispetto a quello delle dispersioni invernali, richiede una più difficile valutazione vista la molteplicità dei fattori da considerare per la stima dei carichi ambiente.

In particolare, mentre per il calcolo delle dispersioni invernali si può far riferimento a condizioni stazionarie (si assume cioè che la temperatura dell'aria esterna rimanga costante nel corso della giornata e pari al valore di progetto) senza commettere grandi errori, nel caso dei carichi estivi tale discorso viene a mancare a seguito dell'estrema variabilità dei flussi termici legati alla radiazione solare.

Si parla, infatti, di carichi termici "rotanti" estremamente variabili nel corso della giornata e strettamente influenzati dalle caratteristiche inerziali delle strutture, responsabili di fenomeni di attenuazione e sfasamento temporale del carico termico effettivo rispetto all'apporto di calore istantaneo.

La stima dei carichi ambiente prevede, quindi, un'attenta valutazione di tutte le componenti che contribuiscono alla definizione dei carichi sensibili e latenti:

- Contributi di calore sensibile:
  - Radiazione solare attraverso vetri, muri, tetti;
  - Trasmissione attraverso vetri, muri e tetti;

- Infiltrazione di aria esterna;
  - Apporto interno all'ambiente dovuto a persone, luci, apparecchiature elettriche.
- Contributi di calore latente:
- Apporto di vapore dovuto a persone presenti in ambiente;
  - Infiltrazione di aria esterna, avente in genere un'umidità specifica superiore a quella dell'aria ambiente;
  - Vapore prodotto in ambiente da eventuali processi o apparecchiature presenti.

Sulla base di quanto appena detto appare evidente che una stima precisa dei carichi ambiente, vista la molteplicità dei fattori da considerare, prevede un'attenta valutazione dei differenti contributi alle varie ore della giornata.

Pur coscienti di tali considerazioni si è voluta fare una stima dei carichi termici estivi attraverso il software MC4 Suite 2009, che come si è detto precedentemente lavora in regime stazionario.

La scelta della potenzialità dell'impianto sarà quindi determinata dal valore del carico massimo concomitante ad una data ora.

Dai dati elaborati si è ottenuto:

<b>Potenza massima (W)</b>	<b>Ora</b>	<b>Mese</b>
32624	18	7

**Tabella 6.31- Potenza massima estiva.**

Ciò significa che l'impianto di climatizzazione dovrà essere dimensionato in maniera tale da abbattere tale potenza massima.

### 6.7.2 Fabbisogno energetico estivo

Come è successo per il fabbisogno invernale il software MC4 consente la valutazione del fabbisogno energetico estivo dell'edificio in maniera automatica sempre in accordo con la norma UNI EN 11300-1. Si ricorda che il periodo di raffrescamento è compreso tra il 16/04 al 16/10.

Suddividendo l'unità immobiliare nei due appartamenti che la costituiscono si ottengono i risultati qui di seguito definiti.

<b>Appartamento 1</b>						
	$Q_{cool}$	$Q_{int}$	$Q_{sol}$	$\eta$	$Q_{trasm}$	$Q_{vent}$
gen	0	0	0	0	0	0
feb	0	0	0	0	0	0
mar	0	0	0	0	0	0
apr''	-26	583	3523	0.35	10472	1333
mag	-30	1205	8605	0.60	14579	1821
giu	3591	1166	9066	0.98	6077	700
lug	8998	1205	9798	1.00	1865	140
ago	6200	1205	8000	1.00	2748	257
set	117	1166	6199	0.72	8983	1084
ott''	-5	544	2152	0.26	9133	1254
nov	0	0	0	0	0	0
dic	0	0	0	0	0	0
<b>MJ</b>	<b>18845</b>	<b>7074</b>	<b>47343</b>		<b>53857</b>	<b>6589</b>

Tabella 6.32- Fabbisogno energetico estivo appartamento 1.

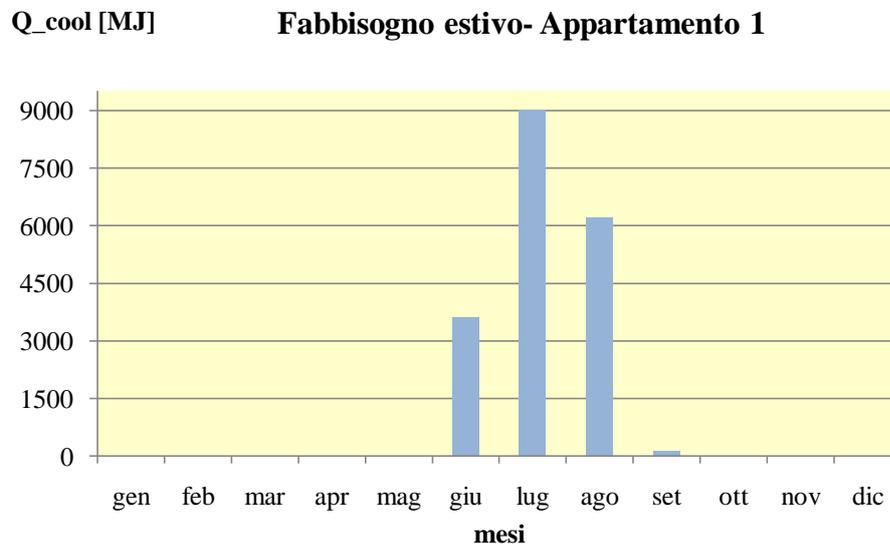


Grafico 6.3- Fabbisogno energetico estivo appartamento 1.

<b>Appartamento 2</b>						
	$Q_{cool}$	$Q_{int}$	$Q_{sol}$	$\eta$	$Q_{trasm}$	$Q_{vent}$
gen	0	0	0	0.0000	0	0
feb	0	0	0	0.0000	0	0
mar	0	0	0	0.0000	0	0
apr	18	583	2519	0.3700	7620	714
mag	350	1205	6412	0.6200	10746	975
giu	3169	1166	6935	0.9700	4710	375
lug	6882	1205	7492	1.0000	1740	75
ago	4667	1205	5965	1.0000	2365	138
set	393	1166	4298	0.6900	6768	581
ott	23	544	1388	0.2600	6673	671
nov	0	0	0	0.0000	0	0
dic	0	0	0	0.0000	0	0
<b>MJ</b>	<b>15502</b>	<b>7074</b>	<b>35009</b>		<b>40623</b>	<b>3528</b>

Tabella 6.33- Fabbisogno energetico estivo appartamento 2.

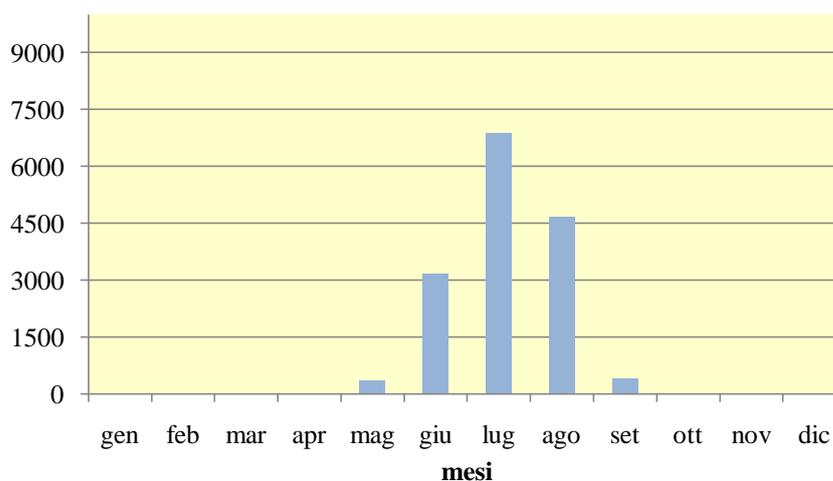
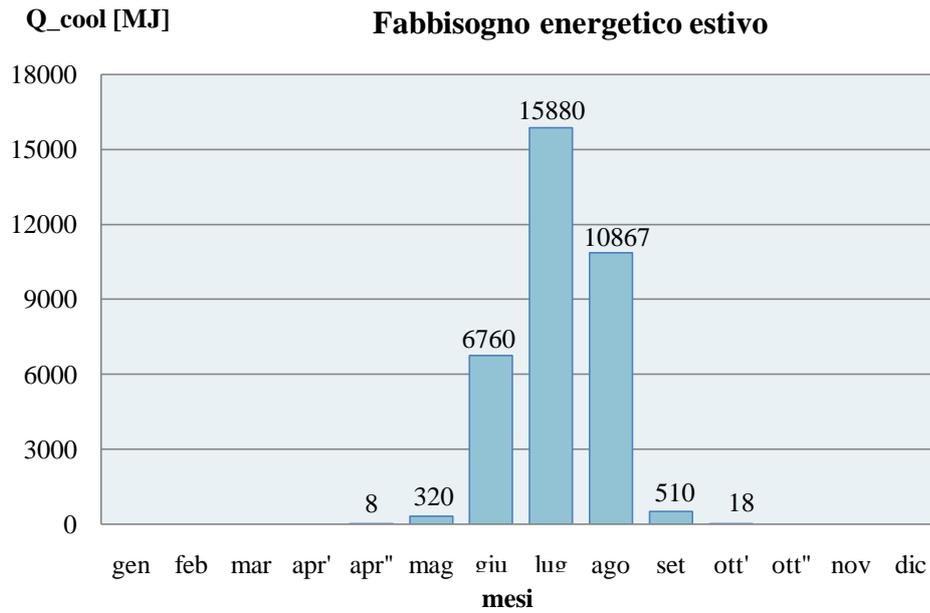
**Q<sub>cool</sub>[MJ] Fabbisogno energetico estivo- Appartamento 2**


Grafico 6.4- Fabbisogno energetico estivo appartamento 2.

Nel complesso l'interna unità immobiliare possiede un fabbisogno energetico estivo pari a **34347 MJ**.



E facile vedere la grande differenza tra il fabbisogno energetico estivo e quello invernale.

Dall'elaborazione della legge 10 in regime estivo si è infine ottenuto:

<b>Fabbisogno annuo di energia per raffrescamento estivo (kJ/anno)</b>	34526269
<b>Indice di prestazione dell'involucro edilizio (kW/m2 anno)</b>	18.07

Tabella 6.34- Risultati per il caso estivo.

## 6.8 Capacità termica e costante di tempo

Le variazioni di calore che avvengono durante il giorno fanno sì che il flusso di calore tra interno e esterno dell'edificio cambia in maniera considerevole con il passare delle ore. Un involucro ben progettato, dunque, deve isolare l'ambiente interno da questi sbalzi di temperatura. Oltre, naturalmente, attraverso l'impianto di climatizzazione questo può essere raggiunto attraverso le proprietà stesse dell'involucro edilizio: la massa termica. L'inerzia termica consiste nella capacità del materiale di opporsi al passaggio di calore e di

accumularne una parte in modo tale da mantenere la temperatura interna costante, omogenea e confortevole. Tale ritardo, con cui l'involucro cede il calore accumulato si chiama sfasamento ed indica il tempo che impiega il flusso di calore per passare da un lato all'altro dell'involucro. Quindi per avere una buona funzione stabilizzatrice l'involucro deve possedere due importanti caratteristiche: una bassa conducibilità termica da un lato e dall'altro un'elevata capacità termica. Per definizione la **capacità termica** rappresenta la *quantità di energia che devo fornire all'edificio per far aumentare di 1 °C la temperatura*, in pratica definisce la possibilità del muro di immagazzinare calore, calore che in un secondo momento verrà ceduto agli ambienti interni. Invece la **conducibilità termica** è per definizione la *quantità di calore che passa attraverso due opposte superfici aventi volume unitario e una differenza di temperatura di 1 °C*. E' quindi immediato affermare che il tempo con cui un'onda di calore attraversa il muro è proporzionale alla capacità termica e inversamente proporzionale alla conducibilità. Quanto più alta è la capacità termica tanto più il calore impiegherà ad essere trasmesso attraverso l'involucro, e quanto maggiore sarà la conducibilità termica tanto minore sarà il tempo impiegato dal flusso di calore ad attraversare l'involucro. Si chiama dunque **costante di tempo**,  $\tau$ , il rapporto tra capacità termica dell'edificio e il coefficiente di dispersione termica. Tanto maggiore è  $\tau$  tanto maggiore sarà il tempo in cui l'edificio cambia la sua temperatura.

A fronte di quanto appena affermato risulta interessante la valutazione sia della capacità termica che della costante di tempo.

Il software, utilizzato per il calcolo in regime stazionario, ne permette la determinazione secondo quanto prescritto dalla norma UNI EN 13786.

Si riportano qui di seguito i risultati ottenuti distinguendo entro i due appartamenti:

	<i>Appartamento 1</i>	<i>Appartamento 2</i>
<i>Capacità termica (kJ/K)</i>	109905	58263
<i>Coefficiente di dispersione (W/K)</i>	740	514
<i>Costante di tempo (h)</i>	41	31

**Tabella 6.35- Capacità termica e costante di tempo dei due appartamenti componenti l'unità immobiliare.**

Questi valori riguardo la costante di tempo ci dicono che il secondo appartamento risente in maniera leggermente maggiore delle variazioni di temperatura esterna rispetto al primo. Proprio per questo motivo come si vedrà nel Capitolo 7 par. 7.8 spegnendo istantaneamente l'impianto di riscaldamento o di raffrescamento la temperatura scende o sale maggiormente nella seconda abitazione piuttosto che nella prima.

## 6.9 Considerazioni riassuntive

L'analisi in regime stazionario, avvenuta attraverso il software commerciale MC4 Suite 2009, ha consentito di conseguire diversi obiettivi. Per capire al meglio i risultati ottenuti si riportano qui di seguito le osservazioni riassuntive sui diversi fronti analizzati.

### **Dimensionamento dei pannelli radianti**

Avvalendosi della norma UNI EN 1264 si è calcolata la temperatura di mandata e la massima potenza emessa dal pannello per m<sup>2</sup>, risultanti pari a 40 °C e 85 W/ m<sup>2</sup>. Dai risultati ottenuti, note le dispersioni dei locali e la superficie pannellabile, si è riscontrato che tra tutti i locali componenti l'unità immobiliare, in 8 di essi (di cui 5 bagni) non si sarebbe stati in grado di soddisfare il carico termico solamente attraverso l'utilizzo di impianti a pannelli a pavimento. Si è quindi scelto una soluzione che comprendesse l'inserimento di termoarredo nei bagni (escludendo in essi l'utilizzo di pannelli radianti) mentre nei restanti 3 locali la potenza residua è stata compensata attraverso l'uso di pannelli radianti a parete. In base dunque al carico da soddisfare è stato scelto, per ogni locale, un passo di tubi adeguato. Il

dimensionamento dei pannelli radianti è stato sviluppato, oltre che con il software MC4, anche con un programma liberamente scaricabile dal sito Caleffi s.p.a. Entrambi i risultati ottenuti attraverso i due software sono stati convalidati mediante l'utilizzo di un foglio di calcolo Excel nel quale sono state riportate le formule da normativa. Dal confronto si è riscontrata una variazione minima tra i risultati ottenuti attraverso i due software e il foglio Excel.

### **Fabbisogno energetico netto edificio**

Per quanto riguarda il fabbisogno di energia netta nel periodo invernale si è riscontrato un fabbisogno maggiore nell'appartamento con superficie disperdente più elevata. Dai dati ottenuti si è visto come ci sia un'incidenza maggiore degli scambi per trasmissione su quelli per ventilazione sia nel caso estivo che in quello invernale. Per quanto riguarda poi gli apporti termici è emerso che quelli solari danno un contributo maggiore di quelli interni, rimanendo quest'ultimi costanti su tutto l'anno. E' stato inoltre possibile valutare la costante di tempo,  $\tau$ , rapporto tra capacità termica e coefficiente di dispersione termica. Si riscontra che  $\tau$  risulta leggermente maggiore nel primo appartamento rispetto al secondo; questo sta ad indicare che l'appartamento più piccolo risentirà in maniera leggermente maggiore delle variazioni esterne di temperatura.

### **Fabbisogno di energia primaria edificio**

Si è voluto valutare la variazione di fabbisogno di energia primaria (e di conseguenza variazione su rendimento medio stagionale e indice di prestazione energetica) che si avrebbe inserendo all'interno dell'edificio una caldaia tradizionale, una caldaia a condensazione oppure una pompa di calore geotermica. Dal confronto tra caldaia tradizionale e caldaia a condensazione è stato possibile notare un aumento del rendimento medio stagionale passando da un valore di 84 a 91. Di tutti i termini che entrano in gioco nel calcolo del rendimento il termine che incide su tale aumento è il rendimento di produzione. Naturalmente il rendimento di produzione risulta maggiore in una caldaia a condensazione in quanto, come è noto, tale tipo di caldaia sfrutta il calore latente di vaporizzazione facendo condensare i fumi. Da sottolineare che si

sarebbe riscontrato un aumento maggiore nel caso in cui l'impianto di riscaldamento fosse costituito solamente da pannelli radianti. Il fatto di aver inserito nei bagni i termoarredo fa sì di diminuire il rendimento finale in quanto la temperatura di mandata dal generatore deve essere più elevata. Naturalmente un aumento del rendimento medio stagionale,  $\eta_g$ , fa sì di diminuire l'indice di prestazione energetica facendolo passare da  $130 \text{ kW/hm}^2 \text{ anno}$  a  $130 \text{ kW/hm}^2 \text{ anno}$ . Analizzando poi l'utilizzo di una pompa di calore geotermica si riscontra un aumento ulteriore del rendimento medio stagionale, anche in questo caso è il rendimento di produzione che aumenta arrivando ad un valore pari a 220. Si nota quindi come l' $EP_i$  cali enormemente raggiungendo un valore di  $55 \text{ kW/hm}^2 \text{ anno}$ .

Infine è risultato interessante vedere come il fabbisogno di energia primaria, e quindi tutti i parametri ad esso correlati, varino nel caso di un edificio gemello nel quale, però sono stati considerati pacchetti murari che rispettano i valori di trasmittanza definiti dalla normativa attuale. I risultati così ottenuti hanno dimostrato che l'utilizzo della medesima pompa di calore, installata in un edificio che rispetti gli attuali parametri progettuali, fornirebbe un  $EP_i$  ancora più basso. L'edificio essendo più isolato ha una minor dispersione verso l'esterno e quindi anche una minor perdita per distribuzione ma in termini percentuali il rendimento di distribuzione risulta minore. L'ultimo confronto effettuato è stata la valutazione della quantità di combustibile o di elettricità, necessari in un anno, al fine di soddisfare il fabbisogno dell'edificio utilizzando rispettivamente caldaia o pompa di calore. In questo modo si potuto valutare l'incidenza economica delle varie soluzioni. Dai risultati così ottenuti si è visto come passando da una caldaia tradizionale a una a condensazione si ha un risparmio di circa il 63% sulla spesa annua passando da 11484 € a 4219 €. L'utilizzo poi di una pompa di calore fa diminuire ulteriormente i consumi, essendo il costo dell'energia elettrica per kWh molto minore rispetto al costo di un  $\text{m}^3$  di combustibile. Si arriva dunque ad una spesa annua pari a 773 €. Inquadrando tale ragionamento da un punto di vista ambientale è stato immediato notare come l'emissione di  $\text{CO}_2$  diminuisca in maniera rilevante.



## Capitolo 7

### Analisi in regime dinamico

La differenza tra l'analisi statica (analisi vista nel capitolo precedente) e dinamica consiste principalmente nella scelta di alcuni parametri, che nel calcolo del regime stazionario, così come dice la parola stessa, si valutano senza variazioni nel tempo al contrario del caso dinamico in cui si sceglie di farli variare. Quindi mentre nel regime stazionario si ipotizza una temperatura interna all'alloggio fissa a 20°C e una temperatura esterna costante (valore ricavabile dalle norme); in regime dinamico si considerano dati climatici su base oraria e quindi variabile nel corso della giornata.

*Le simulazioni in regime stazionario consentono di indagare solo in modo parziale le reali prestazioni degli edifici, queste partono dall'assunto che la variazione ciclica delle temperature e il contributo imputabile alla radiazione solare possono essere trascurati, per cui i dati climatici utilizzati sono molto aggregati. Le simulazioni effettuate in regime dinamico, invece permettono un'analisi molto più realistica e completa valutando nel dettaglio i contributi apportati dall'inerzia termica dell'involucro e dalle ventilazione naturale, che hanno ripercussioni sulle prestazioni termiche sia in regime invernale, sia in quello estivo.*

E' possibile affermare, dunque, che il reale comportamento termico-dinamico dell'edificio è, strettamente dipendente dalle oscillazioni delle condizioni interne all'edificio (determinate dalla modalità di occupazione e di gestione degli impianti), e contemporaneamente dalle fluttuazioni delle condizioni

climatiche che si verificano al suo esterno. Per determinare, quindi, tali effetti è necessario procedere con valutazioni di tipo dinamico, che considerino la variabile temporale, correlata alla capacità termica dei materiali, nello studio dei fenomeni di trasmissione del calore.

Considerare una valutazione di tipo dinamico consente di valutare per quanto riguarda l'involucro edilizio, non solo la resistenza termica (unica caratteristica valutata in regime stazionario), ma anche un fenomeno molto importante : che l'effetto di mitigazione termica, fra le condizioni interne ed esterne, avviene nel tempo. Si assiste dunque a due effetti:

1. smorzamento dell'onda termica: la quantità di calore che passa da un ambiente all'altro viene ridotta grazie all'isolamento;
2. sfasamento dell'onda termica: effetto che dipende dalle proprietà termofisiche del materiale che compone le pareti esterne dell'edificio. In particolare, le murature riescono ad accumulare calore in quantità dipendente dalle loro caratteristiche di capacità termica e massa.

Risulta dunque di fondamentale importanza considerare l'**inerzia termica**.

Esistono a tale scopo diversi software che consentono di effettuare simulazioni del comportamento energetico dell'edificio.

In questo capitolo si studierà l'edificio attraverso il software TRNSYS 16.1.

## 7.1 Strumento di calcolo utilizzato: TRNSYS 16.1

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

Tale strumento contiene diverse interfacce grafiche. Nel lavoro che seguirà si farà riferimento solamente a due di esse: TRNBUILD e SIMULATION STUDIO.

Vale la pena, per comprendere meglio quanto sarà detto in seguito, illustrare le due piattaforme.

### 7.1.1 Interfaccia: TRNBUILD

L'interfaccia TRNBUILD è lo strumento utilizzato per inserire i dati di input per gli edifici multizona.

Aprendo l'interfaccia ci si trova davanti alla schermata di Figura 7.1.

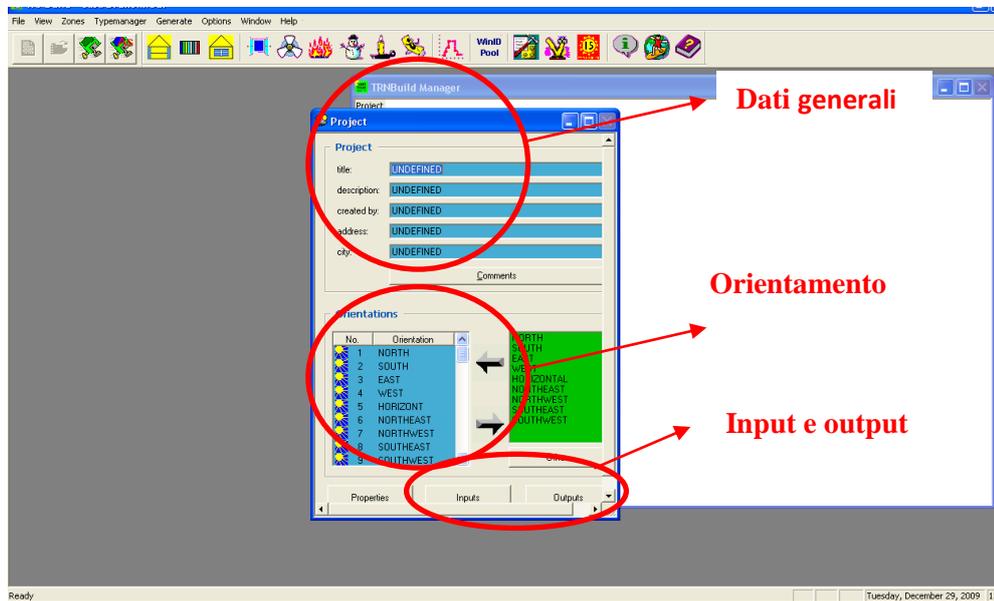


Figura 7.1- Schermata di iniziale di TRNBUILD.

La finestra di inizializzazione del progetto consente di impostare i dati generali del progetto, quali: nome, descrizione, paese, indirizzo dell'edificio di cui si farà la simulazione. E' inoltre possibile definire i tipi di orientamento che poi verranno utilizzati nella schermata della zona. Oltre a quelli già presenti è possibile definirne altri attraverso il tasto "Other". Per quanto riguarda le proprietà adottate, in mancanza di una definizione dell'utente si utilizzano i valori di default.

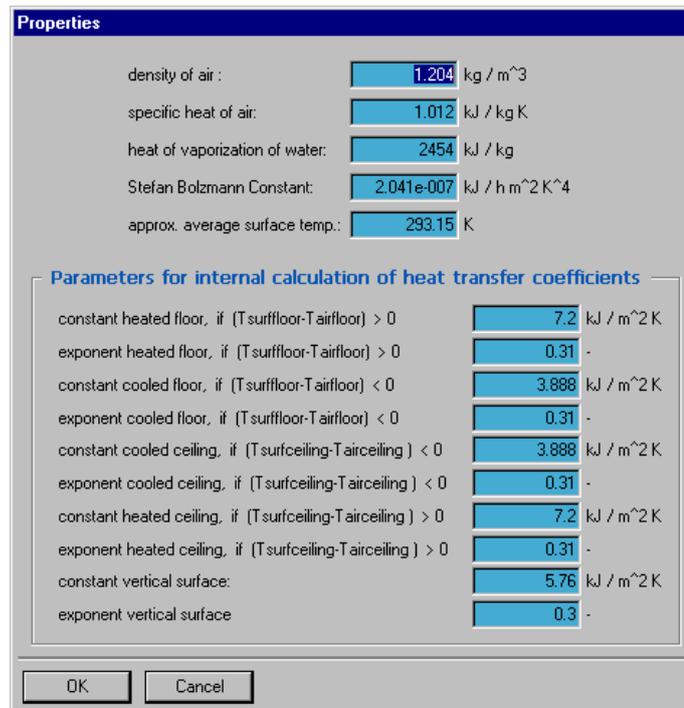


Figura 7.2- Proprietà di default.

Attraverso il tasto *Input* è possibile creare gli *Input* di ingresso del progetto mentre grazie al tasto *Output* è possibile definire il tipo di output che si desidera.

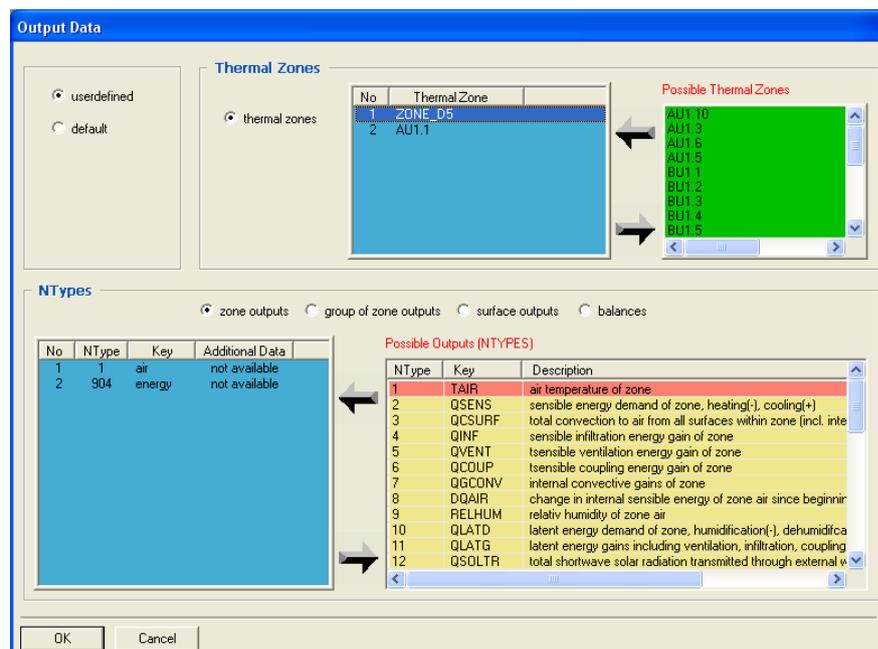


Figura 7.3- Creazione di un nuovo output.

La finestra ZONE descrive tutte le informazioni che definiscono una zona termica. I dati che descrivono una zona possono essere divisi in quattro punti principali:

1. Dati iniziali;
2. Caratteristiche pareti;
3. Caratteristiche finestre;
4. Dati sui ricambi d'aria attraverso le finestre (infiltration) e per ventilazione meccanica (ventilation), dati sugli impianti di riscaldamento (heating) e raffreddamento (cooling) con le rispettive caratteristiche e apporti gratuiti (gains).

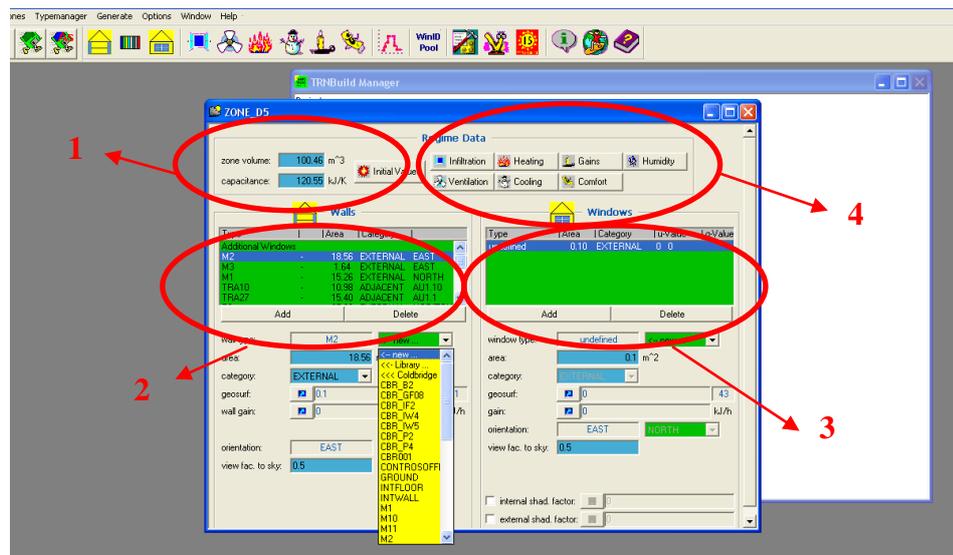


Figura 7.4- Schermata di una zona.

### 1. Dati iniziali

Sono rappresentati da:

- Volume della zona;
- Capacità termica (calcolato in maniera automatica dal programma una volta inserito il volume moltiplicando tale volume per 1.2) e modificabile successivamente;
- Temperatura iniziale;
- Umidità iniziale.

## 2. Caratteristiche pareti

In questa parte della schermata l'utente può aggiungere, modificare o eliminare le pareti di una zona. Cliccando il tasto *Add* è possibile inserire i muri che comporranno la zona. Per la selezione del muro è possibile visualizzare i muri disponibili dal menù a tendina situato nella parte destra della sezione. Il programma è di fatti dotato di una libreria da cui è possibile scegliere il tipo di muro necessario alle proprie esigenze. Risulta comunque possibile definire 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 *layer* (che rappresentano i materiali di cui sarà composta la parete) desiderati si è in grado di costruire il pacchetto murario necessario. Va sottolineato che anche in questo caso i *layer*, possono, sia essere scelti dalla libreria di cui è in possesso Trnsys, sia essere creati, noti conducibilità, densità e capacità del materiale.

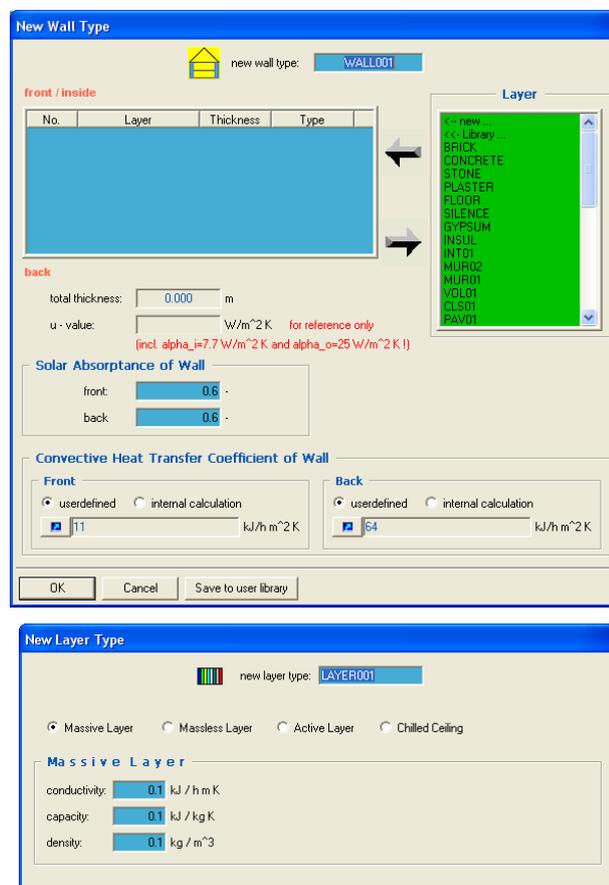


Figura 7.5- Creazione di un nuovo muro e di un nuovo materiale.

Una volta selezionato il tipo di muro occorre definire la superficie, la categoria, cioè se si tratta di muro esterno, interno, confinante con un'altra zona, o di bordo e infine è necessario fissare l'orientazione.

### **3. Caratteristiche finestre**

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 finestra. Le finestre possono essere scelte tra un elenco a disposizione oppure create. In quest'ultimo caso è necessario far riferimento ad un ulteriore programma compatibile con Trnsys, Window 5.1.

### **4. Dati di definizione**

*Infiltrazioni*: possono essere specificati i flussi d'aria che da una zona vanno verso un'altra zona;

*Ventilazione*: in questa sezione può ad esempio essere specificato un flusso d'aria proveniente dal terminale di raffrescamento o riscaldamento;

*Riscaldamento*: creando un nuovo tipo di 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*: creando un nuovo tipo di raffrescamento l'utente deve inserire la temperatura di settaggio, la potenza di raffrescamento e la deumidificazione dell'aria all'interno della zona.

*Apporti gratuiti*: è possibile definire gli apporti interni conferiti dalla presenza di persone, di elettrodomestici, lampade elettriche o altri carichi energetici.

## **7.1.2 Interfaccia: SIMULATION STUDIO**

---

Una volta modellato l'edificio comincia la fase della simulazione vera e propria.

Per far partire le simulazioni si lavora sulla piattaforma SIMULACION STUDIO.

In questa interfaccia ritroviamo i *Type*, che simulano il nostro edificio, collegati tra loro attraverso appositi collegamenti che servono a stabilire il tipo di correlazione che intercorre tra i vari componenti.

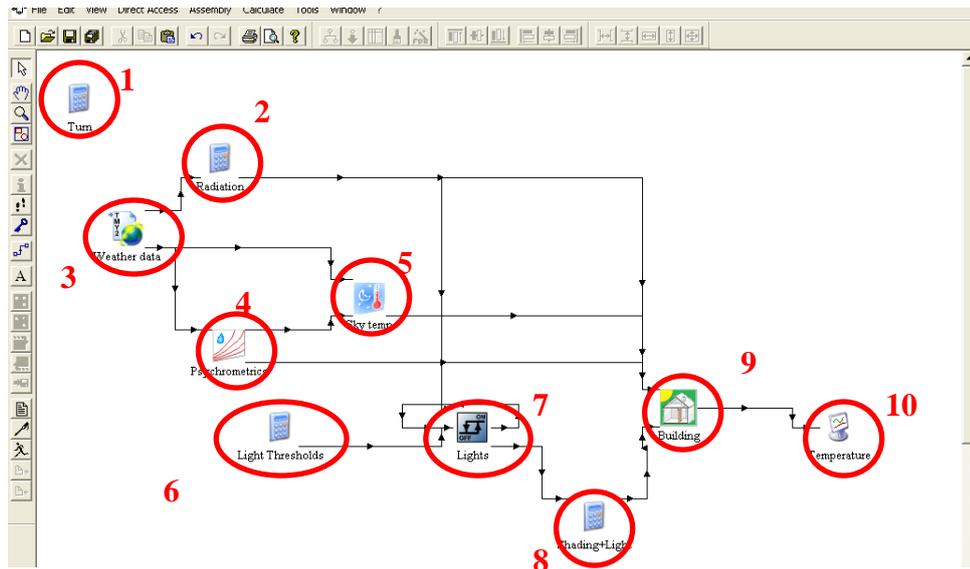


Figura- 7.6- Schermata di Simulation Studio.

La creazione di un nuovo progetto “ *Building Project* ” porta in automatico alla creazione dello schema visualizzato in Figura 7.6.

Di cui elencando i Type e le loro caratteristiche:

1. Turn: file contenenti funzioni di calcolo;
2. Radiation: file contenenti funzioni di calcolo;
3. Weather data: Type 109, file meteo (soleggiamento, umidità, temperature sterna velocità venti, ecc..);
4. Sky temp: Type 69, file meteo (nuvolosità);
5. Psychrometric: Type 33, dati psicrometrici;
6. Light thresholds: file contenenti funzioni di calcolo;
7. Lights: Type 2, file di controllo del processo;
8. Shading+lights: file contenenti funzioni di calcolo;
9. Building: Type 56, file che caratterizza l’edificio. Da questo type si richiama l’interfaccia Trnbuild;
10. Temperature: Type 65, file di pubblicazione dei risultati.

A questi *Type* è naturalmente possibile aggiungerne altri in base al tipo di esigenza, facendo attenzione ai collegamenti.

Cliccando su ciascun *Type* è possibile conoscere i dati in ingresso e in uscita al *Type* stesso mentre cliccando sul collegamento si è in grado di creare i collegamenti tra i dati in uscita di un *Type* e quelli in ingresso al *Type* collegato.

Lanciando, dunque, la simulazione è possibile visualizzare i file in un apposita interfaccia grafica oppure esportarli come file di testo in modo da poterli gestire con altri programmi di calcolo.

## 7.2 Modellazione dell'edificio esaminato

L'unità immobiliare è stata simulata in TRNSYS attraverso la creazione di due modelli:

*1 modello:* costituito di 23 zone; 4 zone rappresentanti i sottotetti e le restanti rappresentanti gli ambienti di cui è composto l'edificio. Questo modello verrà usato per il calcolo del fattore di carico;

*2 modello:* costituito di 8 zone; 4 zone rappresentanti i sottotetti, 2 zone rappresentati gli appartamenti costituenti l'edificio e 2 zone non riscaldate (rappresentanti garage e locale impianto). Tale modello troverà la sua applicazione nel calcolo del fabbisogno dell'unità immobiliare e in altre simulazioni che verranno meglio descritte in seguito.

Prima di procedere, però, alla creazione delle varie zone, si è dovuto procedere con la creazione dei pacchetti murari, di cui è costituito l'edificio e con la creazione delle finestre. E' bene quindi presentare una breve descrizione di come è avvenuta tale realizzazione.

### 7.2.1 Creazione dei pacchetti murari

I pacchetti murari che è stato necessario creare sono quelli illustrati nel Capitolo 5.

Per la creazione dei pacchetti murari si è proceduto come illustrato nel paragrafo 7.1.1.

Per comprendere meglio i vari passi prendiamo in esame solamente uno di essi, sottolineando che per gli altri si è proceduto nella stessa maniera.

Analizziamo come esempio esplicativo il pacchetto murario **M1**.

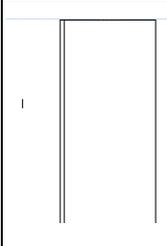
	MATERIALI	s	$\lambda$		ct	$\rho$
		[m]	[W/mK]	[kJ/hmK]	[kJ/hm <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>3</sup> ]
	intonaco interno	0.010	0.700	2.520	0.910	1400
	parete in cls	0.300	1.910	6.876	0.850	2400

Figura 7.7- Pacchetto murario M1.

Aprendo l'interfaccia TRNBUILD, nella sezione riguardante la caratteristica della definizione del muro è possibile procedere con la costruzione del pacchetto.

I passi seguiti per la realizzazione sono stati :

**passo 1:** selezionare *New* dal menù a tendina. Compare una nuova finestra “*New wall type*”.

**passo 2:** nel box in alto a destra definire il nome associato al muro: M1.

**passo 3:** selezionare *new* nel menù dei layer. Compare la finestra “*New layer type*”.

**passo 4:** digitare il nome che si vuole associare al primo layer (intonaco interno) e immettere i valori di conducibilità termica, calore specifico e densità, noti dalla specifiche tecniche.

**passo 5:** fissare lo spessore del primo materiale componente il pacchetto, quindi 10 mm.

**passo 6:** aggiungere un altro layer per immettere la parete in cls.

**passo 7:** salvare il muro come “*Save to user library*”. In tal modo è possibile richiamare il tipo di muro appena costruito in progetti differenti.

Una volta definiti tutti i pacchetti murari si è stati in grado di ottenere una libreria contenente tutti i tipi di muri desiderati.

## 7.2.2 Creazione delle finestre

La creazione delle finestre purtroppo non risulta così immediata come accade per la definizione dei pacchetti murari. In tal caso si è dovuto utilizzare un altro software, Window 5.1, dal quale è possibile salvare dei file di testo che, copiati in un apposita cartella possono essere letti da Trnsys.

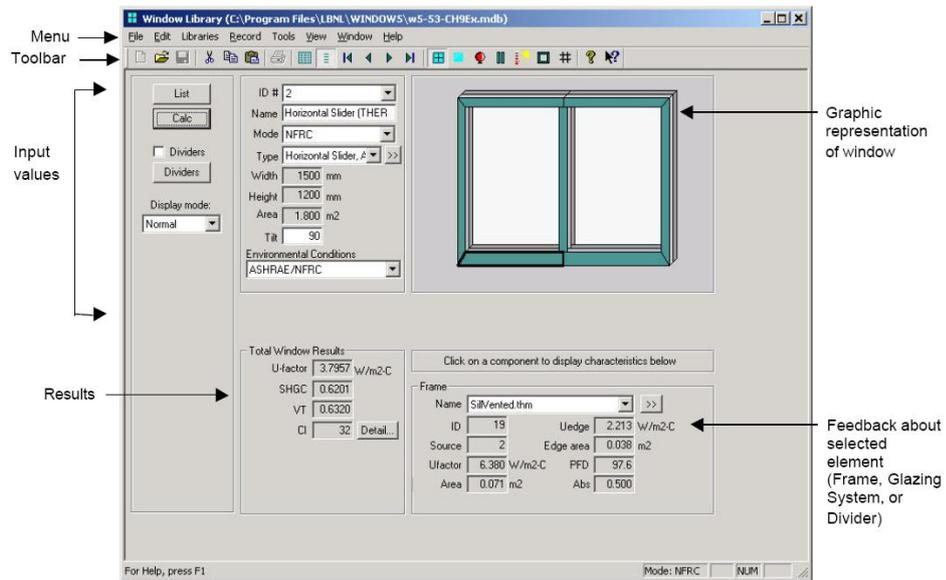


Figura 7.8- Schermata principale di Window 5.1.

Prima di procedere con la creazione di tutte le componenti finestrate dell'edificio in questione è stato necessario creare il sistema di vetri e il telaio uguali per tutte le finestre.

#### 7.2.2.1 Creazione del sistema di vetri

Il sistema di vetri che è stato utilizzato per le finestre dell'edificio è un doppio vetro 3.9-12-4 con intercapedine di krypton.



Cliccando il tasto  è stato possibile procedere con la creazione del vetro. Definendo il nome del vetro nel box in alto a destra, è possibile selezionare il tipo di vetro e di intercapedine desiderata, da un elenco già presente nel programma.

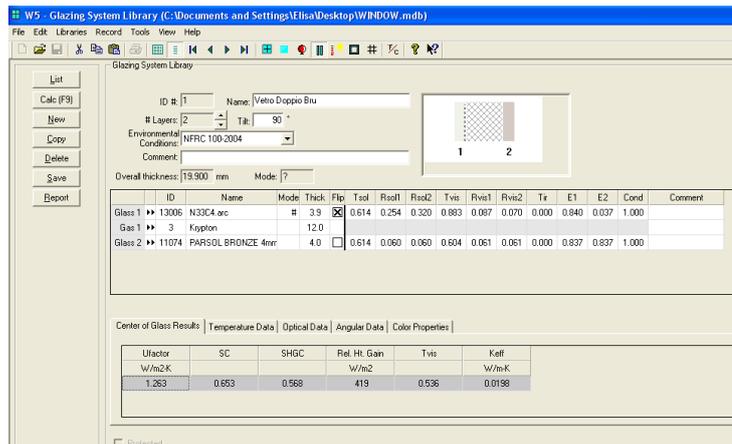


Figura 7.9- Schermata di creazione del vetro.

E' possibile vedere, già in questa schermata la trasmittanza termica del vetro in ( $W/m^2K$ ).

### 7.2.2.2 Creazione del telaio

I tipi di telai utilizzati sono due: un tipo per il telaio esterno e uno per il telaio interno, in particolare il primo con uno spessore di 115 mm e il secondo con uno spessore di 70 mm.



Cliccando il tasto  ci si trova davanti ad una lista di telai predefiniti. Per creare il nuovo telaio è stato necessario cliccare il tasto *new*, ottenendo una nuova schermata in cui è possibile definire le caratteristiche del telaio desiderato.

Definendone il nome, la trasmittanza, fissata a  $2.06 W/m^2K$ , lo spessore (differente nei due casi) e il coefficiente di assorbimento del materiale scelto a 0.7, è quindi stato possibile creare i due telai.

### 7.2.2.3 Creazione della finestra

Ritornando nella schermata principale di Window è finalmente possibile procedere alla realizzazione delle finestre.

I passi seguiti per la realizzazione di una singola finestra possono essere riassunti qui di seguito:

**passo 1:** cliccare sulla casella *new*.

**passo 2:** definizione del nome dell'infisso.

**passo 3:** selezionare nel box type custom dual vision o custom single vision a seconda che la finestra che si vuole creare sia unica o separata in due parti.

**passo 4:** definizione della larghezza e dall'altezza.

**passo 5:** cliccando sul vetro oppure sul telaio è possibile selezionare dal menù a tendina in basso il tipo di vetro e telaio precedentemente creati.

**passo 6:** cliccando *Calc* è possibile lanciare i calcoli.

Per salvare le caratteristiche dell'infisso così creato, in modo da poterle immettere nella libreria di Trnsys è necessario cliccare sul tasto *Report* e selezionare come report Type: DOE-2. E' di fatti questo il tipo di salvataggio che consente di copiare immediatamente l'infisso qui creato, nell'archivio di Trnsys. In realtà per quanto riguarda gli infissi a due ante non è stato possibile il salvataggio in tale formato; si è quindi proceduto con il salvataggio in ENERGY-PLUS. In questo caso è stato necessario apportare alcune modifiche al file creato in modo da essere compatibile con Trnsys.

### 7.2.3 Creazione delle zone tramite TRNBUILD

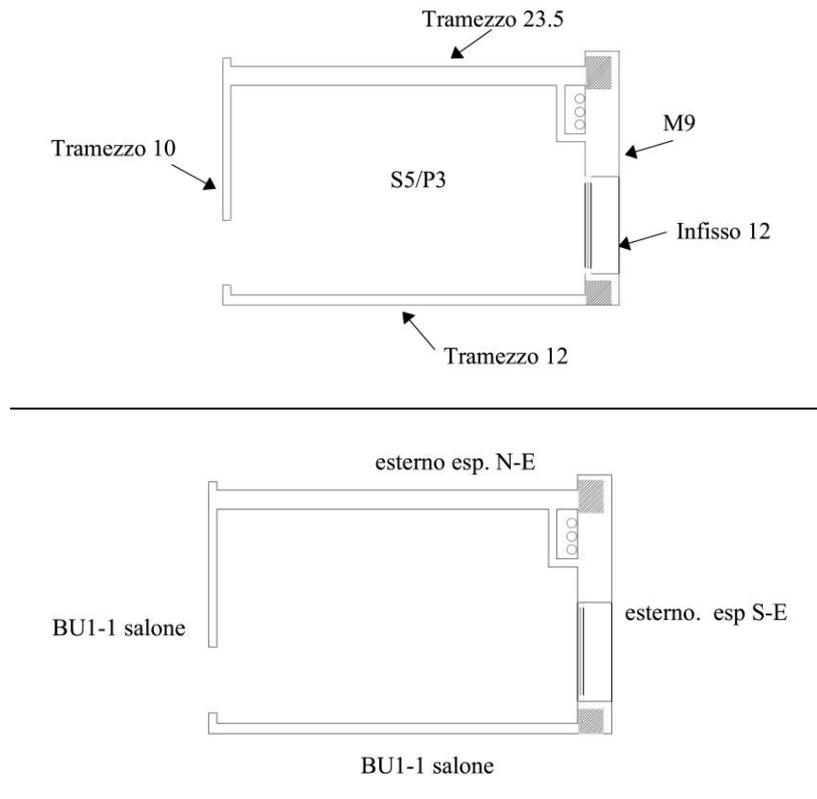
---

Una volta definiti i pacchetti murari di cui è composto l'involucro edilizio, e le finestre è stato possibile procedere con la creazione delle varie zone. Per spiegare come avviene in TRNSYS la creazione di una zona si elencheranno di seguito i passi eseguiti per la realizzazione di un ambiente, costituente il primo modello sopra citato (in analogia si è proceduto per la creazione del secondo modello).

Come detto in precedenza nel file costituente il *1 modello* sono state create 23 zone. Per capire meglio come si è proceduto alla creazione delle singole zone, si riportano qui di seguito i passi effettuati per il locale BU1-7, vano cucina situato al primo piano dell'appartamento occupante la parte destra dell'unità immobiliare.

In primo luogo è necessario definire il volume del locale nel box in alto a sinistra. Tale volume è stato dedotto dalle piante.

Per conoscere, poi, il tipo di muri caratterizzanti il suddetto locale si è fatto riferimento a quanto precedentemente definito nel software MC4.



**Figura 7.10- Vano BU1-7.**

Una volta note le tipologie delle pareti e le rispettive aree si è potuto procedere con l'immissione delle stesse nella sezione *Walls*. Per la selezione della tipologia di muro si è richiamato tramite il menù a tendina la libreria che era stata creata precedentemente, contenente tutti i muri di cui è composto l'edificio.

Si riporta nella tabella sottostante le caratteristiche, delle singole pareti:

<b>Pacchetto murario</b>	<b>Area (m2)</b>	<b>Categoria</b>	<b>Orientazione</b>
M9	7.25	Esterno	est
Tramezzo 23.5	12.18	Adiacente a un'altra zona	BU1-8
Tramezzo 12	12.32	Adiacente a un'altra zona	BU1-1
Tramezzo 10	8.26	Adiacente a un'altra zona	BU1-1
P3	11.28	Adiacente a un'altra zona	AU1-9
S5	4.91	Adiacente a un'altra zona	CU1-3
	4.83	Adiacente a un'altra zona	CU1-4

Si nota che la parete esterna è stata fissata con orientamento a est. Questo perché nella creazione del progetto si è impostato una rotazione dell'edificio di 42° da nord ad est in modo tale da ragionare con N-S-O-E.

Inoltre si noti come il programma una volta definita una parete adiacente in una zona, in automatico riporta la parete, con le sue caratteristiche, nella finestra della zona adiacente.

Una volta definiti i muri, è necessario inserire gli infissi.

Sempre nella sezione *Walls*, selezionando *Additional Window* si procede all'inserimento degli infissi nella parte destra della finestra, *Windows*. Anche in questo caso, come nel caso precedente occorre richiamare, dalla libreria precedentemente creata, l'infisso desiderato. Selezionando *Library* dal menù a tendina è stato possibile procedere con l'inserimento dell'infisso 12.

Come descritto dalla tabella seguente anche in questo caso sono state definite le caratteristiche dell'infisso:

Tipo di infisso	Area (m2)	Categoria	Orientazione
Infisso 12	1.83	Esterno	WIND_12

Nel caso particolare degli infissi, come si può notare dalla tabella sovrastante è stata creata un'orientazione particolare per ciascuno di essi. Questo è stato fatto in modo tale da poter utilizzare il *Type 34*, *Type* che permette di definire le sporgenze del muro rispetto alla posizione dell'infisso. Per ulteriori dettagli si rimanda a quanto segue.

Rimane ora da inserire i ponti termici. I ponti termici vengono inseriti nella sezione *Walls*, aprendo il menù a tendina e selezionando la voce *Coldbridge*, si apre una nuova finestra dove occorre definire il nome del ponte termico e la sua resistenza termica in ( $hmK/kJ$ ). Una volta fatto ciò, nella schermata principale occorre definirne la lunghezza e l'orientamento. Nel caso in esame sono stati immessi gli stessi ponti termici già precedentemente considerati con la trattazione di MC4.

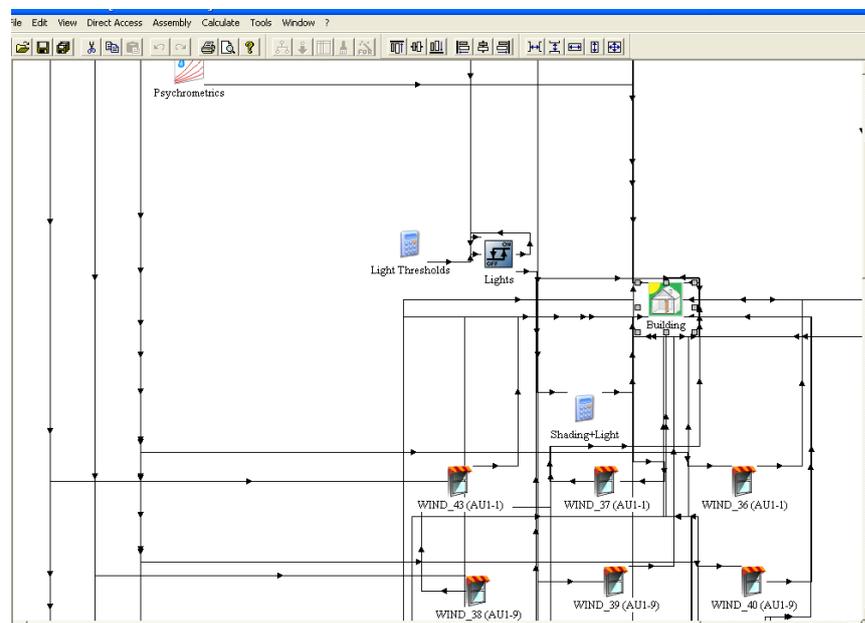
In maniera analoga a quanto illustrato precedentemente si è proceduto per la definizione delle altre zone.

In particolare si evidenzia che nella creazione del 2 *modello* in cui sono state realizzate come zone riscaldate solamente 2 zone costituenti gli appartamenti.

## 7.2.4 Creazione del progetto tramite SIMULATION STUDIO

Aperto la schermata principale di Trnsys 16.1 si è proceduto con la creazione del progetto.

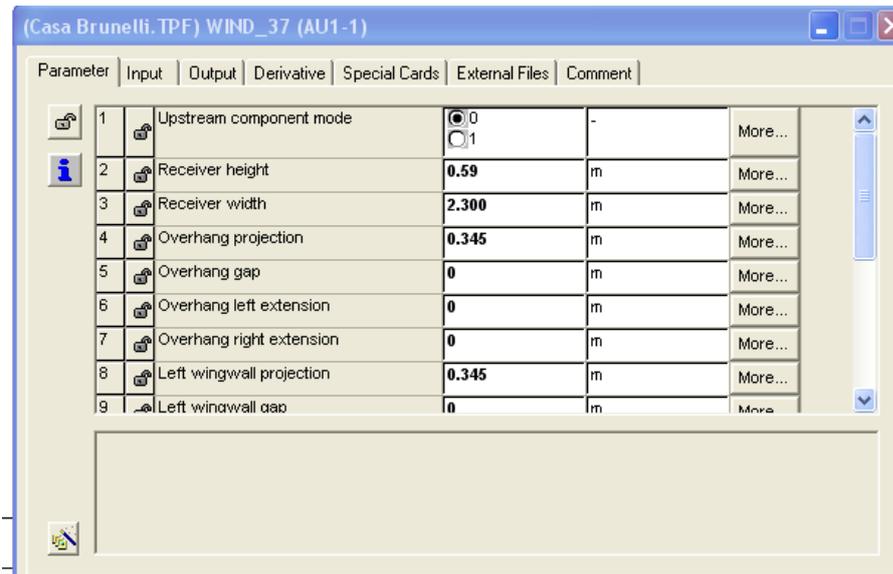
Selezionando nuovo dalla barra degli strumenti, e scegliendo *Building Project* è possibile dare vita al file comprendente tutti i type, necessari per la modellazione del caso esaminato.



**Figura 7.11- Schermata di Simulation Studio.**

Oltre ai *Type* descritti precedentemente nel paragrafo 7.2.2, creati in maniera automatica dal programma, ne sono stati aggiunti altri per modellare in maniera più realistica l'edificio.

In modo tale da definire la rientranza dell'infisso rispetto al muro esterno si è utilizzato il Type 34.



**Figura 7.12- Scheda del Type 34.**

Come è possibile vedere dalla figura è possibile definire in questo tipo di *Type*:

1. Collegamento: essendo nel nostro progetto collegato al Type 16 è sempre 0.
2. Altezza infisso
3. Larghezza infisso
4. Sbalzo sovrastante l'infisso
5. Distanza tra lo sbalzo e l'inizio della finestra
6. Distanza della sporgenza a sinistra dell'infisso
7. Distanza della sporgenza a destra dell'infisso
8. Profondità del muro laterale rispetto all'infisso nella parte sinistra
9. Distanza del muro dall'infisso nella parte sinistra
10. Estensione del muro presente nella parte sinistra dell'infisso sopra l'infisso stesso
11. Estensione del muro presente nella parte sinistra dell'infisso sotto l'infisso stesso
12. Rientranza a destra dell'infisso rispetto alla parete esterna
13. Distanza tra la rientranza a destra e l'infisso
14. Estensione del muro presente nella parte destra dell'infisso sopra l'infisso stesso
15. Estensione del muro presente nella parte destra dell'infisso sotto l'infisso stesso
16. Orientamento

Si sono immessi tanti Type 34 quante sono le finestre dell'edificio, facendo attenzione ad impostare le caratteristiche esatte, ottenute dalle piante e dai prospetti. Una volta creati tutti i Type è stato necessario collegare ciascuno di essi al Type 56 (riferito all'edificio) a al Type 16 (riferito alle condizioni climatiche della località considerata).

### 7.2.5 Creazione degli ombreggiamenti

Per costruire un modello ancora più vicino alla realtà occorre, oltre all'aver considerato l'ombreggiatura data dalla posizione della finestra nella parete; definire le ombreggiature fornite dalle sporgenze del primo piano nei confronti delle finestre del piano terra, delle tettoie sulle finestre sottostanti, della parte destra dell'edificio sull'altra e viceversa (a causa della forma a ferro di cavallo) e infine dell'ombreggiamento dato dall'edificio sovrastante al patio centrale. Tutto questo è stato possibile attraverso l'utilizzo di un ulteriore programma, "Sombrero", software compatibile con Trnsys 16.1.

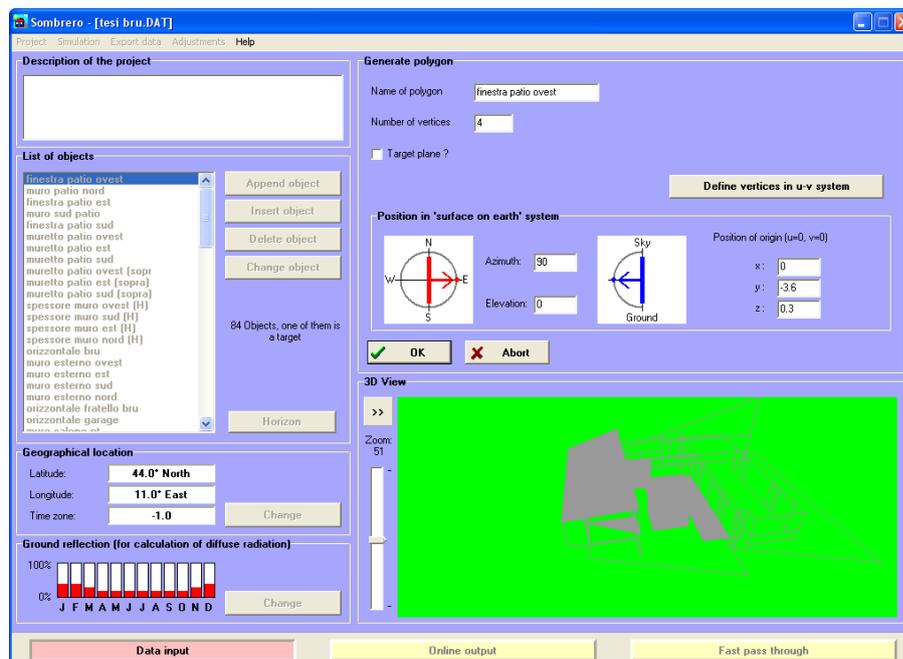


Figura 7.13 – Schermata di Sombrero.

### 7.2.5.1 Creazione dell'edificio

---

Per poter simulare l'ombreggiamento sulle finestre interessate si è proceduto con la modellazione di una parte dell'edificio, parte interessata all'ombreggiamento.

Per la definizione del piano, Sombrero considera due tipi di coordinate:

1. Coordinate di riferimento  $x,y,z$  : coordinate rispetto alle quali verrà disegnato ogni oggetto;
2. Coordinate  $u, v$ : coordinate che determinano la forma e le dimensioni dell'oggetto che si sta definendo.

Ogni oggetto disegnato dovrà, quindi, essere definito da questi due sistemi di coordinate.

Per la creazione del modello, occorre innanzitutto definire latitudine, longitudine e fuso orario (rispetto al meridiano di Greenwich). Nel caso in esame è stata definita:

*Latitudine:* 44° north

*Longitudine:* 11° est

*Time base:* -1

Corrispondenti alle coordinate di Bologna, sito dove è situato l'edificio.

Si è proceduto, poi con la realizzazione della parte di edificio che occorre definire per simulare l'ombreggiatura desiderata.

Per capire meglio come si è svolta tale realizzazione si riportano qui di seguito i passi utilizzati per la creazione di una finestra:

1. *Insert object*: definizione della forma della finestra con le rispettive dimensioni.

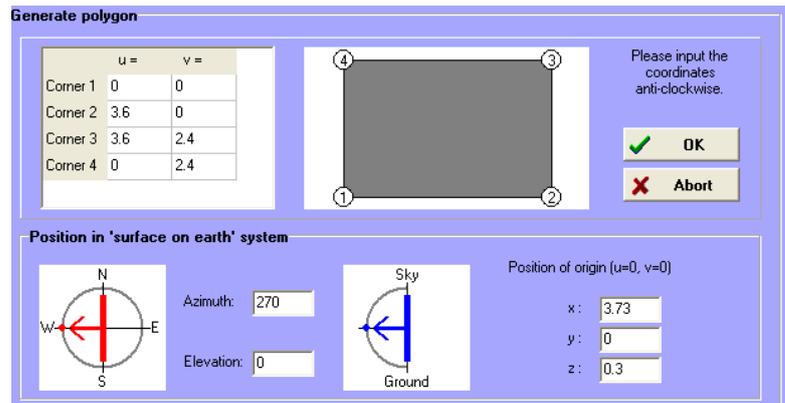


Figura 7.14- Definizione coordinate u-v.

Una volta definiti un numero di lati pari a 4 si procede con la definizione delle coordinate u-v conoscendo le dimensioni dell'infisso.

2. *Position in "surface on earth" system*: definizione della posizione della finestra: nord (0°), sud (180°), ovest (270°) e est (90°).
3. *Elevation of the plane*: si può introdurre un valore tra -90° e 90° per definire l'angolo tra la normale e il piano.
4. *Position of origin*: definizione delle coordinate x,y,z. Definizione della finestra rispetto al sistema di riferimento principale.

Tale procedimento è stato ripetuto per gli infissi: 30, 30a, 30b, 1, 3, 3, 4,7, 11, 12, 28, 25, 26, 27, per le pareti e tettoie che potevano contribuire all'ombreggiatura su di essi.

Per la simulazione dell'ombreggiamento, su ciascuna finestra indicata in precedenza, si è spuntata l'opzione target. Tale opzione consente di scegliere, di volta in volta, la finestra di cui si vuole calcolare l'ombreggiamento.

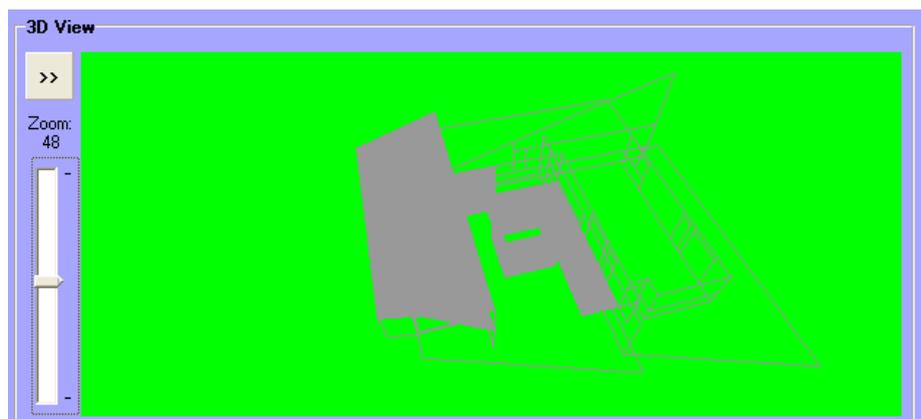


Figura 7.15- Modello finale creato in Sombro.

7.2.5.2 Output programma

Una volta creato il modello è possibile procedere con il calcolo dell'ombreggiatura.

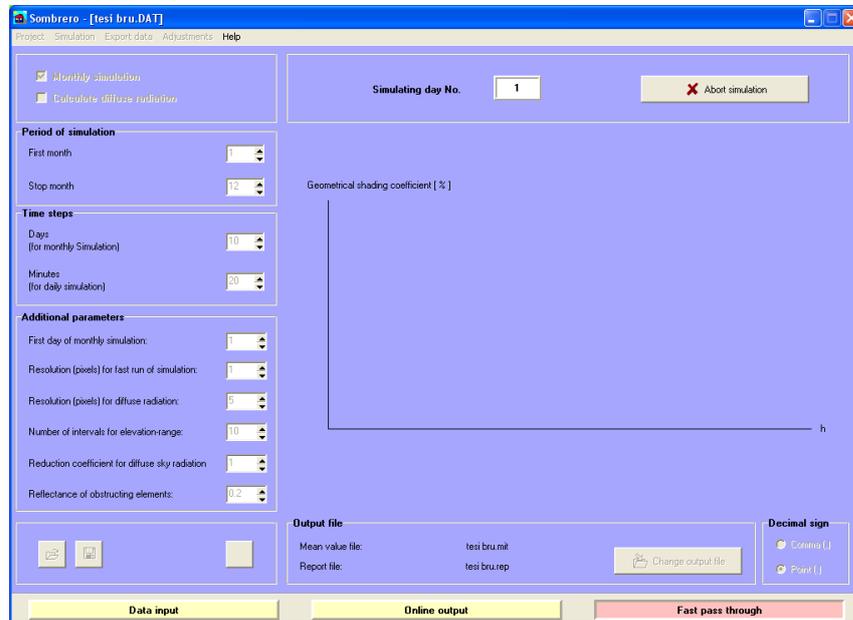


Figura 7.16- Simulazione ombreggiamento.

Spuntati i “check” Monthly simulation e Coefficient diffusion radiation si definisce come periodo di simulazione 12 mesi, un time step pari a 1 giorno ogni 60 minuti e si da via alla simulazione.

Nel file dei risultati è dunque possibile visualizzare:

<i>Number of interval</i>	<i>Day of the years</i>	<i>Hours</i>	<i>Min</i>	$GSC_B$	$1 - GSC_B$	$v_S$	$1 - v_S$	$v_G$	$1 - v_G$
---------------------------	-------------------------	--------------	------------	---------	-------------	-------	-----------	-------	-----------

1. Numero di intervalli;
2. Giorni dell'anno;
3. Ore;
4. Minuti;
5.  $GSC_B$ , Geometrical shading coefficient (beam), coefficiente geometrico di ombreggiamento;
6.  $v_S$ , fattore di vista per ostacoli;

7.  $v_G$ , fattore di vista per terreno e orizzonte.

Una volta terminata la simulazione e ottenuti tali risultati è possibile salvarli direttamente in un file di estensione “.trn” in modo da poterli utilizzare in TRNSYS.

A questo punto tornando nella schermata Simulation Studio, del progetto creato in Trnsys, è stato possibile collegare i Type 34, delle finestre desiderate, ai file “.trn”, file risultato delle simulazioni di Sombrero.

### 7.3 Calcolo del fabbisogno termico in regime dinamico

Dato che alcune delle simulazioni effettuate riguardano il calcolo del fabbisogno energetico prima di procedere con l’analisi dei risultati ottenuti si è ritenuto necessario chiarire meglio il concetto di fabbisogno energetico valutato in regime dinamico.

Il calcolo del fabbisogno di energia in regime dinamico si differenzia notevolmente da quello visto per il regime stazionario, e indicato dalla norma UNI EN 11300-1.

Il metodo dinamico, utilizzato da TRNYS, si basa principalmente su di un bilancio termico (tipicamente su base oraria) che tiene conto degli effetti di accumulo e rilascio termico dei componenti edilizi opachi dell’edificio.

Il modello dell’edificio ottenuto attraverso il Type 56 considera le diverse zone come zone termiche alle quali è associato un certo volume d’aria. I flussi termici scambiati attraverso i vari componenti dell’involucro edilizio sono determinati attraverso la tecnica dei fattori di risposta (Mitalas, 1971), tecnica basata sul concetto di funzione di trasferimento, in cui la sollecitazione indotta sul sistema fisico “parete” viene correlata con la risposta del “sistema” stesso.

In pratica, il metodo delle funzioni di trasferimento o dei fattori di risposta può essere pensato come un metodo che “racconta la storia termica del muro”.

Per capire meglio tale metodo si rimanda al paragrafo successivo, in cui viene riassunto il concetto matematico delle funzioni di trasferimento.

### 7.3.1 Metodo delle funzioni di trasferimento

Il metodo delle funzioni di trasferimento, è stato proposto per la prima volta negli anni settanta da Mitalas e Stephenson. Sviluppato dapprima presso l'ASHRAE (American Society of Heating and Refrigeration and Air Conditioning Engineers) è penetrato in Italia, dove per conto del CNR nell'ambito del Progetto Finalizzato Energetica, è stato sviluppato il codice MORE sulla base dello stesso algoritmo.

La particolarità di questo approccio consiste nella integrazione delle equazioni differenziali per la trasmissione del calore nel discreto anziché nel continuo. Ciò significa che se le condizioni al contorno (temperatura e flussi in ingresso) sono note come funzioni continue ad intervalli discreti (ad es. ogni ora), l'equazione differenziale può essere integrata con una particolare procedura (quella delle Z- Trasformate) che equivale al metodo delle trasformate di Laplace nel continuo.

Dato quindi un qualunque componente edilizio (opaco o trasparente) e definite le condizioni al contorno, i flussi termici che attraversano lo strato limite (esterno o interno) sono dati da espressioni del tipo:

$$\varphi_e = \frac{D(z)}{B(z)} T_e(z) - \frac{1}{B(z)} T_i(z) \quad (7.1)$$

$$\varphi_i = \frac{1}{B(z)} T_e(z) - \frac{A(z)}{B(z)} T_i(z) \quad (7.2)$$

I flussi termici risultano dunque funzioni della temperatura T sulle rispettive facce del componente e di opportune funzioni dell'operatore z: A(z), B(z), D(z) dette appunto funzioni di trasferimento del componente. Si può dimostrare che anti trasformando rispetto a z si ottengono delle funzioni (nel tempo) del tipo:

$$\varphi_t = \sum_{j=0}^{N_b} b_j T_{e,t-\Delta t} - T_r \sum_{j=1}^{N_d} d_j \varphi_{i,t-(j-1)\Delta t} \quad (7.3)$$

Dove il flusso in ogni istante diventa funzione:

- del valore assunto in istanti precedenti;
- della temperatura sulla faccia interna anch'essa valutata negli istanti precedenti;

- della temperatura interna di riferimento (assunta costante);
- di opportuni coefficienti dei quali si possono dare formule esplicite in quanto dipendenti solo dalle caratteristiche termo fisiche e geometriche del componente considerato. Una volta dunque definito il tipo di manufatto, i suoi materiali e la geometria è possibile la loro determinazione (a oggi esistono delle banche dati in cui sono contenuti tali coefficienti determinati per un vastissimo repertorio di componenti edilizi).

Tali coefficienti esprimono dunque una risposta termica del mezzo ad una sollecitazione esterna unitaria (sono detti infatti “Thermal Response Factors”) e rappresentano, pertanto la “funzione di trasferimento” del sistema che traduce in carico termico ambiente il guadagno energetico del componente.

La simulazione del transitorio termico di una parete viene in pratica eseguita utilizzando tali coefficienti in semplici formule che consistono essenzialmente di sviluppi in serie temporali, dove ciascuno di essi, secondo il proprio numero d’ordine, va a premoltiplicare il valore istantaneo della temperatura o del flusso termico di istanti precedenti. Essi assumono, dunque, la funzione di “fattori di importanza” in quanto attribuiscono un diverso “peso” a ciascuno degli stati precedenti, portando così, nella valutazione dello stato attuale del sistema, gli effetti della sua “storia” precedente.

Il metodo delle funzioni di trasferimento (TFM) si basa dunque sul fattore di risposta che stabilisce che, per un dato ambiente, il modello della *risposta termica* per ogni apporto di calore è sempre lo stesso.

In pratica il modello di conversione dell’apporto di calore convertito in carico termico, in dato periodo di tempo, resta invariato. Tale principio del fattore di risposta si basa su alcune proprietà di cui godono le funzioni di trasferimento:

**Principio della sovrapposizione:** il carico totale è pari alla somma dei carichi di tutti gli ambienti componenti l’edificio stesso. Questo principio consente di suddividere il problema della trasmissione di calore in forme più elementari. Consente inoltre di considerare separatamente gli apporti di calore su base oraria. Sapendo che una parte di calore viene subito convertita in carico termico, mentre l’altra parte viene convertita nelle ore successive, con questo principio si può stimare per ogni ora l’andamento dei carichi dovuti all’apporto di calore della stessa ora e quindi i contributi per avere il carico termico orario.

**Principio di linearità:** l'ampiezza della risposta termica ad un apporto di calore varia linearmente con l'ampiezza dell'apporto stesso.

**Principio di invariabilità:** due apporti di calore di uguale grandezza che avvengono in tempi diversi producono la stessa risposta termica dell'ambiente.

Gli ultimi due punti consentono di ridurre notevolmente i calcoli necessari, di fatti in questo modo è sufficiente calcolare una sola volta il modello del carico attraverso un'equazione di bilancio termico. Partendo da questi concetti il metodo delle funzioni di trasferimento calcola solamente una volta le temperature delle superfici che si affacciano sull'ambiente (con il metodo del bilancio termico) e poi calcola il carico termico. Poiché la trasformata di Laplace di un impulso è il valore del modulo dell'impulso allora il metodo TFM calcola gli apporti di calore ( dovuti alle luci, all'irraggiamento solare, all'affollamento, alla conduzione delle pareti) come impulsi di ampiezza unitaria. Le funzioni di trasferimento sono quindi calcolate come costanti numeriche che rappresentano il carico termico corrispondente ad una perturbazione impulsiva unitaria.

Una volta determinate le funzioni di trasferimento per le più comuni tipologie costruttive sono assunte indipendenti dagli ingressi impulsivi semplificando molto i calcoli conseguenti.

Riassumendo è possibile affermare che il metodo delle funzioni di trasferimento applica una serie di *fattori peso* (WF, *Weghting Factors*) o coefficienti delle funzioni di trasferimento per conduzione, CTF, ad ogni superficie opaca esterna e alle differenze tra le temperature dello spazio interno, in maniera da determinare l'apporto di calore. L'apporto solare attraverso i vetri e le varie forme di apporti di calore interni vengono calcolati direttamente per l'ora esaminata.

Il metodo TFM applica poi una seconda serie di *Weghting Factors*, o coefficienti di trasferimento ambiente, RTF, agli apporti di calore aventi componente radiante per tenere conto dell'effetto di accumulo termico nel convertire l'apporto di calore in carico termico per raffreddamento. L'ambiente interviene in modo da assemblare opportunamente i vari guadagni di calore, ognuno con il proprio peso, riconducendone l'effetto complessivo alla creazione di un carico termico sull'aria interna dell'ambiente. Solo nel caso di

ambiente isolato termicamente verso l'esterno tutto il guadagno di calore è riscontrabile come carico termico; in tutti gli altri casi solo una parte contribuisce al carico con un certo ritardo che dipende, dall'inerzia termica totale delle strutture, dalla morfologia dell'ambiente e dalla natura dell'apporto di calore.

L'applicazione del metodo TFM richiede l'utilizzo di alcuni dati preliminari relativi al progetto. Nello specifico i dati da fornire sono:

➤ **Apporti esterni**

Per valutare gli apporti esterni occorre fornire:

- Orientamento e dimensioni delle componenti dell'involucro edilizio;
- Tipi e colori dei materiali utilizzati;
- Dimensioni e destinazioni d'uso degli spazi da condizionare;
- Condizioni del sito (ombre riportate, eventuale presenza di superfici riflettenti, ecc.) e degli spazi adiacenti.

➤ **Apporti interni**

Per valutare gli apporti interni occorre fornire:

- Illuminazione: tipologia e quantità dei corpi illuminanti. Criteri d'uso. Quota convettiva e radiante del flusso termico;
- Affollamento: numero di persone, Attività svolte. Criteri d'uso;
- Apparecchiature: Potenza di targa. Ubicazione. Criteri d'uso. Consumi energetici. Quantità d'aria necessaria al loro funzionamento.

➤ **Dati climatici**

Oltre alla temperatura oraria media (a bulbo secco e a bulbo umido) occorre considerare la direzione dei venti e la velocità prevalente dei venti.

➤ **Condizioni interne di progetto**

Oltre alla temperatura a bulbo secco e l'umidità relativa occorre fissare il tasso di ventilazione richiesto per l'attività svolta nei locali. A questo scopo occorre riferirsi alle norme UNI o ASHRAE.

➤ **Data e ora di progetto**

Per il calcolo di picco occorre analizzare più ore di più giorni tipo nei diversi mesi. Nel caso di dimensionamento dell'impianto di climatizzazione per tutto l'anno occorre valutare anche per i mesi di gennaio e febbraio le temperature massime invernali possibili.

L'applicazione del metodo TFM richiede due stadi di calcoli:

- La determinazione degli apporti di calore su base oraria;
- L'applicazione dei coefficienti delle funzioni di trasferimento (CTF) ai suddetti apporti di calore sull'equazione di trasferimento ambiente per calcolare i carichi termici.

Come è possibile vedere dalla Figura 7.17 , dove viene riportato lo schema sul funzionamento del metodo TFM, si può notare come ogni apporto di calore genera un proprio carico termico indipendente dal contributo degli altri apporti, in accordo con il principio di sovrapposizione degli effetti. Si osservi come la parte convettiva degli apporti di calore viene calcolata direttamente nell'ultima sommatoria che genera direttamente il carico termico dell'ambiente.

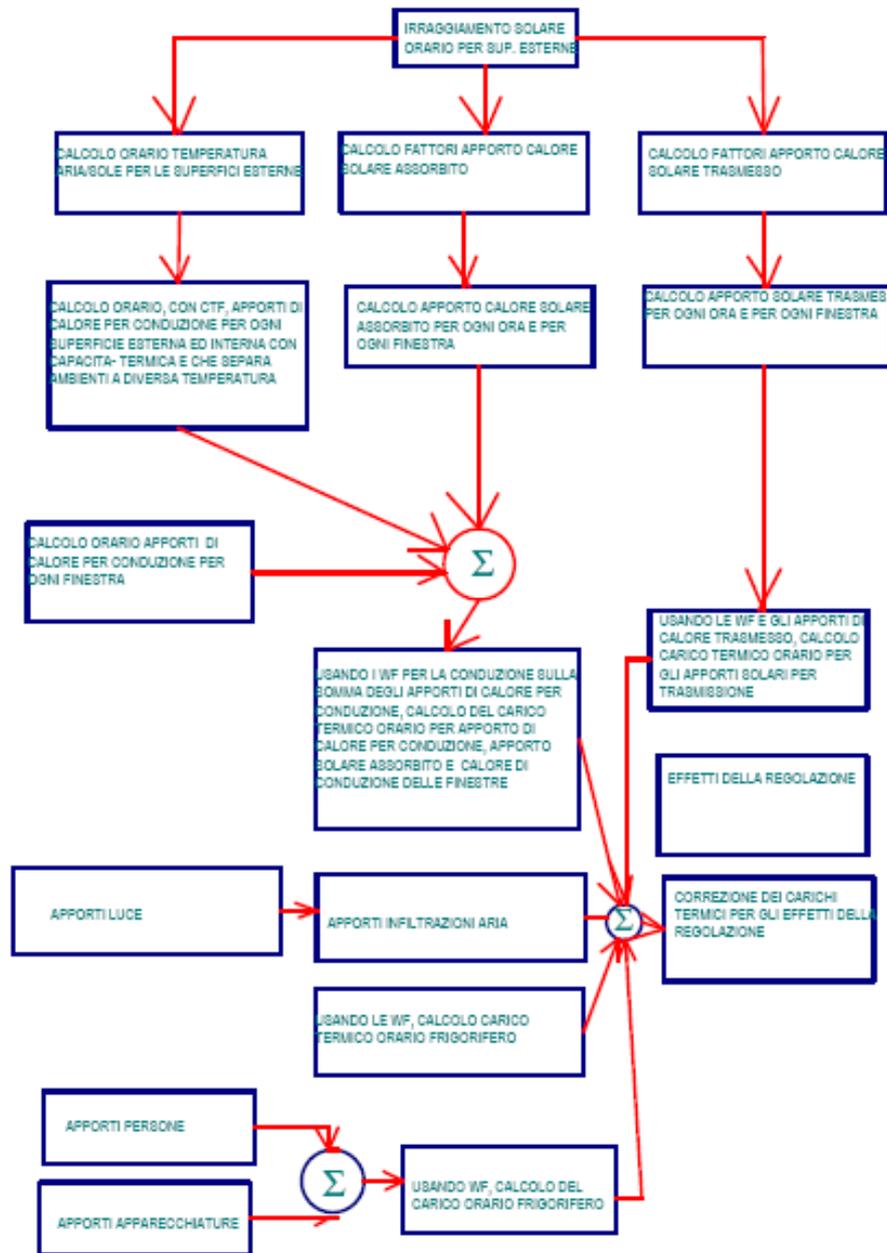


Figura 7.17- Schema riguardante il funzionamento del metodo TFM.

### 7.3.2 Bilancio termico applicato da TRNSYS

Come già detto in precedenza Trnsys si basa sulle funzioni di trasferimento e il calcolo del fabbisogno termico avviene tramite un'equazione di bilancio:

$$DQ_{air}dt + Q_{heat} - Q_{cool} + Q_{inf} + Q_{vent} + Q_{coup} + Q_{trasm} + Q_{Gint} + Q_{Wgain} + Q_{solgain} = 0 \quad (7.4)$$

Dove:

$DQ_{air}dt$  rappresenta la variazione dell'energia interna della zona, kJ/h

$Q_{heat}$  rappresenta il fabbisogno energetico utile invernale dell'edificio, kJ/h

$Q_{cool}$  rappresenta il fabbisogno energetico utile estivo dell'edificio, kJ/h

$Q_{inf}$  rappresenta la quantità di energia dovuta agli apporti per infiltrazione, kJ/h

$Q_{vent}$  rappresenta la quantità di energia dovuta agli apporti per ventilazione, kJ/h

$Q_{coup}$  rappresenta l'apporto per convezione del flusso da'aria che va da una zona all'altra, kJ/h

$Q_{trasm}$  rappresenta la quantità di energia termica scambiata per trasmissione dai componenti edilizi opachi, kJ/h

$Q_{Gint}$  rappresenta la quantità di energia dovuta agli apporti interni, kJ/h

$Q_{Wgain}$  rappresenta l'energia interna dei componenti edilizi (persone, illuminazione, ecc.), kJ/h

$Q_{solgain}$  rappresenta la quantità di energia fornita dagli apporti solari tramite pareti opache e trasparenti, kJ/h

#### 7.3.2.1 Flusso di calore attraverso muri e finestre

Il flusso termico e la temperatura caratterizzante un muro o una finestra è rappresentato nella figura sottostante dove la nomenclatura utilizzata viene definita come:

$S_{s,i}$  rappresenta il flusso di calore radiativo assorbito dalla faccia interna del muro (apporti solari e radiativi);

$S_{s,0}$  rappresenta il flusso di calore radiativo assorbito dalla superficie esterna (apporti solari);

$\dot{q}_{r,s,0}$  rappresenta il flusso di calore radiativo netto trasferito a tutta la superficie esterna del muro;

$\dot{q}_{r,s,i}$  rappresenta il flusso di calore radiativo netto trasferito dalla superficie all'interno della zona;

$\dot{q}_{w,g,i}$  rappresenta il flusso di calore (definito dall'utente) verso la superficie del muro o verso la superficie della finestra;

$\dot{q}_{s,0}$  rappresenta il flusso di calore per conduzione che va dall'interno della superficie del muro verso la zona;

$\dot{q}_{s,i}$  rappresenta il flusso di calore per conduzione che va dal muro verso la faccia interna;

$\dot{q}_{c,s,0}$  rappresenta il flusso di calore convettivo dato dall'ambiente verso la superficie esterna del muro;

$T_{s,i}$  rappresenta la temperatura interna superficiale;

$T_{s,0}$  rappresenta la temperatura esterna superficiale;

$T_i$  rappresenta la temperatura della zona;

$T_{a,i}$  rappresenta la temperatura dell'ambiente esterno.

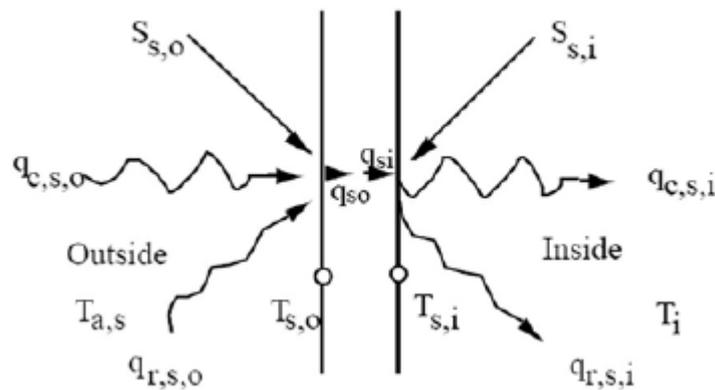


Figura 7.18- Flusso di calore e temperatura della superficie del muro.

I muri sono quindi modellabili attraverso la teoria della funzioni di trasferimento di Mitalas e Arseneault. Per tutti i tipi di muro il calore trasferito attraverso la superficie del muro stesso, per conduzione è definibile attraverso:

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,0}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \quad (7.5)$$

$$\dot{q}_{s,0} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k T_{s,0}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,0}^k \quad (7.6)$$

Dove:

$\dot{q}_{s,0}$  rappresenta il flusso di calore per conduzione che va dall'interno della superficie del muro verso la zona;

$\dot{q}_{s,i}$  rappresenta il flusso di calore per conduzione che va dal muro verso la faccia interna;

$a_s^k, b_s^k, c_s^k, d_s^k$  rappresentano le funzioni di trasferimento;

$T_{s,0}^k$  rappresenta la temperatura superficiale esterna del muro;

$T_{s,i}^k$  rappresenta la temperatura superficiale interna del muro.

Questa serie di equazioni in termini di temperature superficiali e di flussi di calore sono valutate a uguali intervalli di tempo; ed è il termine k che definisce la sommatoria. Tale termine può essere cambiato direttamente dall'utente all'interno dell'interfaccia TRNBUILD.

Le finestre, invece, vengono valutate come dei muri esterni senza massa termica, parzialmente trasparenti nei confronti del sole ma opachi nei confronti degli apporti interni i quali si suppongono assorbiti solamente attraverso le pareti opache. Le finestre vengono dunque considerate, nel calcolo del bilancio del Type 56, come in figura.

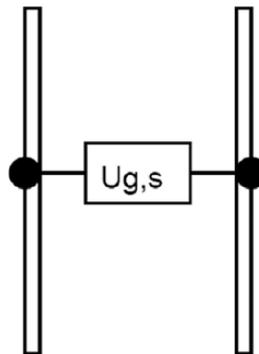


Figura 7.19- Modello della finestra considerato nel bilancio del Type 56.

Le equazioni considerate sono nel caso delle finestre sono:

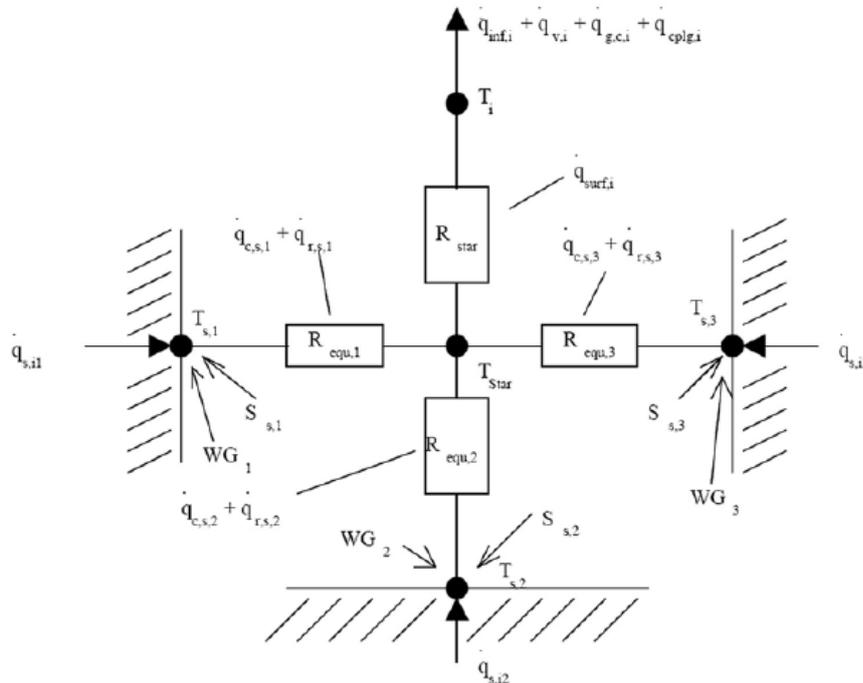
$$a_s^0 = b_s^0 = c_s^0 = U_{g,s} \quad (7.6)$$

$$a_s^k = b_s^k = c_s^k = d_s^k = 0 \text{ per } k > 0 \quad (7.7)$$

Dove:

$U_{g,s}$  rappresenta il coefficiente di perdita totale del vetro dall'interno verso la superficie esterna.

Il flusso di calore radiativo e convettivo scambiati tra la superfici interne della zona sono rappresentati in Figura 7.20.



**Figura 7.20- Flusso radiativo e convettivo scambiato tra le superfici interne della zona.**

Tale metodo (proposto da Seem) usa un nodo artificiale definente la temperatura  $T_{star}$  e prende in considerazione il flusso convettivo e radiativo che va verso il nodo e che poi viene convogliato in un altro muro o in una finestra.

Questa temperatura  $T_{star}$  viene utilizzata per calcolare il flusso di calore complessivo che agisce sulla superficie interna del muro:

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \dot{q}_{c,s,i} + \dot{q}_{r,s,i} \quad (7.8)$$

Dove:

$\dot{q}_{c,s,i}$  rappresenta il flusso di calore convettivo agente sulla superficie interna;

$\dot{q}_{r,s,i}$  rappresenta il flusso di calore radiativo agente sulla superficie interna.

Che si può anche scrivere come:

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equiv,i} A_{s,i}} (T_{s,i} - T_{star}) \quad (7.9)$$

Dove:

$A_{s,i}$  rappresenta l'area della superficie interna.

Per la superficie esterna viene considerata una temperatura fittizia del cielo,

$T_{sky}$ , input per il Type 56.

Quindi il flusso di calore totale  $\dot{q}_{comb,s,0}$  trasferito alla superficie è dato dalla somma del calore trasferito per convezione e quello trasferito per radiazione:

$$\dot{q}_{comb,s,0} = \dot{q}_{c,s,0} + \dot{q}_{r,s,0} \quad (7.10)$$

Dove con :

$$\dot{q}_{c,s,0} = h_{conv,s,0} \cdot (T_{a,s} - T_{s,0}) \quad (7.11)$$

$$\dot{q}_{r,s,0} = \sigma \cdot \varepsilon_{s,0} \cdot (T_{a,s}^4 - T_{fsky}^4) \quad (7.12)$$

$$T_{fsky} = (1 - f_{sky}) \cdot T_{a,s} + f_{sky} \cdot T_{sky} \quad (7.13)$$

Dove:

$\dot{q}_{comb,s,0}$  rappresenta il flusso convettivo e radiativo agente sulla superficie;

$\dot{q}_{c,s,0}$  rappresenta il flusso convettivo agente sulla superficie;

$\dot{q}_{r,s,0}$  rappresenta il flusso radiativo agente sulla superficie;

$h_{conv,s,0}$  rappresenta il coefficiente convettivo di trasmissione sulla superficie esterna;

$f_{sky}$  rappresenta il fattore di vista del cielo della superficie esterna;

$T_{fsky}$  rappresenta la temperatura fittizia usata per valutare lo scambio termico radiativo;

$\varepsilon_{s,0}$  rappresenta il coefficiente di emissione della superficie esterna;

$\sigma$  rappresenta la costante di Stephan-Boltzmann.

Quindi il bilancio energetico dato dalla superficie è:

$$\dot{q}_{s,i} = \dot{q}_{comb,s,i} + S_{s,i} + Wallgain \quad (7.14)$$

$$\dot{q}_{s,0} = \dot{q}_{comb,s,0} + S_{s,0} \quad (7.15)$$

Dove con il termine  $S_{s,i}$  si considerano oltre che la radiazione solare anche gli apporti interni dati dagli oggetti e dalle persone mentre con il termine wallgain si intendono gli apporti solari, che variano durante il giorno a causa della diversa posizione del sole oppure gli apporti dovuti ad un sistema di pannelli radianti a soffitto o pavimento. Per la superficie esterna il termine  $S_{s,0}$  sta ad indicare solamente la radiazione solare.

Per quanto riguarda i muri esterni, il flusso di calore che attraversa la superficie esterna è funzione delle condizioni della temperatura dell'aria:

$$\dot{q}_{s,i} = B_S T_{a,s} - C_S T_{star,i} + D_S \quad (7.16)$$

Dove:

$$B_S = \frac{e_s h_{s,0}}{(1-f_s)} \quad (7.17)$$

$$C_S = \frac{f_s \left( \frac{1}{R_{equiv,iA_{s,i}}} \right)}{(f_s-1)} \quad (7.18)$$

$$D_S = \frac{f_s S_{s,i} + e_s (S_{s,0} - K_{s,0}) + K_{s,i}}{(1-f_s)} \quad (7.19)$$

$$e_s = \frac{b_s^0}{a_s^0 + h_{s,0}} \quad (7.20)$$

$$f_s = (b_s^0 e_s - c_s^0) R_{equiv,iA_{s,i}} \quad (7.21)$$

Dove  $K_{s,i}$  e  $K_{s,0}$  sono definite tramite le funzioni di trasferimento:

$$K_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,0}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \quad (7.22)$$

$$K_{s,0} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k T_{s,0}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \quad (7.23)$$

Per i muri adiacenti ad altre zone con o senza le stesse condizioni della zona considerata e per i muri interni si applica l'equazione 7.16 ma con le seguenti condizioni:

zona adiacente:  $T_{a,s} = T_{star,j}$

muri interni:  $T_{a,s} = T_{star,i}$

zona adiacente con identiche condizioni:  $T_{a,s} = T_{star,i}$

e:

$$B_s = \frac{e_s \frac{1}{Requiv,iA_{s,i}}}{(1-f_s)} \quad (7.24)$$

$$e_s = \frac{b_s^0}{a_s^0 + \frac{1}{Requiv,iA_{s,i}}} \quad (7.25)$$

Per quanto riguarda gli apporti interni alla zona considerata, saranno definiti dalla combinazione delle formule 7.15 e 7.16.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{surf,i} = \sum A_s \dot{q}_{comb,i} = \sum_{j=1}^{zona\ adiacente} \sum_{i=1}^{sup.interna\ j} A_s B_s T_{star,j} + \\ sup.esterna A_s B_s T_a + muro\ interno A_s B_s T_{star} + cond\ bordo \\ note A_s B_s T_{h,s} + sup.zona\ i A_s C_s T_{star,i} - D_s - S_s, i \end{aligned} \quad (7.26)$$

Il bilancio energetico è dato da:

$$\dot{Q}_{surf,i} = \frac{1}{R_{star,i}} (T_{star,i} - T_i) \quad (7.27)$$

L'infiltrazione e la ventilazione sono forniti in termini i ricambi d'aria per ora per ogni zona.

L'apporto di energia dovuto a questi due contributi è dato da:

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{m}_{inf,i} C_p (T_a - T_i) \quad (7.28)$$

$$\dot{Q}_{vent} = \sum_k^{n_{vent}} \dot{m}_{v,k,i} C_p (T_{v,k} - T_i) \quad (7.29)$$

Dove:

$\dot{m}_{inf,i}$  rappresenta la portata di aria dovuta ad infiltrazione;

$\dot{m}_{v,k,i}$  rappresenta la portata di aria dovuta alla ventilazione;

$C_p$  rappresenta il calore specifico dell'aria;

$T_{v,k}$  rappresenta la temperatura di ventilazione dell'aria;

$T_a$  rappresenta la temperatura dell'ambiente.

Per tutti muri o finestra separanti più zone a differenti temperature o per tutti quei muri esterni aventi condizioni al contorno note è possibile specificare anche un accoppiamento convettivo. Tale accoppiamento rappresenta la massa d'aria che fluisce da una zona all'altra attraverso la superficie (di muri o finestre) e viene definita come la somma di tutti gli apporti dei muri o delle finestre appartenenti a quella zona:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{cplg,i} = & \\ & \sum^{adj.zones} \sum^{surf.ac. sito j} \dot{m}_{cplg,s} C_p (T_j - T_i) + \dots + \\ & know\ bound.mcp\ lg,s C_p T_b,s - T_i \end{aligned} \quad (7.30)$$

Dove:

$\dot{m}_{cplg,s}$  rappresenta la massa d'aria che entra in una zona attraverso i muri e le finestre.

## 7.4 Simulazioni effettuate

---

Le simulazioni svolte sono servite per lo più a valutare il comportamento dell'involucro edilizio. L'eccezione è rappresentata dalla simulazione che ha permesso la determinazione del fattore di carico con la quale si è riusciti a valutare l'utilizzo del generatore scelto.

Le simulazioni effettuate e che verranno discusse nei paragrafi successivi risultano:

1. Calcolo del fabbisogno energetico e confronto con il regime stazionario;
2. Calcolo del fattore di carico;

3. Fabbisogno energetico considerando muri interni
4. Funzionamento parziale dell'impianto;
5. Free cooling;
6. Variazione spessore isolante di copertura, controsoffitto, pareti perimetrali;
7. Valutazione del fabbisogno energetico estivo con tende interne, tende esterne o schermature;
8. Valutazione fabbisogno energetico al variare della massa dei muri.

## 7.5 Calcolo del fabbisogno energetico e confronto con regime stazionario

Qui di seguito verranno confrontati i risultati riguardanti il fabbisogno (invernale ed estivo) ottenuti tramite il software MC4 SUTIE 2009, programma che lavora in regime stazionario (seguendo la norma UNI EN 11300-1) e il software TRNSYS, software che lavora in regime dinamico. Utilizzando i dati ottenuti dal calcolo della legge 10 del programma MC4 e i dati ottenuti tramite il bilancio energetico fornito da TRNSYS, è stato possibile effettuare un confronto tra i dati ottenuti in regime stazionario e quelli ottenuti in regime dinamico. Si ricorda che il confronto è fatto considerando i ponti termici.

### 7.5.1 Settaggio in TRNSYS

---

Per calcolare il fabbisogno dell'edificio è necessario definire per le zone riscaldate, e quindi per i due appartamenti una temperatura pari a 20 °C per il periodo invernale, e 26 °C per il periodo estivo attraverso, rispettivamente, i *Typemanager Heating* e *Cooling*. Per quanto riguarda i contributi dovuti alla ventilazione si è fissato un valore di 0.3 vol/s mentre per gli apporti interni si è fissato un valore pari a 450 W, avendo entrambi gli appartamenti una superficie maggiore di 170 m<sup>2</sup>.

Il calcolo del fabbisogno avviene attraverso la scelta, tra gli output ottenibile dal Type 56, dell' NTYPE 904, che fornisce un bilancio energetico dal quale è possibile ottenere il fabbisogno per il riscaldamento invernale e quello per il raffrescamento estivo.

## 7.5.2 Risultati

Si riportano nelle seguenti tabelle i risultati riguardanti il **fabbisogno invernale** ed estivo per i due appartamenti componenti l'unità immobiliare.

### 1 Appartamento

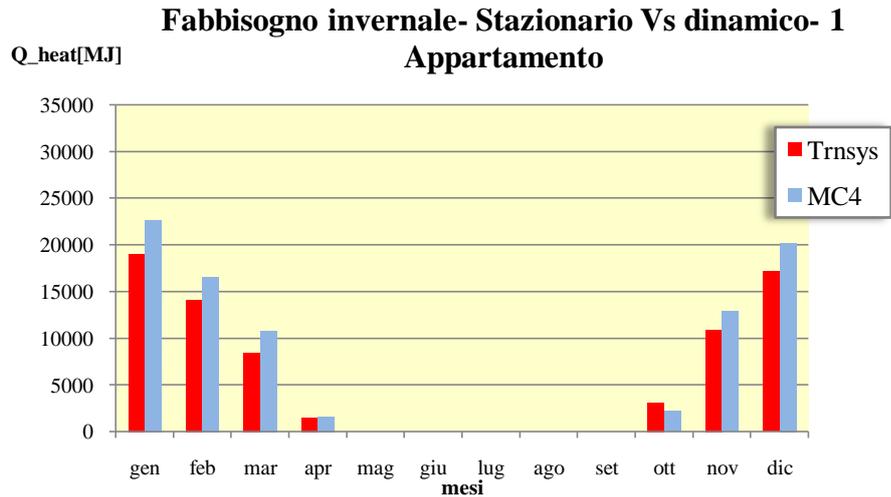
PERIODO INVERNALE	Fabbisogno energetico invernale [MJ]	Scambio per trasmissione [MJ]	Scambio per ventilazione [MJ]	Apporti interni [MJ]	Apporti solari [MJ]
<b>STAZIONARIO</b>	<b>123284</b>	<b>136715</b>	<b>17891</b>	<b>7114</b>	<b>24808</b>
<b>DINAMICO</b>	<b>115357</b>	<b>119008</b>	<b>18212</b>	<b>7115</b>	<b>15571</b>
VARIAZIONE	<b>6.4 %</b>	13.0 %	-1.8%	0.0%	37.2 %

Tabella 7. 1- Confronto fabbisogno energetico invernale del 1 Appartamento.

### 2 Appartamento

PERIODO INVERNALE	Fabbisogno energetico invernale [MJ]	Scambio per trasmissione [MJ]	Scambio per ventilazione [MJ]	Apporti interni [MJ]	Apporti solari [MJ]
<b>STAZIONARIO</b>	<b>86966</b>	<b>99379</b>	<b>9578</b>	<b>7114</b>	<b>15663</b>
<b>DINAMICO</b>	<b>74383</b>	<b>82605</b>	<b>9748</b>	<b>7115</b>	<b>11832</b>
VARIAZIONE	<b>14.5 %</b>	16.9 %	-1.8%	0.0%	24.5%

Tabella 7.2- Confronto fabbisogno energetico invernale del 2 Appartamento.



**Grafico 7.1- Confronto tra Fabbisogno invernale calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 1.**

<i>Fabbisogno energetico invernale (MJ)</i>		
	<i>Regima stazionario</i>	<i>Regime dinamico</i>
<b>gen</b>	22672	19047
<b>feb</b>	16551	14133
<b>mar</b>	10815	8488
<b>apr'</b>	1641	1515
<b>mag</b>	0	0
<b>giu</b>	0	0
<b>lug</b>	0	0
<b>ago</b>	0	0
<b>set</b>	0	0
<b>ott'</b>	2207	3096
<b>nov</b>	12862	10948
<b>dic</b>	20217	17155

**Tabella 7.3- Confronto tra Fabbisogno invernale calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 1.**

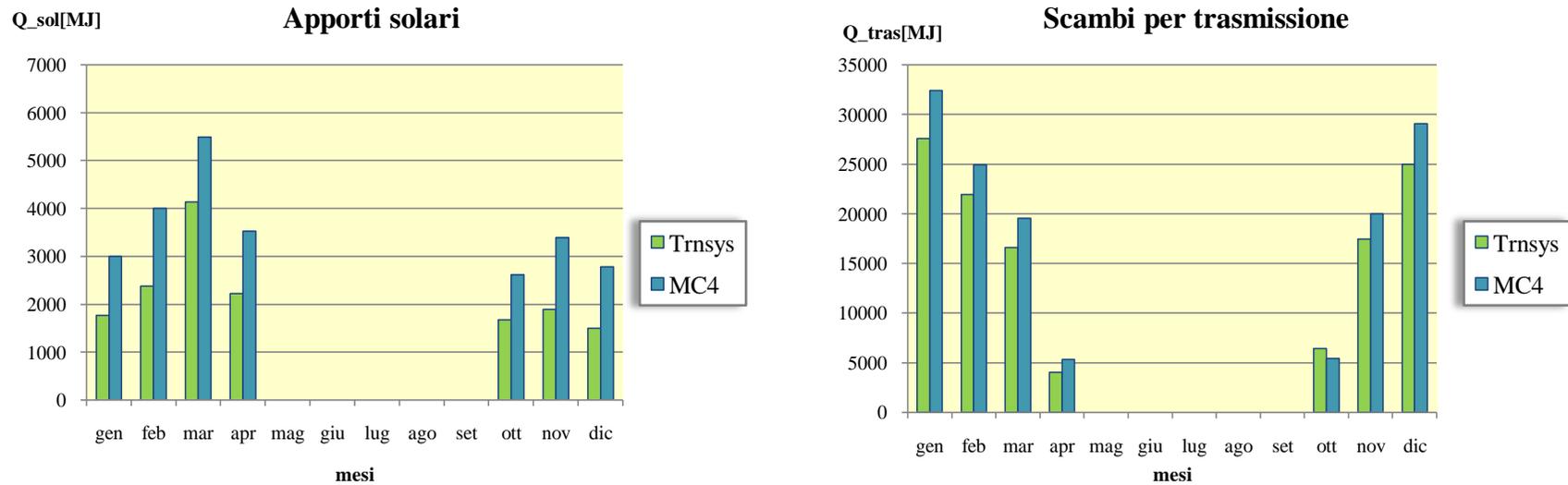
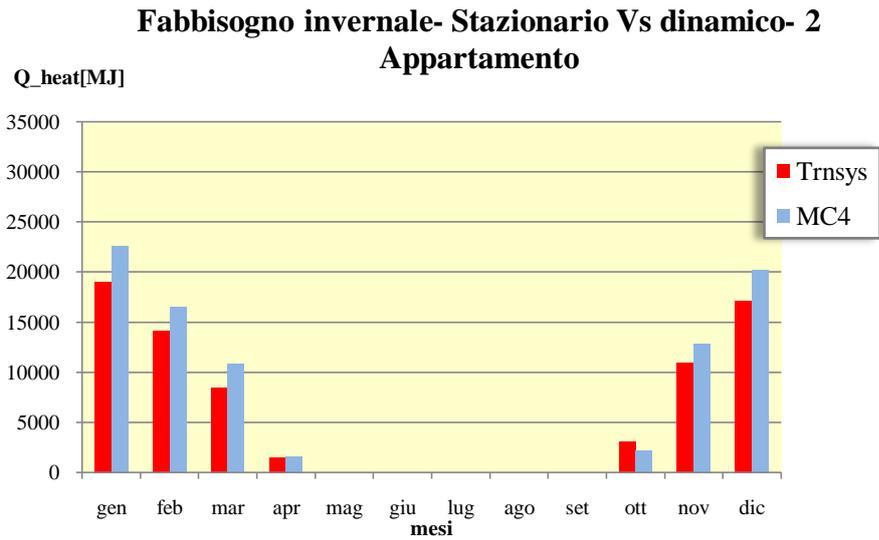


Grafico 7.2- Confronto tra Apporti solari e scambio per trasmissione calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 1.

	<i>Apporti solari (MJ)</i>			<i>Scambio per trasmissione (MJ)</i>	
	Regime stazionario	Regime dinamico		Regime stazionario	Regime dinamico
gen	3003	1454	gen	32416	26533
feb	4000	1922	feb	24943	21111
mar	5495	3338	mar	19524	15896
apr'	3523	1798	apr'	5346	3841
ott'	2614	1368	ott'	5420	6182
nov	3395	1543	nov	20006	16807
dic	2778	1223	dic	29060	24103

Tabella 7.4- Confronto tra Apporti solari e scambio per trasmissione calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 1.



**Grafico 7.3- Confronto tra Fabbisogno invernale calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 2.**

<i>Fabbisogno energetico invernale (MJ)</i>		
	<i>Regima stazionario</i>	<i>Regime dinamico</i>
gen	22672	19047
feb	16551	14133
mar	10815	8488
apr'	1641	1515
mag	0	0
giu	0	0
lug	0	0
ago	0	0
set	0	0
ott'	2207	3096
nov	12862	10948
dic	20217	17155

**Tabella 7.5- Confronto tra Fabbisogno invernale calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 2.**

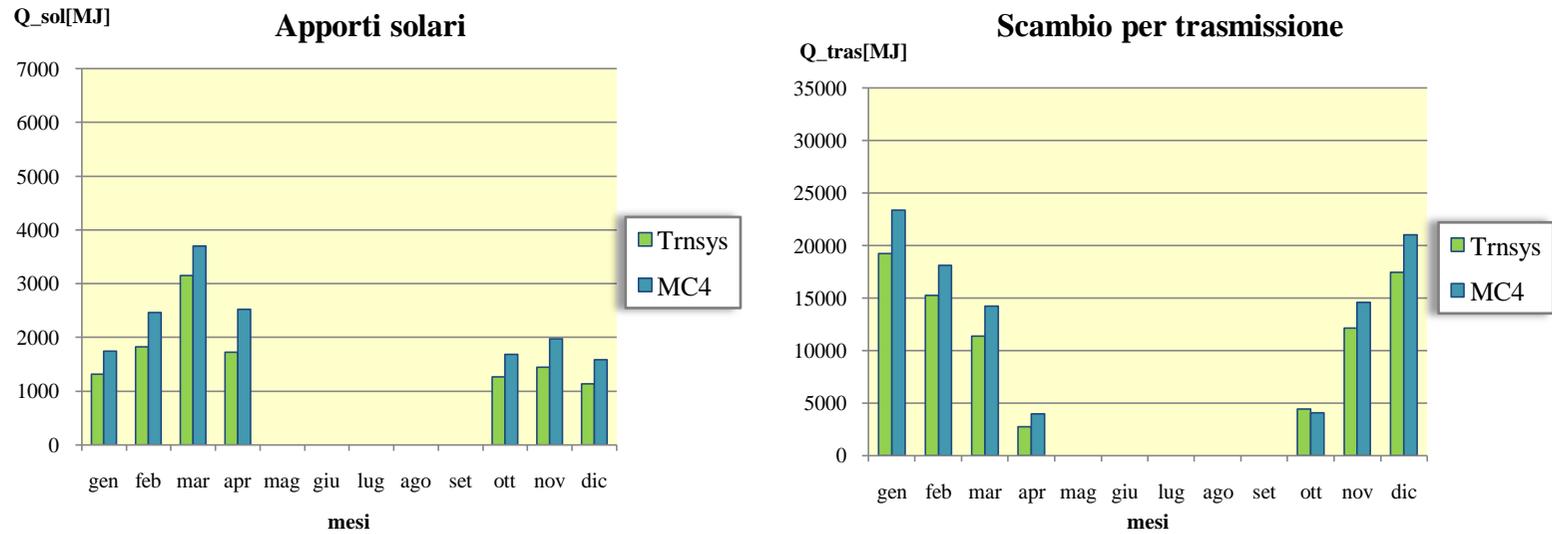


Grafico 7.4- Confronto tra Apporti solari e scambio per trasmissione calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 2.

	<i>Apporti solari (MJ)</i>		<i>Scambio per trasmissione (MJ)</i>	
	<i>Regime stazionario</i>	<i>Regime dinamico</i>	<i>Regime stazionario</i>	<i>Regime dinamico</i>
gen	1740	1310	gen	23380
feb	2462	1820	feb	18106
mar	3700	3153	mar	14248
apr'	2519	1718	apr'	3989
ott'	1686	1260	ott'	4061
nov	1975	1440	nov	14591
dic	1581	1130	dic	21003

Tabella 7.6- Confronto tra Apporti solari e scambio per trasmissione calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 2.

Come ci si aspettava il fabbisogno energetico calcolato con il software MC4 risulta maggiore rispetto a quello valutato considerando il regime dinamico. Risulta dunque una stima a “favore di sicurezza” del regime stazionario. Si nota una differenza del 6.4 % per quanto riguarda l’appartamento 1 (appartamento più grande) e del 14.5% per il secondo. Le differenze principali si trovano essenzialmente nello scambio per trasmissione e negli apporti solari (vedi tabelle 7.4 e 7.6). Tali differenze sono dovute principalmente ad un approccio semplicistico nel valutare gli effetti dinamici nel regime stazionario, attraverso i coefficienti di riduzione degli apporti gratuiti (periodo invernale) e delle dispersioni (periodo estivo). Si nota inoltre una leggera differenza anche per lo scambio termico per ventilazione. Tale differenza è dovuta probabilmente alla differenza di temperatura dell’aria esterna utilizzata dai due metodi. Gli apporti interni naturalmente sono identici. Avendo i due appartamenti una superficie maggiore di 170 m<sup>2</sup>, si sono definiti gli apporti interni pari a 450 W, come riportato nella norma UNI EN 11300-1.

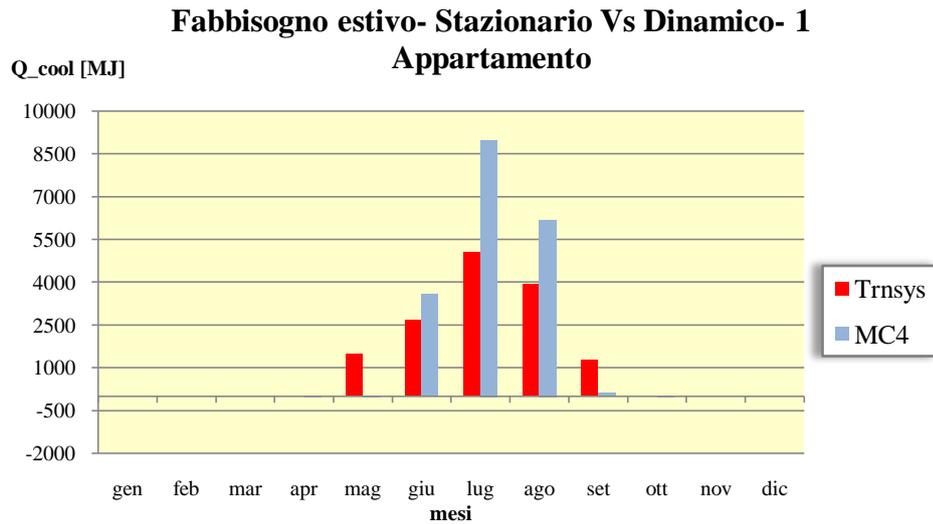
Per quanto riguarda il calcolo del **fabbisogno estivo**, le differenze riscontrate sono maggiori rispetto al caso invernale. In particolare i risultati ottenuti:

PERIODO ESTIVO	Fabbisogno energetico estivo [MJ]	Apporti interni [MJ]	Apporti solari [MJ]	Scambio per trasmissione [MJ]	Scambio per ventilazione [MJ]
<b>STAZIONARIO</b>	<b>18845</b>	<b>7074</b>	<b>47343</b>	<b>53857</b>	<b>6589</b>
<b>DINAMICO</b>	<b>14407</b>	<b>7076</b>	<b>36415</b>	<b>57364</b>	<b>6940</b>
VARIAZIONE	<b>23.5 %</b>	0.0%	23.1 %	- 6.5 %	-5.3%

**Tabella 7.5- Confronto fabbisogno energetico estivo 1 Appartamento.**

PERIODO ESTIVO	Fabbisogno energetico estivo [MJ]	Apporti interni [MJ]	Apporti solari [MJ]	Scambio per trasmissione [MJ]	Scambio per ventilazione [MJ]
<b>STAZIONARIO</b>	<b>15502</b>	<b>7074</b>	<b>35009</b>	<b>40623</b>	<b>3528</b>
<b>DINAMICO</b>	<b>13924</b>	<b>7076</b>	<b>28058</b>	<b>38269</b>	<b>3714</b>
VARIAZIONE	<b>10.2 %</b>	0.0%	19.9%	5.8%	-5.3%

**Tabella 7.6- Confronto fabbisogno energetico estivo 2 Appartamento.**



**Grafico 7.5- Confronto tra Fabbisogno estivo calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 1.**

<i>Fabbisogno energetico estivo (MJ)</i>		
	<i>Regima stazionario</i>	<i>Regime dinamico</i>
gen	0	0
feb	0	0
mar	0	0
apr'	583	0
mag	1205	1481
giu	1166	2667
lug	1205	5044
ago	1205	3937
set	1166	1278
ott'	544	0
nov	0	0
dic	0	0

**Tabella 7.7- Confronto tra Fabbisogno estivo calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 1.**

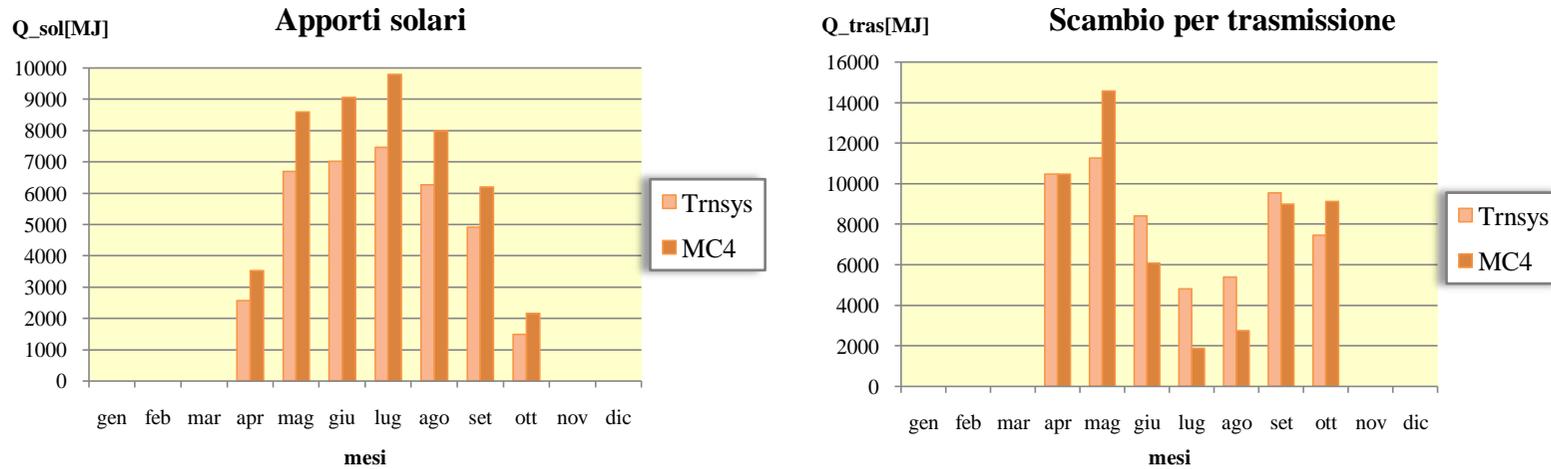
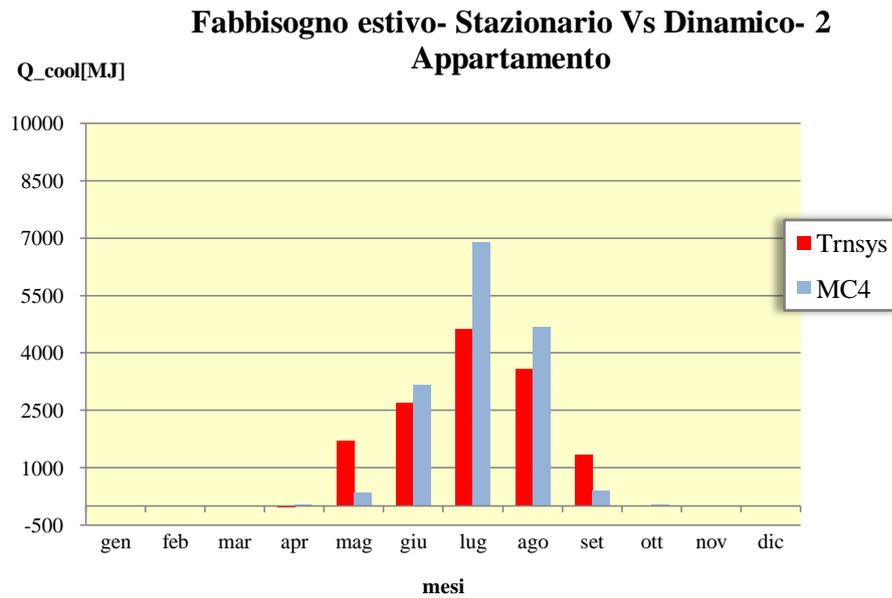


Grafico 7.6- Confronto tra Apporti solari e scambio per trasmissione calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 1.

	<i>Apporti solari (MJ)</i>			<i>Scambio per trasmissione (MJ)</i>	
	Regime stazionario	Regime dinamico		Regime stazionario	Regime dinamico
apr"	3523	2056	apr"	10472	10034
mag	8605	5357	mag	14579	10701
giu	9066	5604	giu	6077	7907
lug	9798	5957	lug	1865	4389
ago	8000	5029	ago	2748	5035
set	6199	3967	set	8983	9101
ott"	2152	1201	ott"	9133	7185

Tabella 7.8- Confronto tra Apporti solari e scambio per trasmissione calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 1.



**Grafico 7.7- Confronto tra Fabbisogno estivo calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 2.**

<i>Fabbisogno energetico estivo (MJ)</i>		
	<i>Regima stazionario</i>	<i>Regime dinamico</i>
gen	0	0
feb	0	0
mar	0	0
apr'	583	0
mag	1205	1694
giu	1166	2701
lug	1205	4624
ago	1205	3573
set	1166	1329
ott'	544	3
nov	0	0
dic	0	0

**Tabella 7.9- Confronto tra Fabbisogno estivo calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 2.**

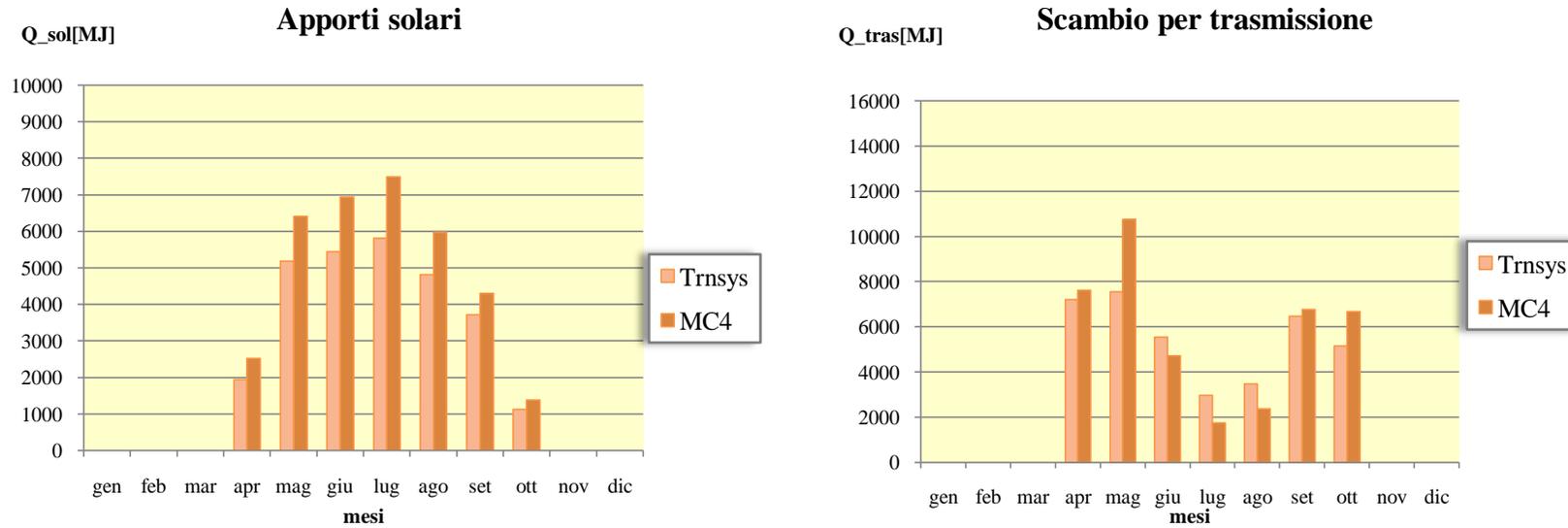


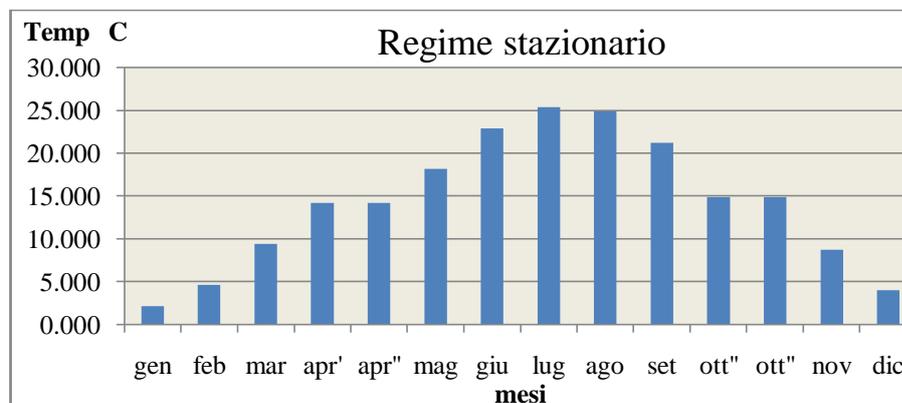
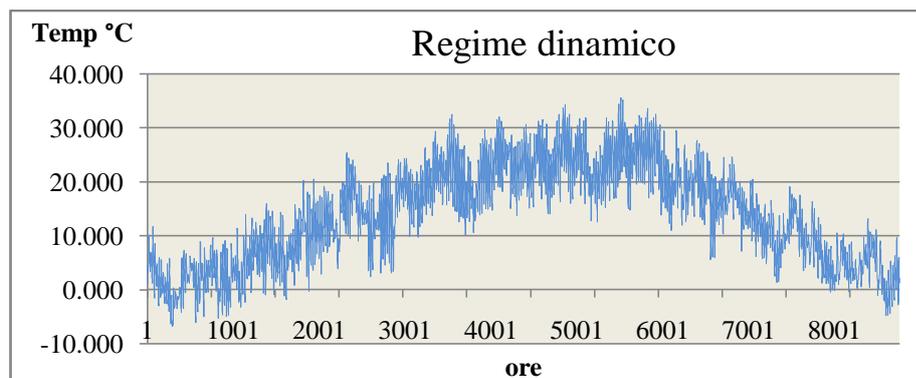
Grafico 7.8- Confronto tra Apporti solari e scambio per trasmissione calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 2.

	<i>Apporti solari (MJ)</i>			<i>Scambio per trasmissione (MJ)</i>	
	<i>Regime stazionario</i>	<i>Regime dinamico</i>		<i>Regime stazionario</i>	<i>Regime dinamico</i>
apr"	2519	1948	apr"	7620	7206
mag	6412	5185	mag	10746	7539
giu	6935	5441	giu	4710	5523
lug	7492	5813	lug	1740	2947
ago	5965	4815	ago	2365	3456
set	4298	3727	set	6768	6446
ott"	1388	1129	ott"	6673	5152

Tabella 7.10- Confronto tra Apporti solari e scambio per trasmissione calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 2.

Come nel caso invernale anche nel caso estivo la differenza maggiore si riscontra nello scambio per trasmissione ma soprattutto negli apporti solari con una differenza del 23.5% nel primo appartamento e del 10.2% per il secondo. Per quanto riguarda il termine di scambio per ventilazione la differenza tra i due metodi è cresciuta rispetto al caso invernale passando da un 1.8% ad un 5.3%. E' da supporre che questo aumento sia dovuto al fatto che in estate si hanno maggiori differenze tra le temperature utilizzate dal regime stazionario rispetto a quello dinamico.

La differenza principale tra analisi in regime stazionario e analisi in regime dinamico sta nel fatto che la prima segue quanto indicato dalla norma UNI/TS 11300-1 e quindi le temperature sono considerate costanti nel tempo mentre il regime dinamico considera i dati ottenuti dalla Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education (dati medi orari, <http://www.meteonorm.com>).



### Fabbisogno energetico - Stazionario Vs Dinamico

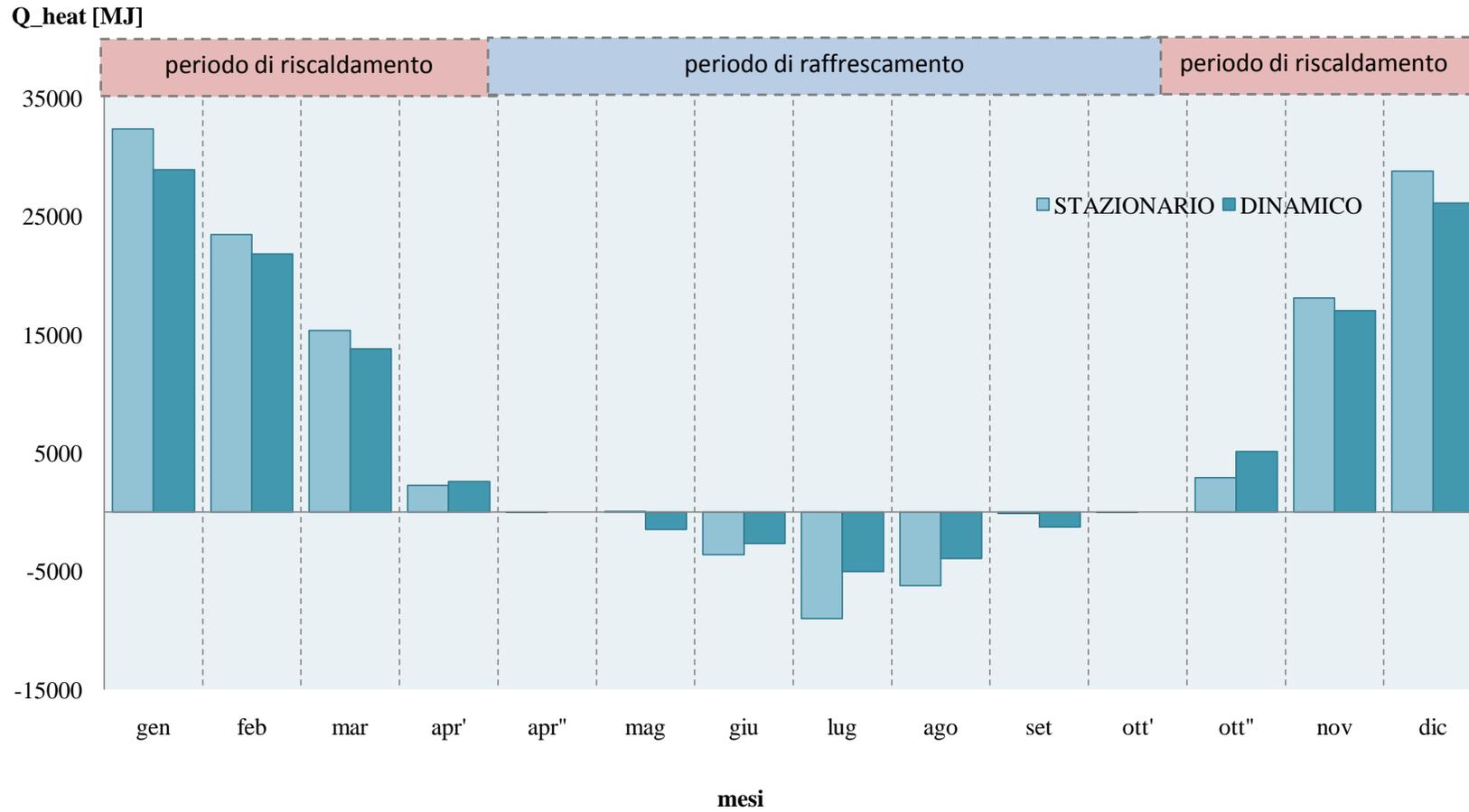


Grafico 7.9- Confronto tra Fabbisogno energetico calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 1.

### Fabbisogno energetico - Stazionario Vs Dinamico

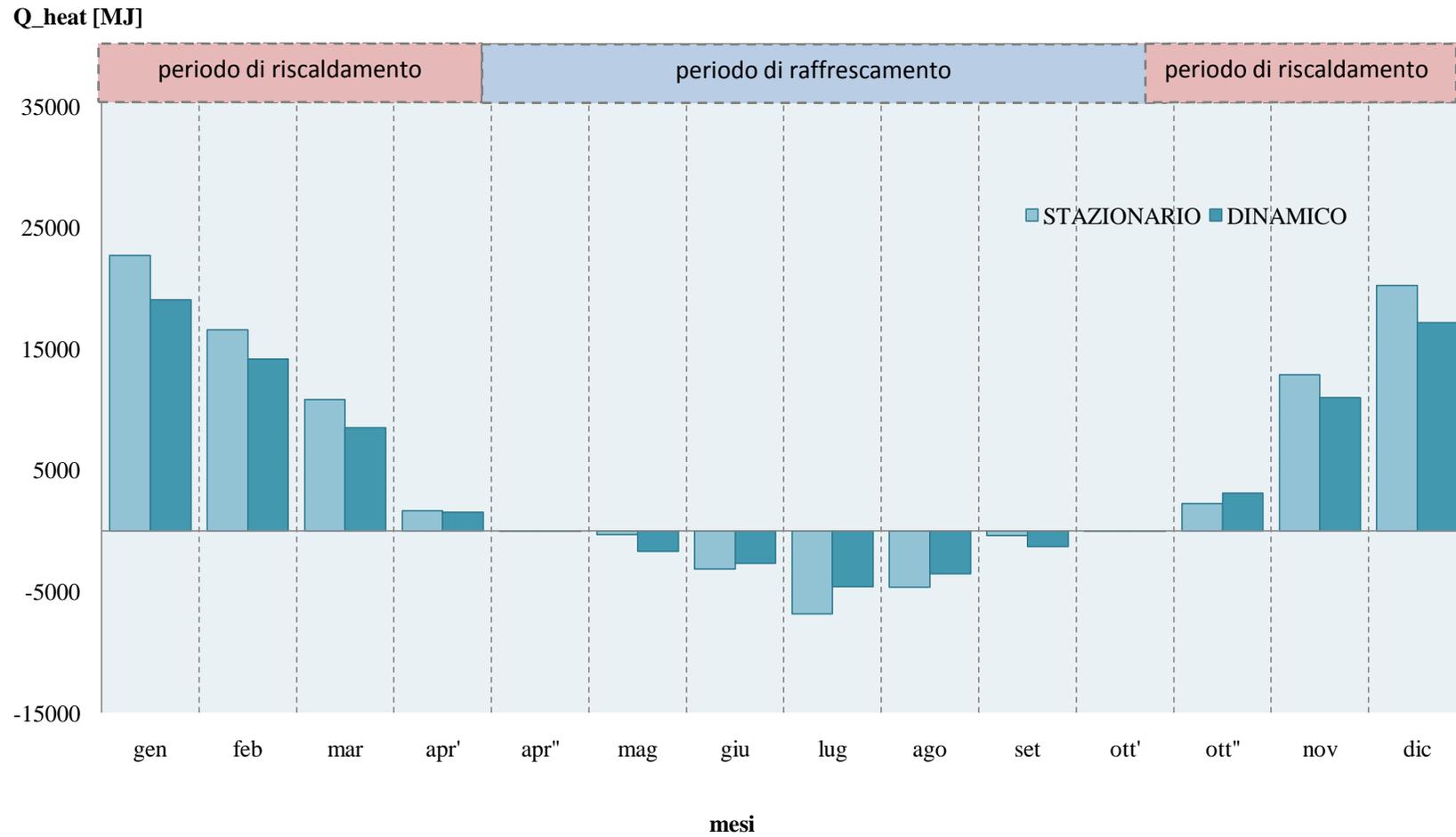


Grafico 7.10- Confronto tra Fabbisogno energetico calcolato in regime stazionario e dinamico dell'appartamento 2.

E' quindi immediato, dai risultati riportati precedentemente, ottenere la differenza nei riguardi del fabbisogno estivo ed invernale per l'intero edificio.

<b>Fabbisogno energetico netto (MJ)</b>		
	<b>Unità immobiliare</b>	
	<b>Stazionario</b>	<b>Dinamico</b>
<i>gen</i>	55059	47966
<i>feb</i>	40000	35959
<i>mar</i>	26181	22268
<i>apr'</i>	3906	4103
<i>apr''</i>	7	0
<i>mag</i>	-320	-3174
<i>giu</i>	-6759	-5369
<i>lug</i>	-15880	-9668
<i>ago</i>	-10867	-7510
<i>set</i>	-510	-2607
<i>ott''</i>	-18	-3
<i>ott'</i>	5130	8202
<i>nov</i>	30945	27983
<i>dic</i>	49029	43259

<b>Fabbisogno invernale (MJ)</b>	210250	189740	10%
<b>Fabbisogno estivo (MJ)</b>	34347	28331	18%

**Tabella 7.11- Confronto fabbisogno invernale ed estivo dell'intera unità immobiliare.**

Si ha una differenza complessiva, tra i due metodi dell'10% nel periodo invernale e del 18% nel periodo estivo.

Si noti, in ultimo, la grande differenza tra il fabbisogno energetico valutato nel periodo invernale e quello calcolato nel periodo estivo.

## 7.6 Calcolo fattore di carico

Interessante è valutare la dispersione, in termini di potenza, emessa da ciascun ambiente in modo tale da ottenere il fattore di carico. Il fattore di carico di un generatore (nel nostro caso della Pompa di calore) dice quanto il generatore

viene sollecitato e resta acceso per sopperire al fabbisogno di energia. In pratica ne definisce l'utilizzo.

### 7.6.1 Settaggio in TRNSYS

Per ottenere il calcolo della potenza sono stati fissati per i vari ambienti i valori di temperatura e il numero di ricambi d'aria riportati nella tabella sottostante. Mentre sono stati considerati nulli gli apporti interni.

<i>Locale</i>	<i>Temperatura [°C]</i>		<i>Numero di ricambi d'aria [vol/s]</i>
	<i>Inverno</i>	<i>Estate</i>	
<i>bagni</i>	24	26	2.0
<i>cucina</i>	20	26	1.5
<i>Altri locali</i>	20	26	0.5

Attraverso la scelta di output dell'NTYPE 5 e 30, che forniscono rispettivamente l'energia per ventilazione e l'energia per trasmissione, si è potuto procedere con le simulazioni e quindi con il calcolo delle potenze per i vari ambienti.

### 7.6.2 Risultati

Per la valutazione della potenza complessivamente dispersa dall'interno edificio si è proceduto sommando i valori massimi di potenza ottenuti per i vari ambienti durante il periodo invernale.

Confrontando i valori ottenuti in regime stazionario e in regime dinamico:

Dispersione termica in regime stazionario (kW)	Dispersione termica in regime dinamico (kW)
38.03	37.64

**Tabella 7.12- Confronto dispersioni termiche di progetto nel periodo invernale.**

Dispersione termica in regime stazionario (kW)	Dispersione termica in regime dinamico (kW)
32.64	31.65

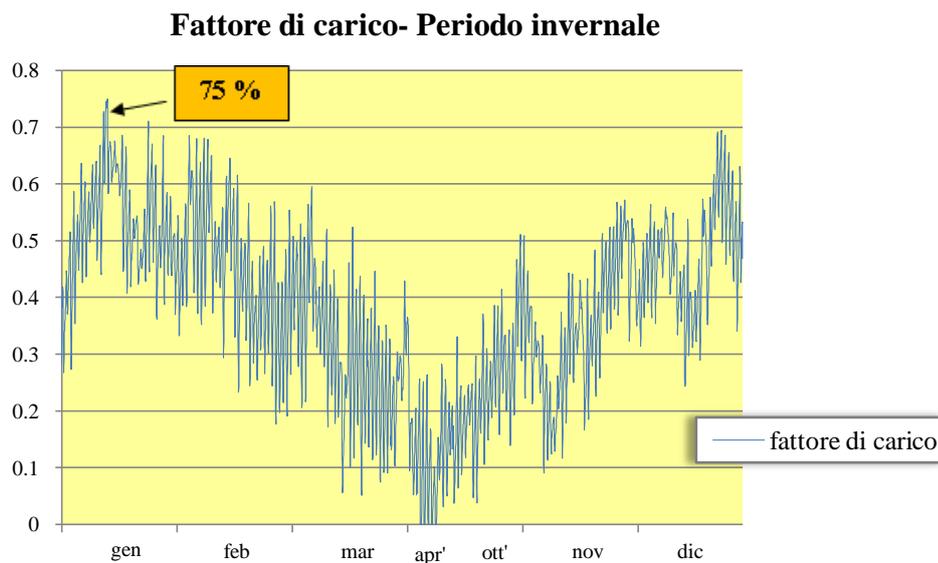
**Tabella 7.13- Confronto dispersioni termiche di progetto nel periodo estivo.**

Si può notare come i due valori siano del tutto paragonabili.

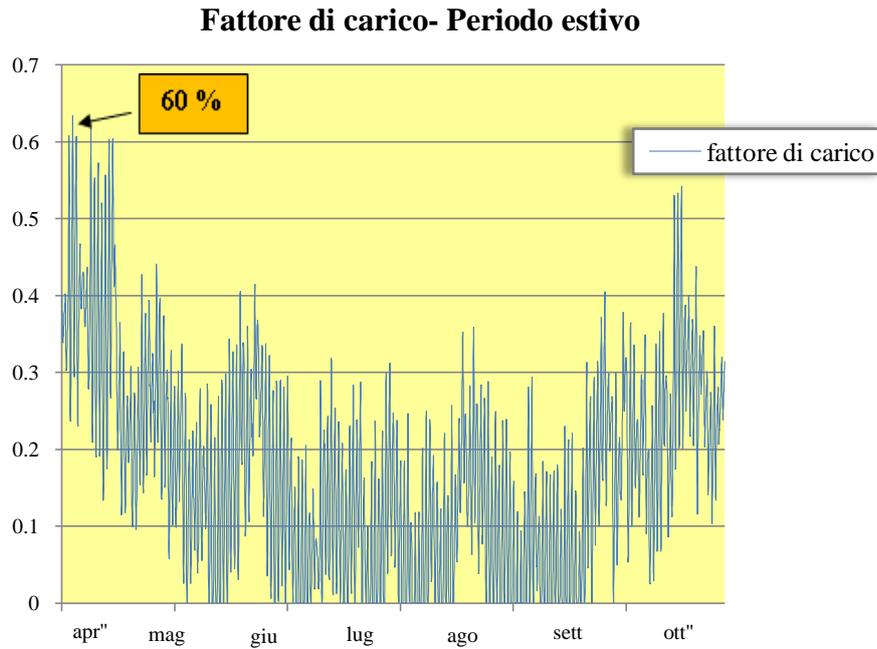
Il fattore di carico, per quello che si è detto sopra, rappresenta il rapporto tra la potenza istantanea e la potenza installata (che nel caso particolare è di 50 kW).

$$f_c = \frac{\text{Potenza istantanea}}{\text{Potenza installata}}$$

Per valutare quindi il fattore di carico in funzione del tempo si è sommata la dispersione termica complessiva (ottenuta sommando il termine di trasmissione e quello di ventilazione) dei vari ambienti nelle diverse ore dell'anno e la si è divisa per la potenza installata.



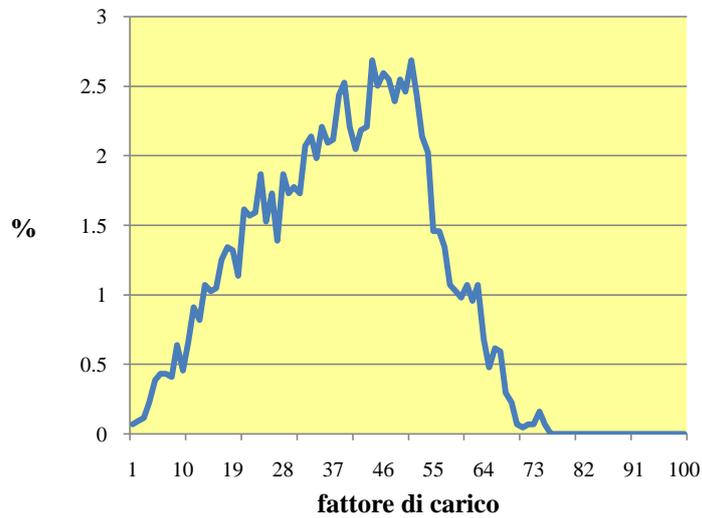
**Grafico 7.11- Fattore di carico nel periodo invernale.**



**Grafico 7.12- Fattore di carico nel periodo estivo.**

Come si può vedere dai grafici precedenti si ha un valore del fattore di carico per il periodo invernale pari al 75% mentre quello estivo è pari al 60%. Ciò significa che la pompa di calore installata (avente una potenza di 50 kW) lavora nel periodo invernale al massimo al 75 % della sua potenza massima e nel periodo estivo al 60 %. L'aver dunque installato una pompa di calore avente una potenza pari a 50 kW ha portato ad un sovradimensionamento dell'impianto.

E' possibile definire il fattore di carico anche attraverso un ulteriore grafico:



**Grafico 7.13- Fattore di carico (espresso in %) in funzione della percentuale di utilizzo.**

<i>Fc</i>	<i>0-10</i>	<i>10-20</i>	<i>20-30</i>	<i>30-40</i>	<i>40-50</i>	<i>50-60</i>	<i>60-70</i>	<i>70-80</i>	<i>80-90</i>	<i>90-100</i>
%	5	12	17	22	25	15	5	0	0	0

Da questo grafico e dalla tabella sovrastante si nota che la PdC installata non raggiunge mai il 100% del fattore di carico (come già detto in precedenza), ciò significa che non lavora mai alla massima potenza. Inoltre si può dire che il generatore installato viene utilizzato per un 50 % delle volte ad una potenza compresa tra il 40 e il 70% della potenza massima (50 kW).

## 7.7 Fabbisogno energetico considerando muri interni

Le pareti interne in edifici riscaldati hanno poca influenza sulle dispersioni energetiche poiché spesso separano ambienti riscaldati alla stessa temperatura. Esse, però, hanno effetti notevoli sull'inerzia termica degli edifici poiché, sottoposte ad irraggiamento solare, accumulano calore che viene poi restituito all'aria quando questa tende a raffreddarsi.

I flussi che entrano in gioco nel sistema sono flussi termici radiativi a bassa lunghezza d'onda dovuti alla radiazione solare penetrante attraverso le superfici trasparenti e flussi radiativi ad alta lunghezza d'onda dovuti alla radiazione mutua fra le pareti. Quindi le pareti interne risultano di grande importanza sia nella valutazione dell'accumulo termico sia nella valutazione della temperatura interna. In pratica esse accumulano l'energia solare che

penetra all'interno degli ambienti attraverso le superfici trasparenti (porte vetrate, finestre, ecc) e la restituiscono all'aria ambiente contribuendo al crescere o al decrescere della sua temperatura. L'accumulo termico delle pareti interne contribuisce, in maniera notevole, all'evoluzione termica dell'edificio. E' bene sottolineare tale concetto in quanto molto spesso si ritiene che le pareti interne non contribuiscono all'accumulo termico dell'intero edificio essendo solitamente elementi di separazione tra ambienti alla medesima temperatura e quindi non attraversati da flussi di calore. Questo, però, risulta valido solamente in regime stazionario. In realtà l'evoluzione termica dell'edificio è in regime variabile e quindi le condizioni transitorie riportano in causa anche le strutture apparentemente non attraversate da flusso termico, come le pareti interne di cui se ne tiene conto attraverso la loro capacità termica.

Per tutte queste ragioni si è ritenuto di rilevante importanza considerare nel calcolo del fabbisogno termico e in tutti i confronti che seguiranno da questo punto in poi i muri interni.

### 7.7.1 Settaggio in TRNSYS

---

Alla sezione *Wall* dell'interfaccia TRNBUILT si sono aggiunti i muri interni nelle zone modellanti i due appartamenti, definendone l'area e la categoria.

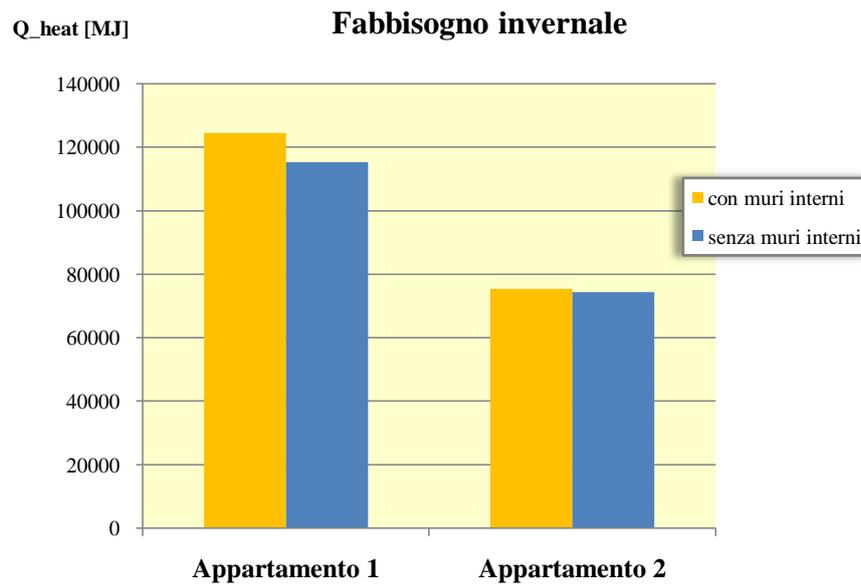
### 7.7.2 Risultati

---

Confrontando i fabbisogni energetici ottenuti con il file considerante i muri interni e quello con l'assenza di muri interni si sono trovati i seguenti risultati per il fabbisogno invernale:

	<i>Appartamento 1</i>	<i>Appartamento 2</i>
Fabbisogno invernale senza muri interni (MJ)	115357	74383
Fabbisogno invernale con muri interni (MJ)	124551	75458
variazione	<b>7%</b>	<b>1%</b>

**Tabella 7.14 – Confronto tra fabbisogno energetico invernale considerando muri interni e non.**

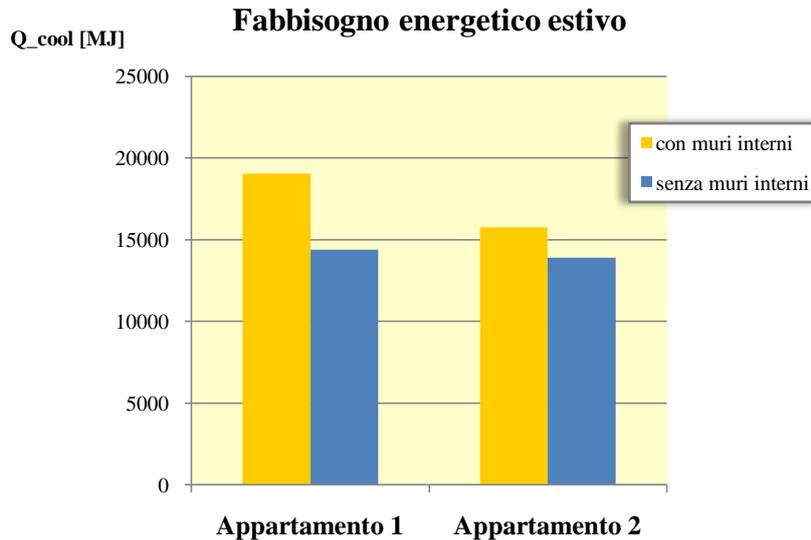


**Grafico 7.14- Confronto tra fabbisogno energetico invernale considerando muri interni e non.**

Mentre per quanto riguarda il fabbisogno estivo:

	<i>Appartamento 1</i>	<i>Appartamento 2</i>
Fabbisogno estivo senza muri interni (MJ)	14407	13924
Fabbisogno estivo con muri interni (MJ)	19060	15761
variazione	<b>32%</b>	<b>13%</b>

**Tabella 7.15– Confronto tra fabbisogno energetico estivo considerando muri interni e non.**



**Grafico 7.15- Confronto tra fabbisogno energetico estivo considerando muri interni e non.**

Si rileva, dunque, che le differenze maggiori si riscontrano nell'appartamento 1, in quanto possiede una superficie maggiore di muri interni. Inoltre, l'aumento maggiore si individua nel periodo estivo.

## 7.8 Funzionamento parziale dell'impianto

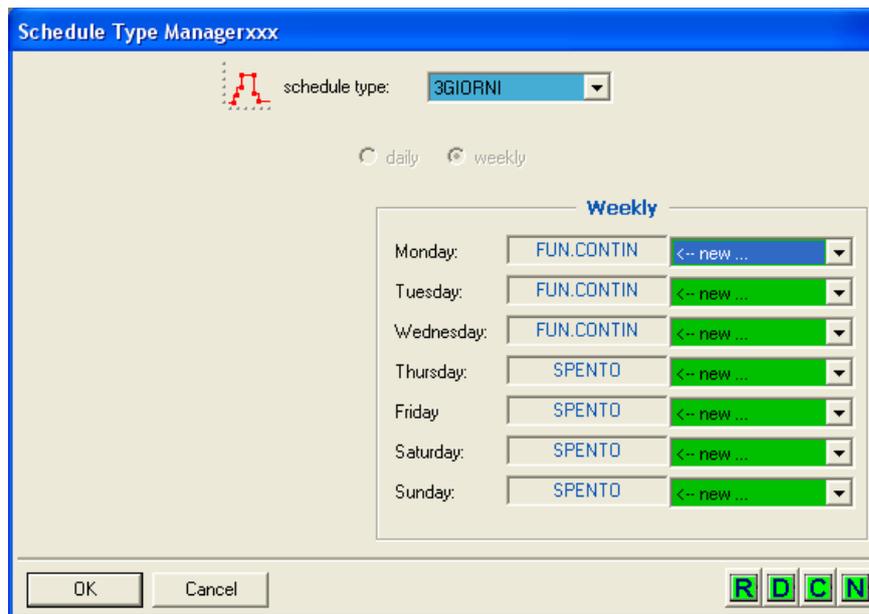
Vediamo ora come cala la temperatura dell'edificio ipotizzando di tener acceso l'impianto di riscaldamento per 3 giorni e di spegnerlo per i restanti 4.

***In pratica si intende considerare, con uno spegnimento improvviso dell'impianto, l'inerzia termica dell'edificio trascurando l'inerzia dell'impianto stesso.***

E' noto che un edificio ad elevata inerzia termica contribuisce a mantenere più stabili le temperature interne, anche quando all'esterno si verificano grandi escursioni termiche. L'inerzia termica cioè rappresenta l'effetto combinato dell'accumulo termico e della resistenza termica della struttura; caratteristiche che dipendono dalla massa frontale della parete e dalla conduttività dei materiali. In particolare è possibile dire che all'aumentare della capacità termica cresce la quantità di energia immagazzinata e al diminuire della conduttività decresce anche la velocità con cui il calore viene ceduto.

### 7.8.1 Settaggio in TRNSYS

Per quanto riguarda il settaggio delle opzioni in TRNSYS per far sì di valutare un impianto acceso 3 giorni e spento 4 si agisce sull'interfaccia TRNBUILT. Dapprima si procede creando, nell'opzione *Schedule*, un nuovo tipo di *manager* che fissi un funzionamento continuo dell'impianto nei primi 3 giorni e lo spegnimento nei successivi 4.



**Figura 7.19–** Schermata in cui si definisce il funzionamento dell'impianto.

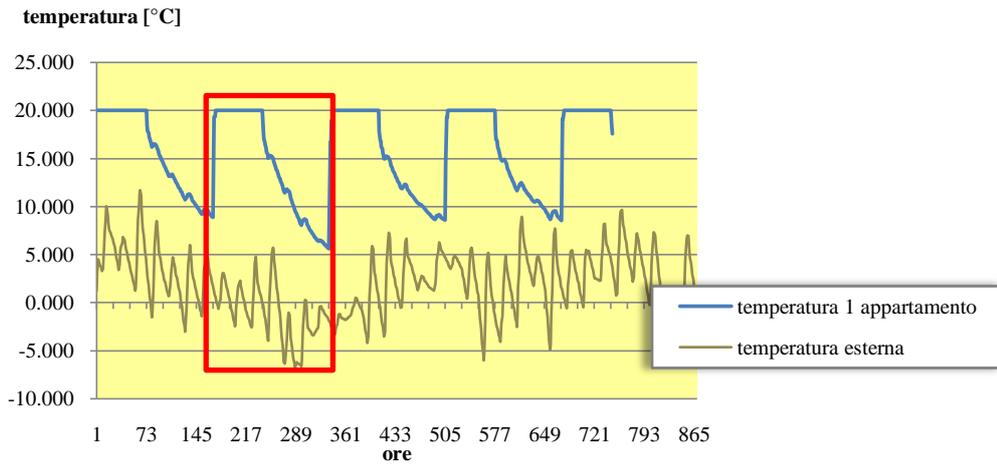
A questo punto è possibile fissare il *Typemanager Heating, Ventilation, Gain* rispettando questa condizione.

Per ottenere la temperatura interna dei due appartamenti è stato necessario selezionare come output del *Type 56*, l'NTYPE 1: Tair (temperature of zone).

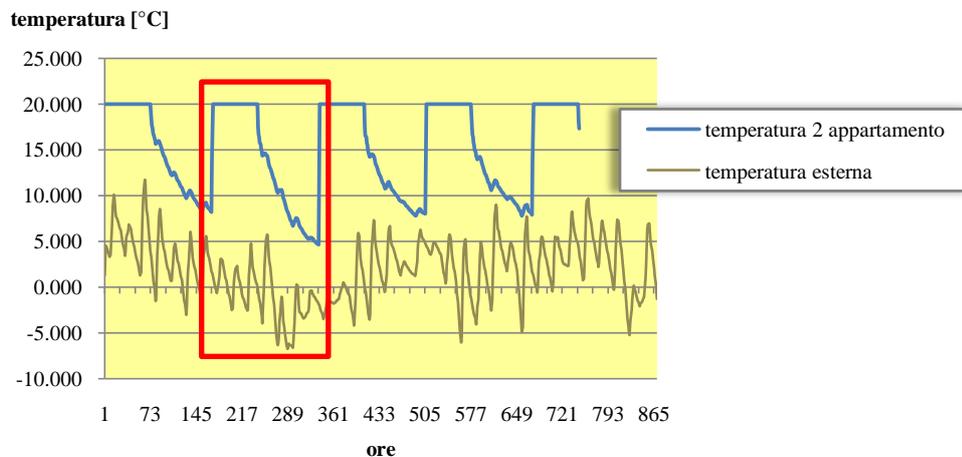
### 7.8.2 Risultati

Per valutare il calo di temperatura all'interno dei singoli appartamenti nel *periodo invernale* si è considerato il mese più freddo dell'anno: Gennaio, mese in cui la temperatura scende fino a  $-6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (secondo i dati climatici utilizzati dal programma di simulazione).

### Temperatura interna-1 Appartamento -Gennaio



### Temperatura interna-2 Appartamento -Gennaio



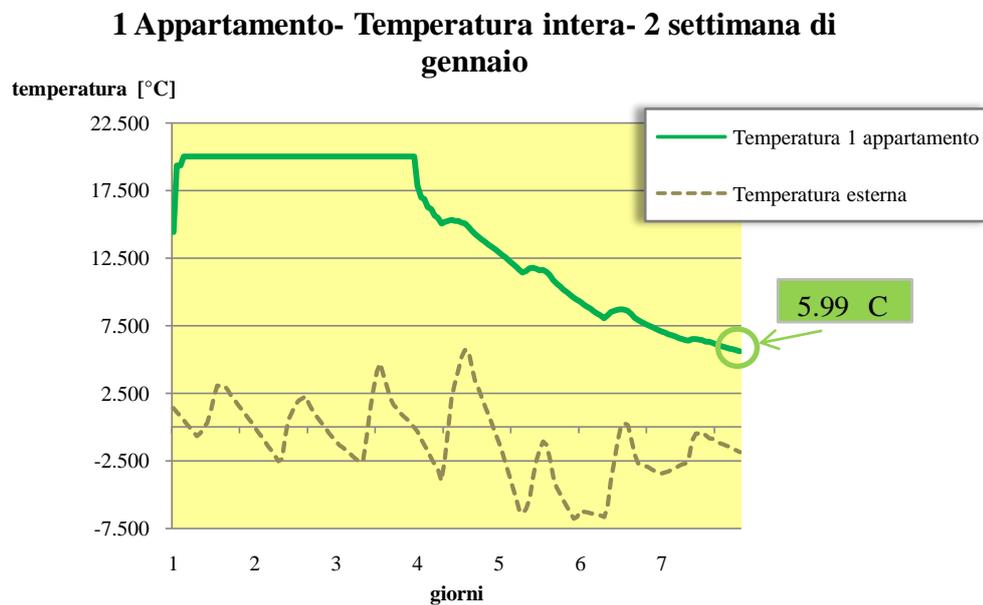
**Grafico 7.16- Temperature interne nei due appartamenti in Gennaio.**

Come si può notare dal riquadro rosso la temperatura interna più bassa si registra alla fine della seconda settimana di gennaio in entrambi i casi, avendo in questo periodo le temperature esterne minori.

Graficando in maniera più dettagliata la temperatura interna, si nota come alla fine del 4° giorno in cui si è avuto lo spegnimento dell'impianto di riscaldamento, la temperatura dell'appartamento 1 da 20 °C scende fino a 5.9 °C; mentre quella dell'appartamento 2 scende fino a 4.6 °C. Si ricordi che nell'ora in cui la temperatura interna scende fino a tali valori la temperatura esterna è di -1.8 °C; si riscontra quindi un  $\Delta T$ , rispettivamente, di 7.7 e 6.4 °C. Si ricorda che queste temperature sono le minimi temperature interne a cui

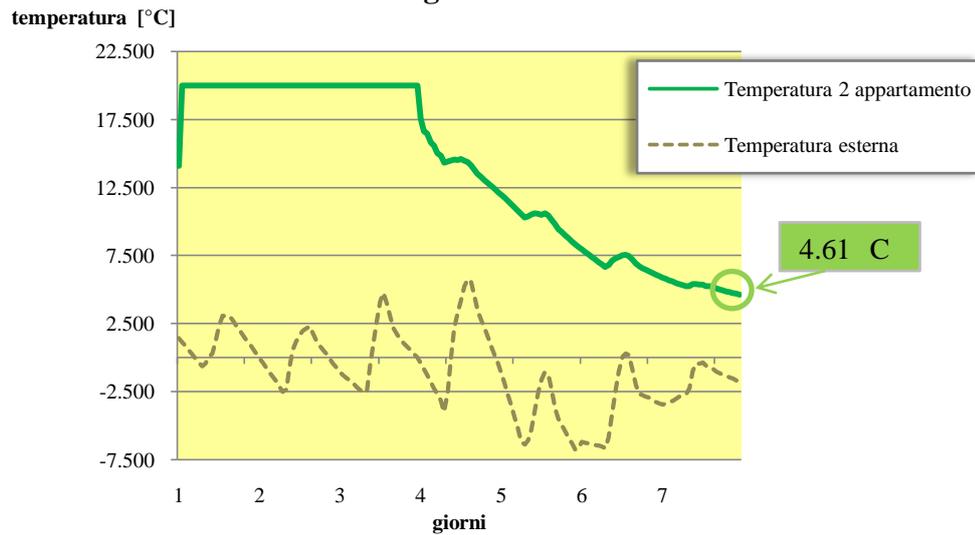
possono arrivare i due appartamenti in inverno avendo un funzionamento dell'impianto di questo tipo e quindi si sottolinea che già nella settimana successiva al termine del 4 giorno di spegnimento la temperatura interna registrata è di 8.58 e 7.96 °C rispettivamente per l'appartamento 1 e 2.

Un'ultima considerazione è nel confronto con la simulazione senza muri interni. E' di fatti proprio in questo raffronto dove si può notare l'importanza di aver considerato i muri interni. Dalle stesse simulazioni effettuate non considerando i muri interni si raggiungeva una temperatura di 2.67 °C nel primo appartamento e di 2.97 °C nel secondo. L'aver dunque considerato i tramezzi ha portato a dei risultati sicuramente più vicini alla realtà riguardo all'abbassamento della temperatura interna. In verità per un ancor maggior ravvicinamento ai dati reali sarebbe stato opportuno considerare anche la capacità termica dei mobili, se pur basso, questo valore può influenzare la variazione della temperatura interna.



**Grafico 7.17- Variazione della temperatura interna nell'appartamento 1.**

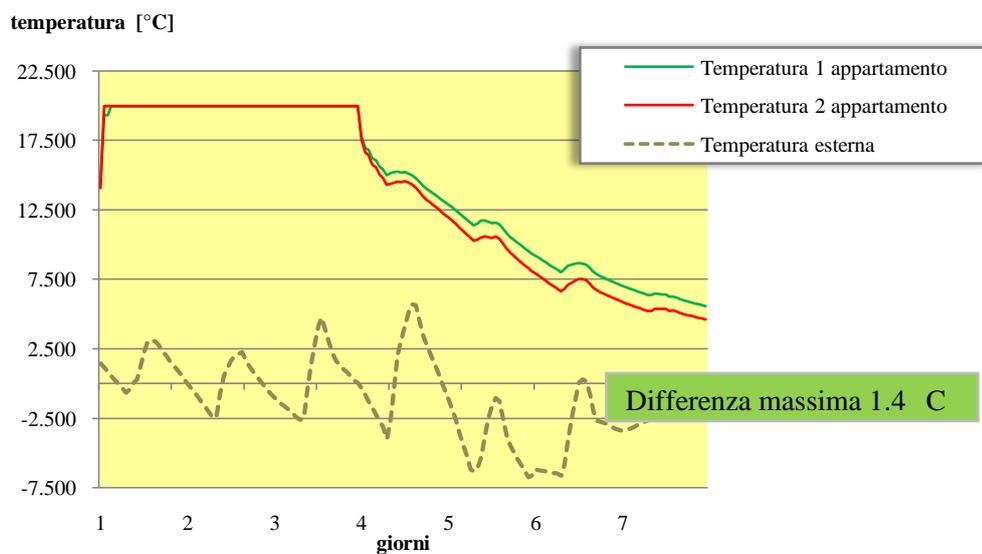
### 2 Appartamento- Temperatura intera- 2 settimana di gennaio



**Grafico 7.18- Variazione della temperatura interna nell'appartamento 2.**

Confrontando la variazione delle temperature interne nei due appartamenti si riscontra una differenza massima di temperatura pari 1.4 °C. Come si può vedere dal grafico sottostante nell'appartamento 2 si raggiungono temperature leggermente minori rispetto all'appartamento 1.

### Confronto Temperatura intera- 2 settimana di gennaio

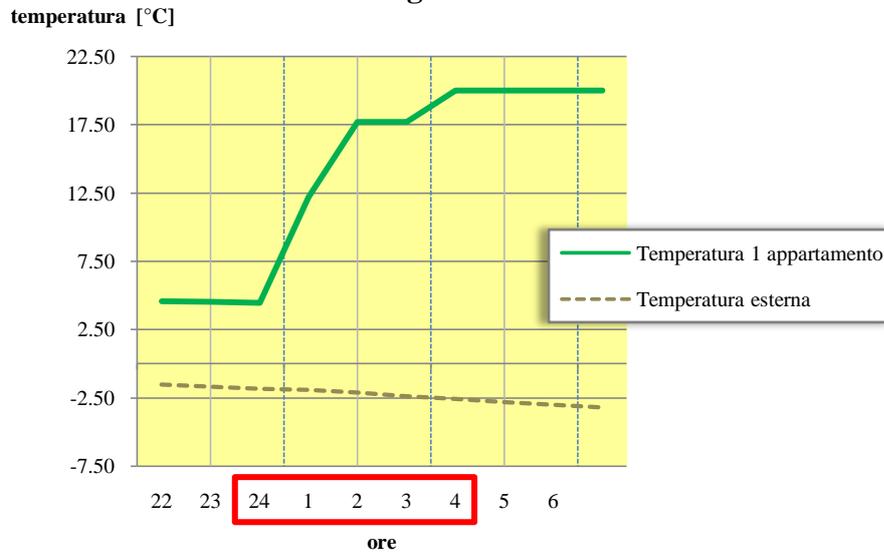


**Grafico 7.19- Confronto temperatura interna dei due appartamenti.**

Interessante è notare quanto tempo dall'accensione del sistema di riscaldamento si reinstauri la temperatura interna di 20 °C.

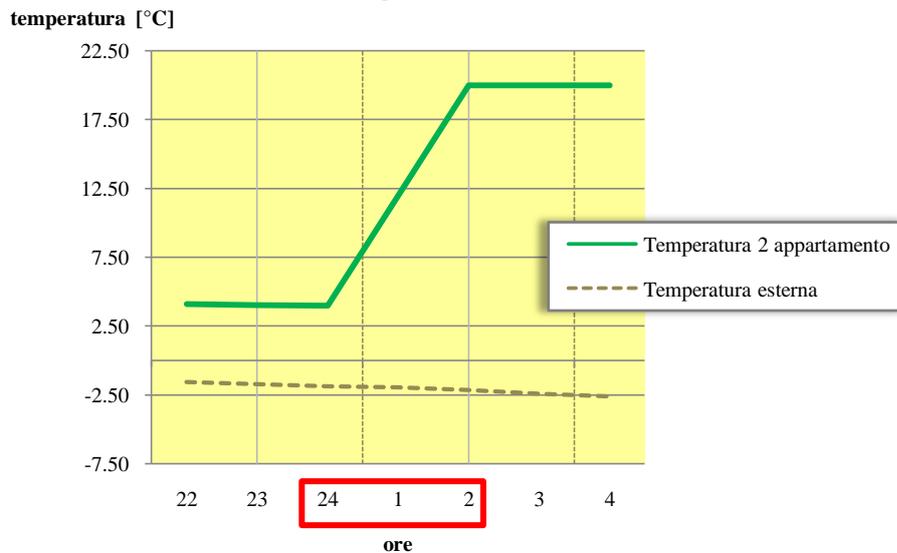
Nel primo appartamento la temperatura interna di 20 °C si ripristina in un tempo pari a 4 ore, mentre nel secondo il tempo scende a 2 ore.

**1 Appartamento- Temperatura intera- 2 settimana di gennaio**



**Grafico 7.20- Tempo necessario per ripristinare la temperatura di 20 °C nel 1 appartamento.**

**2 Appartamento- Temperatura intera- 2 settimana di gennaio**

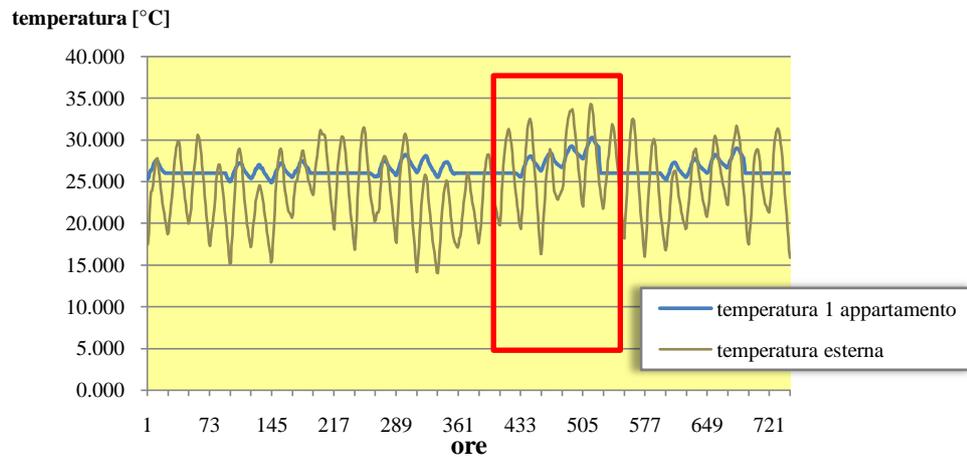


**Grafico 7.21- Tempo necessario per ripristinare la temperatura di 20 °C nel secondo appartamento.**

Ragionamenti analoghi possono essere effettuati per il *periodo estivo*.

Considerando il mese di luglio come periodo di riferimento, si nota che la temperatura maggiore all'interno dei due appartamenti si rileva circa nella terza settimana.

### Temperatura interna-1 Appartamento -Luglio



### Temperatura interna-2 Appartamento -Luglio

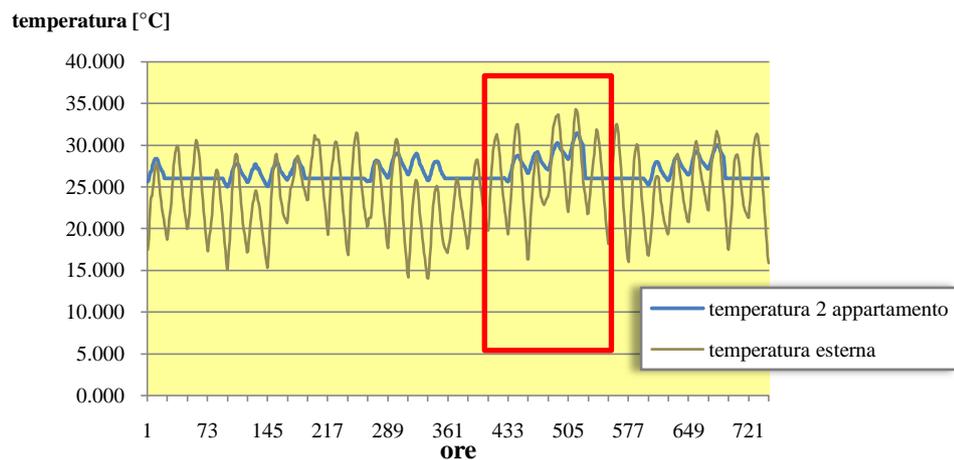


Grafico 7.22- Temperatura interna dei due appartamenti nel mese di Luglio.

Andando ad analizzare più nel dettaglio la variazione di temperatura interna si nota che la temperatura massima all'interno dell'edificio si ottiene alle ore 15; in particolare si arriva ad una temperatura di 30.3 °C nel primo appartamento mentre si raggiungono i 31.4 °C nel secondo appartamento. Anche nel caso estivo si denota un incremento leggermente maggiore nel secondo appartamento rispetto al primo. Si sottolinea che nello stesso orario la

temperatura esterna è considerata, dal programma di simulazione, pari a 33.74 °C e quindi si registra un  $\Delta T$  tra esterno e interno pari a 3.4 °C nel primo caso e di 2.3 °C nel secondo. Anche in questo caso si ricorda l'importanza di aver considerato i muri interni. Di fatti nel caso in cui non fossero stati valutati la temperatura del primo appartamento sarebbe salita fino a 33 °C mentre quella del secondo fino a 33.4 °C. Ancora una volta il secondo appartamento risulta influenzato in parte minore dall'aver considerato nel modello i muri interni, in quanto, come già detto più volte, include una superficie minore di muri interni rispetto all'altro.

### 1 Appartamento- Temperatura interna- 3 settimana di luglio

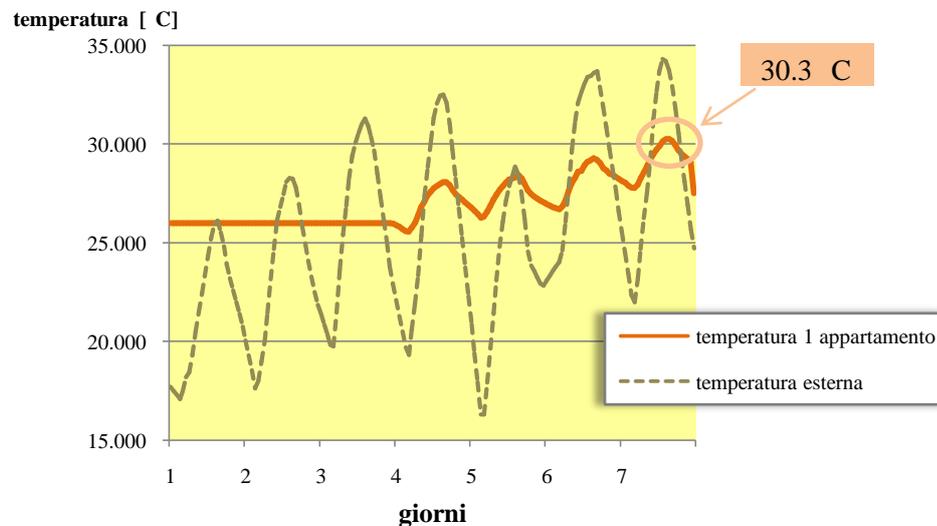


Grafico 7.23- Temperatura interna del primo appartamento nella 3 settimana di Luglio.

### 2 Appartamento- Temperatura intera- 3 settimana di luglio

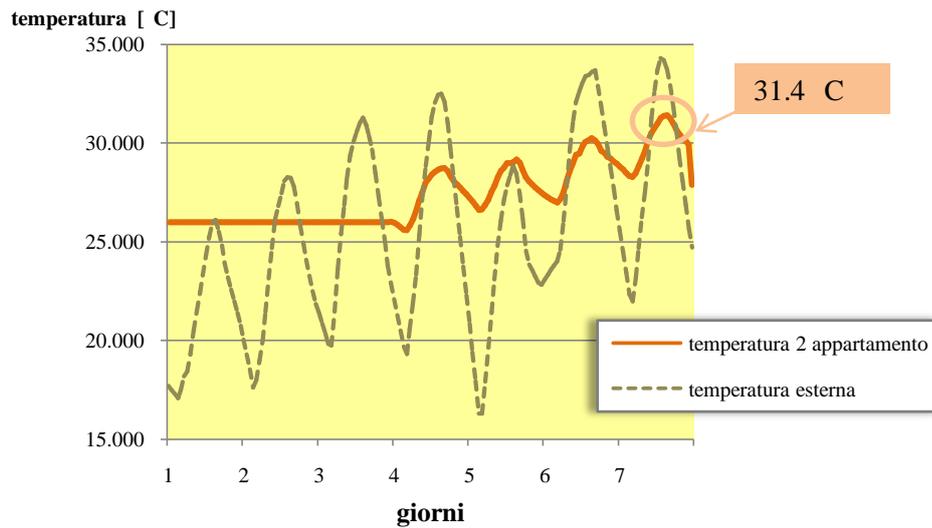


Grafico 7.24- Temperatura interna del primo appartamento nella 3 settimana di Luglio.

Facendo un confronto tra le temperature interne del primo e del secondo appartamento si trova una variazione massima di circa 1°C. Si riscontra che nel 1 appartamento si raggiungono temperature che sono sempre leggermente minori rispetto al secondo.

### Confronto Temperatura intera- 3 settimana di luglio

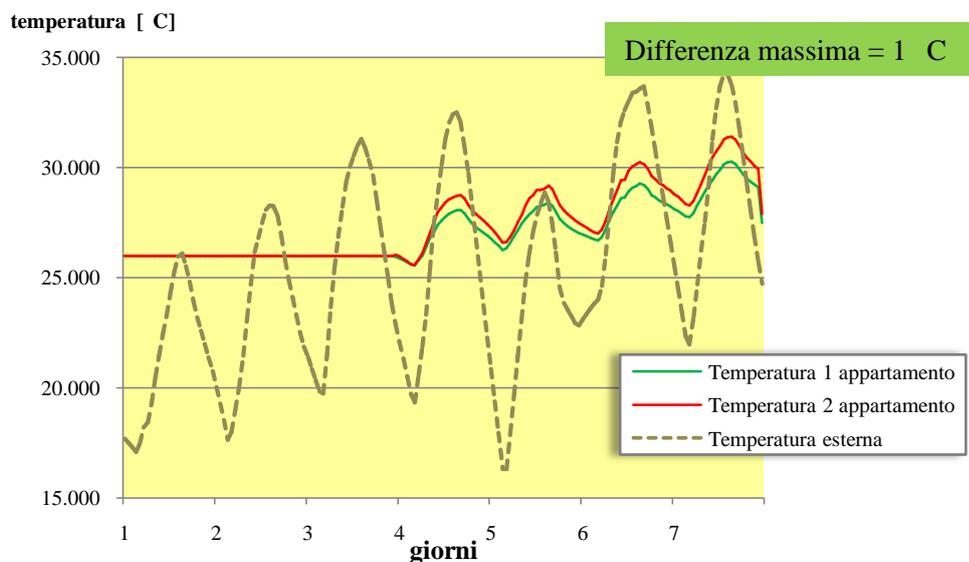


Grafico 7.25- Confronto tra le temperature interne raggiunte dai due appartamenti.

Anche in tal caso è possibile valutare approssimativamente il tempo necessario a raggiungere nuovamente la temperatura di 26 °C una volta riaccesso l'impianto.

E' quindi possibile notare dai grafici sottostanti che il tempo necessario a ripristinare tale temperatura è di circa 1 ora in entrambi i casi.

### 1 Appartamento- Temperatura intera- 3 settimana di luglio

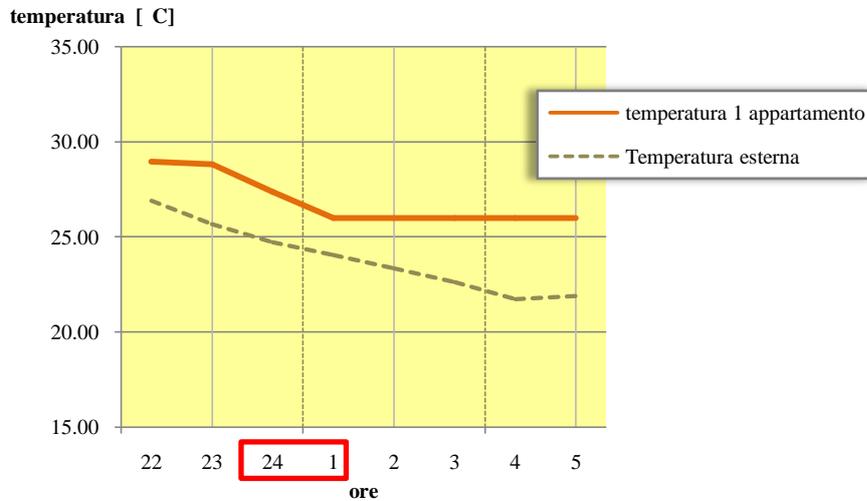


Grafico 7.26- Tempo necessario per ripristinare la temperatura di 26 °C nel primo appartamento.

### 2 Appartamento- Temperatura intera- 3 settimana di luglio

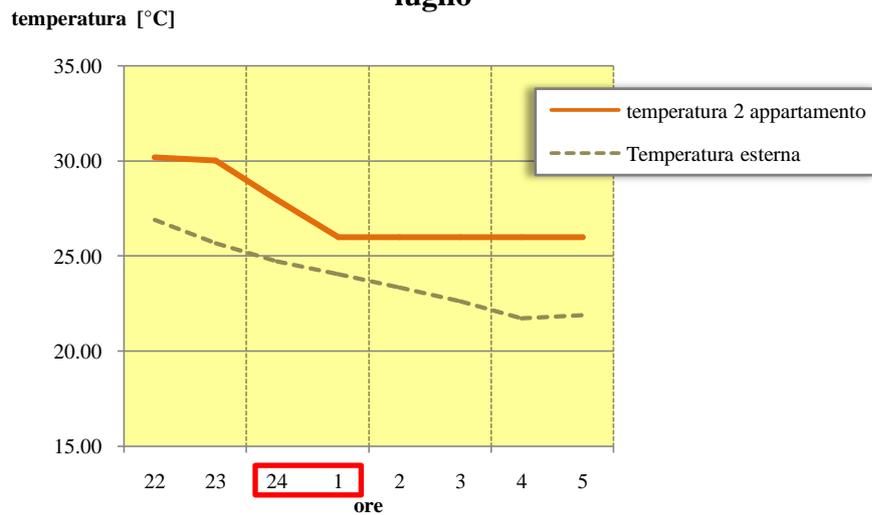


Grafico 7.27- Tempo necessario per ripristinare la temperatura di 26 °C nel secondo appartamento.

## 7.9 Free Cooling

---

Al fine di ridurre gli apporti termici durante il regime estivo e raffrescare gli spazi dell'organismo edilizio devono essere adottate soluzioni progettuali che garantiscano di utilizzare al meglio le condizioni ambientali esterne e le caratteristiche distributive degli spazi per favorire la ventilazione naturale dell'edificio, con particolare riferimento alla ventilazione notturna (free cooling).

Risulta, dunque, interessante vedere come cambia il fabbisogno estivo e la temperatura interna dell'edificio considerando un impianto di raffrescamento funzionante dalle 8 alle 22. Si suppone dunque di spegnere l'impianto di raffrescamento nelle ore notturne e contemporaneamente aprire le finestre in modo tale da ottenere una sorta di ventilazione forzata (passando da 0.3 l/h a 1 l/h).

### 7.9.1 Settaggio in TRNSYS

---

Per quanto riguarda il settaggio delle opzioni in TRNSYS per far sì di valutare un impianto acceso solamente in alcune ore del giorno occorre intervenire sull'interfaccia TRNBUILT. Nell'opzione *Schedule*, si crea un nuovo tipo di *manager* che fissa il funzionamento dell'impianto di raffrescamento solamente tra le 8 e le 22.

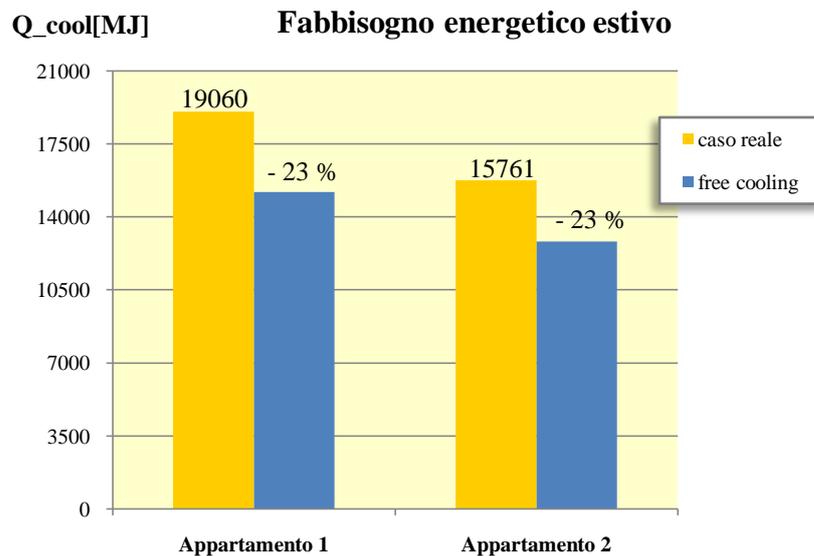
A questo punto è possibile fissare il *Typemanager Cooling* che rispetti questa condizione.

Lo stesso procedimento deve essere seguito per il *Gain Ventilation* dove si dovrà impostare un opportuna *Schedule* che fissi una ventilazione pari a 0.3 l/h dalle 8 alle 22 e una ventilazione pari a 1 l/h dalle 22 alle 8 (ore notturne).

Fabbisogno e temperatura interna vengono così ottenuti attraverso l'NTYPE 904 e 1.

## 7.9.2 Risultati

Per quanto riguarda il fabbisogno, considerando un regime intermittente di raffrescamento (impianto acceso dalle 8 alle 22) si riscontra naturalmente una diminuzione del fabbisogno. Tale diminuzione si aggira attorno al 20 % in entrambi gli edifici.



**Grafico 7.28- Confronto fabbisogno estivo nel caso di funzionamento continuo e intermittente dell'impianto.**

L'aver dunque considerato una ventilazione notturna definisce dei risultati positivi nella riduzione dei carichi per raffrescamento.

Solitamente di fatti le temperature notturne esterne sono minori rispetto alle temperature interne e questo viene sfruttato per rimuovere una certa quantità di calore durante la notte; quindi il successo di tale ventilazione dipende dalla differenza di temperatura tra interno e esterno.

In altre parole è possibile affermare che la ventilazione notturna porta ad un minor dispendio di energia per la climatizzazione.

Analizzando come settimana rappresentativa la terza settimana di luglio è possibile notare come varia la temperatura interna dei due appartamenti considerando un regime intermittente.

### Confronto Temperatura intera- 3 settimana di luglio

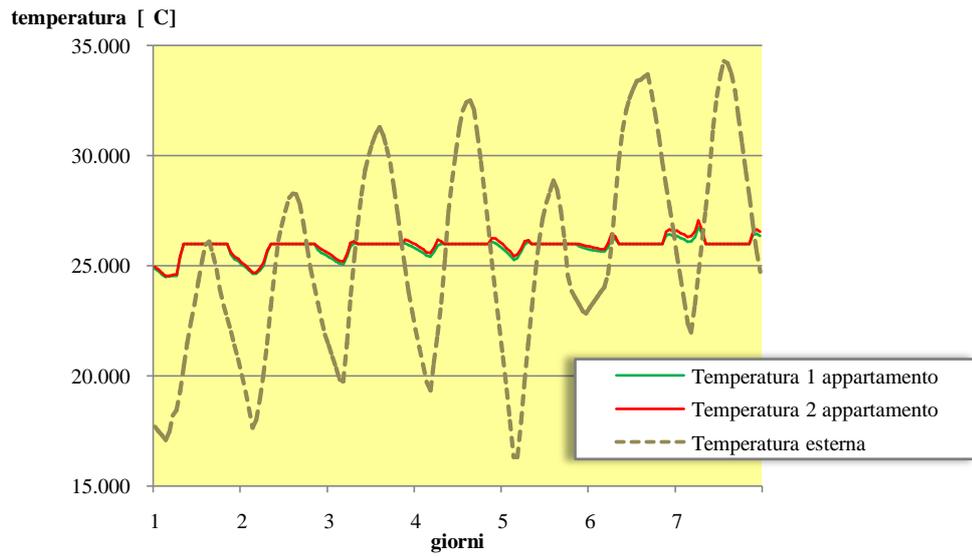
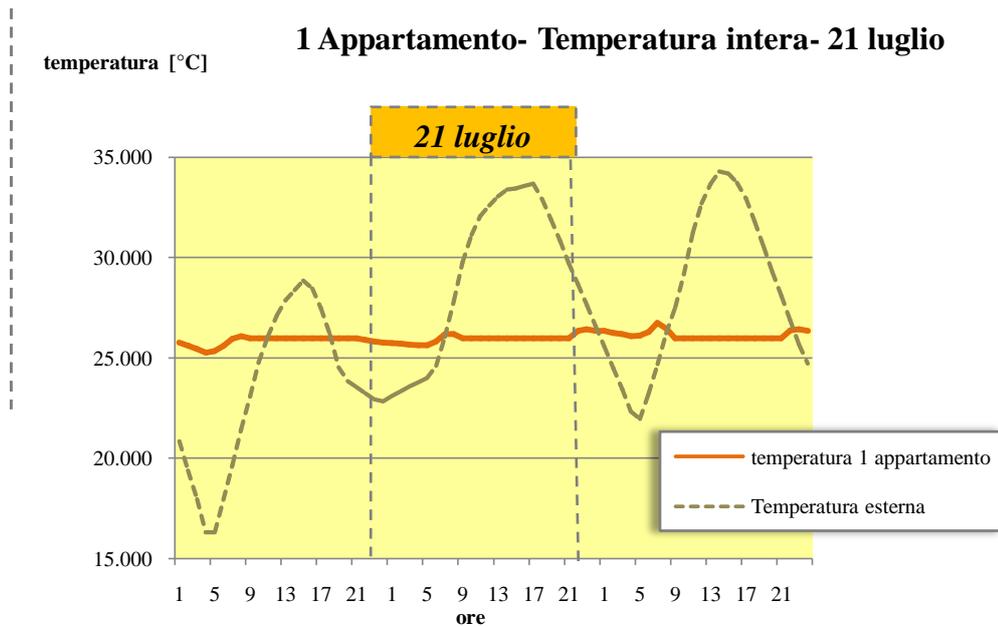
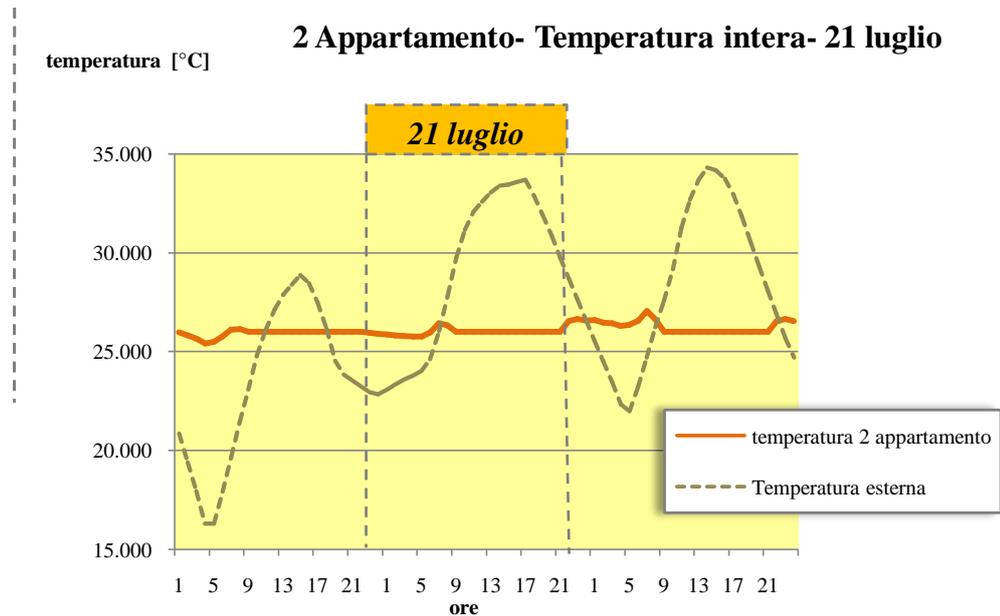


Grafico 7.29- Confronto temperature interne nei due appartamenti nella terza settimana di luglio.

### 1 Appartamento- Temperatura intera- 21 luglio





**Grafico 7.30- Confronto temperature interne nei due appartamenti prendendo il 21 luglio.**

Come è possibile notare dai grafici sovrastanti ipotizzando di spegnere l'impianto istantaneamente la temperatura subisce una leggera diminuzione nelle ore notturne (quando la temperatura esterna tende a scendere) per poi ricominciare a salire nelle prime ore del mattino. Analizzando i dati si è visto che tale innalzamento è attorno ad un grado in entrambi gli appartamenti.

Questo sta ad indicare che nel caso particolare il considerare una ventilazione notturna porta a dei benefici in termini di fabbisogno ma non in termini di diminuzione di temperatura interna.

## 7.10 Variazione spessore isolante

Un'adeguata coibentazione permette di ridurre il dispendio energetico di un abitazione, secondo i criteri della bioedilizia. Se tutte le abitazioni fossero correttamente isolate, i consumi si ridurrebbero del 20% e la resa di corpi scaldanti o pannelli radianti aumenterebbe.

Un'abitazione coibentata consente di avere un clima interno ottimale in ogni stagione perché sia il caldo sia il freddo penetrano in modo ridotto.

Al contrario se la casa non è isolata dal punto di vista termico, in inverno il calore prodotto dall'impianto di riscaldamento si dirige verso zone più fredde e

le finestre, disperdendosi anche in grande quantità. In questo modo, oltre ad avere ambienti poco confortevoli da vivere, si spreca calore ed energia necessaria per produrlo. Per queste ragioni qui di seguito si è deciso di effettuare diverse simulazioni riguardo l'isolamento dell'unità immobiliare. Verranno così trattati:

- *Variazione isolamento copertura*
- *Isolamento controsoffitto*
- *Isolamento pareti perimetrali*

### 7.10.1 Variazione spessore isolante tetto

---

Un buon isolamento delle coperture rappresenta una delle azioni fondamentali da porre in atto per la buona efficienza energetica di un edificio, in quanto la dispersione termica che si realizza attraverso il tetto è una quantità sensibile di quella che interessa l'involucro nel suo insieme. Un buon isolamento del tetto, di fatti, garantisce un sensibile abbassamento dei consumi energetici dell'edificio e un notevole miglioramento del confort abitativo.

Per queste ragioni si ritiene interessante studiare come varia sia il fabbisogno dei due appartamenti sia la temperatura interna modificando l'isolamento della copertura. Ipotizzando di mantenere invariato il tipo di isolamento, sughero, si mettono a confronto i seguenti casi:

- 0 cm di isolamento;
- 6 cm di isolamento (valore che rispecchia le condizioni reali);
- 16 cm di isolamento (valore che permette di rispettare i limiti di trasmittanza della norma:  $U < 0.300 W/m^2K$ ).

#### 7.10.1.1 Settaggio in TRNSYS

---

Per realizzare tale confronto basta modificare, prima della simulazione, nel *Typemanager Wall* lo spessore dell'isolante componente il pacchetto del tetto. Anche in questo caso volendo valutare il fabbisogno nel periodo invernale ed estivo occorrerà settare per una prima simulazione 20 °C nel *Typemanager Heating*, e per la seconda una temperatura pari a 26 °C nel *Typemanager Cooling*. In un terzo momento sarà, quindi necessario, per valutare la

variazione della temperatura interna, procedere con le simulazioni a impianto spento.

#### 7.10.1.2 Risultati

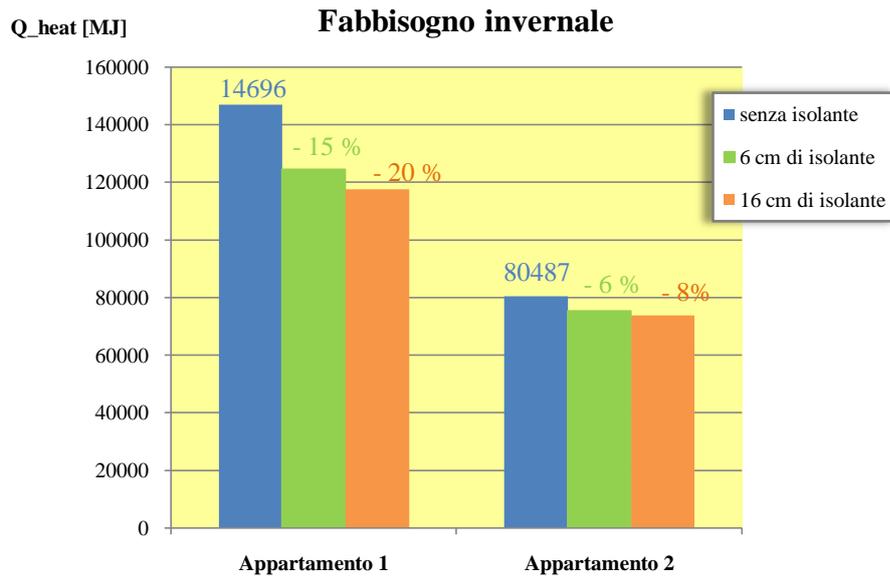
Si mettono qui di seguito in evidenza i risultati riguardanti il fabbisogno energetico estivo ed invernale ottenuti variando l'isolamento della copertura:

<b>Aumento isolante tetto</b>	<b>Appartamento 1</b>		<b>Appartamento 2</b>	
	<i>Fabbisogno invernale [MJ]</i>	<i>Fabbisogno estivo [MJ]</i>	<i>Fabbisogno invernale [MJ]</i>	<i>Fabbisogno estivo [MJ]</i>
0 cm	145965	19062	80487	16232
6 cm	124551	19060	75458	15761
16 cm	117582	19057	73869	15716
variazione	-20%	0%	-8%	-3%

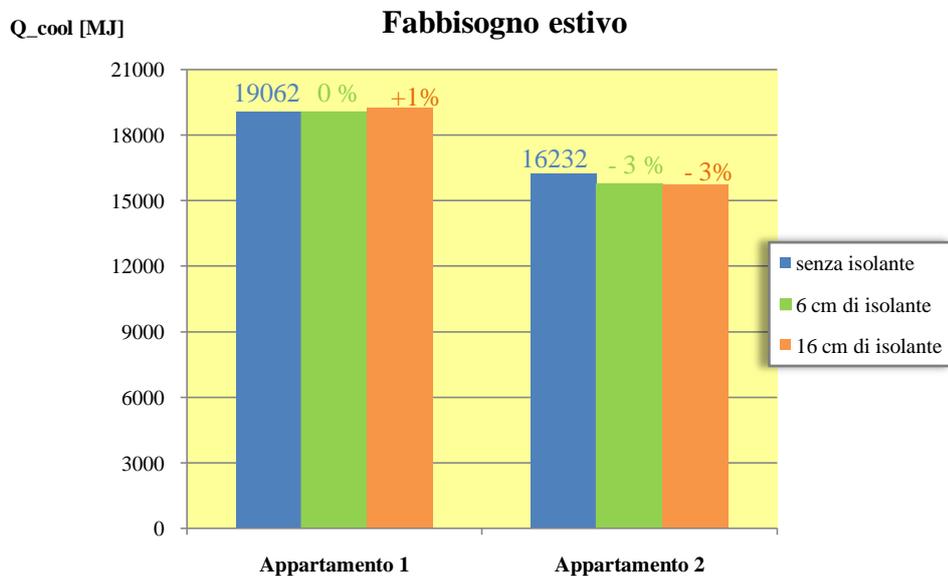
**Tabella 7.16- Confronto tra i fabbisogni energetici dei due appartamenti variando lo spessore dell'isolante.**

Confrontando i fabbisogni ottenuti considerando diversi spessori di isolante si nota come tale modifica incida principalmente sul fabbisogno invernale, in particolare incide principalmente sul fabbisogno invernale del primo appartamento, essendo l'appartamento con una superficie maggiore di copertura. Quindi si passa da un fabbisogno invernale pari a 145320 MJ, corrispondente all'assenza di isolamento, ad un fabbisogno di 117582 MJ, corrispondente a uno spessore di sughero pari a 16 cm. Si ha dunque una diminuzione del fabbisogno del 20%. La diminuzione del fabbisogno invernale del secondo appartamento risulta, invece, solamente pari al 8%.

Per quanto riguarda il fabbisogno estivo si ha una diminuzione minima, rispettivamente dello 0 e del 3%. Se inoltre si vuole valutare la differenza percentuale tra il fabbisogno ottenuto nel caso reale (con 6 cm di isolante) e quello ottenuto con un aumento fino a 16 cm di isolante si individua nel caso invernale una diminuzione del 5 % nell'appartamento 1 e del 2% nell'appartamento 2. In entrambi i casi non si individuano miglioramenti notevoli nel caso estivo.

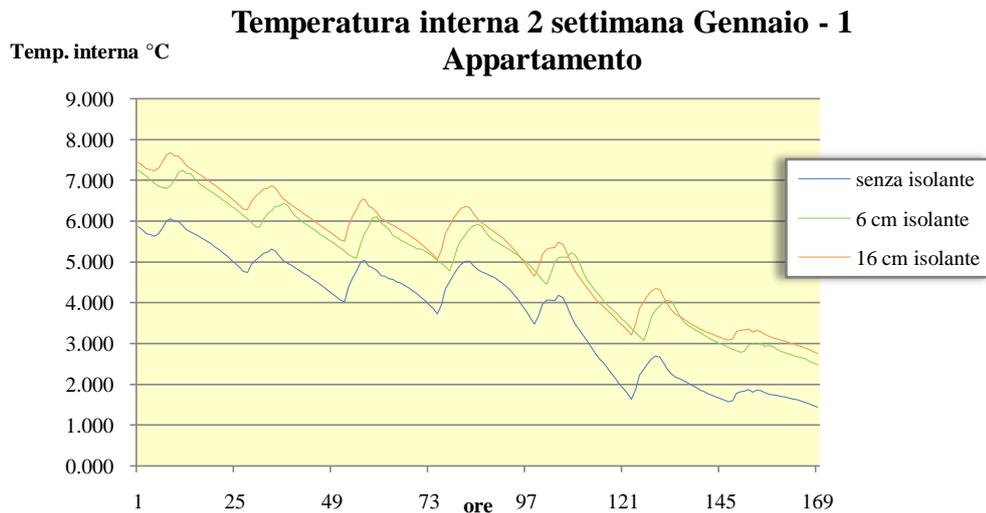


**Grafico 7.31- Confronto fabbisogno invernale variando lo spessore della copertura.**

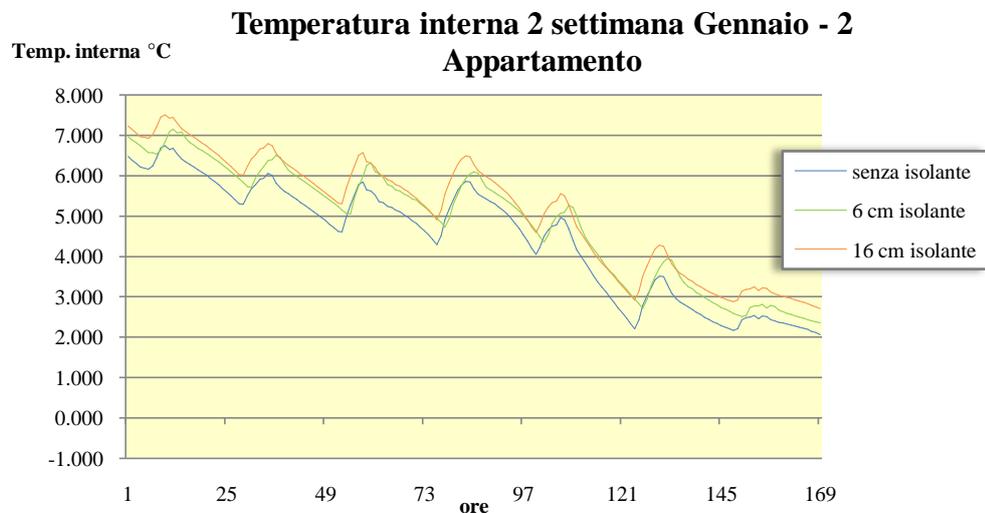


**Grafico 7.32- Confronto fabbisogno estivo variando lo spessore della copertura.**

Per quanto riguarda la variazione della temperatura interna verrà qui di seguito riportata solamente la temperatura invernale corrispondente ad una settimana di riferimento (seconda settimana di gennaio) in quanto per la variazione di temperatura interna nel periodo estivo non si sono individuati particolari rilevanti.



**Grafico 7.33- Variazione della temperatura interna del primo appartamento al variare dello spessore della copertura.**



**Grafico 7.34- Variazione della temperatura interna del secondo appartamento al variare dello spessore della copertura.**

Nel primo appartamento si riscontra un aumento massimo della temperatura interna, passando da un tetto privo di isolamento a uno con 16 cm di sughero, pari a 1.96 °C. Solamente di 0.96 °C nell'appartamento 2. Questa differenza è da attribuirsi, come già prima evidenziato, al fatto che un aumento di isolante nel tetto inciderà maggiormente nell'appartamento avente una maggior superficie del medesimo. Se, invece, confortiamo i miglioramenti sulla temperatura che si riscontrano passando dal caso reale al caso con un aumento fino a 16 cm di isolante rileviamo un miglioramento in entrambi gli appartamenti di 0.6 °C.

## 7.10.2 Isolante controsoffitto

Interessante risulta vedere se agendo solamente sul controsoffitto, invece che direttamente in copertura, si ottengono comunque miglioramenti sia nei confronti del fabbisogno sia nei confronti della temperatura interna.

Si è dunque inserito uno strato di polistirene espanso avente uno spessore di 10 cm portando la trasmittanza da un valore di  $4.58 \text{ W/m}^2\text{K}$  (trasmittanza di un pannello in cartongesso di spessore pari a 1.2 cm) a una di  $0.351 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### 7.10.2.1 Settaggio in TRNSYS

Per realizzare tale confronto basta aggiungere, prima della simulazione, nel *Typemanager Wall* l'isolante nel pacchetto del controsoffitto. Si è quindi aggiunto al cartongesso, componente il controsoffitto, come isolante il polipropilene espanso, con uno spessore di 10 cm. Anche in questo caso volendo valutare il fabbisogno nel periodo invernale occorrerà settare una temperatura pari a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  nel *Typemanager Heating*, mentre per la valutazione del fabbisogno estivo si definisce una temperatura pari a  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  nel *Typemanager Cooling*. Infine per valutare la variazione della temperatura interna, si dovrà procedere con le simulazioni a impianto spento.

### 7.10.2.2 Risultati

Si riportano dunque i fabbisogni energetici calcolati con e senza isolante:

<i>isolante controsoffitto</i>	<i>Appartamento 1</i>		<i>Appartamento 2</i>	
	<i>Fabbisogno invernale [MJ]</i>	<i>Fabbisogno estivo [MJ]</i>	<i>Fabbisogno invernale [MJ]</i>	<i>Fabbisogno estivo [MJ]</i>
caso reale	124551	19060	75458	15761
aumento isolante controsoffitto	110834	19067	68739	15979
variazione	-11%	0%	-9%	1%

**Tabella 7.17- Confronto tra i fabbisogni energetici dei due appartamenti variando lo spessore dell'isolante.**

L'aver isolato il controsoffitto incide notevolmente nei riguardi del fabbisogno invernale, facendolo diminuire del 11% nell'appartamento 1 e del 9% nell'appartamento 2. Cosa diversa accade per quanto riguarda il fabbisogno estivo. In tal caso la variazione è praticamente nulla. In altre parole isolando il controsoffitto si hanno notevoli miglioramenti del fabbisogno invernale e nessuno per il fabbisogno estivo.

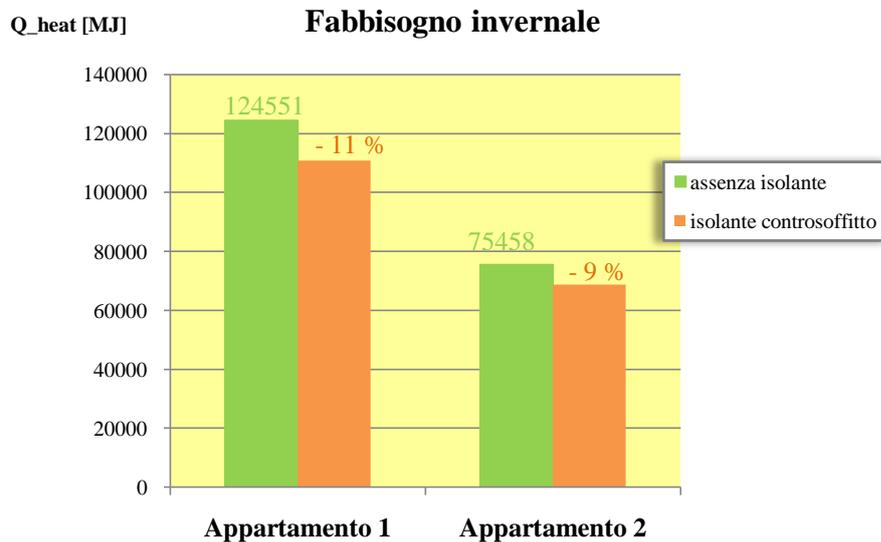


Grafico 7.35- Confronto fabbisogno invernale variando lo spessore del controsoffitto.

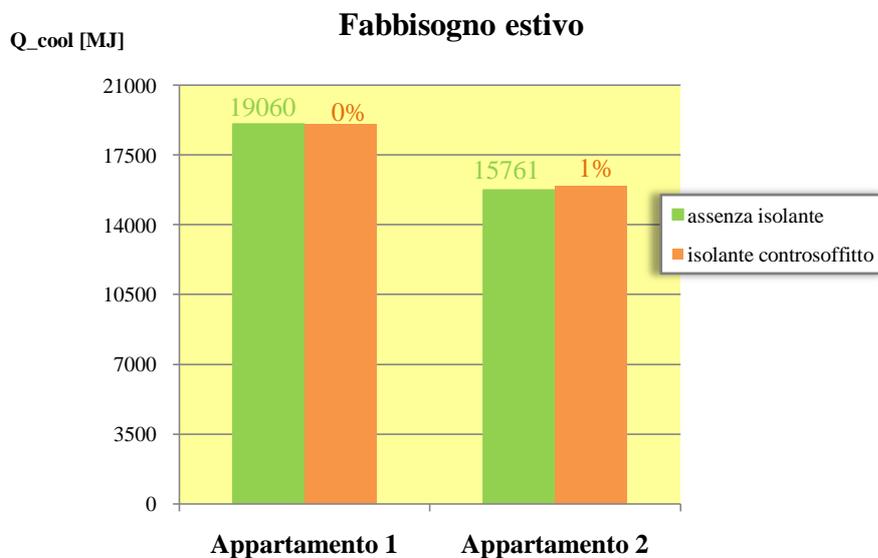
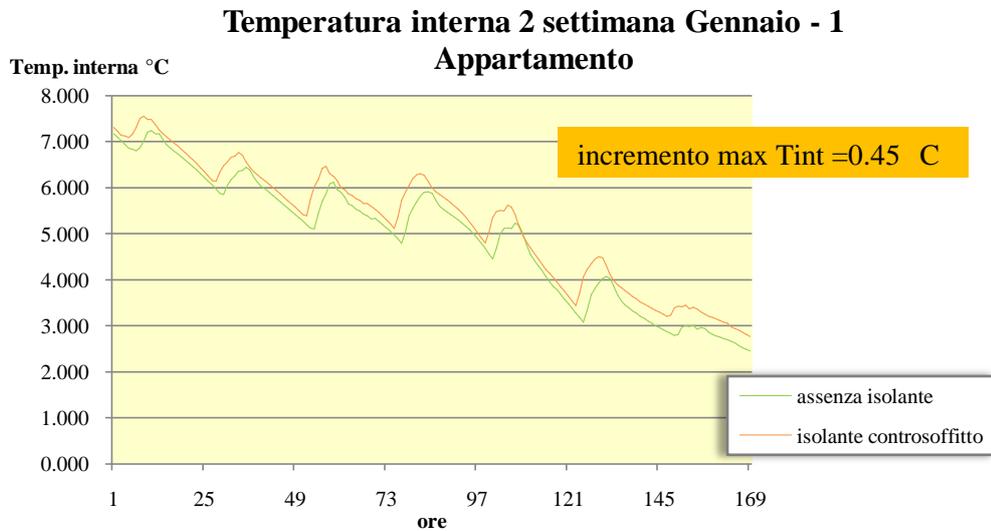


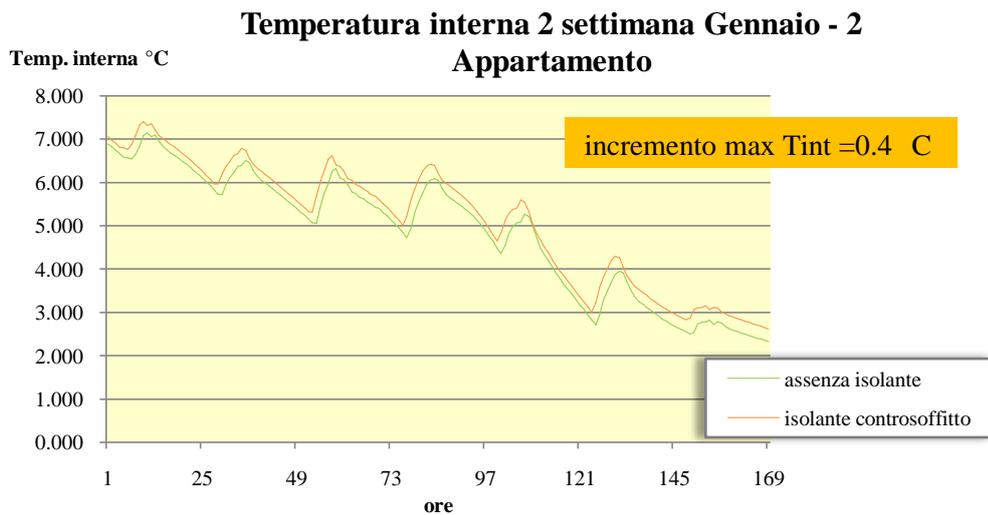
Grafico 7.36- Confronto fabbisogno estivo variando lo spessore del controsoffitto.

Per quanto riguarda la valutazione della temperatura interna valutando i benefici su di essa dati dall'isolamento del controsoffitto considerando come

settimana di riferimento la seconda di gennaio, si nota un incremento della temperatura interna di 0.4 °C nell'appartamento 2 mentre di 0.45 °C nel primo appartamento.



**Grafico 7.37- Variazione della temperatura interna del primo appartamento al variare dell'isolamento del controsoffitto.**



**Grafico 7.38- Variazione della temperatura interna del secondo appartamento al variare dell'isolamento del controsoffitto.**

### 7.10.3 Isolante pareti perimetrali

---

In virtù della maggiori superfici in gioco le pareti risultano le principali responsabili delle dispersioni energetiche verso l'esterno.

Uno dei più comuni interventi che vengono fatti solitamente nella ristrutturazione degli edifici è quello che prevede un'applicazione del rivestimento isolante nelle pareti esterne così da correggere i ponti termici e ridurre gli effetti indotti nelle strutture e nei parametri murari dalle variazioni rapide o notevoli della temperatura esterna.

In pratica si aumenta in questo modo l'inerzia termica dei muri esterni.

Partendo quindi da questo concetto si ritiene interessante valutare come varino fabbisogni e temperatura interna, inserendo un isolamento a cappotto nei muri esterni.

Pensando di isolare l'edificio con un isolante di polistirene espanso avente uno spessore di 10 cm si è agito sui seguenti muri:

- M1
- M2
- M10
- M3
- M4
- M7
- M9

la cui composizione è visibile nella Tabella 5.1.

#### 7.10.3.1 Settaggio in TRNSYS

---

Per realizzare tale confronto basta aggiungere, prima della simulazione, nel *Typemanager Wall* l'isolante con il proprio spessore nei pacchetti murari rappresentanti i muri esterni dell'edificio. Anche in questo caso volendo valutare il fabbisogno nel periodo invernale occorrerà settare una temperatura pari a 20 °C nel *Typemanager Heating*, mentre per la valutazione del fabbisogno estivo si definisce una temperatura pari a 26 °C nel *Typemanager Cooling*. Infine per valutare la variazione della temperatura interna, si dovrà procedere con le simulazioni a impianto spento. Interessante sarà, inoltre,

valutare il confronto tra la temperatura a cui si portano i due appartamenti rispetto alla temperatura registrata considerando i reali pacchetti murari dell'edificio in caso di funzionamento parziale dell'impianto.

7.10.3.2 Risultati

Per quanto riguarda il fabbisogno energetico:

<i>Aumento isolante muri esterni</i>	<i>Appartamento 1</i>		<i>Appartamento 2</i>	
	<i>Fabbisogno invernale [MJ]</i>	<i>Fabbisogno estivo [MJ]</i>	<i>Fabbisogno invernale [MJ]</i>	<i>Fabbisogno estivo [MJ]</i>
caso reale	124551	19060	75458	15761
isolamento a cappotto	98400	23159	61593	18315
variazione	-21%	26%	-18%	18%

Tabella 7.18- Confronto tra i fabbisogni energetici dei due appartamenti considerando il caso reale e un isolamento a cappotto.

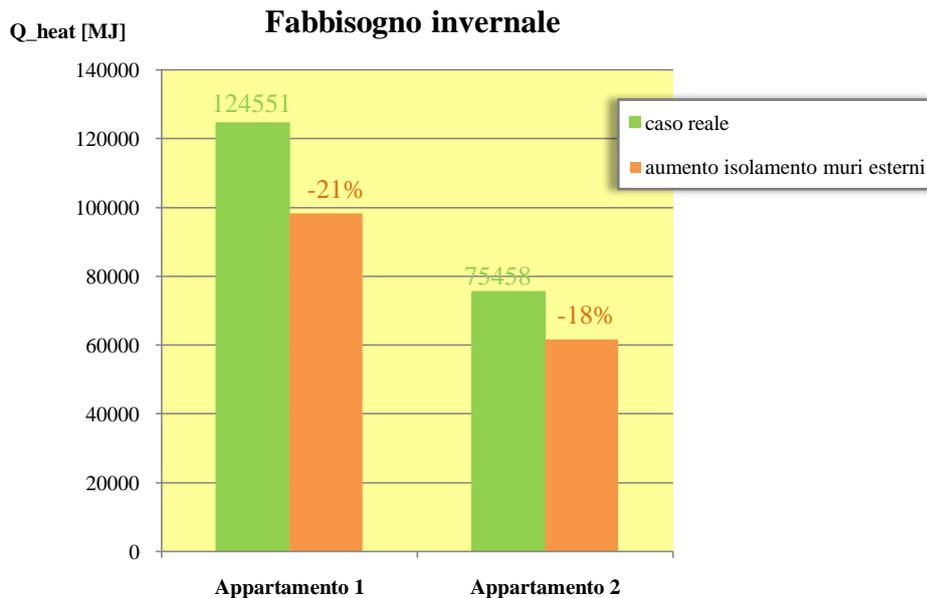
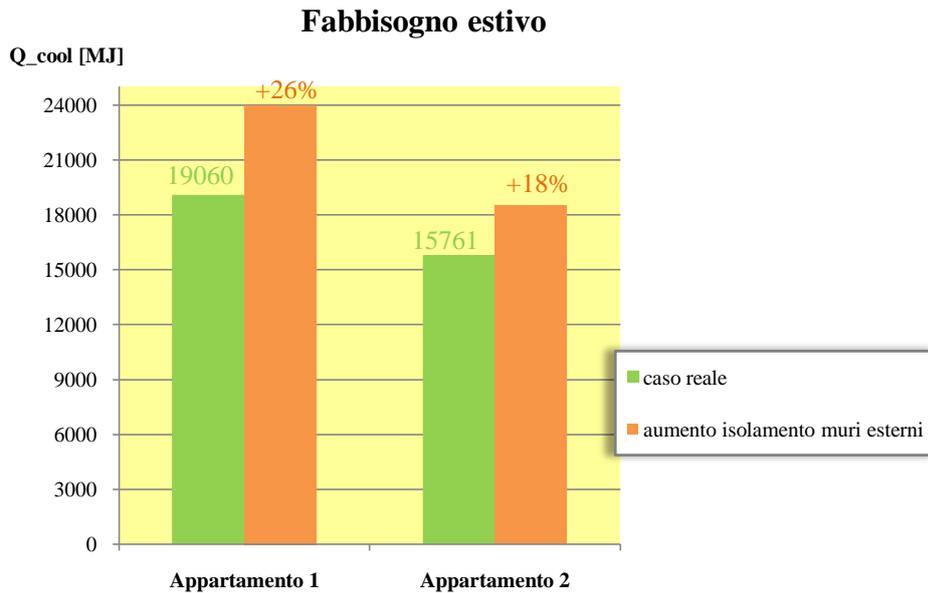


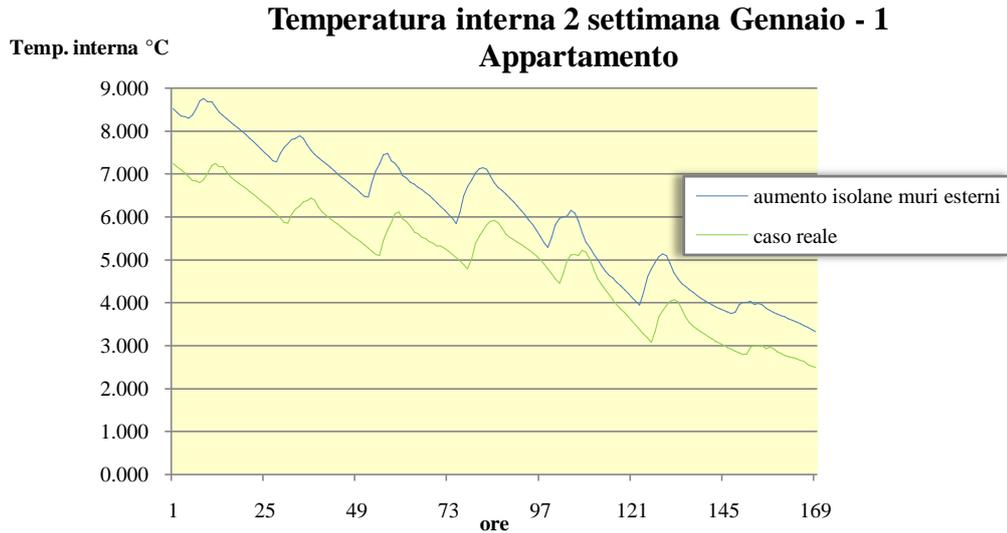
Grafico 7.39- Confronto fabbisogno invernale caso reale- isolamento a cappotto.



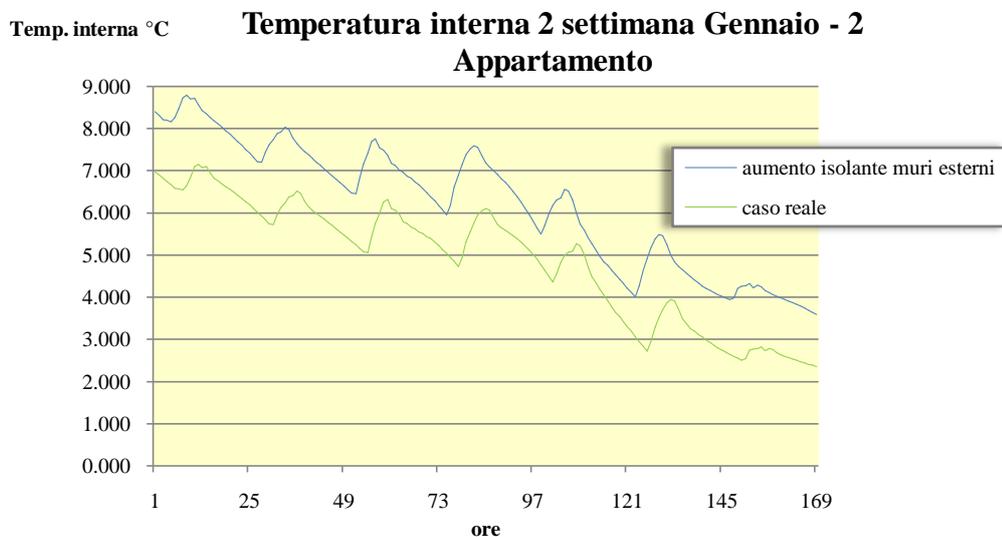
**Grafico 7.40- Confronto fabbisogno estivo caso reale- isolamento a cappotto.**

Come si può notare dai risultati riportati precedentemente si ha una notevole diminuzione del fabbisogno energetico invernale, del 21 % e del 18%, rispettivamente per l'appartamento 1 e per l'appartamento 2. Nel caso estivo invece si verifica un peggioramento. Ciò significa che l'impianto di raffrescamento dovrà lavorare di più rispetto al caso in cui non vi sia la presenza di isolamento a cappotto per portare l'ambiente alla stessa temperatura di progetto.

Per quanto riguarda la temperatura interna in inverno si hanno miglioramenti notevoli. Come è possibile vedere dal grafico sottostante, riportante l'andamento della temperatura interna nella seconda settimana di gennaio nel caso reale e nel caso di isolamento a cappotto, si ha un aumento della stessa fino ad un incremento di 1.80 °C nell'appartamento 1 e fino a 1.6 °C nel secondo rispetto al caso reale.

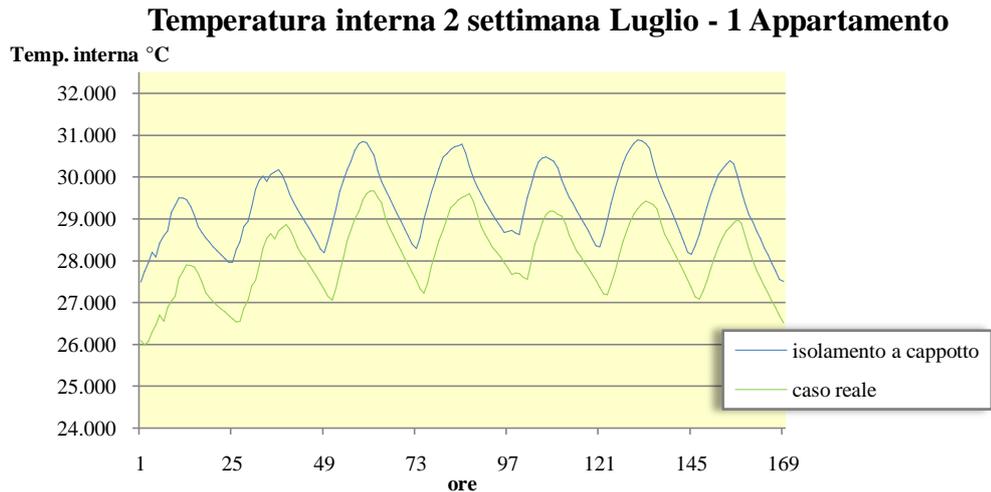


**Grafico 7.41-** Variazione della temperatura interna del primo appartamento mettendo un isolamento a cappotto.

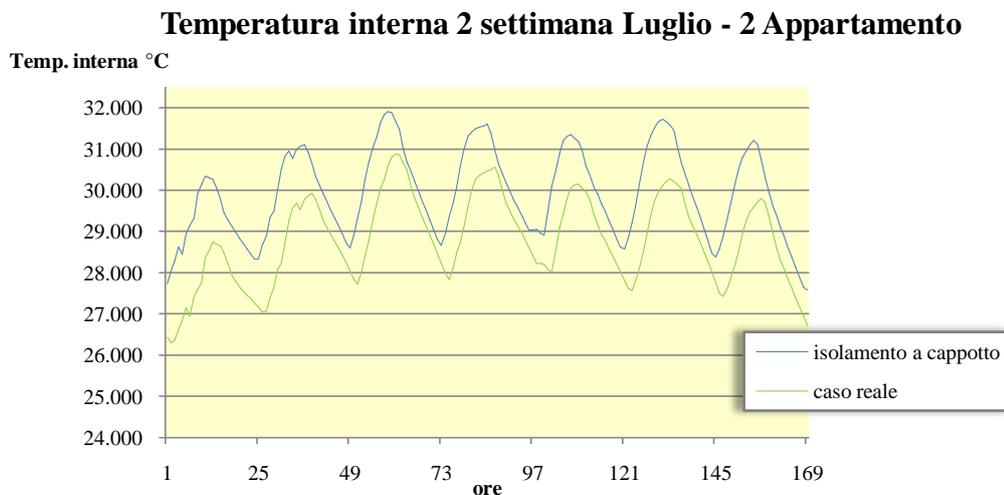


**Grafico 7.42-** Variazione della temperatura interna del secondo appartamento mettendo un isolamento a cappotto.

Al contrario dei casi precedenti dove gli effetti sulla temperatura estiva non erano di rilevante importanza in quest'ultimo confronto la situazione risulta differente. In questo caso si ha un peggioramento della temperatura interna, in particolare la temperatura interna ha un incremento fino a 2.05°C nell'appartamento 1 e fino a 2.03 °C nel secondo, rispetto al caso reale, raggiungendo picchi di temperatura rispettivamente di 31 e 32 °C.



**Grafico 7.43-** Variazione della temperatura interna del primo appartamento mettendo un isolamento a cappotto.



**Grafico 7.44-** Variazione della temperatura interna del secondo appartamento mettendo un isolamento a cappotto.

Come ultimo confronto verrà qui di seguito analizzato il caso di impianto funzionante 3 giorni e spento 4. Si vuole così notare come migliora la temperatura interna, e quindi l'inerzia termica dell'edificio avendo aggiunto isolante.

### 1 Appartamento- Temperatura intera- 2 settimana di gennaio

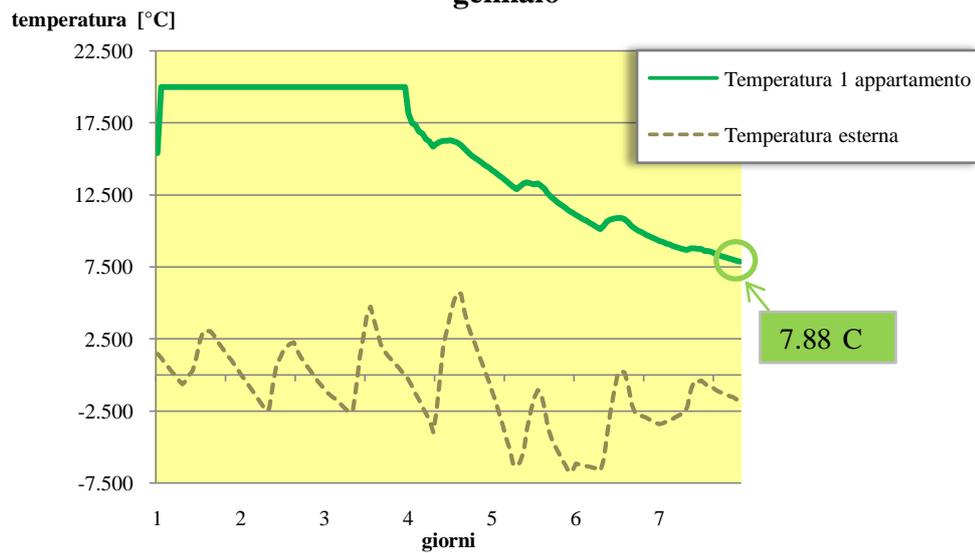


Grafico 7.45- Variazione della temperatura interna nell'appartamento 1.

### 2 Appartamento- Temperatura intera- 2 settimana di gennaio

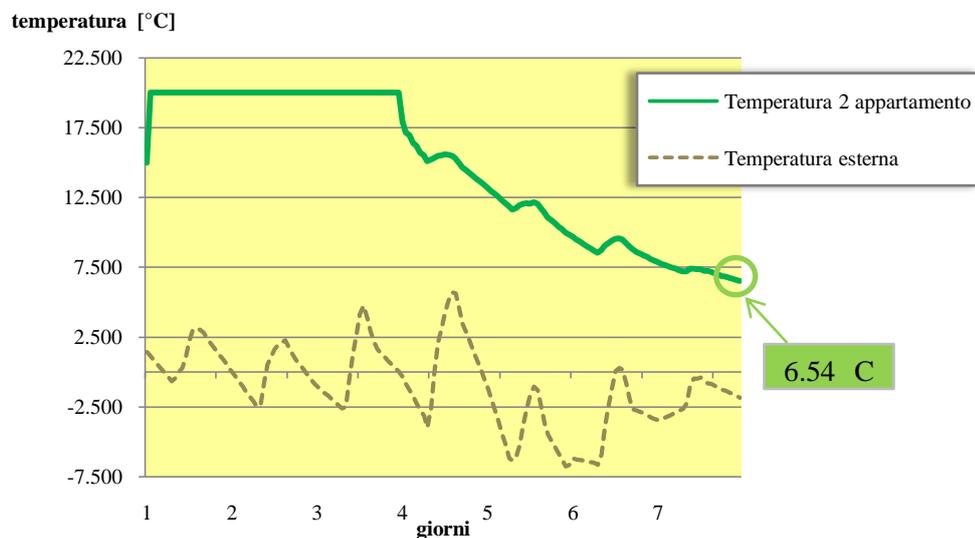


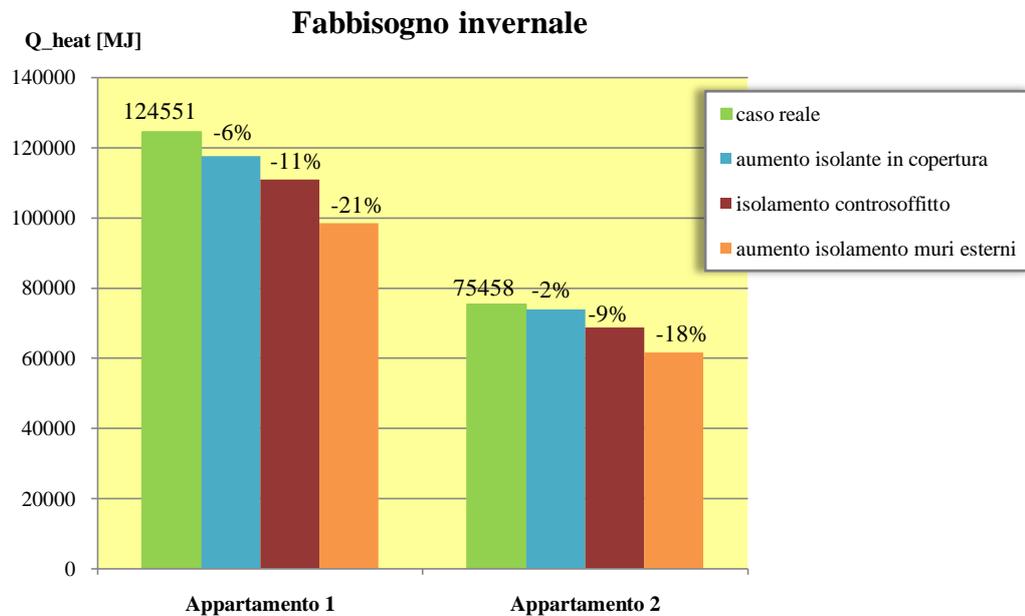
Grafico 7.46- Variazione della temperatura interna nell'appartamento 1.

Come si può vedere dal grafico 7.45 nel primo appartamento la temperatura minima raggiunta durante l'inverno, supponendo di spegnere istantaneamente l'impianto di riscaldamento dopo 3 giorni di funzionamento, è di 7.88 °C rispetto ai 5.99 °C raggiunti nell'abitazione nel caso si considerassero i pacchetti murari reali. Si può dunque notare un innalzamento della temperatura, nella stessa ora considerata, pari a circa 2 °C. Ragionamenti del tutto analoghi possono essere affrontati per il secondo alloggio. In tal caso si

passa, alla fine della seconda settimana di gennaio, da una temperatura di 4.61 °C (vedi grafico 7.18) a una di 6.54, e quindi un incremento di 2 °C anche in questo caso.

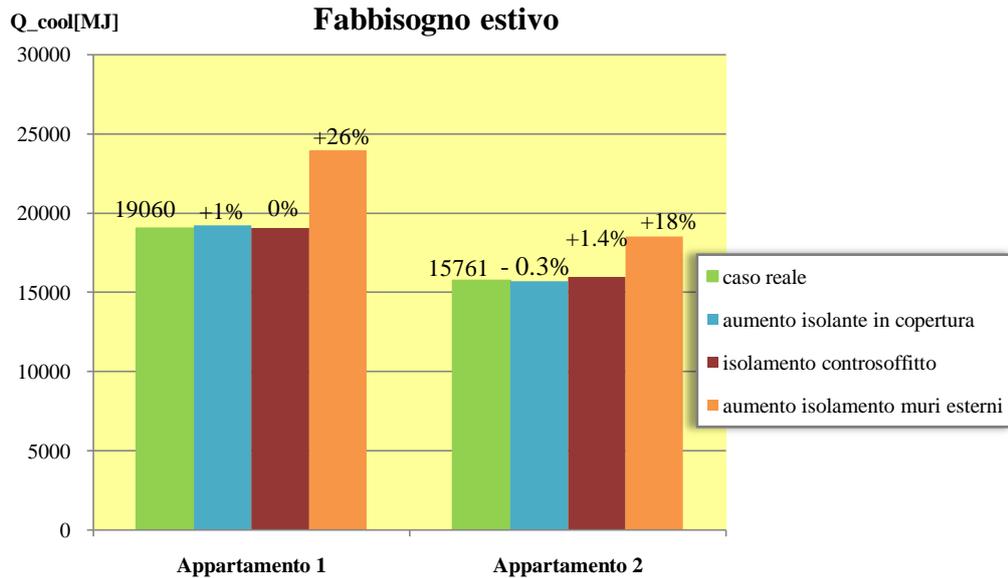
Se, invece, si analizza come varia la temperatura interna nel caso estivo sempre ipotizzando un funzionamento dell'impianto di raffrescamento pari a 3 giorni la settimana e spegnimento istantaneo, allora si riscontra un leggerissimo peggioramento (meno di mezzo grado).

Quindi riassumendo i risultati riguardanti il fabbisogno energetico dei casi analizzati cambiando l'isolamento:



**Grafico 7.47- Confronto Fabbisogno energetico invernale.**

Si può notare come il fabbisogno diminuisca passando dal caso reale all'immissione di isolante. In particolare l'abbassamento maggiore del fabbisogno invernale si riscontra, in entrambi gli appartamenti, con l'inserimento di un isolamento a cappotto. E' da sottolineare che comunque già inserendo isolamento nel controsoffitto si ottiene una buona diminuzione, diminuzione pari al 12 e al 10%.



**Grafico 7.48- Confronto Fabbisogno energetico estivo.**

Per quanto riguarda il fabbisogno estivo le cose sono leggermente diverse. In pratica nei primi tre casi analizzati non si hanno variazioni apprezzabili mentre addirittura mettendo un isolamento a cappotto si ha un peggioramento. In pratica isolare maggiormente le pareti dell'edificio fa sì di creare un "effetto serra" al suo interno.

### 7.11 Valutazione del fabbisogno estivo considerando tende interne, tende esterne oppure schermature

Da studi condotti a livello europeo si è visto che a seconda delle caratteristiche dell'edificio esso subisce più o meno l'influenza termica. In particolare i principali fattori di condizionamento sono: tipo di utenza soddisfatta dall'edificio, tipo di schermatura, posizione della schermatura, condizioni di lavoro della schermatura stessa. Oltre a ridurre il fabbisogno di energia invernale un buon sistema schermante permette di ridurre anche il fabbisogno estivo. Concentrandosi su quest'ultimo, negli ultimi anni si è notato che, nel nostro Paese, la spesa per il raffrescamento estivo sta per superare la spesa per il riscaldamento invernale. Diventa dunque di rilevante importanza, al fine di minimizzare i consumi estivi, progettare adeguatamente un sistema di tende,

persiane o schermature. In alcune situazioni climatiche, tende e persiane, possono addirittura rendere superfluo un sistema di condizionamento attivo.

Data la grande superficie finestrata di cui l'edificio in esame è caratterizzato diventa interessante vedere come il fabbisogno estivo (ma anche quello invernale) cambia inserendo tende interne, tende esterne oppure schermature.

In particolare si eseguiranno le 3 simulazioni considerando per ciascuna scelta due differenti condizioni:

- ombreggiatura continua su tutta la giornata
- ombreggiatura variabile, si considera cioè di ombreggiare le finestre a est dalle 8 del mattino alle 14, le finestre ad ovest dalle 14 alle 18 e per tutte le altre si considera un ombreggiamento delle 12 ore centrali della giornata.

### 7.11.1 Settaggio in TRNSYS

Per considerare l'ombreggiamento degli infissi si agisce sul *Typemanager Windows*. Selezionando ad una ad una le finestre appartenenti all'edificio vengono settati rispettivamente:

<u>Schermature esterne:</u>	Fraction of abs. Solar radiation to zone = 0.1
	Reflection coefficient of internal device = 0.5
	Additional thermal resistance = 0.2
	External shading factor = 1
<u>Tende esterne:</u>	Fraction of abs. Solar radiation to zone = 0.1
	Reflection coefficient of internal device = 0.5
	Additional thermal resistance = 0
	External shading factor = 0.55
<u>Tende interne:</u>	Fraction of abs. Solar radiation to zone = 0.1
	Reflection coefficient of internal device = 0.5
	Additional thermal resistance = 0
	External shading factor = 0.65

I valori definiti precedentemente per il fattore di ombreggiamento sono stati prelevati dalla norma UNI EN 11300-1 e vengono settati, per ciascuna finestra, nella schermata della zona nella sezione *windows*.

Per simulare un ombreggiamento variabile durante la giornata è stato necessario creare tre *Schedule* a seconda della posizione degli infissi.

A questo punto è possibile procedere alla simulazione e quindi al calcolo del fabbisogno energetico estivo.

### 7.11.2 Risultati

Analizzando i risultati ottenuti dalle simulazioni con i tre diversi casi esaminati si ritrova una diminuzione del fabbisogno come quella visibile in figura 7.49.

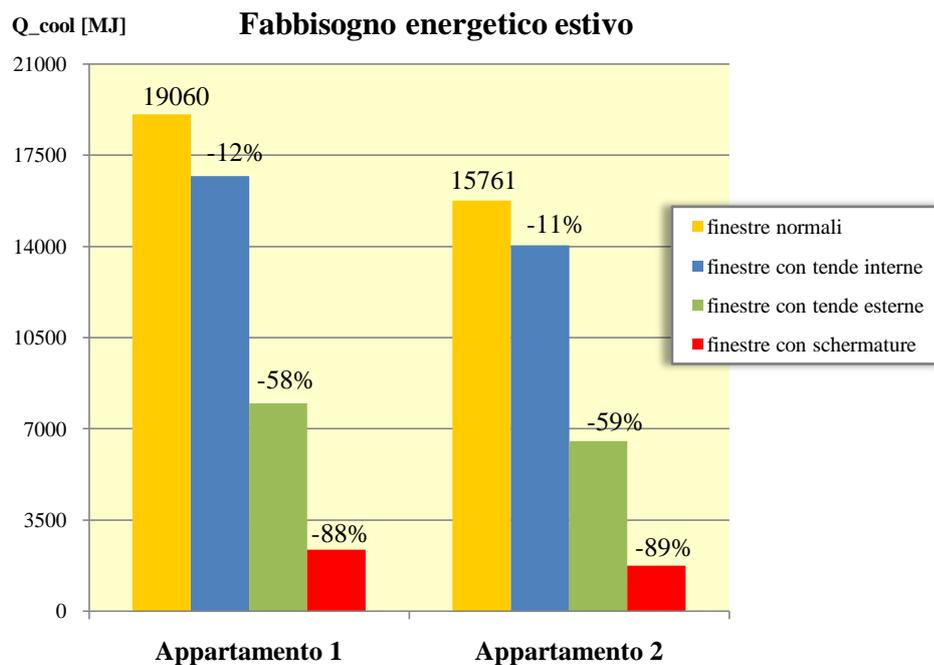
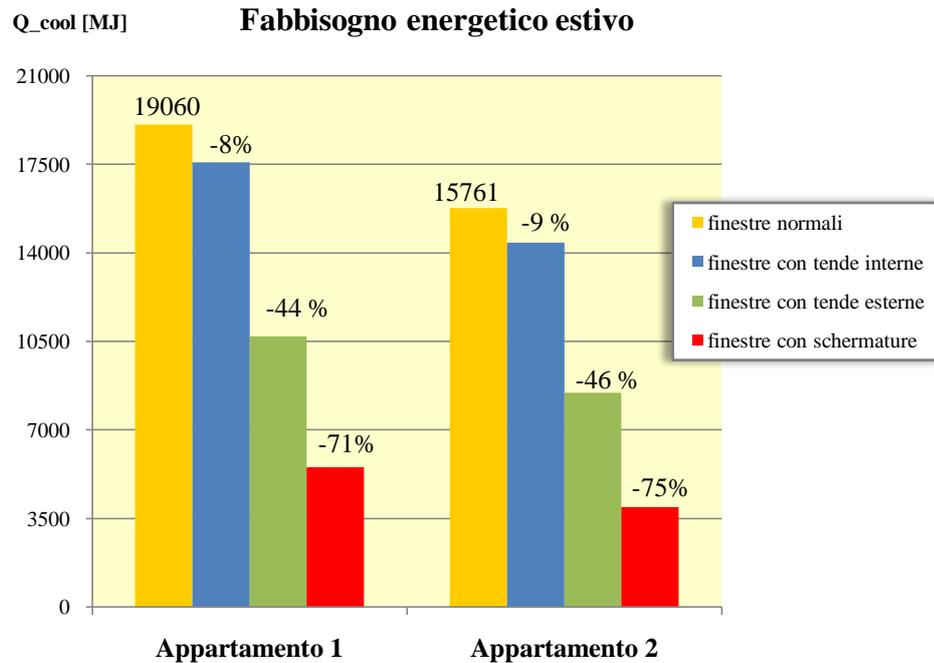


Grafico 7.49- Fabbisogno estivo con e senza ombreggiamenti .

Quindi passando da infissi privi di ombreggiamento a infissi con tende si riscontra una diminuzione del fabbisogno di circa il 12% in entrambi gli appartamenti. Un miglioramento si ha poi se invece di tende interne si considerassero tende esterne arrivando ad una diminuzione del fabbisogno maggiore del 50%. L'utilizzo, infine, di schermature consente una diminuzione del fabbisogno energetico estivo del 88%.

Per una migliore aderenza alla realtà è bene considerare il caso di ombreggiamento degli infissi, non continuo su tutta la giornata, ma variabile a seconda delle ore. E quindi considerando le ombreggiature nelle finestre come

indicato precedentemente si riscontra una diminuzione del fabbisogno come indicato dal grafico sottostante.



**Grafico 7.50- Fabbisogno estivo con e senza ombreggiamenti .**

Naturalmente il fabbisogno subisce, in tutti e tre i casi, una diminuzione inferiore al caso in cui considerassi un ombreggiamento continuo, ma comunque anche in tal caso si noti come passando dalla considerazione di tende interne alle schermature si registri una forte diminuzione del fabbisogno. E' quindi possibile affermare che le tende interne incidono in maniera nettamente minore sul fabbisogno rispetto ai sistemi esterni.

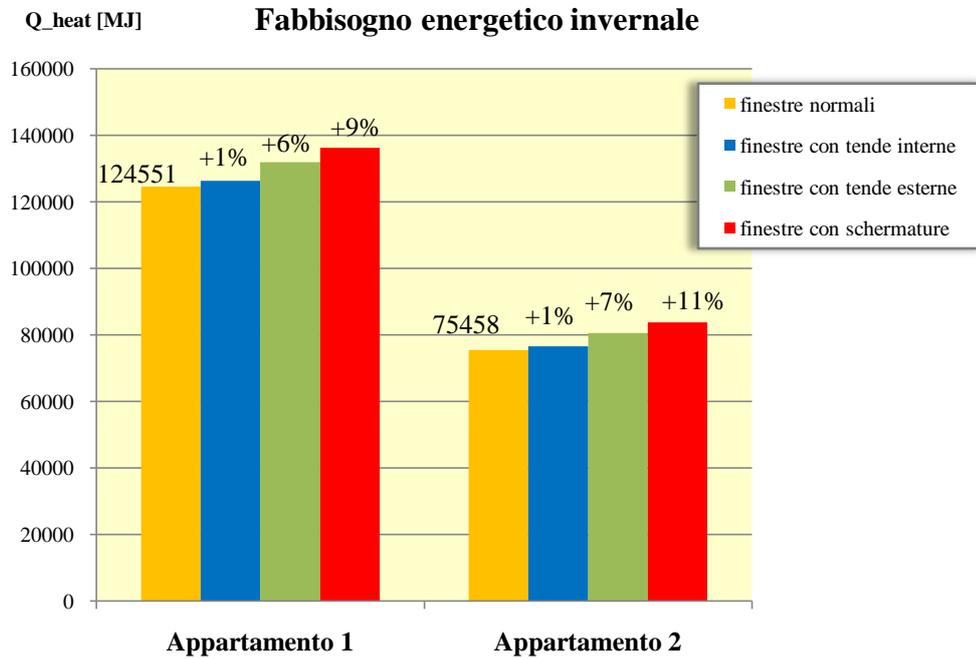
Tali simulazioni hanno dunque permesso di evidenziare il fatto che il considerare ombreggiamenti negli infissi diventa di rilevante importanza per il calcolo del fabbisogno e di conseguenza importante per il dimensionamento dell'impianto per il raffrescamento estivo.

Naturalmente il considerare ombreggiamenti nel periodo invernale farà sì di aumentare il fabbisogno per il riscaldamento. Dalle simulazioni effettuate si è visto che:

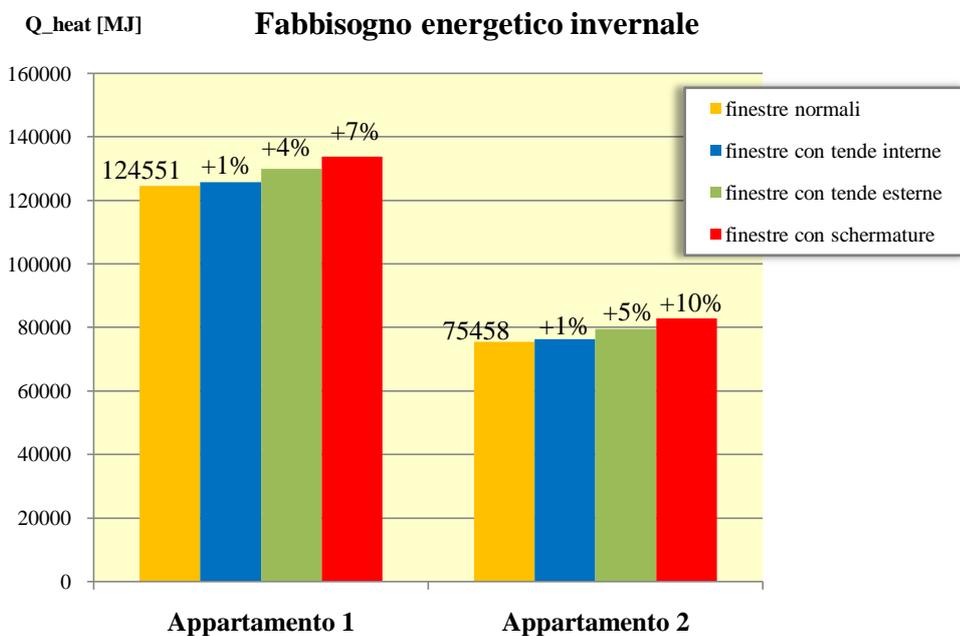
il considerare le tende interne non porta a aumenti notevoli del fabbisogno, il fabbisogno di fatti aumenta solamente dell'1%;

il considerare tende esterne influisce maggiormente sul fabbisogno energetico registrando un aumento di circa il 7%;

il considerare le schermature influisce in maniera ancora maggiore portando ad una maggiorazione sul fabbisogno fino al 11%.



**Grafico 7.51- Fabbisogno invernale con e senza ombreggiamenti (ombreggiamenti continui durante tutta la giornata).**

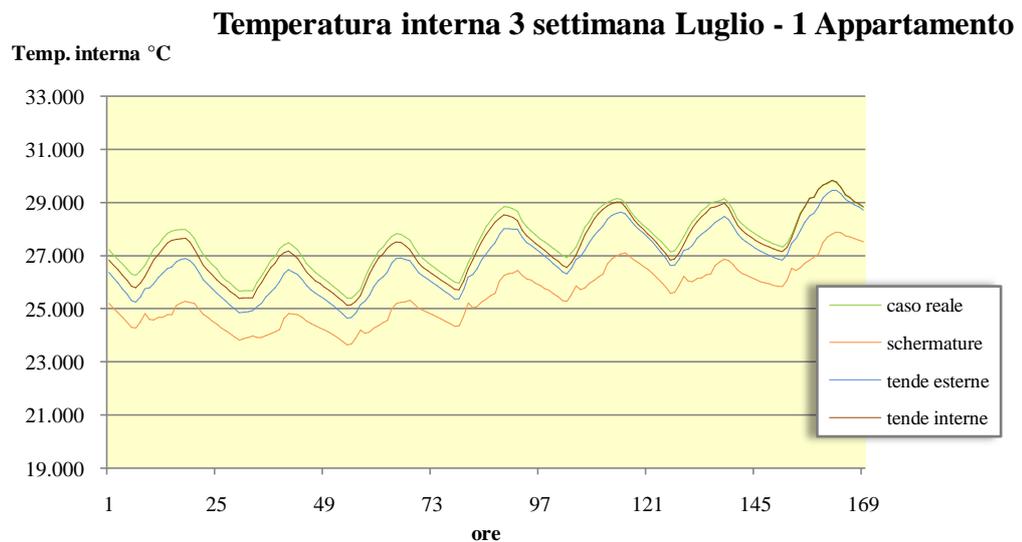


**Grafico 7.52- Fabbisogno invernale con e senza ombreggiamenti (ombreggiamenti variabili durante la giornata).**

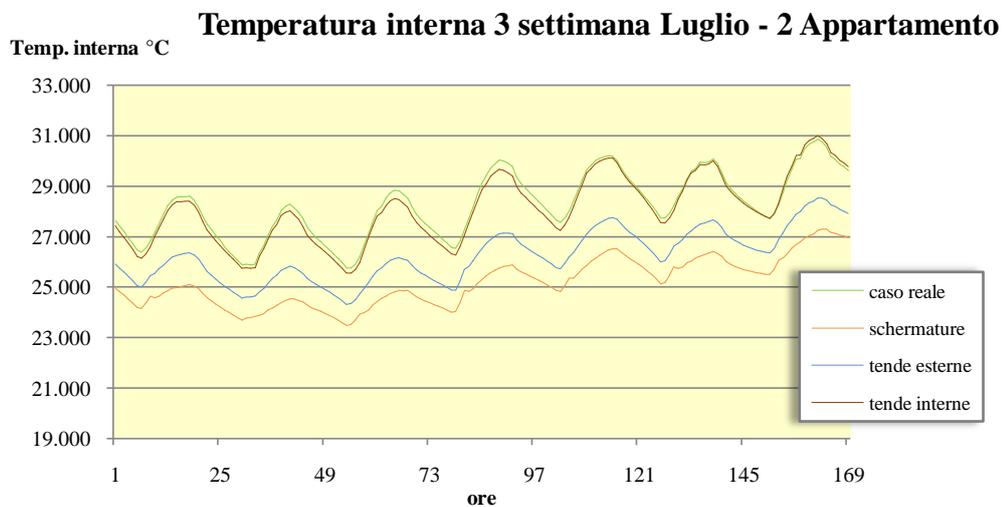
Dai grafici sovrastanti è possibile notare come il considerare ombreggiamenti continui o variabili durante la giornata incide relativamente poco, in particolare per le tende interne non incide per niente.

Rimane da valutare il beneficio ottenuto nei confronti della temperatura interna utilizzando i vari ombreggiamenti.

Prendendo come settimana di riferimento la terza settimana di luglio è possibile notare come la temperatura interna diminuisca notevolmente passando dall'uno all'altro caso.



**Grafico 7.53- Temperatura interna appartamento 1.**



**Grafico 7.54- Temperatura interna appartamento 2.**

Prendendo in considerazione l'appartamento 1 se nel caso reale, di vetri privi di schermature o tende, si arriva a picchi di temperatura interna pari a 30 °C, si nota una diminuzione pari circa a 1.5 °C nel caso di utilizzo di tende interne. Considerando tende esterne e schermature si arriva addirittura ad una diminuzione di più di 4 °C. Stesso ragionamento è possibile farlo per il secondo appartamento. In questo caso, dato che la superficie finestrata risulta minore, la diminuzione a cui è soggetta la temperatura interna è leggermente minore: si passa da una diminuzione di 0.4 °C, con l'utilizzo di tende interne, fino a un abbassamento di 3°C con le schermature.

Da questi risultati, come già detto per il fabbisogno, si nota l'importanza di tende o schermature nelle superfici finestrate. A maggior ragione nel caso studio in cui la superficie finestrata risulta un contributo importante rispetto alla superficie totale dell'edificio.

## 7.12 Valutazione del fabbisogno energetico al variare della massa dei muri

Scopo di questa sezione risulta vedere come cambiando i pacchetti murari leggeri in pacchetti murari massivi cambi il fabbisogno energetico dell'edificio. Si considera a tal fine di modificare le pareti verticali opache sia esterne che interne costituite da un pacchetto leggero, con un pacchetto avente le seguenti caratteristiche:

densità  $1800 \text{ kg/m}^3$

capacità  $0.84 \text{ kJ/kgK}$

conducibilità  $0.7 \text{ W/mK}$

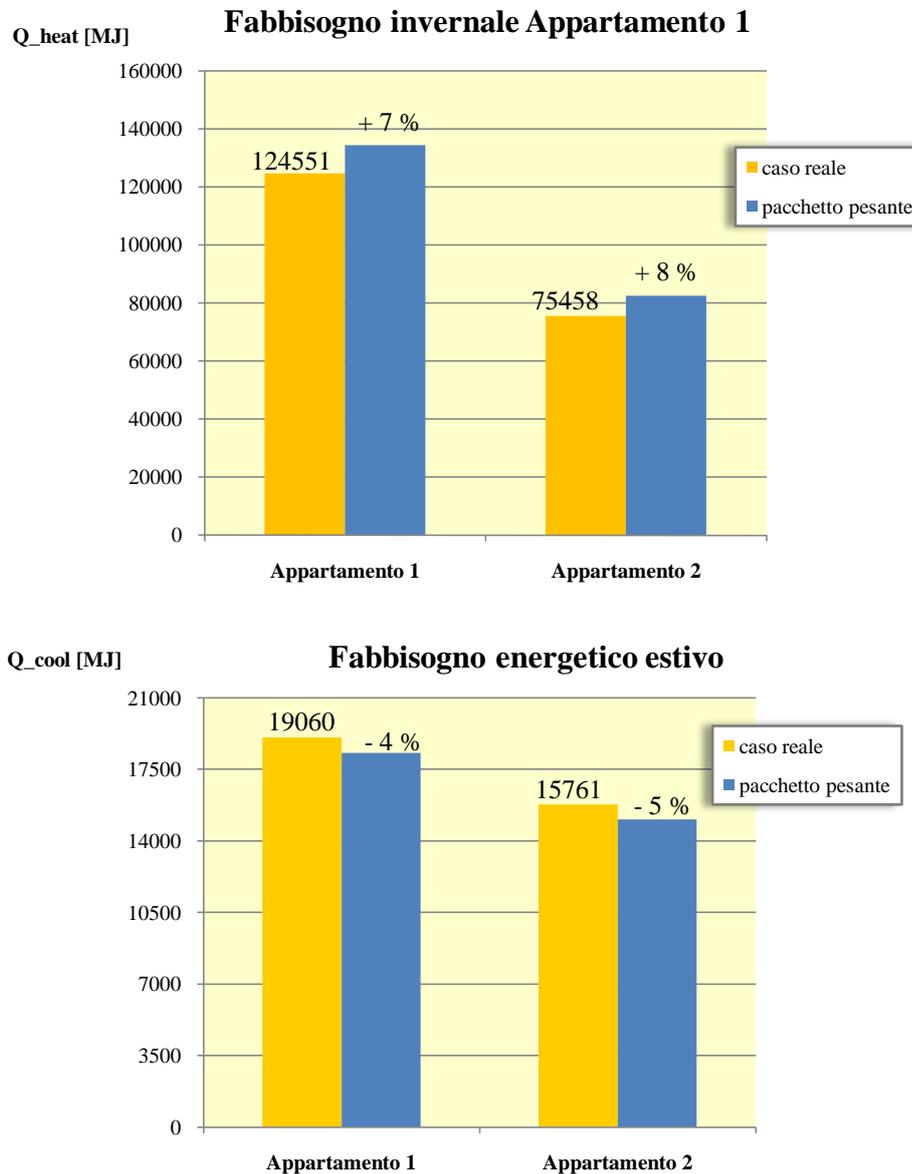
### 7.12.1 Settaggio in TRNSYS

---

Per modificare i pacchetti murari è necessario creare un nuovo *Layer* che comprenderà le caratteristiche elencate precedentemente. A questo punto sarà necessario modificare i pacchetti murari dei muri verticali, sia esterni che interni.

## 7.12.2 Risultati

Il fabbisogno energetico si modifica quindi nel modo seguente:



**Grafico 7.55- Fabbisogno energetico con pacchetto pesante.**

Per quanto riguarda il caso invernale si nota come l'utilizzo di un pacchetto pesante faccia sì di aumentare il fabbisogno. In particolare si ha un aumento del 7 e dell'8%. Per quanto riguarda invece il fabbisogno estivo si ha un miglioramento registrando una diminuzione. Questi risultati sono influenzati in maggior parte dall'aumento di trasmittanza che fa sì di aumentare il fabbisogno invernale e diminuire quello estivo.

Se si fosse mantenuta costante la trasmittanza e si fosse agito solamente sulla densità delle muratura, passando a una  $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$  si sarebbe diminuito il fabbisogno invernale di circa il 4% e quello estivo sarebbe aumentato di 1%.

### 7.13 Considerazioni riassuntive

---

Per avere uno sguardo d'insieme di tutte le simulazioni effettuate si riportano qui di seguito le osservazioni che è stato possibile effettuare dall'analisi dei risultati ottenuti.

#### **1. Regime stazionario vs regime dinamico**

Le differenze riscontrate tra i due metodi di calcolo derivano dalla differente valutazione dell'inerzia termica degli edifici e dalla diversa origine dei dati climatici. Il metodo di calcolo in regime stazionario considera in maniera semplificata gli effetti della capacità termica dell'edificio attraverso un unico coefficiente mentre il metodo dinamico ricorre a metodi matematici più rigorosi, quali le funzioni di trasferimento.

#### **2. Considerazioni delle pareti interne**

Dalle simulazioni effettuate si è visto che il considerare le pareti interne incide in maniera rilevante nel calcolo del fabbisogno, in particolare incide sul fabbisogno estivo. Di fatti anche se le pareti interne degli edifici hanno poca influenza nei riguardi delle dispersioni energetiche, in quanto spesso separano ambienti alla medesima temperatura, risultano fondamentali nel calcolo dell'inerzia termica degli immobili, poiché sottoposte a irraggiamento solare accumulano calore che viene poi restituito all'aria.

#### **3. Isolamento**

Confrontando i casi di aumento di isolante in copertura, nel controsoffitto oppure nelle pareti perimetrali con il caso reale si è visto come il fabbisogno invernale diminuisca passando dall'uno all'altro caso. Nel caso estivo si verifica, invece, una diminuzione minima nei primi due casi mentre il considerare l'isolamento a cappotto fa sì di ottenere un aumento del fabbisogno; si viene dunque a creare all'interno dell'edificio un "effetto serra".

Si è inoltre visto come il considerare l'isolamento a cappotto incida in maniera rilevante sulla temperatura interna apportando un aumento fino a 2 °C in più sia nel periodo estivo che in quello invernale. Negli altri due casi analizzati, invece, si sono riscontrati leggeri aumenti di temperatura in inverno e variazioni non significative in estate. Questo ha evidenziato come un buon isolamento dell'involucro edilizio incida in maniera considerevole sulle prestazioni energetiche dello stesso.

Se la casa non è isolata dal punto di vista termico, in inverno, il calore prodotto dall'impianto di riscaldamento si dirige verso zone più fredde e le finestre, disperdendosi anche in grande quantità. In questo modo, oltre ad avere ambienti poco confortevoli da vivere, si spreca calore ed energia necessaria per produrlo.

#### **4. Free cooling**

Dalle simulazioni effettuate considerando una ventilazione free cooling si è visto come il fabbisogno estivo diminuisce del 23%. Per quanto riguarda, invece, la temperatura interna, tenendo spento l'impianto di notte, si registra una variazione minima. Questi risultati indicano che nel caso particolare il considerare una ventilazione notturna porta a dei benefici in termini di fabbisogno ma non in termini di diminuzione di temperatura interna.

E' possibile comunque affermare che il solo considerare una ventilazione notturna pone dei risultati positivi nella riduzione dei carichi per il raffrescamento estivo e di conseguenza un minor dispendio energetico.

La ventilazione incide, dunque, in maniera rilevante sul fabbisogno energetico estivo ed è per questo che risulta importante una sua corretta valutazione.

In particolare si potrebbe pensare di ricorrere oltre che ad una ventilazione naturale ad una ventilazione meccanica attraverso ventilatori a soffitto che aumentino la velocità dell'aria interna e di conseguenza i coefficienti di scambio convettivo tra le pareti e l'aria.

#### **5. Impianto acceso tre giorni su sette**

Dai dati rilevati si è potuto notare come al termine del 7 giorno, presa come settimana di riferimento la seconda di gennaio, la temperatura interna scenda di circa 12 °C, in particolare il secondo appartamento subisce una diminuzione

leggermente maggiore, a indicazione che il tale appartamento risente in maniera leggermente maggiore delle variazioni di temperatura esterna. Per quanto riguarda il periodo estivo, invece, si riscontra un aumento di circa 5 °C. E' stata proprio in questa simulazione che è stato possibile vedere come l'aver considerato i muri interni incida in maniera rilevante sulla temperatura interna. Se, di fatti, non si fossero considerati i muri interni, le temperature interne sarebbero scese (inverno) e salite (estate) in maniera decisamente maggiore. Facendo la stessa simulazione con un isolamento a cappotto sulle pareti perimetrali si è visto come la temperatura in inverno presentasse un significativo aumento al termine del settimo giorno. In estate invece non si sono riscontrate diminuzioni considerevoli. Dai risultati ottenuti è evidente come l'inerzia termica dell'involucro edilizio incida in maniera significativa sulla temperatura interna e quindi ci permetta di mantenere una temperatura costante e vicina ai valori di confort anche quando all'esterno si verificano variazioni di temperatura.

## **6. Tende e schermature**

Avendo l'edificio un'ampia superficie finestrata il considerare tende o schermature porta a notevoli miglioramenti nei riguardi del fabbisogno estivo. Dai tre tipi di simulazioni effettuate (tende interne, tende esterne e schermature) si è visto che il fabbisogno estivo diminuisce in maniera rilevante (70%) considerando le schermature.

Naturalmente facendo le stesse simulazioni nel periodo invernale si registra un aumento del fabbisogno, togliendo apporto solare. In particolare le tende interne non incidono in maniera rilevante mentre tende esterne e schermature possono portare ad un aumento fino all'11%.

Come ci si aspettava e come risulta evidente dai risultati trovati, l'incidenza maggiore sul fabbisogno, si riscontra nell'utilizzo di schermature esterne piuttosto che nell'utilizzo di tende interne, sia nel caso estivo che nel caso invernale.

Analizzando in ultimo la variazione sulla temperatura interna è stato possibile notare, come l'utilizzo di tende esterne e schermature, ne porti una forte diminuzione. Soprattutto nel primo appartamento, in cui la superficie finestrata risulta maggiore, la temperatura interna diminuisce fino a 4 °C con l'utilizzo di

schermature. Subendo una notevole diminuzione della temperatura interna con l'utilizzo di schermature si potrebbe addirittura pensare che non sia necessario l'impianto di raffrescamento estivo.

Si sottolinea dunque l'importanza di un buon dimensionamento delle schermature solari, sia nel periodo estivo che in quello invernale, avendo come obiettivo la progettazione di sistemi di ombreggiamento in relazione alla latitudine e alle condizioni specifiche del contesto.

Nel caso particolare della zona climatica presa in esame (Bologna) si ha l'esigenza di schermarsi dal caldo estivo e di guadagnare calore d'inverno, utilizzando dei sistemi semplici, come appunto un'apertura opportunamente schermata.

### **7. Pacchetti leggeri e pesanti**

Cambiare i pacchetti murari leggeri in pacchetti murari pesanti ha permesso di vedere come si abbiano dei peggioramenti nei riguardi del fabbisogno invernale e dei leggeri miglioramenti per il fabbisogno estivo. Tali risultati sono dovuti al fatto che oltre ad un aumento della densità si è aumentata anche la trasmittanza. Se si fosse mantenuta fissa la trasmittanza e si fosse aumentato solamente il valore della densità si sarebbe registrata una diminuzione del fabbisogno invernale del 4% mentre un aumento sul fabbisogno estivo dell'1%. Risultati che ci dicono che nel caso particolare dell'edificio esaminato la massa non ha una gran rilevanza termica.

### **8. Fattore di carico**

Dai risultati rilevati si è visto che utilizzando un generatore da 50 kW si avrebbe uno sfruttamento massimo del 75% nel periodo invernale e del 60% nel periodo estivo. Un generatore di 50 kW porta dunque ad un sovradimensionamento dell'impianto.



## Conclusioni

Lo studio affrontato ha permesso di indagare su diversi fronti.

Grazie all'analisi in regime stazionario è stato possibile, oltre che valutare gli aspetti energetici dell'involucro edilizio, fare un dimensionamento dell'impianto di riscaldamento radiante e fare delle considerazioni sui risultati ottenibili dall'adozione di vari generatori presenti sul mercato.

Partendo dalle dispersioni termiche dei vari locali e dall'utilizzo della normativa di riferimento si è visto che di tutti i locali componenti l'unità immobiliare in 8 ambienti (di cui 5 bagni) non si sarebbe stati in grado di soddisfare il carico termico solamente attraverso l'utilizzo di impianti a pannelli a pavimento. Si è quindi scelto una soluzione che comprendesse l'inserimento di termoarredo nei bagni (escludendo in essi l'utilizzo di pannelli radianti) mentre nei restanti 3 locali la potenza residua è stata compensata attraverso l'uso di pannelli radianti a parete. In base dunque al carico da soddisfare è stato scelto, per ogni locale, un passo di tubi adeguato.

Prendendo, invece, come base di partenza il fabbisogno di energia netta dell'intero edificio, è stato sviluppato un confronto tra utilizzo di caldaia tradizionale, caldaia a condensazione e pompa di calore. Si è visto che la soluzione migliore e quindi quella che porta ad un rendimento medio stagionale maggiore e ad un EPi minore è quella comprendente l'utilizzo di una pompa di calore. In particolare tale miglioramento si rispecchia in una diminuzione della spesa economica annua necessaria per il riscaldamento. Si è visto, infine, che l'utilizzo di una pompa di calore immessa in un edificio

gemello ma che rispetti i limiti di trasmittanza imposti dalla normativa attuale porterebbe ad un ulteriore miglioramento in termini di  $EP_i$  e di rendimento medio stagionale.

In ultimo, l'analisi in regime dinamico ha consentito di studiare il comportamento energetico dell'involucro edilizio. Grazie alle simulazioni effettuate è stato possibile valutare come la variazione di alcuni parametri influisca in maniera decisiva sia sul fabbisogno invernale ed estivo, sia sulla temperatura interna.

E' quindi possibile affermare che risulta indispensabile un'attenta valutazione energetica in modo tale da studiare al meglio il comportamento reale dell'edificio e quindi poter apportare dei miglioramenti significativi in termini di confort abitativo e di risparmio energetico.

Si evidenzia in ultimo che il modello creato può essere usato come base di ulteriori simulazioni che oltre allo studio dell'involucro potrebbero portare ad un'analisi più approfondita dell'impianto.

Concludendo si può affermare che grazie alla consapevolezza del problema ambientale, e alla consapevolezza che l'edilizia può svolgere un ruolo fondamentale nei riguardi del risparmio energetico si sta pian piano diffondendo tra gli operatori del settore la volontà di creare soluzioni che portino al contenimento dei consumi energetici senza naturalmente compromettere il confort abitativo. Tale obiettivo viene perseguito attraverso vari strumenti quali l'emanazione di una normativa di riferimento e software che ne permettono l'adozione. Sia, dunque, negli edifici di nuova progettazione sia in quelli già esistenti è importante effettuare una stima energetica con lo scopo di individuare possibili risparmi di energia in termini di conduzione impianti, gestione dell'immobile e isolamento termico dell'edificio.





# Bibliografia

## **Siti internet:**

[www.ideaenergia.it](http://www.ideaenergia.it)

[www.romaenergia.it](http://www.romaenergia.it)

[www.ambientediritto.it](http://www.ambientediritto.it)

[www.enea.it](http://www.enea.it)

[www.anit.it](http://www.anit.it)

[www.etc-ecology.it](http://www.etc-ecology.it)

[www.etc-italy.it](http://www.etc-italy.it)

[www.geotherm.it](http://www.geotherm.it)

[www.icosenergia.it](http://www.icosenergia.it)

[www.geotermiacasaval.it](http://www.geotermiacasaval.it)

[www.bioplan.it](http://www.bioplan.it)

[www.immergas.it](http://www.immergas.it)

[www.irsap.it](http://www.irsap.it)

[www.caleffi.it](http://www.caleffi.it)

[www.aermec.it](http://www.aermec.it)

[www.tecnogramma.it](http://www.tecnogramma.it)

[www.sunradiant.it](http://www.sunradiant.it)

## **Letteratura**

*Sustainable development foundation*. Rapporto 2009 per la fondazione dello sviluppo sostenibile L'Europa e le regioni per lo sviluppo sostenibile.

*Arch.tti Martino Milardi, Deborah Pennestri*. Gestione sostenibile delle risorse energetiche nei settori dell'edilizia e negli impianti.

*Ing. Giorgio Acerbi*. Dossier sulle Pompe di calore, Progetto RES & RUE Dissemination Domomatica

*ENEA*. Risparmio energetico della casa.

*G. Semprini, C. Marinosci, L. Barbaresi*. Effetti dell'inerzia termica dei componenti edilizi in ambienti non climatizzati nel periodo estivo, DIENCA Facoltà di Ingegneria Università di Bologna.

*Michele de Carli, Mauro Mantovan, Leonardo Pedrin, Angelo Zarella, Roberto Zecchin, Alessandro Zerbetto*. Analisi di pompe di calore geotermiche con sonde geotermiche.

---

*R. Lazzarin, F. Busato.* Calcolo dei carichi termici dell'edificio ENEA di Ispra, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova Report RSE/2009/32, Vicenza Novembre 2008.

*L. Mazzarella, M. Motta.* Procedura di calcolo semplificata per il calcolo del fabbisogno di energia per raffrescamento estivo, Dipartimento di Energetica Politecnico di Milano.

*Adolfo F. L. Baratta Luigi Venturi.* Prestazioni termiche di pareti perimetrali in regime dinamico.

*A. Gulnöz.* Involucro edilizio- Strutture portanti in Porotherm Bio-Plan, Imola 2008.

*M. Vigolo.* Soluzioni progettuali e costruttive per il miglioramento dell'efficienza energetica degli impianti, Politecnico di Milano.

F. Paoletti. Riscaldare e risparmiare, Global Radiatori.

*C. Becchio, D. Guglielmino, E. Fabrizio, M. Filippi.* Metodologie di calcolo del fabbisogno di energia annuale per la climatizzazione: risultati a confronto, Torino 2009.

*Matteo Medola.* Prestazioni termiche dell'involucro edilizio.

*Simone Ferrari.* Procedure di calcolo e valutazioni dinamiche, 2009.

*Valentina Augenti, Pietro Stefanuzzi.* Considerazioni su soluzioni di involucro opaco in regime termico dinamico.

*G. Semprini, C. Marinosci, S. Falcioni.* Prestazioni energetiche invernali ed estive: analisi e confronti con un edificio campione, DIENCA Facoltà di Ingegneria Università di Bologna, 2009.

*F. Ardente, V. Lo Brano, A. Marvuglia, M. Mistretta, A. Orioli.* Il metodo delle funzioni di trasferimento applicato ad una singola zona termica, La Termotecnica, 2006.

*Prof. Ing. Giuliano Cammarate.* Impianti termotecnici, Dipartimento di ingegneria industriale e meccanica sezione di energetica industriale ed ambientale Università di Catania.

*C. Di Perna, F. Stazi, A. Ursini Casalena, A. Stazi.* Massa e confort: capacità di un'adeguata capacità termica aerea periodica, Dipartimento di energetica e Dipartimento di architettura costruzioni e strutture Università Politecnica delle Marche.

*S. Ferrari.* Procedure di calcolo semplificate e valutazioni dinamiche: implicazioni sul bilancio energetico dell'edificio. Politecnico di Milano, Dip.to Building and Environment Science and Technologies (BEST).

Impianti a pannelli radianti- La regolazione e la distribuzione. IDRAULICA- Pubblicazione periodica di informazione tecno-professionale, 02.95 n°9 *Caleffi.*

Impianti a pannelli radianti- Programmi di calcolo e consigli pratici. IDRAULICA- Pubblicazione periodica di informazione tecno-professionale, 01.96 n°10 *Caleffi.*

Impianti a pannelli radianti. IDRAULICA- Pubblicazione periodica di informazione tecno-professionale-. 12.01 n°21 *Caleffi.*

Regolazione degli impianti a pannelli. IDRAULICA- Pubblicazione periodica di informazione tecno-professionale, 12.04 n°27 *Caleffi.*

Le reti di distribuzione. Quaderni Caleffi, *Mario Doninelli, Caleffi.*

Gli impianti a pannelli radianti. Quaderni Caleffi, *Mario Doninelli, Caleffi.*

*Francesco Paoletti* . Impianti di riscaldamento a bassa temperatura: radiatori in alluminio e pannelli radianti confronto, Riscaldare e Risparmiare, *Global Radiatori*.

*Clima Plast s.r.l.* Impianti radianti a pavimento- posa e progettazione, 2007.

*C. Liquori, P. Ricci.* Pannelli radianti secondo UNI EN 1264- Principali contenuti e schema di certificazione, Plastic pipe and Fittings, 2008.

*Valsir. s.p.a.* Sistema di riscaldamento a pavimento: la norma UNI EN 1264, 2006.

*Buderus. Italia s.r.l.* Impianto di riscaldamento a pannelli radianti a pavimento, documentazione tecnica, 2007.

*Gaberit Marketing e distribuzione SA.* Sistemi a pannelli radianti Gaberit. Benessere a pavimento.

*Prof. Ing. G. Morini.* Appunti del corso di Termotecnica. Corso di Laurea in ingegneria Energetica.

*Prof. Ing. G. Semprini.* Appunti del corso di Impianti Tecnici LS. Corso di laurea in ingegneria Civile.

Prestazione energetiche del sistema edificio- impianto: software per la diagnosi energetica ed il calcolo in regime invernale”. Atti del Convegno- AICARR Bologna 29 ottobre 2009 SAIE.

*Savino Basta, Fabio Minchio, Basta Savino.* Geotermia e pompe di calore. Basta Savino, 2007.

*Monica Lavagna.* Sostenibilità e risparmio energetico. Soluzioni tecniche per involucri eco-efficienti. Libreria CLUP, 2005.

**Normativa:**

UNI/TS 11300-Parte 1- Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

UNI/TS 11330- Parte 2- Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

UNI EN 12831- Impianti di riscaldamento negli edifici- Metodo di calcolo del carico termico di progetto.

UNI EN 1264-1: 1999 Riscaldamento a pavimento- Impianti e componenti- Definizioni e simboli.

UNI EN 1264-2: 2009 Sistemi radianti alimentati ad acqua per il riscaldamento ed il raffrescamento integrati nelle strutture- Riscaldamento a pavimento: metodi per la determinazione della potenza termica mediante metodi di calcolo e prove.

UNI EN 1264-3: 2009 Riscaldamento a pavimento- Impianti e componenti- Dimensionamento.

UNI EN 1264-4: 2003 Riscaldamento a pavimento- Impianti e componenti- Installazione.

UNI EN 1264-5: 2009 Sistemi radianti alimentati ad acqua per il riscaldamento ed il raffrescamento integrati nelle strutture. Superfici per il riscaldamento e il raffrescamento integrate nei pavimenti, nei soffitti e nelle pareti. Determinazione della potenza termica.

**Manuali software:**

Manuale MC4 Suite 2009

Manuale TRNSYS 16.1

Manuale SOMBRERO

Manuale WINDOW 5.1