



**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

**Corso di laurea in Ingegneria Energetica**

**Tesi di laurea magistrale**

**CARATTERIZZAZIONE TERMICA DI SISTEMI RADIANTI  
A PAVIMENTO IN EDIFICI RESIDENZIALI**

**Laureando: Francesco De Bortoli**

**Relatore: Ing. Angelo Zarrella**

**Anno accademico 2017/2018**



# INDICE

1. INTRODUZIONE
2. FABBISOGNO ENERGETICO DEGLI EDIFICI
  - 2.1 L'IMPORTANZA DELL'EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI
  - 2.2 LE DIRETTIVE EUROPEE
  - 2.3 CERTIFICAZIONE ENERGETICA
  - 2.4 GLI EDIFICI NZEB
  - 2.5 I SISTEMI RADIANTI A PAVIMENTO
3. IL CASO DI STUDIO: EDIFICIO PLURIFAMILIARE “RESIDENZA MALASPINA”
  - 3.1 L'EDIFICIO
  - 3.2 IMPIANTI AD ALTA EFFICIENZA
  - 3.3 INVOLUCRO
  - 3.4 IL CASO DI STUDIO
4. DEFINIZIONE E ANALISI DEI PACCHETTI SOLAIO CONTRO-TERRA CON HEAT2
  - 4.1 PREMESSA
  - 4.2 UTILIZZO DI HEAT2
  - 4.3 I PACCHETTI SOLAIO CONTRO TERRA: MATERIALI E VISTA TERMICA
  - 4.4 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI
  - 4.5 CONFRONTI E ANALISI
5. DEFINIZIONE E ANALISI DEI SISTEMI RADIANTI A PAVIMENTO CON TRNSYS
  - 5.1 PREMESSA
  - 5.2 UTILIZZO DI TRNSYS
  - 5.3 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI
  - 5.4 ZONA CAMERA 1: CONFRONTI E ANALISI
6. CONCLUSIONI

# ***CAPITOLO 1***

## **INTRODUZIONE**

Negli ultimi anni il settore edile ha subito uno sviluppo notevole per quanto riguarda l'efficienza energetica dovuto ad una esigenza sempre più marcata di costruire un patrimonio immobiliare costituito da edifici che soddisfino sia il bisogno di ridurre drasticamente i consumi energetici che quello di creare ambienti sani dove il benessere della persona sia fulcro del progetto abitativo.

Le innovazioni hanno compreso e continuano a comprendere sia l'impiantistica, con tecnologie per la generazione e il recupero del calore sempre più efficienti e performanti, sia l'involucro, con la creazione di solai, coperture e pareti maggiormente isolanti e serramenti che riducono al minimo le infiltrazioni d'aria.

Nuove costruzioni e ristrutturazioni devono oramai rispondere ad un'unica esigenza: efficienza energetica, questa è l'indicazione fondamentale delle Direttive Europee. La

prospettiva futura è la realizzazione di edifici autosufficienti grazie allo sviluppo di una cultura che veda il sistema edificio-impianto come unico e autosufficiente.

Gli Stati europei devono continuare ad incentivare il rinnovamento per creare speranza in un futuro ambientale migliore, per far ripartire un settore fondamentale come quello edile e per raggiungere il traguardo dell'indipendenza energetica.

Questo elaborato presenta l'analisi di due sistemi di impianto a pavimento installati su due differenti appartamenti facenti parte di un unico edificio residenziale di 14 unità sito a Padova (PD). Sono stati valutati singolarmente i due pacchetti solaio e studiate le loro caratteristiche tramite il software "Heat2" e poi analizzati all'interno del sistema edificio, in questo ultimo caso mediante "TRNSYS" sono state effettuate le simulazioni dei due modelli.

La modalità utilizzata per elaborare la tesi, oltre ad analizzare le due tipologie di impianto a pavimento, vuole evidenziare la differenza tra una valutazione dell'impianto preso singolarmente e lo stesso visto però come parte integrante dell'edificio: cioè passare da una visione di impianto come sistema indipendente a quella di impianto come ramo fondamentale di un sistema più ampio che possiamo definire "edificio-impianto".

## CAPITOLO 2

### FABBISOGNO ENERGETICO DEGLI EDIFICI

#### 2.1 L'IMPORTANZA DELL'EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI

Gli edifici sono responsabili del 40% del consumo globale di energia nell'Unione Europea. Il settore è in espansione e ciò è destinato ad aumentarne il consumo energetico, pertanto la riduzione del consumo energetico e l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili nel settore dell'edilizia costituiscono misure importanti, necessarie per ridurre la dipendenza energetica dell'Unione e le emissioni di gas a effetto serra.

In Italia, in riferimento agli impieghi finali di energia, nel periodo 1990-2016, il settore civile ha registrato un tasso di crescita del +40.7% (fonte EUROSTAT), con un consumo che nel 2016 è stato pari a 48.2 Mtep.

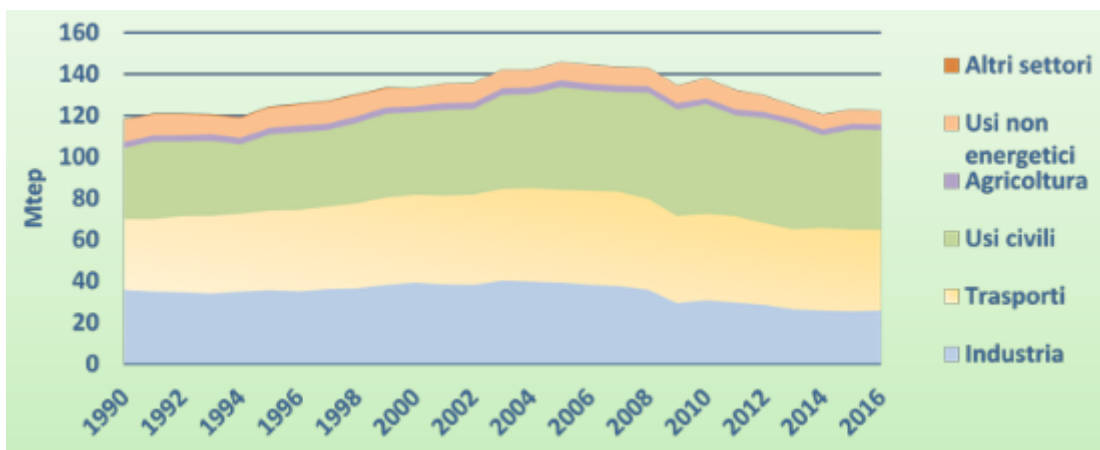
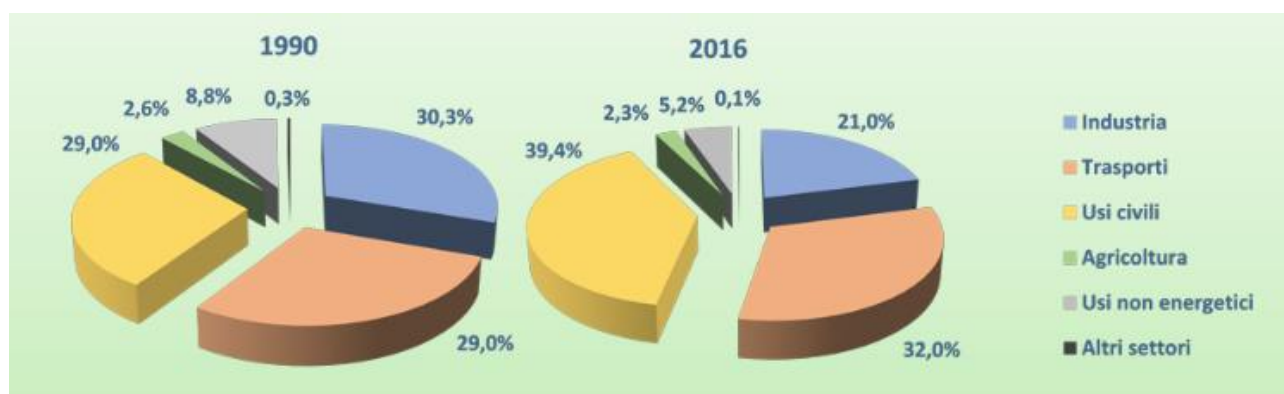


Fig. 2.1 – Impieghi finali di energia per settore (Mtep), anni 1990-2016, fonte EUROSTAT

L'andamento dei consumi energetici settoriali nel periodo 1990-2016 ha modificato la distribuzione di energia: il settore civile assorbe quasi il 40% degli impieghi finali contro il 29% del 1990, seguito dal settore trasporti, che con il 32% rappresenta il secondo settore per quantità di consumi energetici. Il contributo ai consumi finali del settore industria si è invece ridotto dal 30,3% al 21% dal 1990 al 2016.



**Fig. 2.2 – Impieghi finali per settore (%), anni 1990 e 2016, fonte EUROSTAT**

Questi dati fanno notare quanto sia importante agire sull'efficienza energetica degli edifici per raggiungere gli obiettivi fissati dall'Unione Europea in termini di riduzione dei consumi, di riduzione dell'inquinamento e di utilizzo di fonti rinnovabili per la produzione di energia.

Negli ultimi decenni lo scenario energetico e ambientale si è fortemente modificato e lo stato in cui ci si trova a lavorare oggi si può definire di "emergenza": i costi dell'energia sono sempre crescenti, il carico sulle reti (elettrica e gas) mette in crisi gli approvvigionamenti di potenza e sono presenti problematiche ambientali non solo su scala locale ma anche globale.

Concretamente si possono notare numerose problematiche dovute ad un inefficiente utilizzo dell'energia all'interno degli edifici: problemi ambientali come l'innalzamento medio delle temperature, l'inquinamento atmosferico o economici come la dipendenza energetica dagli stati proprietari delle fonti non rinnovabili sono solo alcuni esempi che però evidenziano la necessità che si è avuta e si dovrà avere di agire verso il rinnovamento e la costruzione di un patrimonio immobiliare che abbia come primo scopo il benessere delle persone, non solo da un punto di vista locale, inteso come la qualità di vita all'interno dell'edificio, ma anche a livello globale, cioè creando costruzioni che si adattino alle caratteristiche ambientali del luogo e sfruttino tecnologie efficienti per ridurre al minimo consumi e quindi anche costi.

La strategia per ridurre i consumi energetici e, contestualmente, rispondere alla richiesta di benessere ambientale, viaggia su tre binari paralleli:

- ridurre, a parità di benessere ambientale richiesto, i carichi termici degli edifici;
- applicare, negli impianti tecnologici a servizio del benessere ambientale, le tecnologie più efficienti;
- progettare i sistemi edificio-impianti realmente come sistemi integrati, sfruttando al massimo le possibili sinergie.

E' importante sviluppare in questi anni di crescita tecnologica una cultura che renda i corpi edificio e impianto come un unico sistema integrato edificio-impianto.

## **2.2 LE DIRETTIVE EUROPEE**

Da un punto di vista legislativo l'Unione Europea promuove attraverso le Direttive, la ricerca delle soluzioni necessarie per migliorare dal punto di vista energetico e ambientale il patrimonio immobiliare degli stati facenti parte, come l'Italia.

L'ultima, la 2018/844/UE, pubblicata sulla Gazzetta europea, che aggiorna la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, prevede che i Paesi europei elaborino nei prossimi anni una strategia a lungo termine per sostenere la ristrutturazione degli edifici residenziali e non residenziali, sia pubblici che privati, al fine di ottenere un parco immobiliare decarbonizzato ed ad alta efficienza energetica entro il 2050. Inoltre dovranno facilitare la trasformazione degli edifici esistenti in edifici a energia quasi zero.

La direttiva ha l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica degli edifici attraverso:

- la promozione di ristrutturazioni economicamente efficienti;
- l'introduzione di un 'indicatore di intelligenza' per gli edifici che, grazie all'interazione con la rete, potrà adattare il consumo energetico alle esigenze reali degli abitanti;
- la semplificazione delle ispezioni degli impianti di riscaldamento e di condizionamento dell'aria;
- la promozione dell'elettromobilità mediante l'istituzione di un quadro per i posti auto destinati ai veicoli elettrici.

Gli Stati membri dovranno fare in modo che, prima dell'inizio dei lavori di costruzione “si tenga conto della fattibilità tecnica, ambientale ed economica dei sistemi alternativi ad alta efficienza, se disponibili”.

Per gli edifici oggetto di “ristrutturazioni importanti” invece, gli Stati dovranno favorire l'utilizzo di “sistemi alternativi ad alta efficienza, nella misura in cui è tecnicamente, funzionalmente ed economicamente fattibile” e si dovranno “prendere in considerazione le questioni del benessere termo-igrometrico degli ambienti interni, della sicurezza in caso di incendi e dei rischi connessi all'intensa attività sismica”.

Entro la fine del 2019, la Commissione europea dovrà sviluppare l'“indicatore d'intelligenza”, uno strumento che misuri la capacità degli edifici di migliorare la propria operatività e interazione con la rete, adattando il consumo energetico alle esigenze reali degli abitanti. L'indicatore di predisposizione degli edifici all'intelligenza dovrà tener conto delle caratteristiche di maggiore risparmio energetico, di analisi comparativa e flessibilità, nonché delle funzionalità e delle capacità migliorate attraverso dispositivi più interconnessi e intelligenti.

La metodologia considera tecnologie come i contatori intelligenti, i sistemi di automazione e controllo degli edifici, i dispositivi autoregolanti per il controllo della temperatura dell'aria interna, gli elettrodomestici incorporati, i punti di ricarica per veicoli elettrici, l'accumulo di energia, nonché le funzionalità specifiche e l'interoperabilità di tali sistemi, oltre ai benefici per le condizioni climatiche degli ambienti interni, l'efficienza energetica, i livelli di prestazione e la flessibilità così consentita.

L'obiettivo complessivo della nuova direttiva 2018/844/UE è quello di abbattere dell'80-95%, rispetto ai livelli del 1990, le emissioni di gas serra entro il 2050, con target intermedi al 2030 e 2040. L'obiettivo è strettamente legato con quello, concordato a livello europeo pochi giorni fa, di produrre il 32% di energia rinnovabile entro il 2030.

L'Unione si impegna quindi a elaborare un sistema energetico sostenibile, competitivo, sicuro e decarbonizzato entro il 2050. Per raggiungere tale obiettivo, gli Stati membri devono dotarsi entro il 2050 di misure tese a raggiungere l'obiettivo di lungo termine relativo alle emissioni di gas a effetto serra e a decarbonizzare il parco immobiliare, cui è riconducibile circa il 36% di tutte le emissioni di CO<sub>2</sub> nell'Unione.

E' essenziale che gli Stati membri precisino i risultati attesi delle loro strategie di ristrutturazione a lungo termine e monitorino gli sviluppi definendo indicatori di progresso interni.

Gli sforzi tesi ad accrescere la prestazione energetica nell'edilizia sono importanti anche per contribuire attivamente all'indipendenza energetica dell'Unione e inoltre hanno enormi potenzialità in termini di creazione di occupazione negli Stati membri, in particolare nelle piccole e medie imprese.

Gli Stati membri dell'Unione Europea devono e dovranno promuovere meccanismi finanziari, incentivi e la mobilitazione delle istituzioni finanziarie per favorire le ristrutturazioni destinate a migliorare l'efficienza energetica. Tutto questo dovrebbe avere un ruolo centrale nelle strategie nazionali e dovrebbe incoraggiare alla concessione di prestiti ipotecari rivolti all'efficienza energetica per ristrutturazioni immobiliari la cui efficienza energetica è certificata e alla promozione di investimenti pubblici in un parco immobiliare efficiente sotto il profilo dell'energia.

E' stato valutato che quasi il 75% degli edifici presenti nel territorio italiano sono inefficienti e questo ha dato grossi stimoli per lo sviluppo del lavoro di rinnovo di questi, ma ci deve anche interrogare su come si sia sviluppato nei decenni precedenti il settore edile, sempre rivolto al presente e al massimo profitto senza pensare alle conseguenze che avrebbe portato la mancata prevenzione da un punto di vista energetico e della sicurezza.

Dal 2014 al 2016 sono stati quasi un milione gli interventi di ristrutturazione ai fini di un efficientamento energetico: oltre la metà hanno riguardato la sostituzione dei serramenti e circa il 20% la sostituzione di impianti di climatizzazione invernale e installazione di schermature solari.

Nel rinnovo degli edifici, ma anche nella progettazione di nuovi immobili, ci si sta concentrando sempre più nella creazione di un involucro che sfrutti al meglio le caratteristiche ambientali del luogo e che riduca al minimo le perdite é fondamentale infatti per la costruzione di edifici che riescano a raggiungere prestazioni che si avvicinino all'autosufficienza.

Da un punto di vista impiantistico, le tecnologie di generazione del calore, si stanno concentrando sempre più nell'utilizzo di energia elettrica come fonte primaria, grazie al forte sviluppo che hanno avuto le pompe di calore negli ultimi anni. Questo ha portato ad un

ridimensionamento dell'uso delle biomasse che sicuramente gioverà sotto il profilo dell'inquinamento atmosferico.

L'aumento dell'utilizzo di tecnologie elettriche all'interno degli edifici, sia per la climatizzazione ambientale che per la ventilazione, potrebbe far pensare ad un relativo aumento dei consumi di corrente elettrica. Questo però non è avvenuto perché il maggior utilizzo di tecnologie di questo tipo è stato seguito anche ad un aumento dell'efficienza di questi dispositivi che quindi, in termini assoluti, non ha portato ad un aumento di consumi elettrici. Un semplice esempio è dato dalla riduzione dei consumi per l'illuminazione grazie all'uso di lampadine a Led.

Lo sviluppo tecnologico degli edifici potrebbe essere volano anche per un miglioramento dal punto di vista ambientale ed energetico del settore dei trasporti, che si è visto in precedenza essere il secondo settore per quantità di consumi energetici finali e quindi sostenere con ancora più forza la decarbonizzazione generale dell'economia. Per esempio, gli edifici possono fare leva per lo sviluppo delle infrastrutture necessarie alla ricarica intelligente dei veicoli elettrici.

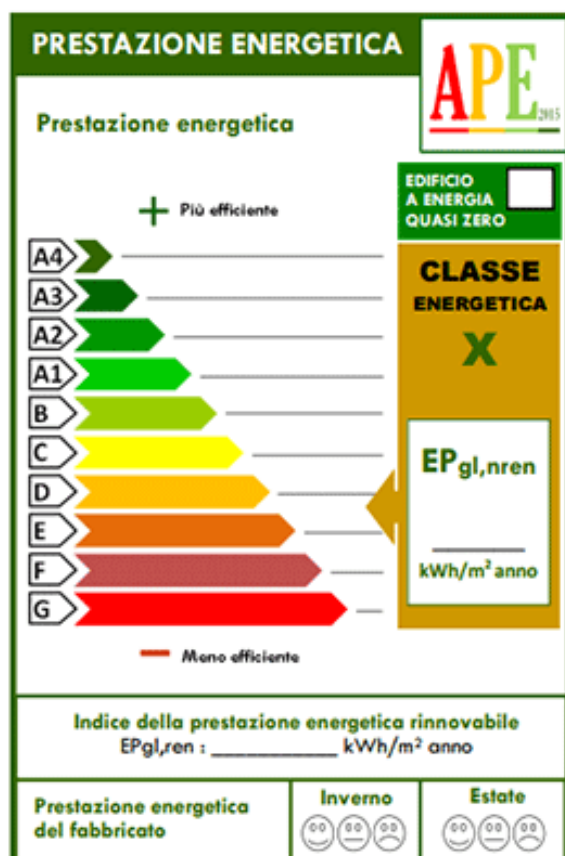
### **2.3 CERTIFICAZIONE ENERGETICA**

La Direttiva del 2010, oltre a imporre agli Stati di fissare dei requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici nuovi ed esistenti, ha promosso la redazione della certificazione energetica degli immobili.

Questa Direttiva è stata recepita in Italia nel giugno 2013 con il DL 63/2013 che ha definito gli "edifici a energia quasi zero", ha stabilito che entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere a energia quasi zero e ha introdotto l'Attestato di Prestazione Energetica (APE) in sostituzione di quello di Certificazione Energetica (ACE).

I decreti di dettaglio relativi all'APE, alla metodologia di calcolo e ai requisiti minimi delle prestazioni energetiche sono stati approvati a luglio 2015 e sono entrati in vigore a ottobre 2015.

L'attestazione APE definisce gli edifici in 10 diverse classi energetiche: A4, A3, A2, A1, B, C, D, E, F, G (dal più efficiente al meno efficiente). Questa viene determinata tramite l'indice di prestazione energetica globale dell'edificio in termini di energia primaria non rinnovabile.



**Fig. 2.3 – Etichetta energetica degli edifici**

Questo indice tiene conto del fabbisogno di energia primaria non rinnovabile non solo per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, come era prima del 1 Ottobre 2015, ma anche di altri servizi come la climatizzazione estiva, la ventilazione, l'illuminazione artificiale e il trasporto di persone o cose (gli ultimi due fabbisogni non sono previsti negli edifici con destinazione residenziale).

Una delle più grandi novità del nuovo APE entrato in vigore nel 2015 ricade nel metodo per determinare la classificazione. Le [precedenti linee guida](#) definivano la scala da A a G secondo i Gradi Giorno (GG) del comune dove si trovava l'immobile e secondo il rapporto S/V (superficie disperdente/volume riscaldato).

Dal 1 Ottobre 2015 invece la classificazione dipende da un "edificio di riferimento".

L'edificio di riferimento è un edificio identico a quello oggetto della progettazione per geometria, orientamento, ubicazione geografica, destinazione d'uso e tipologia d'impianto, avente però caratteristiche termiche ed energetiche predeterminate.

In pratica, l'edificio di riferimento serve per determinare il valore di energia primaria limite di legge che l'edificio di progetto deve rispettare e con il quale confrontarsi. Un grande vantaggio nell'utilizzo dell'edificio di riferimento è che i limiti vengono modellati sull'edificio oggetto dell'intervento.

Le efficienze, i parametri e gli indici di prestazione energetica utilizzati e calcolati nella procedura di attestazione energetica sono:

$H \cdot T$ [W/ (m <sup>2</sup> K)]	coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente
$A_{sol,est} / A_{sup\ utile}$ [-]	area solare equivalente estiva per unità di superficie utile;
$EPH_{nd}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	indice di prestazione termica utile per riscaldamento;
$\eta_H$ [-]	efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione invernale;
$EPH$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot") ;
$EPW_{nd}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	indice di prestazione termica utile per la produzione di acqua calda sanitaria;
$\eta_w$ [-]	efficienza media stagionale dell'impianto di produzione dell'acqua calda sanitaria;
$EPW$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	indice di prestazione energetica per la produzione dell'acqua calda sanitaria. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot");
$EPV$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	indice di prestazione energetica per la ventilazione. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot");
$EPC_{nd}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	indice di prestazione termica utile per il raffrescamento;

$\eta_c$ [-]	efficienza media stagionale dell'impianto di climatizzazione estiva (compreso l'eventuale controllo dell'umidità);
EPC [kWh/m <sup>2</sup> ]	indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva (compreso l'eventuale controllo dell'umidità). Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot");
EPL [kWh/m <sup>2</sup> ]	indice di prestazione energetica per l'illuminazione artificiale. Questo indice non si calcola per la categoria E.1, fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3). Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot");
EPT [kWh/m <sup>2</sup> ]	indice di prestazione energetica del servizio per il trasporto di persone e cose (impianti ascensori, marciapiedi e scale mobili). Questo indice non si calcola per la categoria E.1, fatta eccezione per collegi, conventi, case di pena, caserme nonché per la categoria E.1(3);
$EP_{gl} = EP_H + EP_W + EP_V + EP_C + EP_L + EP_T$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	indice di prestazione energetica globale dell'edificio. Si esprime in energia primaria non rinnovabile (indice "nren") o totale (indice "tot").

Rispetto al passato si ritiene fondamentale:

- specificare le prestazioni dei singoli servizi energetici ( $EP_H$ ,  $EP_W$ ,  $EP_V$ ,  $EP_C$ ,  $EP_L$ ,  $EP_T$ ) e non solo della prestazione globale ( $EP_{gl}$ )
- dare maggiore importanza alle caratteristiche e alla qualità dell'involucro edilizio, cioè alle murature, agli infissi e ai solai che disperdono verso l'esterno, consapevoli che gli interventi sugli impianti sono più agevoli ma anche meno efficienti rispetto agli interventi sull'involucro.

I valori dell'indice di prestazione energetica globale dell'edificio per cui si realizza la scala di classificazione delle classi energetiche sono:

	<b>Classe A4</b>	$\leq 0,40 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$0,40 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	<b>Classe A3</b>	$\leq 0,60 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$0,60 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	<b>Classe A2</b>	$\leq 0,80 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$0,80 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	<b>Classe A1</b>	$\leq 1,00 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$1,00 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	<b>Classe B</b>	$\leq 1,20 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$1,20 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	<b>Classe C</b>	$\leq 1,50 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$1,50 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	<b>Classe D</b>	$\leq 2,00 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$2,00 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	<b>Classe E</b>	$\leq 2,60 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
$2,60 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21) <$	<b>Classe F</b>	$\leq 3,50 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$
	<b>Classe G</b>	$> 3,50 EP_{gl,nren,rif,standard} (2019/21)$

$EP_{gl,nren,rif}$  è l'indice di prestazione energetica globale dell'edificio di riferimento, quindi se ad esempio questo valore è di  $100 \text{ kWh/m}^2$  annuo, allora un immobile per essere di classe energetica A4 deve avere un consumo energetico che non superi i  $40 \text{ kWh/m}^2$  annui.

L'edificio che verrà preso in considerazione nei prossimi capitoli per la caratterizzazione dei sistemi a pavimento fa parte di questa classe e questo grazie alla scelta di un involucro edilizio provvisto di isolamenti termici altamente performanti per la costruzione delle strutture opache orizzontali e verticali, all'attenzione costruttiva dei punti critici (ponti termici), alle chiusure trasparenti a basso emissivo (serramenti e vetri) e da scelte impiantistiche evolute che permettono l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile.

## 2.4 GLI EDIFICI NZEB

La Direttiva Europea 2010/31/UE recepita in Italia con il decreto legge n.63/2013 introduce la definizione di "edifici ad energia quasi zero": edificio ad altissima prestazione energetica, determinata conformemente all'allegato I (della Direttiva). Il fabbisogno energetico molto

basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze.

L'articolo 9 di tale Direttiva stabilisce che negli Stati membri dell'Unione Europea entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero, per quelli occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi la scadenza è anticipata al 31 dicembre 2018.

Le caratteristiche di un "edificio a energia quasi zero" in Italia sono stabilite dal DM 26 giugno 2015, "Requisiti minimi degli edifici". Sono NZEB gli edifici, sia di nuova costruzione che esistenti, per cui sono contemporaneamente rispettati i requisiti prestazionali del decreto stesso e gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili dettati dal decreto legislativo 28/2011 sulle rinnovabili. Come transizione verso gli NZEB, il decreto 2015 fissa già, per gli edifici di nuova costruzione (o soggetti a ristrutturazione importante di 1° livello), requisiti di prestazione in termini di energia primaria più severi del 15% rispetto ai precedenti standard e progressivamente più severi al 2017, 2019 e 2021.

Lo standard NZEB italiano prevede l'inclusione di altri requisiti minimi in aggiunta al limite complessivo sul consumo di energia primaria: gli indici di prestazione termica utile da confrontare con i valori limite dell'edificio di riferimento, il coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione, l'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile, i rendimenti degli impianti di climatizzazione invernale e estiva e di produzione dell'acqua calda sanitaria, i limiti sulle trasmittanze degli elementi disperdenti.

La maggior parte di NZEB applica un set ridotto di tecnologie: cospicuo isolamento di involucro, pompe di calore elettriche (per lo più aria-acqua) e impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica è la combinazione più frequente, con la variante della caldaia a condensazione abbinata a impianto solare termico per la produzione di acqua calda sanitaria. Ne consegue che il vettore elettrico risulta prevalente. Diffusa a circa la metà dei casi la ventilazione meccanica controllata con recupero di calore. Irrilevante appare invece la percentuale di teleriscaldamento e l'uso di biomasse rispettivamente in ambiente urbano e rurale, anche nei climi più freddi e in presenza dei soli servizi di riscaldamento e acqua calda sanitaria. Seppure nei limiti della disponibilità e della qualità dei dati del campione esaminato, solo due sono i casi (in Piemonte) di NZEB con impianto di teleriscaldamento, soluzione per cui non è obbligatoria la quota di rinnovabili ed economicamente più conveniente per l'utente laddove esista già l'infrastruttura. Qualora non sia previsto il servizio di raffrescamento, si

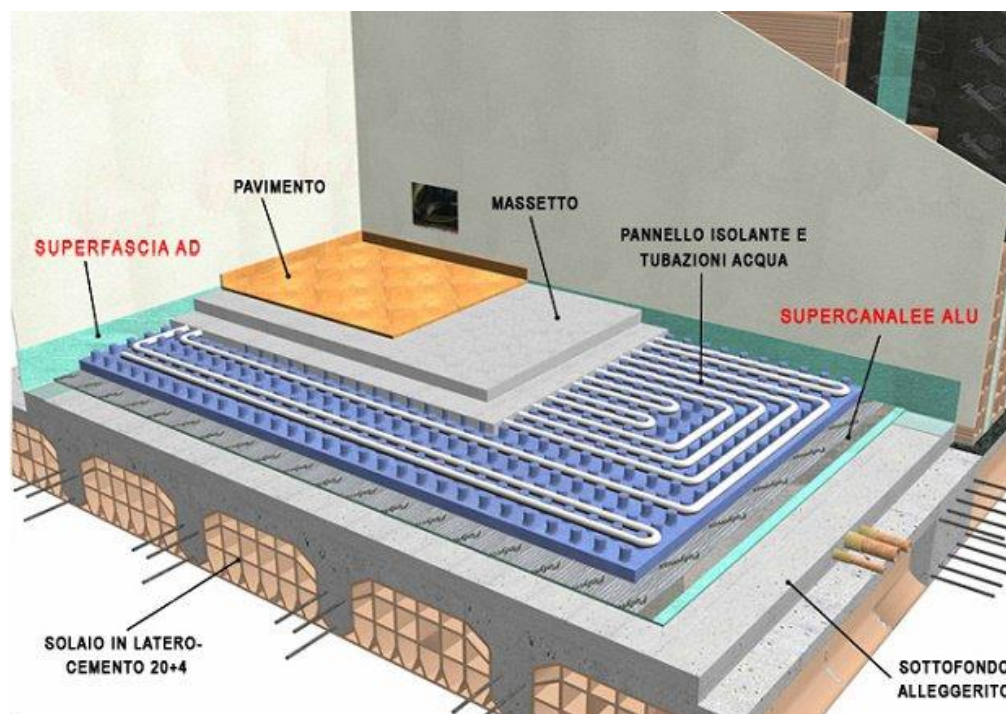
rileva l'uso di sistemi di combustione a gas (caldaia a condensazione) in cui la fornitura di ACS è completata da un impianto solare termico.

Ci si aspetta nei prossimi anni uno sviluppo nella costruzione degli edifici a energia quasi zero attualmente ancora bloccata dai costi eccessivi che rendono questi immobili poco competitivi sia sul mercato sia della compravendita “chiavi in mano” che della costruzione “personalizzata”.

Lo sviluppo maggiore si sta avendo nell'edilizia pubblica grazie alla possibilità di ricevere incentivi e alle scadenze a breve termine date dalla Direttiva.

## 2.5 I SISTEMI RADIANTI A PAVIMENTO

I sistemi radianti a pavimento attuali sono costituiti da circuiti di tubazioni posati sotto la pavimentazione dove all'interno scorre acqua opportunamente riscaldata. Pannelli isolanti preformati permettono una veloce installazione delle tubazioni e direzionano il flusso termico verso l'interno della stanza riducendo le perdite verso il basso.



**Fig. 2.4 – Esempio di sistema radiante a pavimento tradizionale**

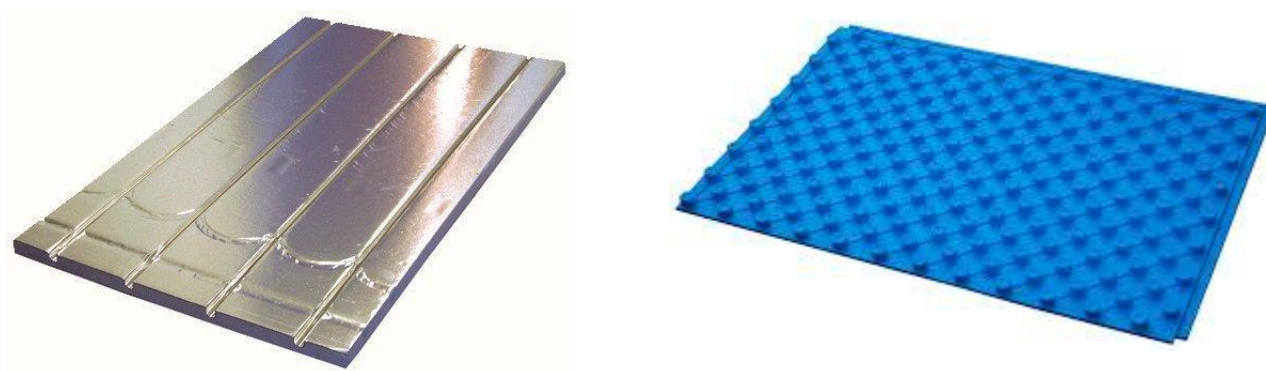
Lo sviluppo di questa tipologia di terminali di riscaldamento ha permesso un grande miglioramento sia per quanto riguarda l'efficienza degli impianti, sia per il comfort abitativo.

Il fluido termovettore che scorre all'interno delle tubazioni è acqua, solitamente a temperature che vanno dai 25°C a massimo 40°C, quindi relativamente basse, che permettono il raggiungimento di rendimenti più elevati per quanto riguarda i generatori di calore e l'utilizzo ottimale di tecnologie come le pompe di calore che con alte temperature di funzionamento non avrebbero rese tali da renderle competitive in termini di prestazioni energetiche.

Altra caratteristica positiva di questi sistemi è data dal fatto che il riscaldamento all'interno delle stanze è omogeneo, quindi la temperatura si svilupperà in maniera simile in tutte le stanze a differenza ad esempio di terminali come i radiatori che creano zone ad alta temperatura nelle vicinanze del corpo scaldante e una disomogeneità della temperatura nelle restanti parti.

Questi sistemi con il tempo si sono continuamente innovati sia per migliorare le caratteristiche termiche sia per far fronte alle esigenze degli interventi come ad esempio i lavori di ristrutturazione che possono non avere a disposizione grandi spessori per la posa di questi impianti.

Sul mercato quindi si possono trovare varie soluzioni per quanto riguarda la tipologia dei pannelli isolanti, che possono avere diversi spessori, diversi materiali e diverse modalità di posa delle tubazioni, dove anche queste si possono trovare con differenti diametri e tipologia di materiale.



**Fig. 2.5 – Due diverse tipologie di pannelli isolanti per impianto a pavimento**

Le tubazioni nei sistemi radianti a pavimento tradizionali sono immerse nel massetto, che solitamente è in sabbia-cemento con spessore di circa 4 cm sopra la tubazione. Si stanno però

sviluppando nuove tipologie di massetti che permettono di ridurre lo spessore anche fino a 1 cm. Un esempio di due differenti sistemi di questo tipo verrà analizzato nei capitoli successivi, dove verrà studiato il comportamento di un impianto che presenta in un appartamento un sistema con massetto tradizionale in sabbia cemento, mentre nell'altro un massetto autolivellante con materiale Q-mas Slim Bio che permette la posa di questo con spessori ridotti.

Al giorno d'oggi tutte queste caratteristiche e modalità d'installazione rendono il sistema radiante a pavimento il terminale d'impianto maggiormente impiegato nelle nuove costruzioni e, grazie alle nuove tecnologie che permettono di ridurre gli spessori di posa, trova grande successo anche negli interventi di ristrutturazione.

Oltre al campo residenziale viene impiegato anche nel settore residenziale, anche in modalità di posa differente, ad esempio con tubazioni immerse direttamente nel solaio.

Gli impianti radianti a pavimento possono essere utilizzati per il raffrescamento dell'abitazione, ambito in cui stanno attualmente incrementando il loro utilizzo. Devono però in tal caso essere associati ad un controllo dell'umidità relativa interna ai locali per evitare la formazione di condensa superficiale. In tali condizioni sono generalmente installati opportuni sistemi di regolazione che evitano che la temperatura di alimentazione dell'acqua sia inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria ambiente.

## ***CAPITOLO 3***

### **IL CASO DI STUDIO: EDIFICIO PLURIFAMILIARE “RESIDENZA MALASPINA”**

#### **3.1 L'EDIFICIO**

L'edificio preso in esame nello studio è sito in via Malaspina a Padova (PD) ed è un edificio residenziale plurifamiliare di nuova costruzione comprendente 14 unità abitative di varie metrature comprese tra 65 e 175 metri quadrati commerciali.

L'impresa costruttrice di tale immobile è Furlan Costruzioni e per quanto riguarda l'aspetto energetico il progettista degli impianti termici e dell'isolamento termico è ing. ir. Gallato Marco, mentre il direttore degli impianti e dell'isolamento termico è l'arch. Gottardo Andrea.

L'immobile è in classe A4 ed è definito “Casa Zero” perché pensata per eliminare i costi di riscaldamento grazie all'utilizzo di impianti tecnologici efficienti, un involucro molto ben isolato e ricambio d'aria con recupero di calore.



**Fig. 3.1 – Render edificio, vista Nord - Ovest**

### **3.2 IMPIANTI AD ALTA EFFICIENZA**

L'immobile è dotato di impianti di tipo autonomo ed ogni unità è servita dal sistema in pompa di calore reversibile Samsung EHS. Questo sistema è funzionante con gas frigorifero R410-A ed è costituito da:

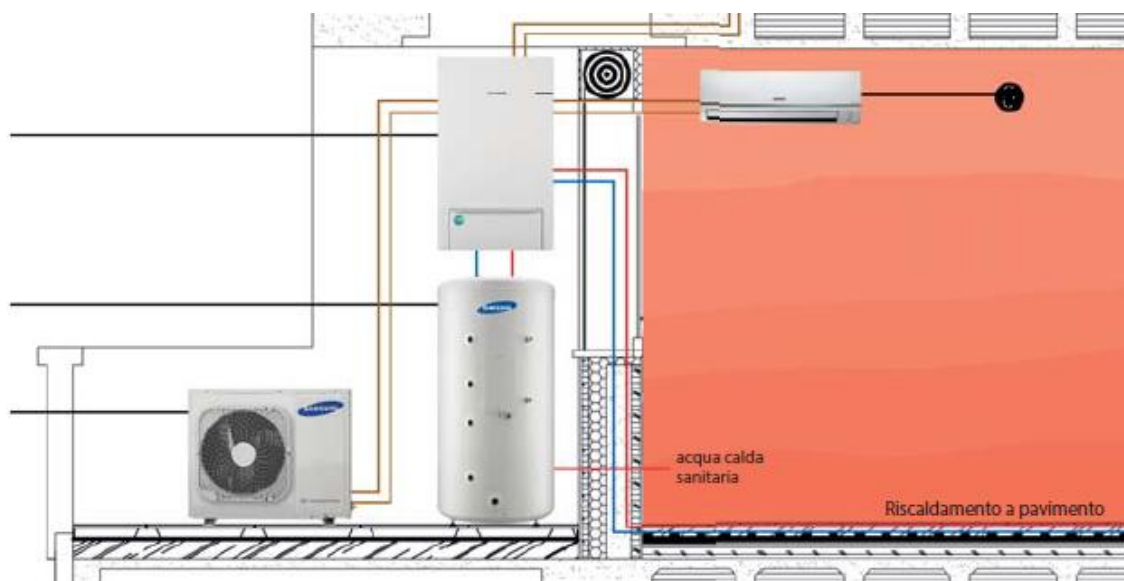
- un'unità moto condensante esterna comprendente il compressore del circuito frigorifero;
- un'unità idronica interna comprendente il condensatore del circuito frigorifero e collegata all'unità esterna mediante tubazioni in rame idonee al trasporto di gas refrigerante;
- due o più unità interne a parete per impianti di climatizzazione, comprendenti (nella fase estiva) l'evaporatore del circuito frigorifero, operanti con espansione diretta del gas refrigerante e collegate all'unità esterna mediante tubazioni in rame idonee al trasporto di gas refrigerante.

L'unità idronica verrà utilizzata per riscaldare il fluido termovettore circolante entro l'impianto a pavimento e lo scambiatore dedicato al riscaldamento dell'accumulo dell'acqua calda sanitaria.

Le unità operanti con espansione diretta del gas refrigerante, verranno invece impiegate, nella fase estiva, per il raffrescamento dell'abitazione.

Le unità 1 e 2 sono servite da un impianto fotovoltaico composto da 10 moduli in silicio policristallino con potenza di picco pari a 250 Wp ciascuno per singola unità con i moduli posizionati sulla falda di copertura rivolta a Ovest.

L'impianto di riscaldamento a pavimento è di marca Wavin con pannelli isolanti Chemidro e tubazioni Clima in PE-Xc.



**Fig. 3.2 – Schema centrale termica**

### **3.3 INVOLUCRO**

L'involucro è l'insieme delle chiusure opache e trasparenti che separano fisicamente l'interno dell'edificio dall'esterno. Questo è considerato l'elemento principale per ottenere un immobile ad alta efficienza, in questo caso in classe A4, quindi la sua scelta strutturale è di fondamentale importanza.

Per quanto riguarda le pareti perimetrali è stata utilizzata la tecnologia Isobloc: blocchi con cassero in legno-cemento posati a secco, opportunamente sfalsati ed armati con giunti ad incastro verticale. La parete sarà poi gettata in opera con calcestruzzo strutturale.

Il solaio è in latero-cemento tranne nella zona in prossimità delle scale dove presenta una struttura completamente in calcestruzzo. Anche questo presenta ottime caratteristiche termiche ed acustiche dovute dalla presenza di un tappeto fonoassorbente, alleggerito con EPS e il pannello isolante dove è installata la tubazione dell'impianto a pavimento.

I serramenti sono in PVC bianco con triplo vetro.



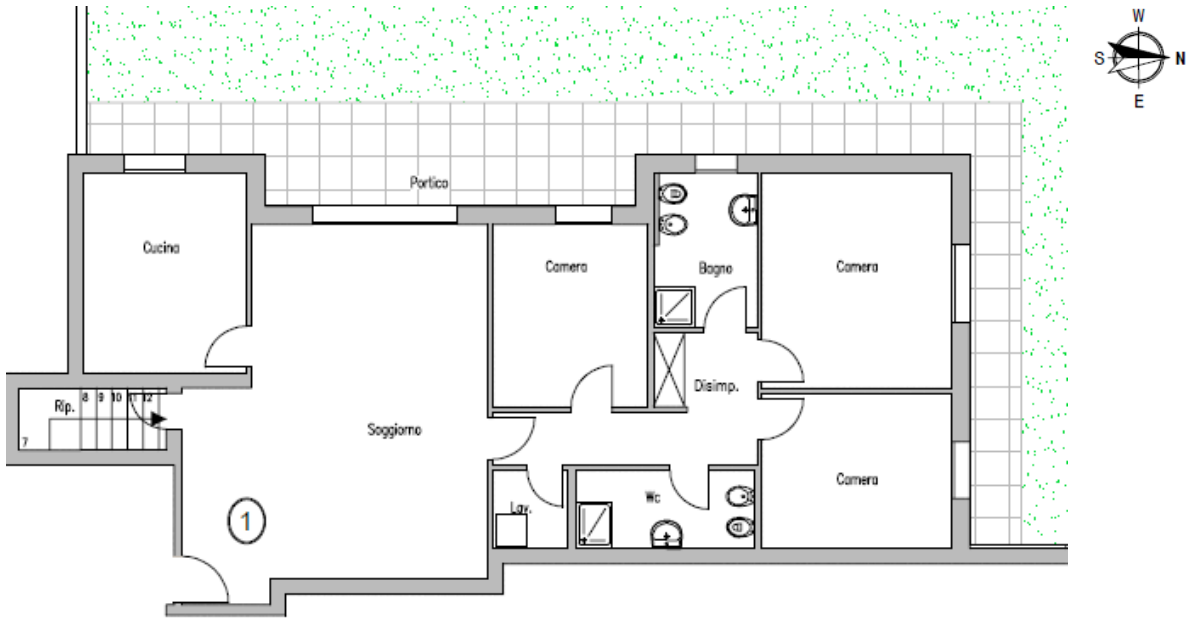
**Fig. 3.3 – Tecnologia Isobloc con EPS grafite**



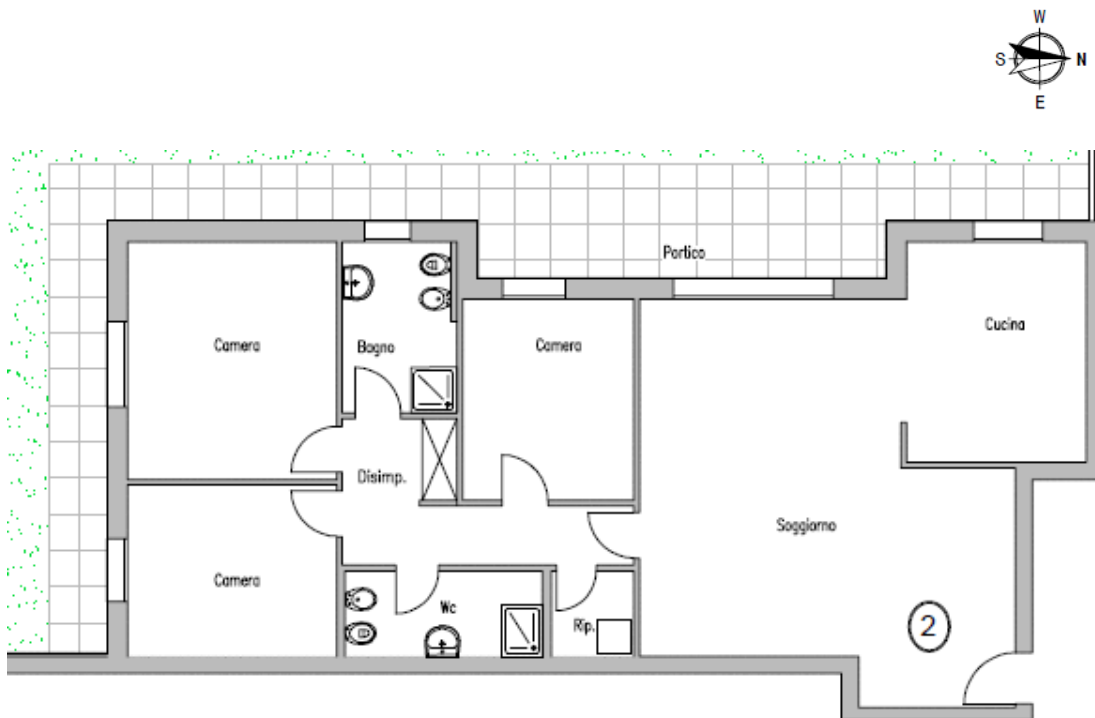
**Fig. 3.4 – Parte di serramento in PVC con triplo vetro**

### **3.5 IL CASO DI STUDIO**

Nel lavoro di tesi sono stati analizzati gli appartamenti N°1 e N°2, cioè quelli al piano terra confinanti con i garage. Questi presentano una pianta simmetrica con spazi praticamente identici, per questo rappresentano un buon caso di studio. L'unica differenza sta nell'orientamento di alcune pareti.



**Fig. 3.5 – Pianta appartamento 1**



**Fig. 3.6 – Pianta appartamento 2**

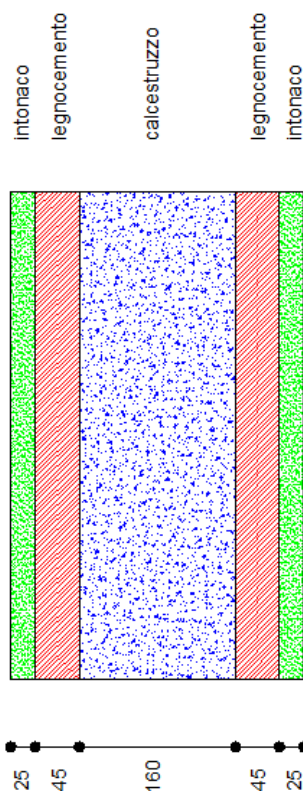
Gli appartamenti analizzati sono costituiti da una zona cucina-soggiorno, tre camere, due bagni, un ripostiglio e un disimpegno di pari superficie commerciale.

**Tab. 3.1 – Superfici e volumi commerciali**

<b>Stanza</b>	<b>Superficie [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>
<b>Cucina-soggiorno</b>	49.43	133.46
<b>Camera1</b>	10.59	28.59
<b>Bagno1</b>	5.86	15.82
<b>Camera2</b>	15.25	41.18
<b>Camera3</b>	10.98	29.65
<b>Bagno2</b>	5.18	13.99
<b>Ripostiglio</b>	2.18	5.89
<b>Disimpegno</b>	8.28	22.36

Da un punto di vista strutturale le pareti sono composte in maniera identica in base all'ambiente con cui confinano, presentando anche lo stesso solaio che le divide dal piano superiore. L'unica differenza sta nel solaio contro terra, che presenta strutture diverse da seconda delle diverse tipologie di materiali utilizzate per la posa dell'impianto di riscaldamento a pavimento.

Ora verranno definite le varie strutture, indicando materiale, spessore, conducibilità termica, capacità termica e densità. Quelle comuni ai due appartamenti sono:



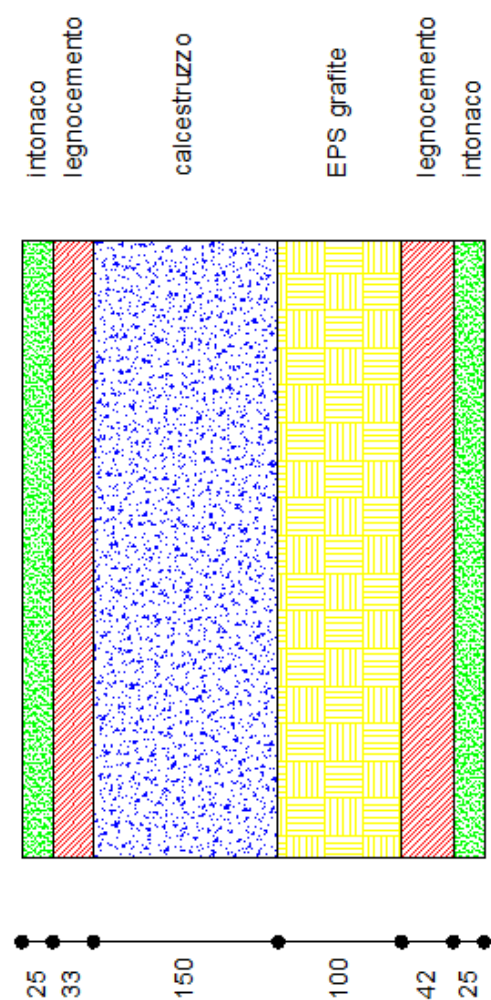
**Fig. 3.7 – Parete divisoria  
appartamenti e vano scale**

**Parete divisoria - Appartamenti**

Materiale	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(m K)]	Capacità termica [kJ/(kg K)]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Intonaco interno</b>	25	0.89	1	1600
<b>Legnocemento</b>	45	0.114	1.5	500
<b>Calcestruzzo</b>	160	1.91	1	2500
<b>Legnocemento</b>	45	0.114	1.5	500
<b>Intonaco interno</b>	25	0.89	1	1600
<b>Totale spessore</b>	300		U [W/m <sup>2</sup> K]	0.910

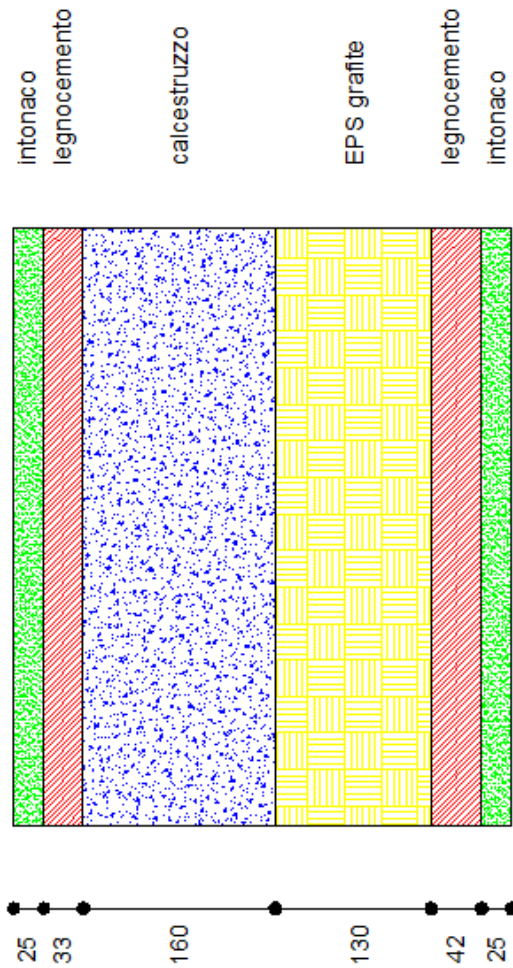
**Parete divisoria – Vano scale**

Materiale	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(m K)]	Capacità termica [kJ/(kg K)]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Intonaco interno</b>	25	0.89	1	1600
<b>Legnocemento</b>	45	0.114	1.5	500
<b>Calcestruzzo</b>	160	1.91	1	2500
<b>Legnocemento</b>	45	0.114	1.5	500
<b>Intonaco interno</b>	25	0.89	1	1600
<b>Totale spessore</b>	300		U [W/m <sup>2</sup> K]	0.910



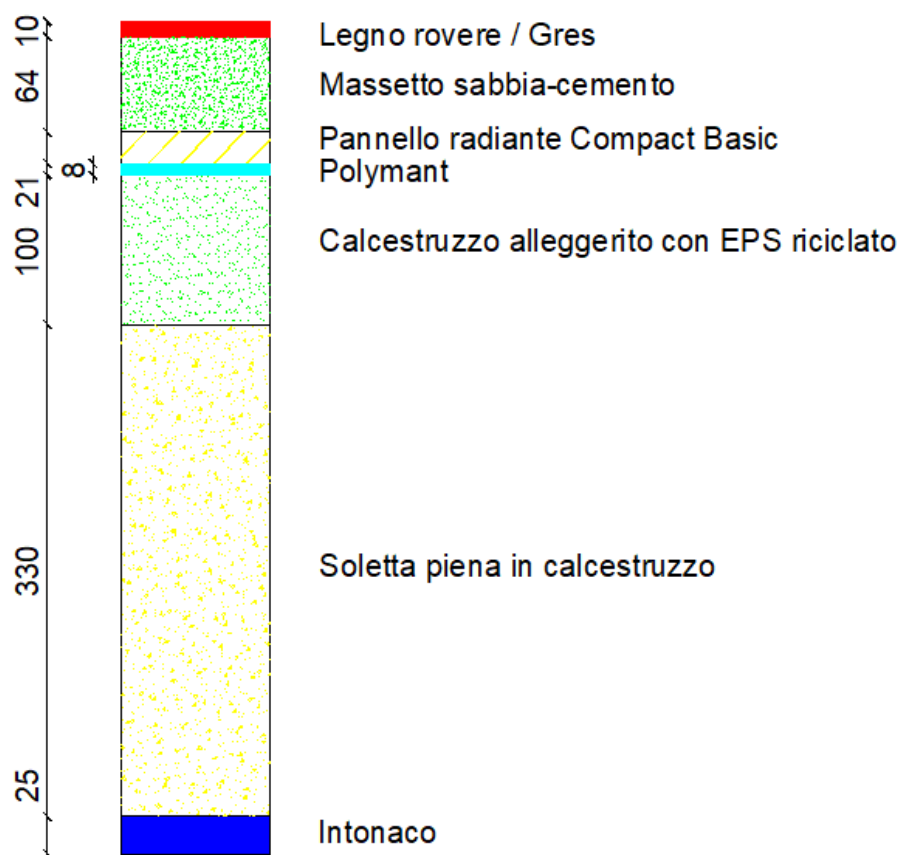
**Fig. 3.8 – Parete divisoria Garage**

<b>Parete divisoria - Garage</b>				
<b>Materiale</b>	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Conduttività termica [W/(m K)]</b>	<b>Capacità termica [kJ/(kg K)]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Intonaco interno</b>	25	0.89	1	1600
<b>Legnocemento</b>	33	0.114	1.5	500
<b>Calcestruzzo</b>	150	1.91	1	2500
<b>EPS grafite</b>	100	0.031	1.45	15.3
<b>Legnocemento</b>	42	0.114	1.5	500
<b>Intonaco interno</b>	25	0.89	1	1600
<b>Totale spessore</b>	384		U [W/m <sup>2</sup> K]	0.234



**Fig. 3.9 – Parete perimetrale**

<b>Parete perimetrale</b>				
<b>Materiale</b>	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(m K)]	Capacità termica [kJ/(kg K)]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Intonaco interno</b>	25	0.89	1	1600
<b>Legnocemento</b>	42	0.114	1.5	500
<b>Calcestruzzo</b>	160	1.91	1	2500
<b>EPS grafite</b>	130	0.031	1.45	15.3
<b>Legnocemento</b>	43	0.114	1.5	500
<b>Intonaco esterno</b>	25	0.89	1	1600
<b>Totale spessore</b>	425		U [W/m <sup>2</sup> K]	0.191



**Fig. 3.10 – Solaio PT-P1 soletta piena**

<b>Solaio PT-P1 (soletta piena) - Gres</b>				
<b>Materiale</b>	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Conduttività termica [W/(m K)]</b>	<b>Capacità termica [kJ/(kg K)]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Gres</b>	10	1.3	0.84	2300
<b>Massetto sabbia-cemento</b>	64	1	0.88	1800
<b>Pannello isolante in EPS – Compact Basic</b>	21	0.035	1.26	25
<b>Polymant</b>	8	0.04	1.3	35
<b>Calcestruzzo alleggerito con EPS riciclato</b>	100	0.17	1.2	300
<b>Soletta piena in calcestruzzo</b>	330	1.35	0.74	1500
<b>Intonaco interno</b>	25	0.89	1	1600
<b>Totale spessore</b>	558		U [W/m <sup>2</sup> K]	0.524

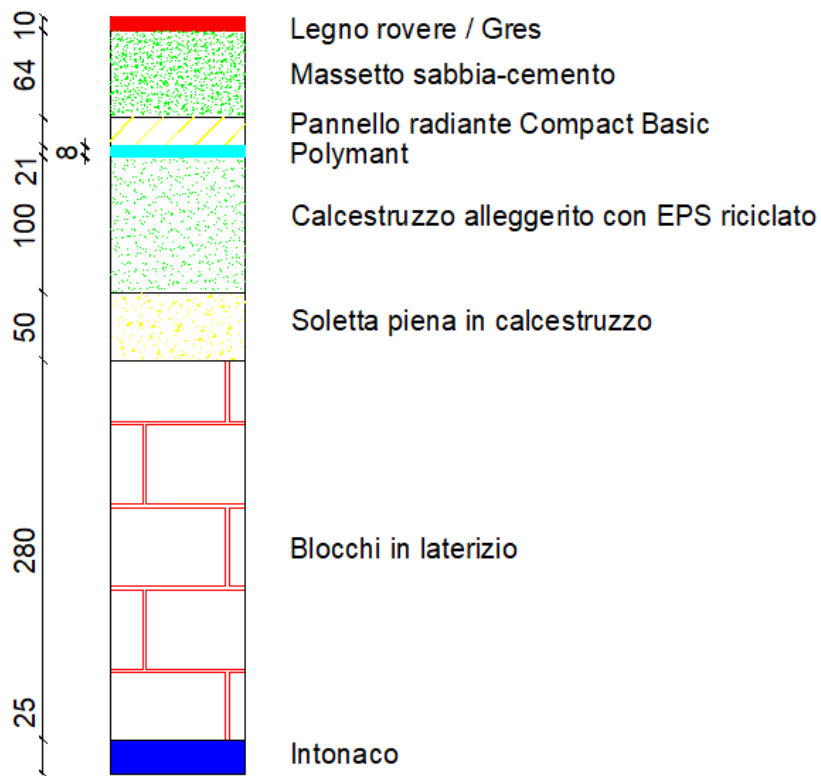
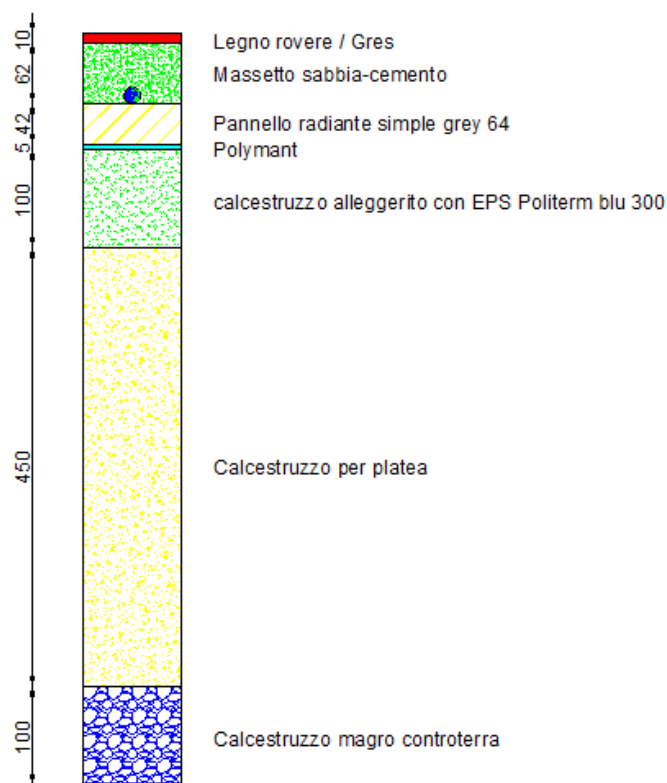


Fig. 3.11 – solaio PT-P1 laterizio/cemento

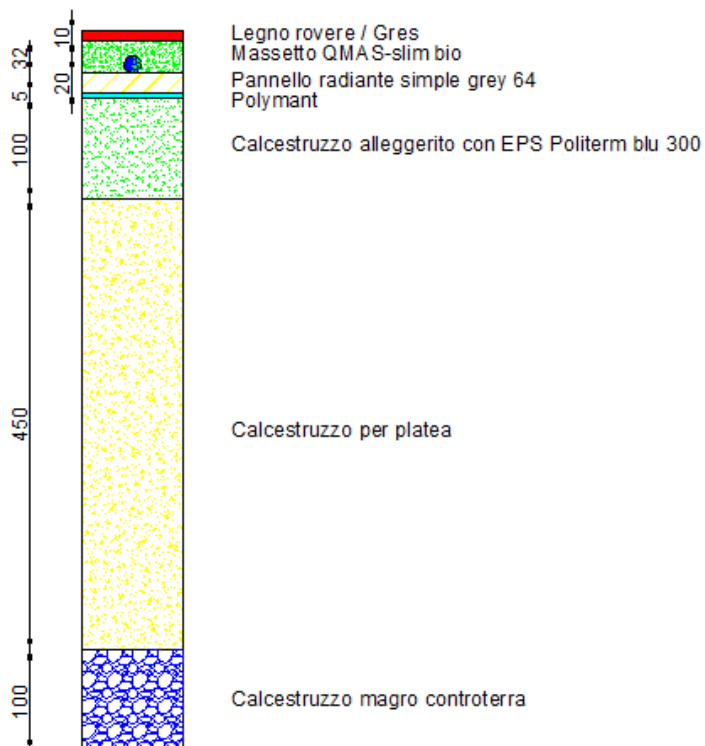
Solaio PT-P1 (solaio laterizio/cemento) - Gres				
Materiale	Spessore [mm]	Conduttività termica [W/(m K)]	Capacità termica [kJ/(kg K)]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]
Gres	10	1.3	0.84	2300
Massetto sabbia-cemento	64	1	0.88	1800
Pannello isolante in EPS – Compact Basic	21	0.035	1.26	25
Polymant	8	0.04	1.3	35
Calcestruzzo alleggerito con EPS riciclato	100	0.17	1.2	300
Soletta piena in calcestruzzo	50	1.35	0.74	1500
Blocco in laterizio	280	0.77	0.84	1000
Intonaco interno	25	0.89	1	1600
<b>Totale spessore</b>	<b>558</b>		<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.468</b>

<b>Solaio PT-P1 (solaio laterizio/cemento) - Legno Rovere</b>				
<b>Materiale</b>	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Conduttività termica [W/(m K)]</b>	<b>Capacità termica [kJ/(kg K)]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Legno Rovere</b>	10	0.18	2.39	650
<b>Massetto sabbia-cemento</b>	64	1	0.88	1800
<b>Pannello isolante in EPS – Compact Basic</b>	21	0.035	1.26	25
<b>Polymant</b>	8	0.04	1.3	35
<b>Calcestruzzo alleggerito con EPS riciclato</b>	100	0.17	1.2	300
<b>Soletta piena in calcestruzzo</b>	50	1.35	0.74	1500
<b>Blocco in laterizio</b>	280	0.77	0.84	1000
<b>Intonaco interno</b>	25	0.89	1	1600
<b>Totale spessore</b>	<b>558</b>		<b>U [W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>0.458</b>

Le strutture del solaio contro terra invece si differenziano per i due appartamenti e proprio questo caratterizza lo studio. In questi due solai sono stati utilizzati sistemi di impianto a pavimento diversi, quindi differenti pannelli isolanti e soprattutto massetti diversi sia nei materiali che nello spessore.



**Fig. 3.12 – Solaio contro terra appartamento 1**



**Fig. 3.13 – Solaio contro terra appartamento 2**

**Solaio contro terra – appartamento 1 – Gres**

<b>Materiale</b>	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Conduttività termica [W/(m K)]</b>	<b>Capacità termica [kJ/(kg K)]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Gres</b>	10	1.3	0.84	2300
<b>Massetto sabbia-cemento</b>	62	1	0.88	1800
<b>Pannello isolante in EPS – Simple Grey</b>	42	0.031	1.26	30
<b>Polymant</b>	5	0.04	1.3	35
<b>Calcestruzzo alleggerito con Politerm 300</b>	100	0.08	1.4	315
<b>Calcestruzzo per solaio</b>	450	1.35	0.74	1500
<b>Calcestruzzo magro</b>	100	2.52	0.88	1500
<b>Totale spessore</b>	769		U [W/m <sup>2</sup> K]	0.314

**Solaio contro terra – appartamento 2 – Gres**

<b>Materiale</b>	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Conduttività termica [W/(m K)]</b>	<b>Capacità termica [kJ/(kg K)]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Gres</b>	10	1.3	0.84	2300
<b>Massetto Qmas Slim Bio</b>	32	1.87	0.999	2000
<b>Pannello isolante in EPS – Renova</b>	20	0.023	1.26	35
<b>Polymant</b>	5	0.04	1.3	35
<b>Calcestruzzo alleggerito con Politerm 300</b>	100	0.08	1.4	315
<b>Calcestruzzo per solaio</b>	450	1.35	0.74	1500
<b>Calcestruzzo magro</b>	100	2.52	0.88	1500
<b>Totale spessore</b>	717		U [W/m <sup>2</sup> K]	0.356

**Solaio contro terra – appartamento 1 – Legno Rovere**

<b>Materiale</b>	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Conduttività termica [W/(m K)]</b>	<b>Capacità termica [kJ/(kg K)]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Legno Rovere</b>	10	0.18	2.39	650
<b>Massetto sabbia-cemento</b>	62	1	0.88	1800
<b>Pannello isolante in EPS – Simple Grey</b>	42	0.031	1.26	30
<b>Polymant</b>	5	0.04	1.3	35
<b>Calcestruzzo alleggerito con Politerm 300</b>	100	0.08	1.4	315
<b>Calcestruzzo per solaio</b>	450	1.35	0.74	1500
<b>Calcestruzzo magro</b>	100	2.52	0.88	1500
<b>Totale spessore</b>	769		U [W/m <sup>2</sup> K]	0.309

**Solaio contro terra – appartamento 2 – Legno Rovere**

<b>Materiale</b>	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Conduttività termica [W/(m K)]</b>	<b>Capacità termica [kJ/(kg K)]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Legno Rovere</b>	10	0.18	2.39	650
<b>Massetto Qmas Slim Bio</b>	32	1.87	0.999	2000
<b>Pannello isolante in EPS – Renova</b>	20	0.023	1.26	35
<b>Polymant</b>	5	0.04	1.3	35
<b>Calcestruzzo alleggerito con Politerm 300</b>	100	0.08	1.4	315
<b>Calcestruzzo per solaio</b>	450	1.35	0.74	1500
<b>Calcestruzzo magro</b>	100	2.52	0.88	1500
<b>Totale spessore</b>	717		U [W/m <sup>2</sup> K]	0.350

Dalle schematizzazioni dei pacchetti solaio contro terra illustrate precedentemente si nota che le differenze stanno nel tipo di massetto e nel pannello radiante.

Nell'appartamento 1 è stato realizzato un tradizionale massetto in sabbia cemento, mentre nell'appartamento 2 è stato deciso di installare un massetto per la posa su impianti radianti ribassati a pavimento. Per questo motivo come materiale è stato utilizzato Q-Mas Slim Bio, un massetto autolivellante a basso spessore a base di anidrite naturale.

Questo materiale permette di ridurre la distanza tra la tubazione del sistema radiante e la superficie calpestabile delle stanze.

Per compensare almeno in parte il minore isolamento del massetto e quindi non creare perdite di calore verso il basso eccessive tenendo comunque un basso spessore, nell'appartamento 2 sono stati posati pannelli Renova 42 che hanno caratteristiche isolanti migliori rispetto a quelli installati nell'appartamento 1, cioè i Simle Grey 64.

I prossimi capitoli si focalizzeranno sull'analizzare i comportamenti termici di questi differenti sistemi radianti sia nello specifico come pacchetto solaio tramite il programma Heat2, sia all'interno del sistema edificio tramite TRNSYS.

## ***CAPITOLO 4***

### **DEFINIZIONE E ANALISI DEI PACCHETTI SOLAIO CONTRO-TERRA CON HEAT2**

#### **4.1 PREMESSA**

Heat2 è un software con il quale si può valutare, in maniera bidimensionale, scambi di calore dinamici o statici all'interno di oggetti che possono essere descritti in una griglia rettangolare.

Questo è particolarmente adatto a valutare varie applicazioni all'interno delle strutture di edifici:

- problemi generali di conduzione termica
- analisi dei ponti termici
- calcolo della trasmittanza delle strutture
- stima della temperatura delle superfici (rischi di creazione di condensa)
- calcolo delle perdite di calore verso il terreno

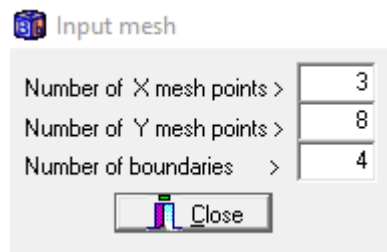
- ottimizzazione dell'isolamento
- analisi di sistemi di riscaldamento a pavimento
- analisi dei serramenti

## 4.2 UTILIZZO DI HEAT2

Nel lavoro di tesi Heat2 è stato utilizzato per valutare il funzionamento dei due diversi sistemi di riscaldamento, installati nel solaio contro terra, descritti nel capitolo precedente, quindi quelli riguardanti l'appartamento 1 e 2 sia con passo tra i tubi di 5 cm che 10 cm.

Le operazioni eseguite con tale programma sono state:

- definizione struttura con l'inserimento dei valori di "Input mesh": si definiscono il numero di variazioni di materiale in direzione x e y e il numero di contorni della struttura.



**Fig. 4.1 – Input mesh**

Definiti questi valori si descrivono gli spessori dei materiali per ogni valore unitario di mesh sia in direzione x che y, quindi per esempio in direzione x si definisce la misura tra 0 e 1, tra 1 e 2 e così via. Stessa cosa per i punti in direzione y.

Mesh in x-direction

Between	Length [m]	Cells	Expansion
0 and 1 >	0.017500	5	1.0000
1 and 2 >	0.015000	4	1.0000
2 and 3 >	0.017500	5	1.0000

Lx=0.05    Nx=14    Spread

Fig. 4.2 – Mesh in direzione x

Mesh in y-direction

Between	Length [m]	Cells	Expansion
0 and 1 >	0.100000	20	1.0000
1 and 2 >	0.450000	90	1.0000
2 and 3 >	0.100000	20	1.0000
3 and 4 >	0.005000	2	1.0000
4 and 5 >	0.042000	10	1.0000
5 and 6 >	0.015000	4	1.0000
6 and 7 >	0.047000	10	1.0000
7 and 8 >	0.010000	2	1.0000

Ly=0.769    Ny=158    Spread

Fig. 4.3 – Mesh in direzione y

- inserimento dei valori di conducibilità termica dei vari materiali: usando le coordinate cartesiane date dai punti “Mesh”: si definisce il nome del materiale della relativa area e il valore di conducibilità termica, in questo caso uguale in direzione x e y ipotizzando i materiali omogenei.

Thermal properties

Number of areas > 8     Set Ly to Lx at input o

n	Lc	Lc J1	Hi	Hi J2	Material name (pull edges to resize list)	Lambda x [W/(m·K)]	Lambda y [W/(m·K)]
Basic					massetto sc	1.0000000	1.0000000
1	0	0	3	1	cls magro	2.5200000	2.5200000
2	0	1	3	2	cls	1.3500000	1.3500000
3	0	2	3	3	politem 300	0.0800000	0.0800000
4	0	3	3	4	polymant	0.0400000	0.0400000
5	0	4	3	5	pannello eps	0.0320000	0.0320000
6	0	5	1	6	massetto sc	1.0000000	1.0000000
7	2	5	3	6	massetto sc	1.0000000	1.0000000
8	0	7	3	8	gres	1.3000000	1.3000000

Fig. 4.4 – Inserimento proprietà termiche

- Descrizione del contorno della struttura tramite i valori delle coordinate x e y sul piano cartesiano dei 4 punti che definiscono gli angoli della struttura intesa come un rettangolo. Ad ogni lato del contorno viene definito un numero, in questo caso da 1 a 4 essendo la struttura a forma rettangolare e si definiscono le condizioni nel caso in cui ci sia scambio termico attraverso tale contorno. Il contorno 1 è quello inferiore, mentre il numero 3 quello superiore. I solai descritti avranno scambio termico attraverso la superficie superiore con l'aria della stanza (contorno 3) e quella inferiore con il terreno (contorno 1), quindi si definiscono dei valori costanti di temperatura dell'aria della stanza e del terreno e le resistenze di scambio per convezione in  $m^2K/W$ .

Il contorno definito come "1" ha valore di resistenza di scambio per convezione pari a  $0 [m^2K/W]$  perché a contatto diretto con il terreno, mentre per il contorno "3" il valore è di  $0.125 [m^2K/W]$  dato dall'operazione:  $\frac{1}{8 [\frac{W}{m^2K}]}$ .

Description of boundaries ✕

Bound	I start	J start
1	0	0
2	3	0
3	3	8
4	0	8

**Fig. 4.5 – Inserimento vertici dei contorni**

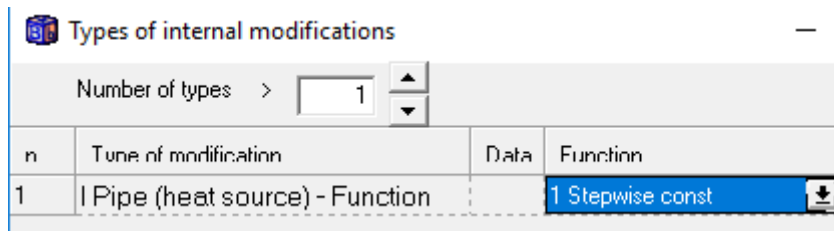
Boundary conditions

Number of types >

n	type	Bounds	funcion	Q [W/m2]	Temp [C]	Res. [m2K/W]
1	Q=const	Default		0		
2	T=const	3			20	0.125000
3	T=const	1			12	0.000000

**Fig. 4.6 – Inserimento condizioni al contorno**

- definizione del tipo di sorgente di calore: nella simulazione è stato scelto di definire il valore di flusso termico uscente dal tubo presente nell'impianto. Per questo nella finestra "Types of internal modifications" è stato inserito "I Pipe" che approssima un cerchio con flusso termico uscente non costante a cui definisco una funzione che a intervalli di 10 minuti, per la durata di una settimana, indica il valore del flusso uscente dal tubo.



**Fig. 4.7 – Definizione del tipo di sorgente di calore**

Per quanto riguarda i valori dei flussi termici sono stati calcolati partendo da dati del progetto ricavati dai vari allegati presenti nella documentazione:

- per il sistema di riscaldamento a pavimento con passo tra i tubi 5 cm i dati relativi al bagno A-7 (quello con finestra) dell'appartamento 1 sono i seguenti:

Lunghezza circuito  $L = 116.34$  [m]

$c_p = 4186$  [J/Kg K]

$\Delta T = 5$  [°C]

$\dot{m} = 95$  [l/h]  $\rightarrow \frac{95}{3600} = 0.0264$  [Kg/s]

$\frac{P}{L} = \frac{0.0264 \cdot 4186 \cdot 5}{116.34} = 4.75$  [W/m]

- per il sistema di riscaldamento a pavimento con passo tra i tubi 5 cm si usano i dati relativi alla camera A-2 (quella confinante con il soggiorno) dell'appartamento 1.

Dati:

Lunghezza circuito  $L = 95.35$  [m]

$c_p = 4186$  [J/Kg K]

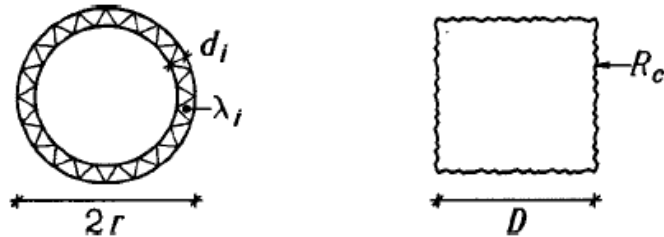
$\Delta T = 5$  [°C]

$\dot{m} = 153$  [l/h]  $\rightarrow \frac{153}{3600} = 0.0425$  [Kg/s]

$\frac{P}{L} = \frac{0.0425 \cdot 4186 \cdot 5}{95.35} = 9.33$  [W/m]

Tra le varie aree definite nella struttura si indica quale sia quella corrispondente alla tubazione dove scorre il fluido per il riscaldamento della stanza. Nel programma le aree stabilite sono tutte rettangolari o quadrate quindi è stata definita un'area e una

resistenza equivalente della tubazione in modo da passare da un'area circolare ad un quadrata:



**Fig. 4. – Approssimazione della tubazione in forma quadrata**

$$\lambda_i \text{ (conducibilità tubo)} = 0.35 \text{ [W/mK]}$$

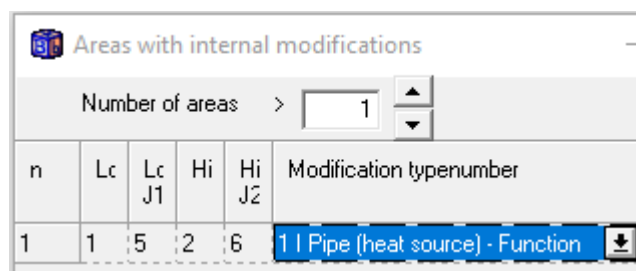
$$d_i \text{ (spessore tubo)} = 2 \text{ [mm]} = 0.002 \text{ [m]}$$

$$2r \text{ (diametro esterno tubo)} = 17 \text{ [mm]} \rightarrow r = \frac{2r}{2} = 8.5 \text{ [mm]} = 0.0085 \text{ [m]}$$

$$D \text{ (lato quadrato equivalente)} = \sqrt{\pi} * r = \sqrt{\pi} * 0.0085 = 0.01505 \text{ [m]} = 15.05 \text{ [mm]}$$

$$R_c \text{ (resistenza quadrato equivalente)} = \frac{2 * D * \ln \frac{r}{(r-d_i)}}{\pi * \lambda_i} =$$

$$= \frac{2 * 0.01505 * \ln \frac{0.0085}{(0.0085-0.002)}}{\pi * 0.35} = 0.00734 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$



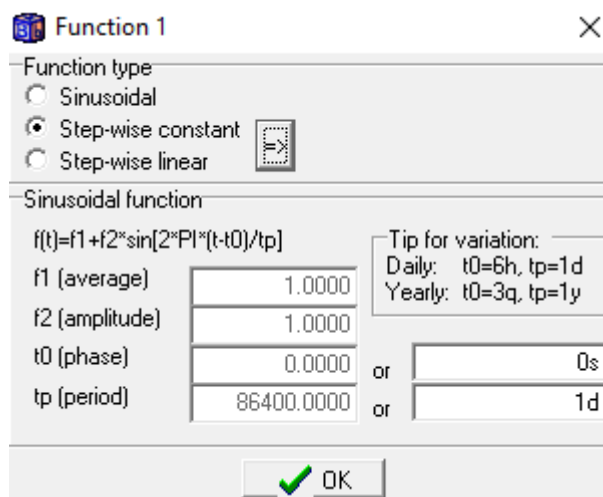
**Fig. 4.8 – Definizione posizione della tubazione all'interno del pacchetto solaio**

- inserimento della funzione che definisce il flusso termico in uscita dalla tubazione. E' stata scelta una "Step-wise constant", funzione che ad ogni intervallo di tempo stabilito fornisce un valore costante, in questo caso del flusso termico. L'intervallo scelto è stato di 5 min per la durata di una settimana. Si è voluto simulare il

funzionamento dell'impianto come in una "giornata tipo": acceso dalle 6 fino alle 9 e dalle 17 alle 23, mentre spento nelle ore restanti. Quindi ad ogni intervallo di tempo nella funzione è associato un valore di flusso: 0 nel caso di impianto spento, mentre 4.75 o 9.33 se acceso.

0d5h35m 0  
 0d5h40m 0  
 0d5h45m 0  
 0d5h50m 0  
 0d5h55m 0  
 0d6h0m 9.33  
 0d6h5m 9.33  
 0d6h10m 9.33  
 0d6h15m 9.33  
 0d6h20m 9.33

**Fig. 4.9 – Esempio di funzione utilizzata per descrivere andamento del flusso termico**



**Fig. 4.10 – Inserimento funzione**

- scelta dei risultati da ottenere: nella finestra "record" vengono definiti i valori da ricavare durante la simulazione.

In questo caso sono stati cinque, tre temperature e due flussi termici:

1. temperatura sulla superficie superiore (pavimento), nel punto centrale (T1)
2. flusso termico attraverso la superficie superiore (Q3)
3. flusso termico attraverso la superficie inferiore (Q1)
4. temperatura sulla superficie superiore (pavimento), nell'estremo sinistro (T2)
5. temperatura sulla superficie superiore (pavimento), nell'estremo destro (T3)

Per quanto riguarda le temperature sono stati inseriti i valori delle coordinate x e y dei tre punti citati precedentemente, mentre per quanto riguarda i flussi termici sono stati indicati il numero di riferimento del contorno corrispondente alle due superfici.

Record

File Edit Actions Graphics

Record enabled    Update interval    Show graphics for column:

Number of columns >  (Max=25)

Col	Type of output	Data	x [m]	y [m]
1	T, point (x,y)		0.050000	0.768000
2	Q, sum of boundaries i1, i2... [W/m]	...		
3	Q, sum of boundaries i1, i2... [W/m]	...		
4	T, point (x,y)		0.001000	0.768000
5	T, point (x,y)		0.099000	0.768000

**Fig. 4.11 – Risultati da ottenere**

I risultati sono stati ricavati ipotizzando una temperatura costante sopra la pavimentazione: le valutazioni sono state fatte con le temperature 10°C, 12°C, 15°C, 18°C e 20°C. Dai valori ottenuti sono stati creati dei grafici per comprendere meglio il funzionamento: della temperatura T1, del flusso termico Q3 e della derivata dT/dt.

I valori ricavati da dT/dt permettono di vedere quanto velocemente cresce la temperatura in fase di riscaldamento. La derivata è stata calcolata nel periodo serale del settimo giorno, dove il comportamento è maggiormente stabile perché meno influenzato dai valori di inizio simulazione. I risultati di tale calcolo sono i valori medi di crescita di temperatura al secondo, valori medi dell'intervallo di cinque minuti che è quello imposto nel programma per la definizione dei risultati.

### 4.3 I PACCHETTI SOLAIO CONTRO TERRA: MATERIALI E VISTA TERMICA

Le prossime figure mostrano come risultano definiti, dal punto di vista dei materiali, i quattro pacchetti solaio analizzati attraverso il programma Heat2 e si può vedere visivamente il comportamento termico nelle strutture. La vista termica è presa nel momento in cui la temperatura superficiale risulta massima, quindi per quanto riguarda l'appartamento 1 è 6d23h5m, mentre per l'appartamento 2 è 6d23h.

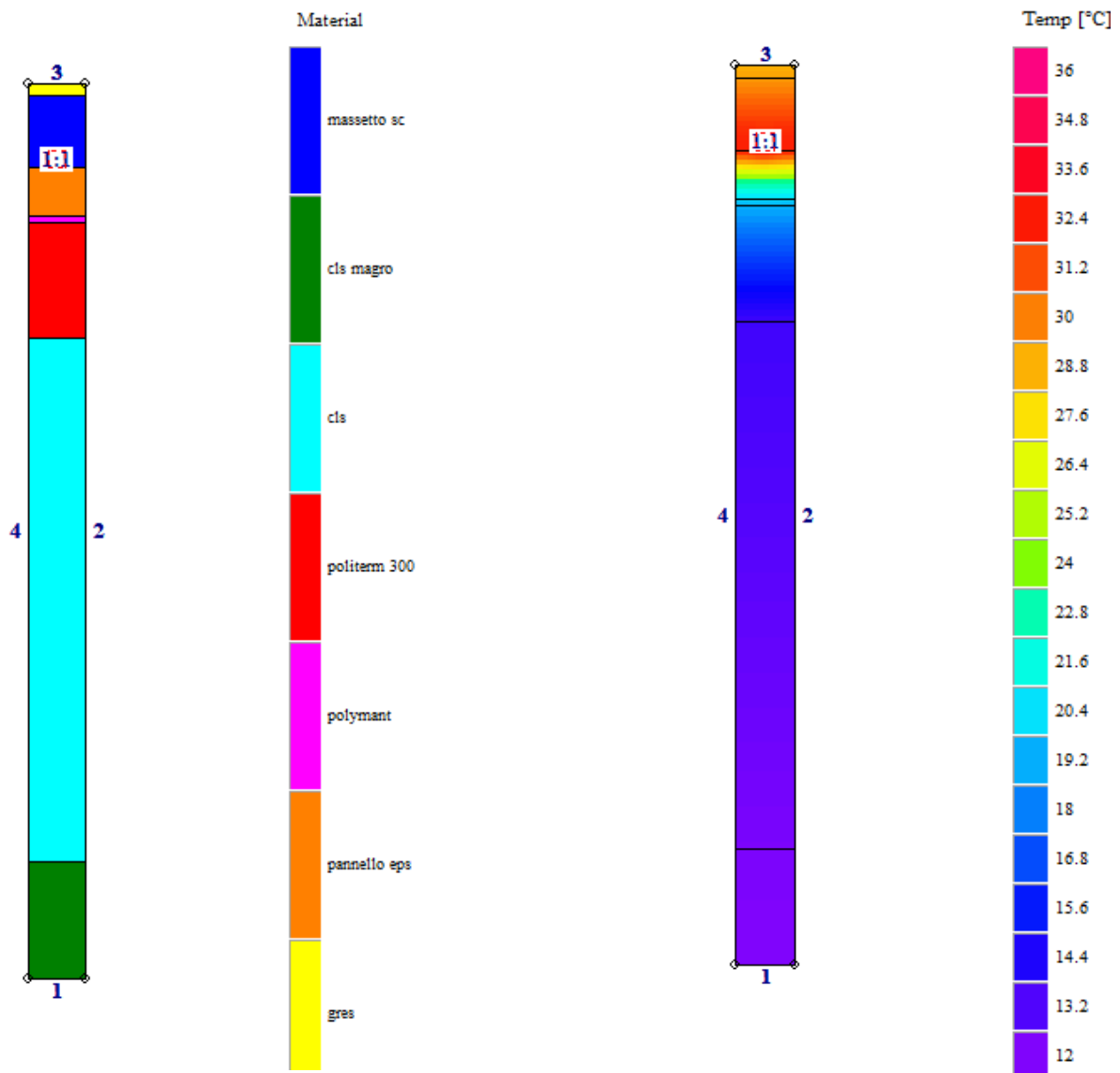
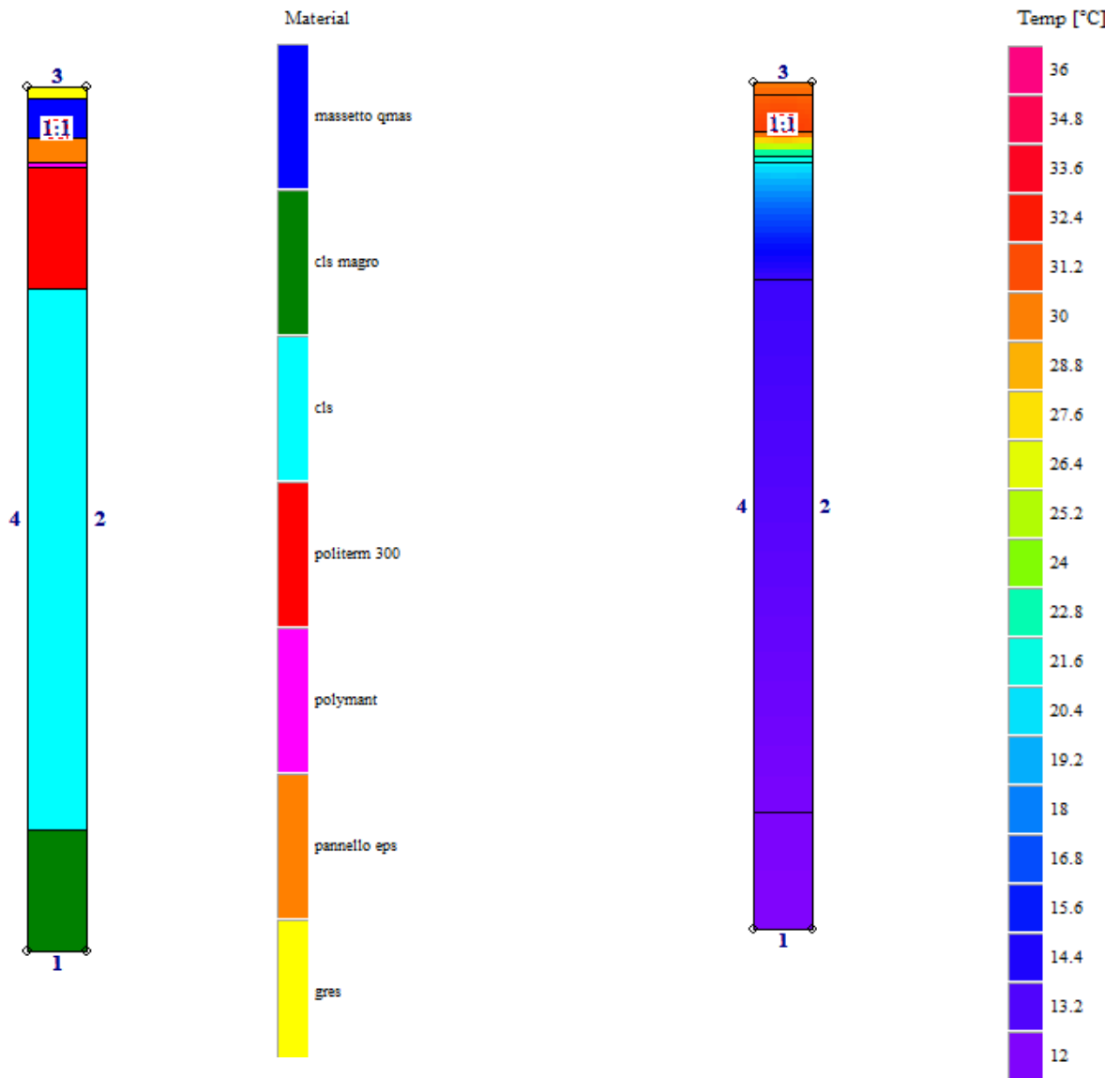


Fig. 4.12 – Heat2: rappresentazione materiali e vista termica del pacchetto Bagno appartamento 1



**Fig. 4.13 – Heat2: rappresentazione materiali e vista termica del pacchetto Bagno appartamento 2**

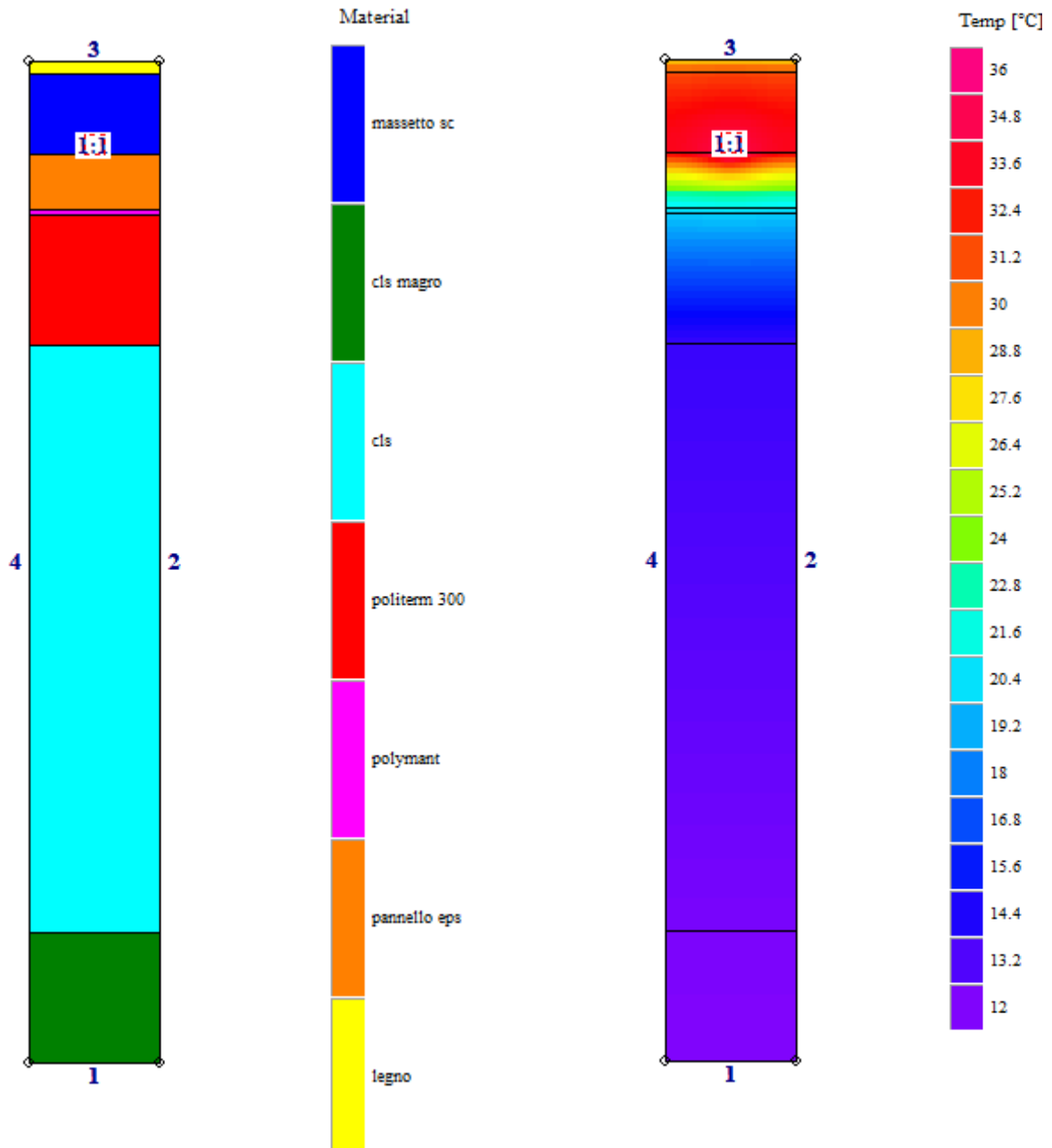
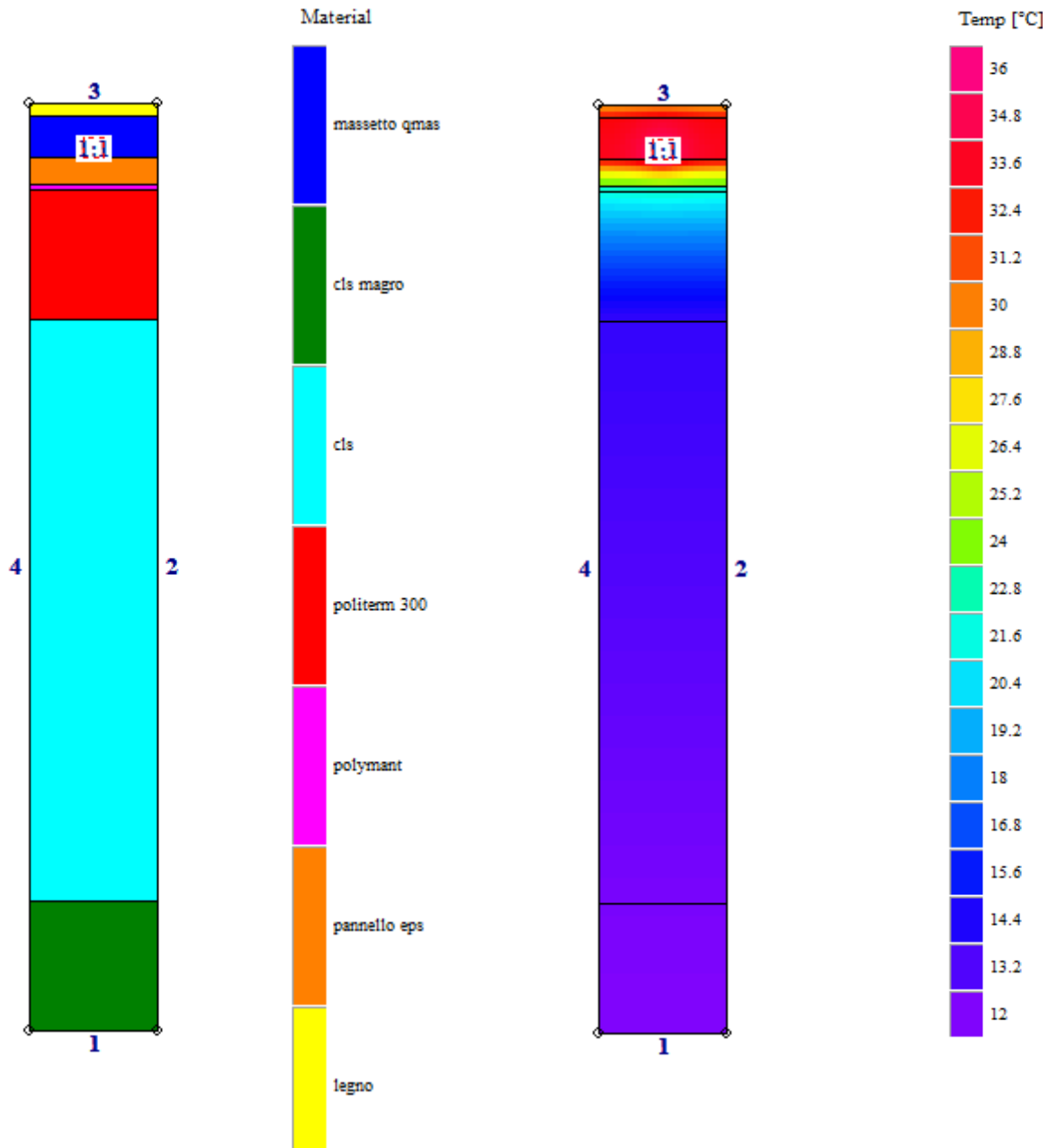


Fig. 4.14 – Heat2: rappresentazione materiali e vista termica del pacchetto Camera appartamento 1



**Fig. 4.15 – Heat2: rappresentazione materiali e vista termica del pacchetto Camera appartamento 2**

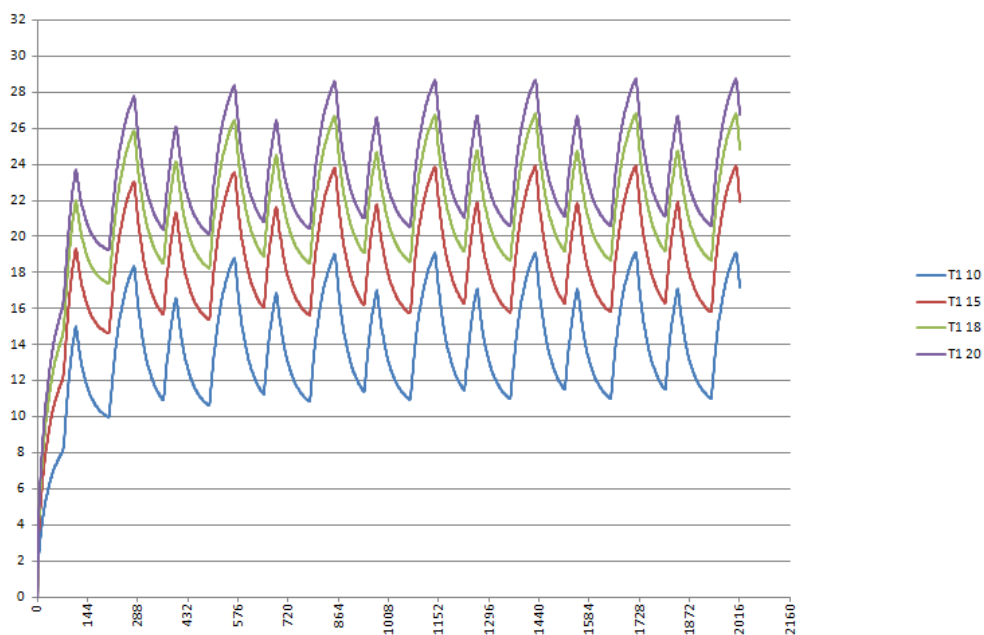
## 4.4 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Le simulazioni effettuate rilevano le caratteristiche di funzionamento dell'impianto nell'arco di una settimana. I valori del primo giorno sono particolarmente influenzati dalle condizioni iniziali imposte in fase di preparazione della simulazione, quindi sono da considerare irrilevanti per l'analisi dell'impianto.

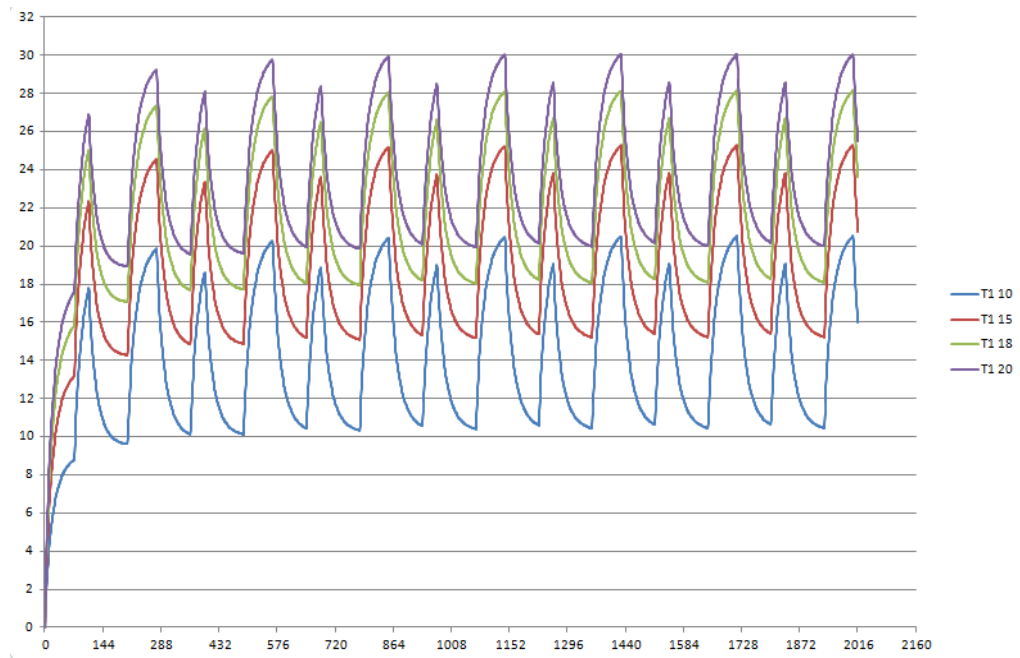
Per valutare i risultati verranno illustrati i grafici ricavati in Excel dai dati elaborati da Heat2 e i valori significativi delle varie caratteristiche.

Per poter analizzare e comprendere al meglio il comportamento termico dei vari pacchetti sono state fatte varie simulazioni ipotizzando una temperatura costante sopra la pavimentazione: le valutazioni sono state fatte con le temperature 10°C, 12°C, 15°C, 18°C e 20°C. Dai valori ottenuti sono stati creati dei grafici per comprendere meglio il funzionamento: della temperatura T1, del flusso termico Q3 e della derivata  $dT/dt$ .

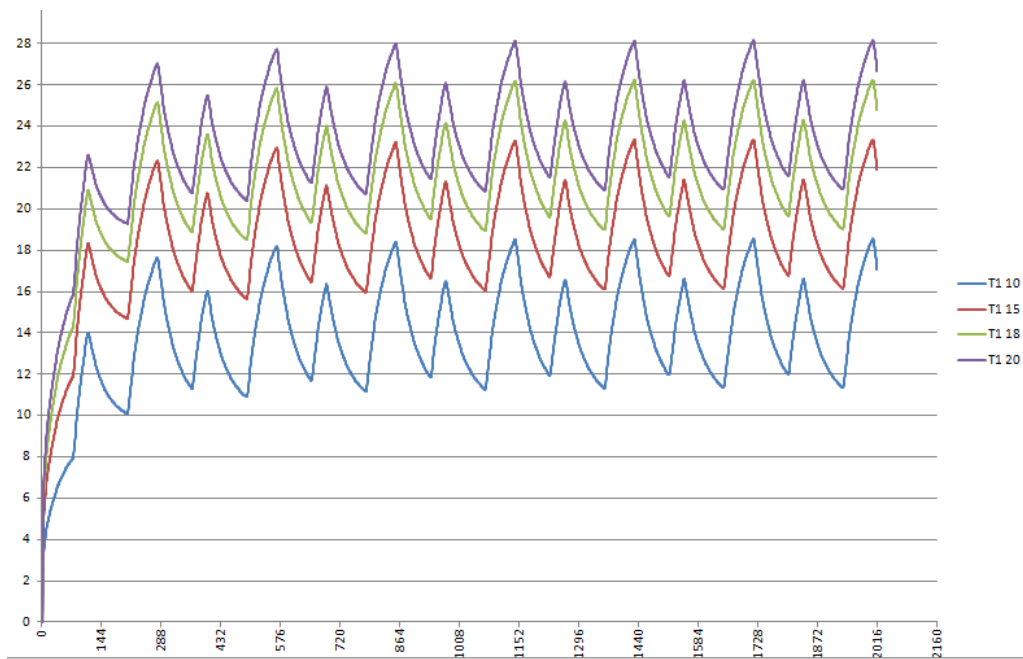
Grafici settimanali della temperatura T1:



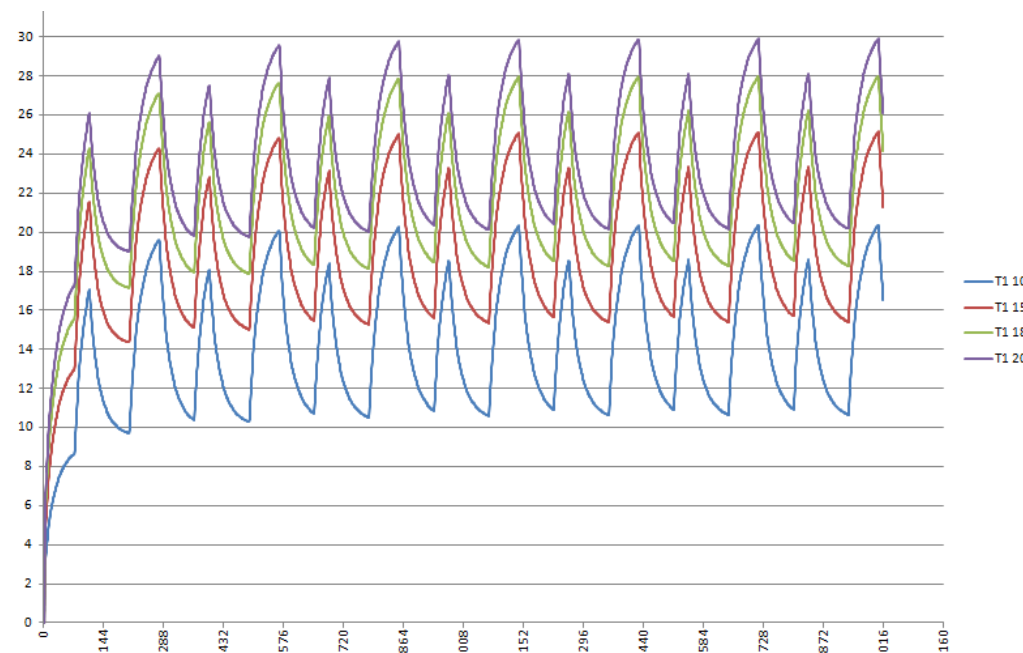
**Fig. 4.16 - Grafico dell'andamento di T1 – pacchetto Bagno appartamento 1**



**Fig. 4.17 - Grafico dell'andamento di T1 – pacchetto Bagno appartamento 2**



**Fig. 4.18 - Grafico dell'andamento di T1 – pacchetto Camera appartamento 1**



**Fig. 4.19 - Grafico dell'andamento di T1 – pacchetto Camera appartamento 2**

I grafici che rappresentano l'andamento di T1 ci mostrano le due aree di funzionamento dell'impianto (mattino e sera) attraverso le zone di crescita della temperatura. Nel diagramma si ha nell'asse Y i valori di temperatura in [°C] mentre nell'asse X il tempo, questo è suddiviso in intervalli di 144 unità che rappresentano 12 ore. Si notano i due valori di picco, quello della fase di riscaldamento serale è più alto dato che il periodo di funzionamento si sviluppa per un numero maggiore di ore:

**Tab. 4.1 – Valori di picco delle temperature T1**

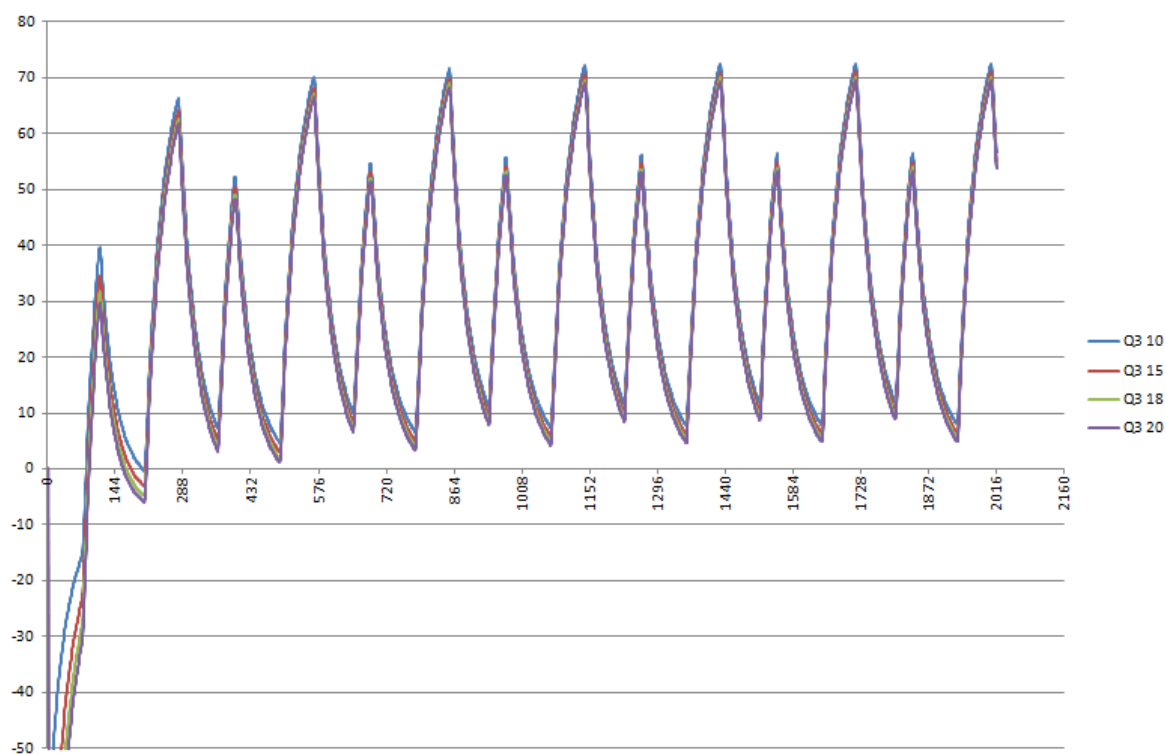
		Temperatura al di sopra della pavimentazione [°C]	10	15	18	20
<b>APP1 BAGNO1</b>	T1 <sub>MAX</sub> (sera) [°C]		19.132	23.938	26.823	28.745
	T1 <sub>MAX</sub> (mattino) [°C]		17.095	21.901	24.785	26.708
<b>APP2 BAGNO1</b>	T1 <sub>MAX</sub> (sera) [°C]		20.525	25.298	28.162	30.071
	T1 <sub>MAX</sub> (mattino) [°C]		19.068	23.841	26.765	28.614
<b>APP1 CAMERA1</b>	T1 <sub>MAX</sub> (sera) [°C]		18.566	23.369	26.25	28.171
	T1 <sub>MAX</sub> (mattino) [°C]		16.617	21.419	24.36	26.221
<b>APP2 CAMERA1</b>	T1 <sub>MAX</sub> (sera) [°C]		20.368	25.137	27.998	29.905
	T1 <sub>MAX</sub> (mattino) [°C]		18.587	23.356	26.217	28.124

La temperatura determinata sopra il contorno 3 incide sull'andamento: ci sarà allora uno scambio termico dovuto dalla differenza di temperatura, che permette un incremento più repentino della temperatura nella fase iniziale di riscaldamento della prima giornata ed una riduzione della temperatura in fase di impianto spento che non porta mai la pavimentazione al di sotto della temperatura imposta.

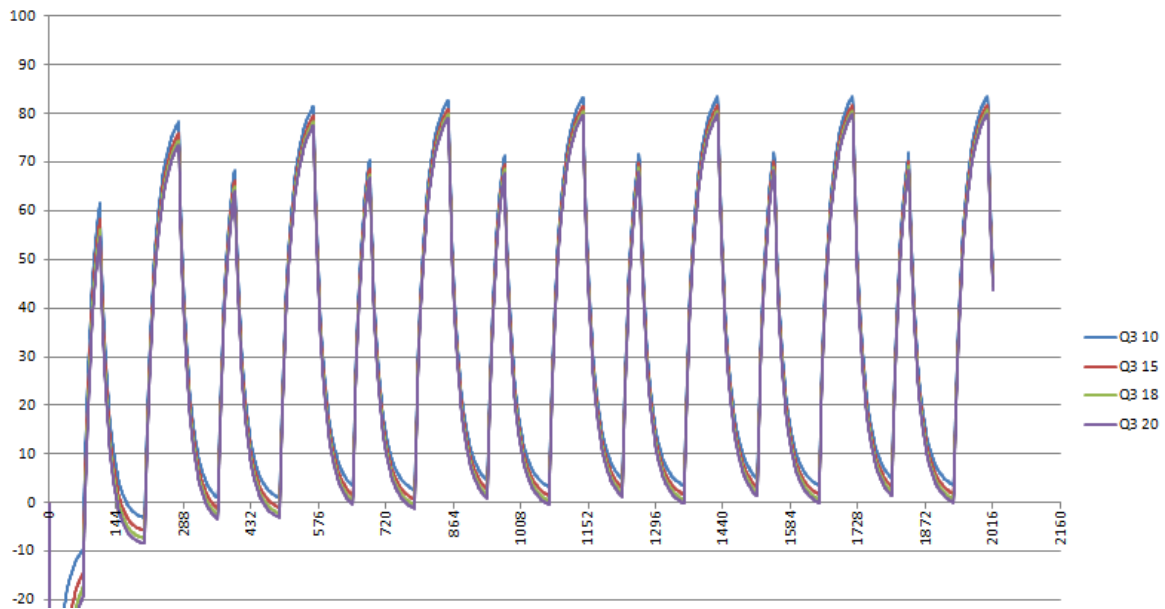
I dati delle temperature di picco ci fanno notare come dei due pacchetti solaio analizzati, quello installato nell'appartamento 2 porti la superficie della pavimentazione ad una temperatura più alta in riferimento al tempo di riscaldamento scelto.

Questo andamento si riscontra anche nei grafici rappresentanti il flusso termico passante per il contorno 3. Si notano le zone di riscaldamento attivo e il comportamento dei flussi termici conferma i valori di picco delle temperatura dato che anche per quanto riguarda il flusso termico i valori maggiori sono quelli relativi al pacchetto dell'appartamento 2.

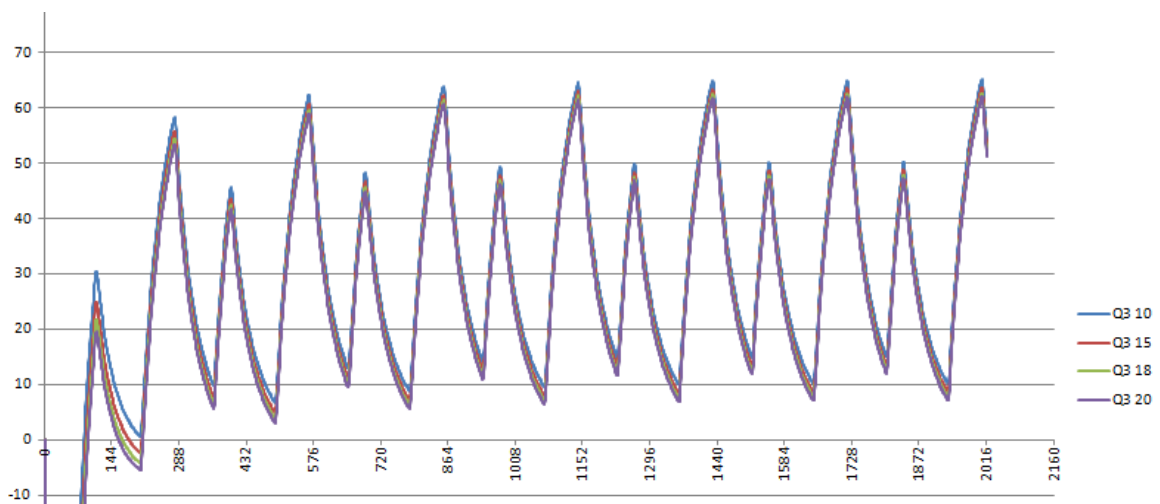
Grafici settimanali del flusso termico Q3:



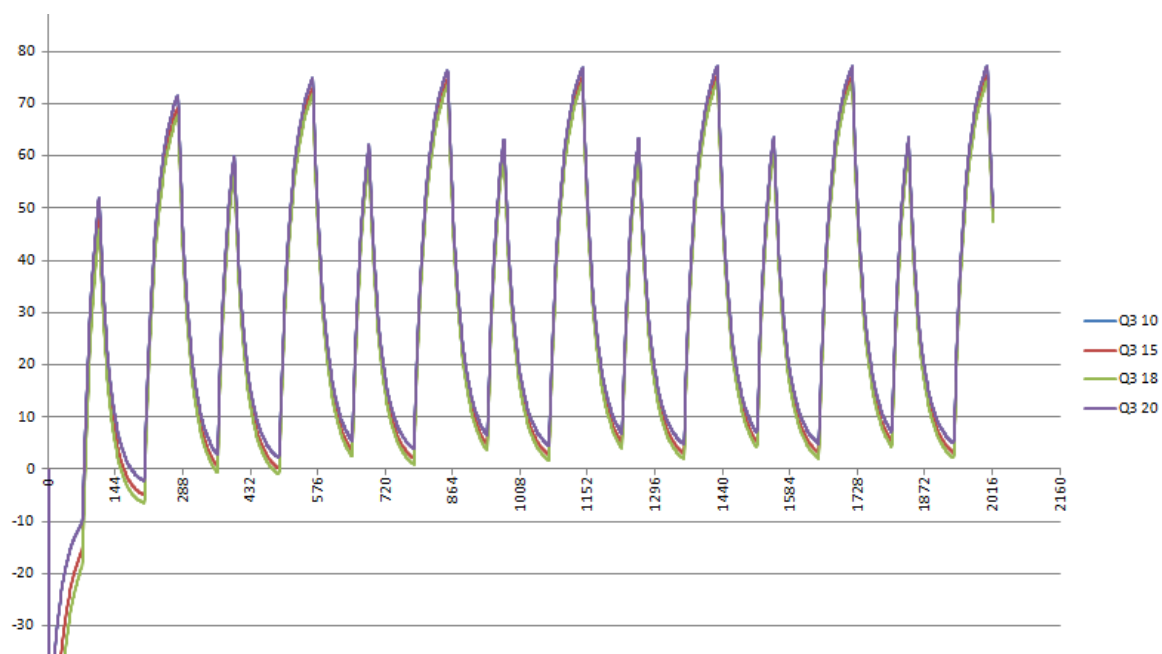
**Fig. 4.20 - Grafico dell'andamento di Q3 – pacchetto Bagno appartamento 1**



**Fig. 4.21 - Grafico dell'andamento di Q3 – pacchetto Bagno appartamento 2**



**Fig. 4.22 - Grafico dell'andamento di Q3 – pacchetto Camera appartamento 1**



**Fig. 4.23 - Grafico dell'andamento di Q3 – pacchetto Camera appartamento 2**

Sull'asse Y si hanno i valori di Q3 in  $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$  mentre sull'asse X il tempo, suddiviso in intervalli di 144 unità che rappresentano un arco temporale di 12 ore. I valori di picco delle due fasi sono:

**Tab. 4.2 – Valori di picco dei flussi termici Q3**

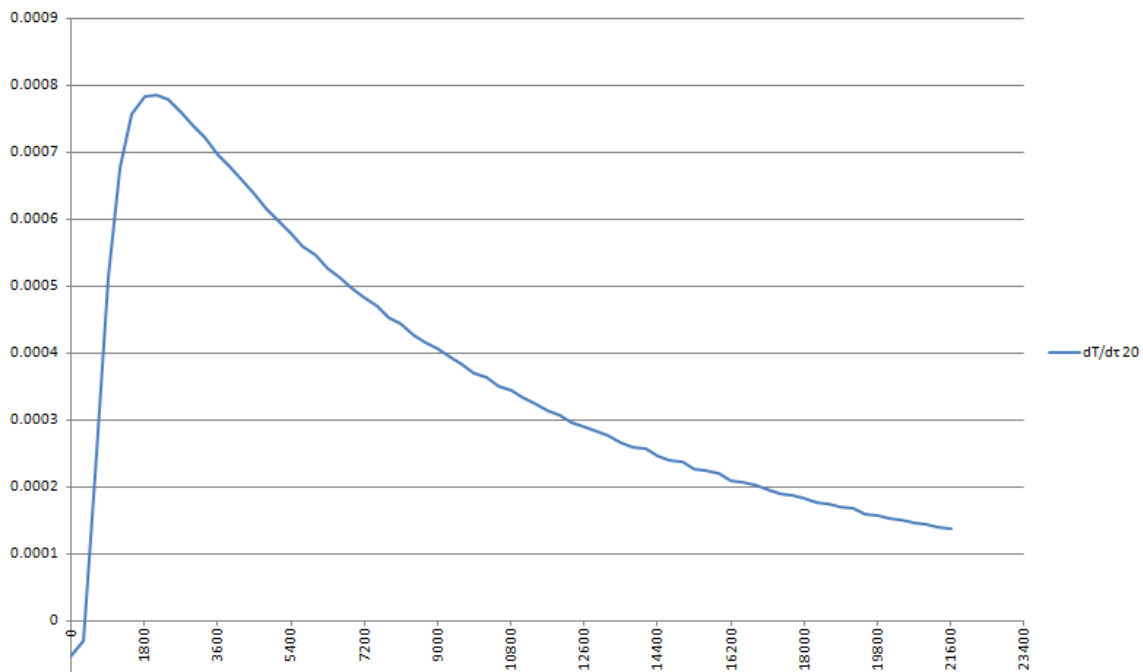
		Temperatura al di sopra della pavimentazione $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$			
		10	15	18	20
<b>APP1 BAGNO1</b>	Q3 <sub>MAX</sub> (sera) $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$	72.608	71.072	70.15	69.534
	Q3 <sub>MAX</sub> (mattino) $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$	56.412	54.874	53.95	53.336
<b>APP2 BAGNO1</b>	Q3 <sub>MAX</sub> (sera) $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$	83.596	81.79	80.708	79.986
	Q3 <sub>MAX</sub> (mattino) $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$	72.01	70.204	69.12	68.396
<b>APP1 CAMERA1</b>	Q3 <sub>MAX</sub> (sera) $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$	65.147	63.632	62.722	62.116
	Q3 <sub>MAX</sub> (mattino) $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$	50.281	48.763	47.853	47.245
<b>APP2 CAMERA1</b>	Q3 <sub>MAX</sub> (sera) $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$	72.23	75.453	74.388	73.677
	Q3 <sub>MAX</sub> (mattino) $[\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})]$	63.592	61.815	60.749	60.038

Il flusso termico con temperatura imposta più bassa raggiunge valori leggermente più alti perché ad impianto spento si avrà comunque un flusso termico dovuto alla differenza di temperatura e questa è maggiore quando il valore della temperatura imposta al di sopra della pavimentazione è minore.

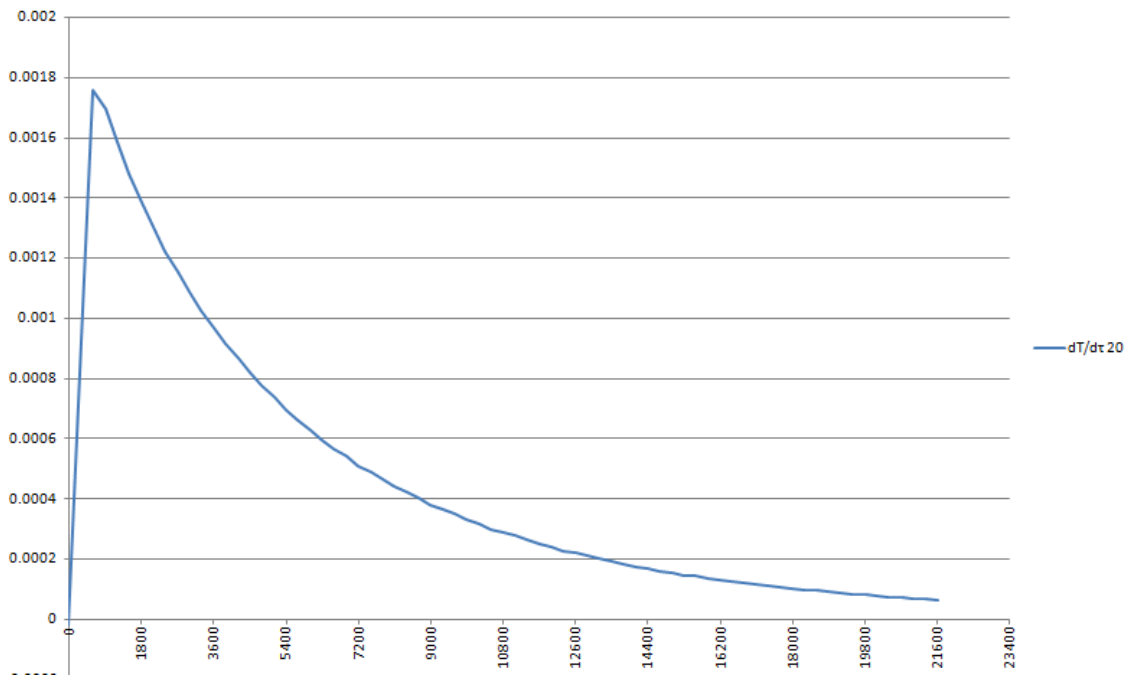
Per dare una spiegazione del differente comportamento dei due pacchetti solaio ho riportato su un grafico i valori di  $dT/d\tau$  ricavati dalla formula:  $\frac{dT}{d\tau} = \frac{(T_{n+1}-T_n)[^{\circ}C]}{300 [s]}$ , dove il numeratore riporta la differenza di temperatura tra fine e inizio dell'intervallo temporale con cui abbiamo ricavato i risultati e al denominatore si ha il valore in secondi di tale intervallo.

I calcoli sono stati eseguiti nel periodo di riscaldamento serale dell'ultimo giorno analizzato, così da avere la minore influenza possibile delle condizioni iniziali imposte.

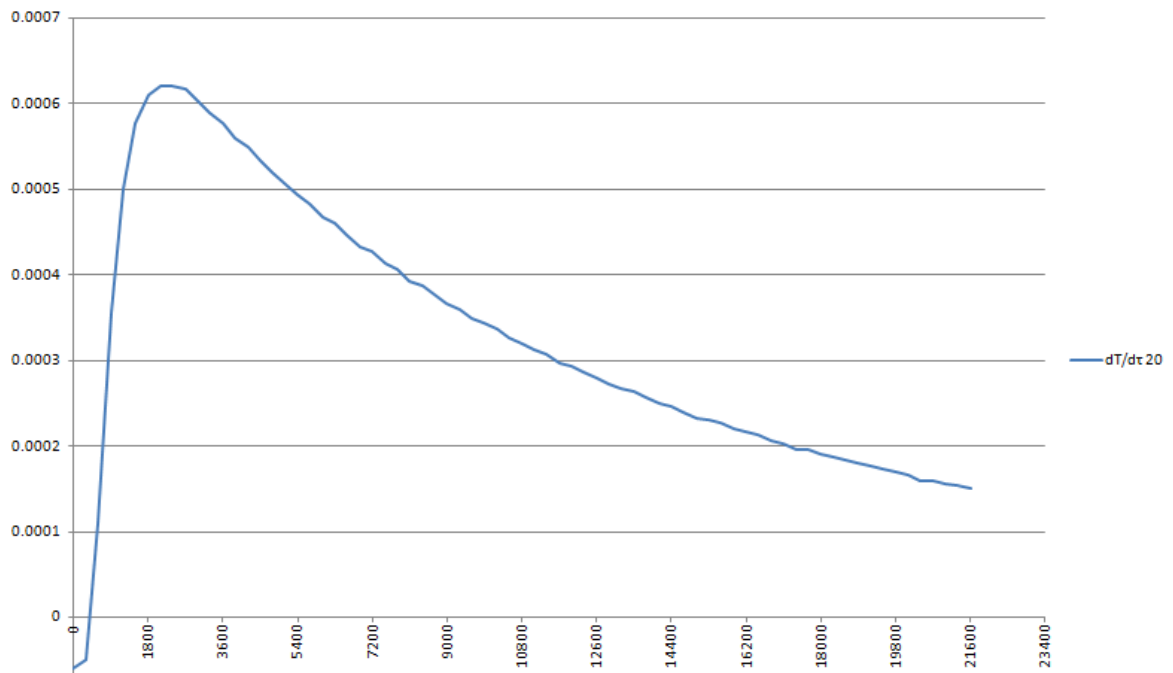
Grafici  $dT/d\tau$  :



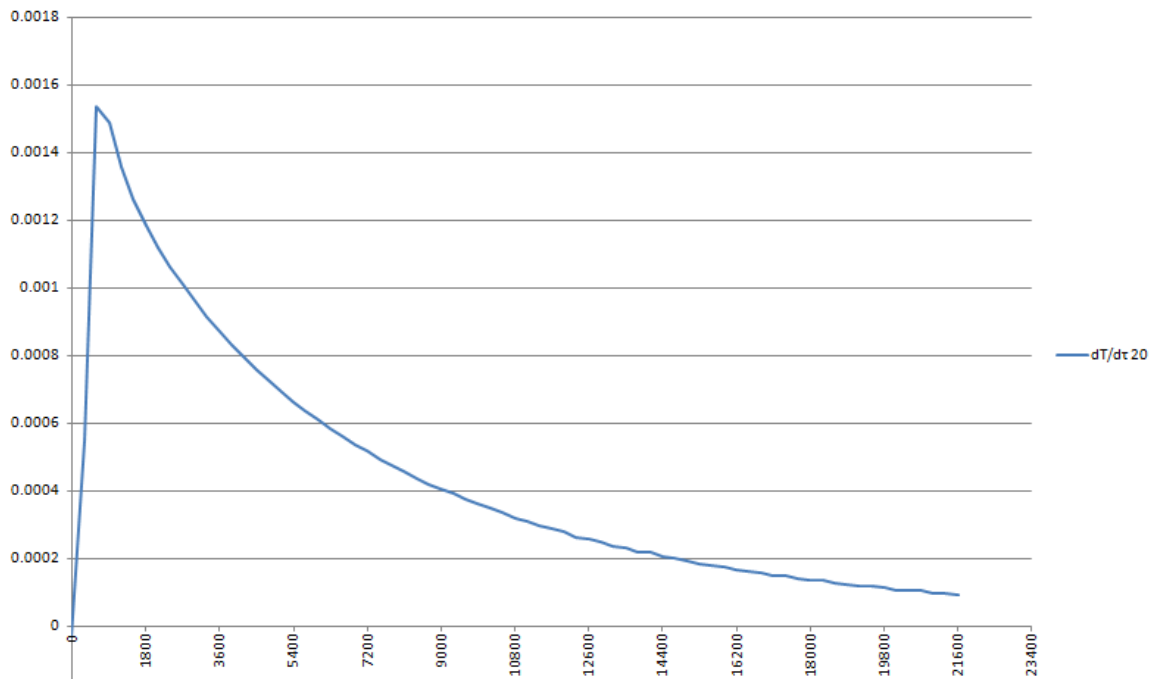
**Fig. 4.24 - Grafico  $dT/d\tau$  – pacchetto Bagno appartamento 1**



**Fig. 4.25 - Grafico  $dT/d\tau$  – pacchetto Bagno appartamento 2**



**Fig. 4.26 - Grafico  $dT/d\tau$  – pacchetto Camera appartamento 1**



**Fig. 4.27 - Grafico  $dT/d\tau$  – pacchetto Camera appartamento 2**

Suell'asse Y i valori di  $dT/d\tau$  in [K/s]] mentre sull'asse X il tempo, suddiviso in intervalli di 1800 unità che rappresentano un arco temporale di 30 minuti. I valori di picco delle due fasi sono:

**Tab. 4.3 – Valori di  $dT/d\tau$  massima e intervallo di rilevamento di tale valore**

	<b>Intervallo temporale di massimo aumento della temperatura a partire da inizio fase di riscaldamento</b>	<b>Max aumento di temperatura [K/s]</b>
<b>APP1 BAGNO1</b>	25-30 minuti	0.000783
<b>APP2 BAGNO1</b>	5-10 minuti	0.00176
<b>APP1 CAMERA1</b>	30-35 minuti	0.000620
<b>APP2 CAMERA1</b>	5-10 minuti	0.001537

I valori di picco ci mostrano come l'effetto del flusso termico in uscita dalla tubazione dell'impianto a pavimento sulla superficie superiore sia più immediato nel pacchetto solaio

installato nell'appartamento 2. Infatti si ha un valore massimo di innalzamento di temperatura specifico più alto e rilevato dopo un periodo più breve dall'inizio del riscaldamento.

L'ultima analisi fatta sui pacchetti utilizzando i risultati ricavati con Heat2 è quella riguardante il flusso termico  $Q_1$ , cioè quello attraverso la superficie inferiore del pacchetto, dovuto alla differenza di temperatura tra quella imposta sopra (10°C, 12°C, 15°C, 18°C, 20°C) il pacchetto solaio e quella sotto (12°C).

Per fare tale valutazione è stata calcolata la media dei flussi termici  $Q_1$  dell'ultimo giorno simulato. Il valore ricavato nell'ipotesi di ugual temperatura sopra e sotto il pacchetto solaio è il mio valore di riferimento ( $Q_{1rif}$ ), cioè comprende solo il flusso termico rilasciato dalla tubazione e non dovuto alla differenza di temperatura, essendo questa nulla.

Quindi per differenza tra i valori di flusso è stato ricavato il flusso termico influenzato solamente dalla differenza tra le temperature imposte ( $Q_{1\Delta T}$ ):  $Q_{1\Delta T} = Q_1 - Q_{1rif}$ .

**Tab. 4.4 – Valori di flusso termico  $Q_{1\Delta T}$  in [W/m<sup>2</sup>] dovuto da differenza di temperature imposte**

$\Delta T$ [°C] tra temperature imposte	-2	3	6	8
APP1 BAGNO1	-0.607	0.911	1.82	2.43
APP2 BAGNO1	-0.718	1.09	2.15	2.87
APP1 CAMERA1	-0.598	0.897	1.79	2.39
APP2 CAMERA1	-0.706	1.06	2.12	2.82

I valori rilevati concordano col fatto che il pacchetto solaio installato nell'appartamento 2 sia meno isolato rispetto all'altro.

Dalla differenza tra tali valori di flusso  $Q_1$ , divisa per il  $\Delta T$  di riferimento posso ricavare un valore specifico di questi, che permette di verificare se, con l'aumento della differenza di temperatura varia anche il valore medio dell'incremento di flusso e la grandezza dell'influenza di tale fattore:  $\frac{Q_{1\Delta T APP2} - Q_{1\Delta T APP1}}{\Delta T}$

**Tab. 4.5 – Valori di flusso termico specifico  $q_{1\Delta T}$  in  $[W/m^2K]$  dovuto da differenza di temperature imposte**

$\Delta T$ [ $^{\circ}C$ ] tra temperature imposte	-2	3	6	8
<b>BAGNO1</b>	-0.0555	0.0597	0.055	0.055
<b>CAMERA1</b>	-0.054	0.0543	0.055	0.0538

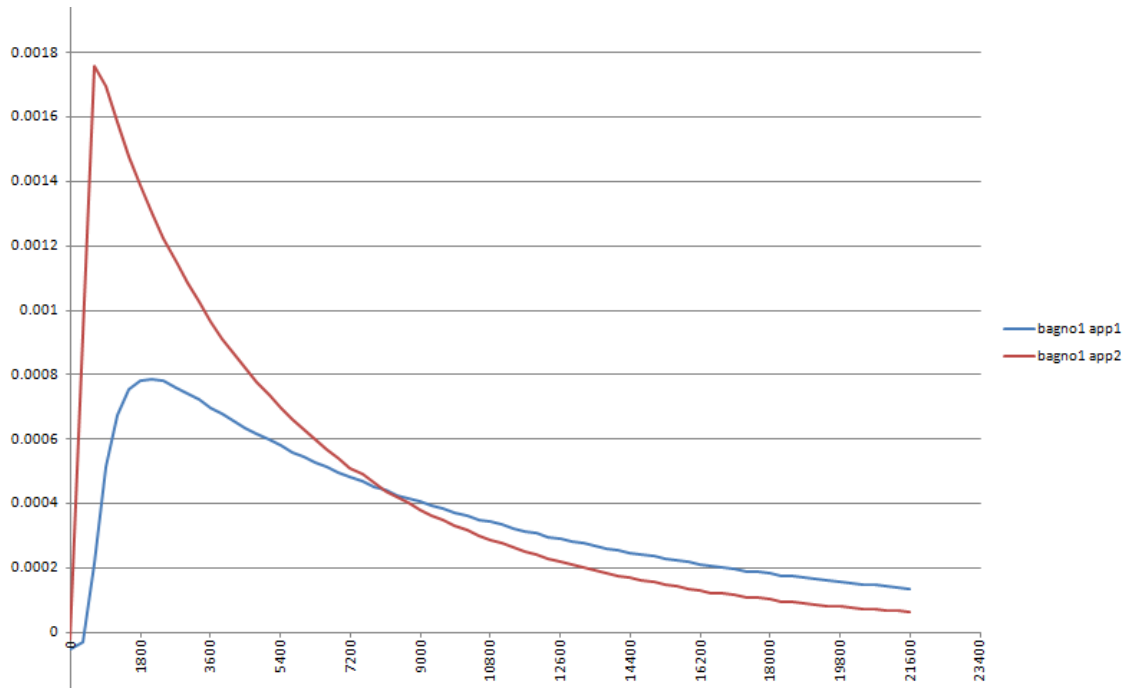
Dai risultati riportati nella tabella 4. si nota come la variazione di  $\Delta T$  praticamente non influisca sui valori di  $q_{1\Delta T}$  e che il valore di variazione del flusso specifico si attesta a circa  $0.055 [W/m^2K]$ .

#### **4.5 CONFRONTI E ANALISI**

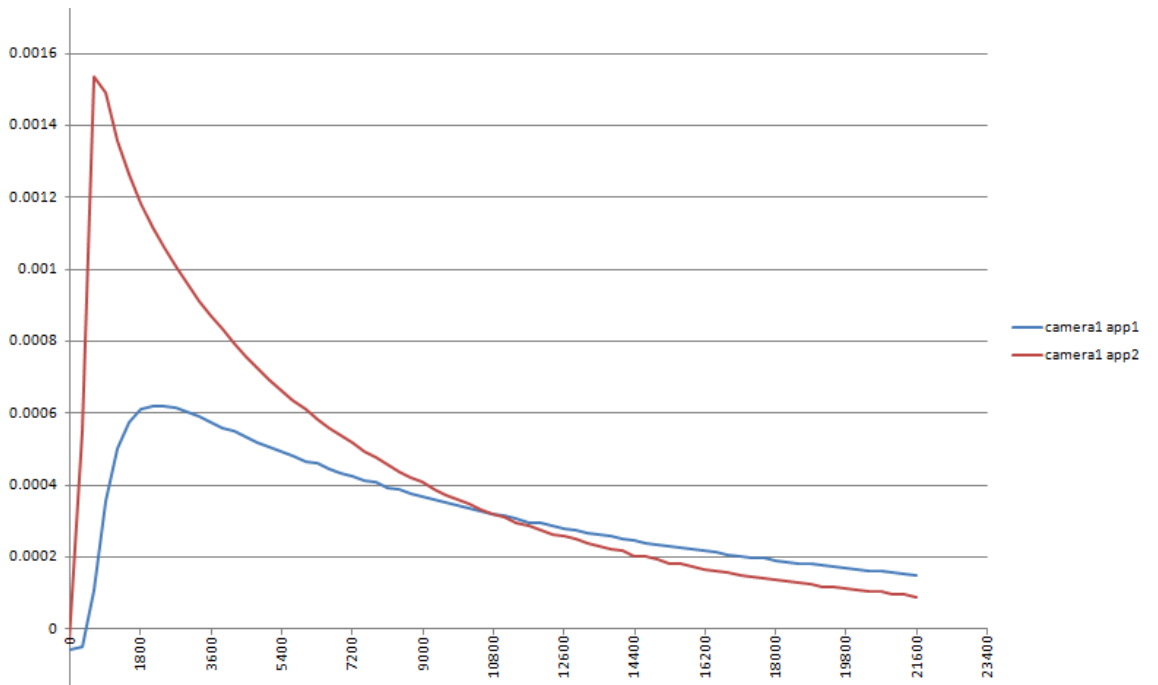
Dai risultati ottenuti per l'andamento di T1 e Q3 si evince che il pacchetto solaio dell'appartamento 2 a parità di flusso termico e per i periodi di riscaldamento ipotizzati ha un comportamento più efficace rispetto al pacchetto solaio dell'appartamento 1 dato che riesce a raggiungere in tali intervalli valori più alti di temperatura superficiale e flusso termico attraverso la pavimentazione.

La caratteristica che incide positivamente su tali risultati è la velocità di trasferimento del flusso termico dalla tubazione alla superficie del contorno 3, valutata tramite i grafici  $dT/d\tau$ . Questi fanno vedere come l'innalzamento della temperatura superficiale sia più repentino nel sistema di riscaldamento a pavimento installato nell'appartamento 2 e questo avviene perché il flusso termico attraversa in minor tempo il massetto e la pavimentazione di tale sistema.

Negativamente incide invece il fatto che il pacchetto solaio dell'appartamento 2 sia meno isolato e permetta un flusso termico verso il basso maggiore. Dai risultati di temperatura e flusso termico ottenuti posso però affermare che questo aspetto incide in maniera minore rispetto alla velocità di trasferimento del calore dell'impianto, altrimenti i risultati di funzionamento avrebbero dovuto mostrare temperature superficiali e flussi termici verso l'alto con valori maggiori per l'appartamento 1 rispetto al numero 2.



**Fig. 4.28 - Grafico di confronto  $dT/d\tau$  – pacchetto Bagno1**

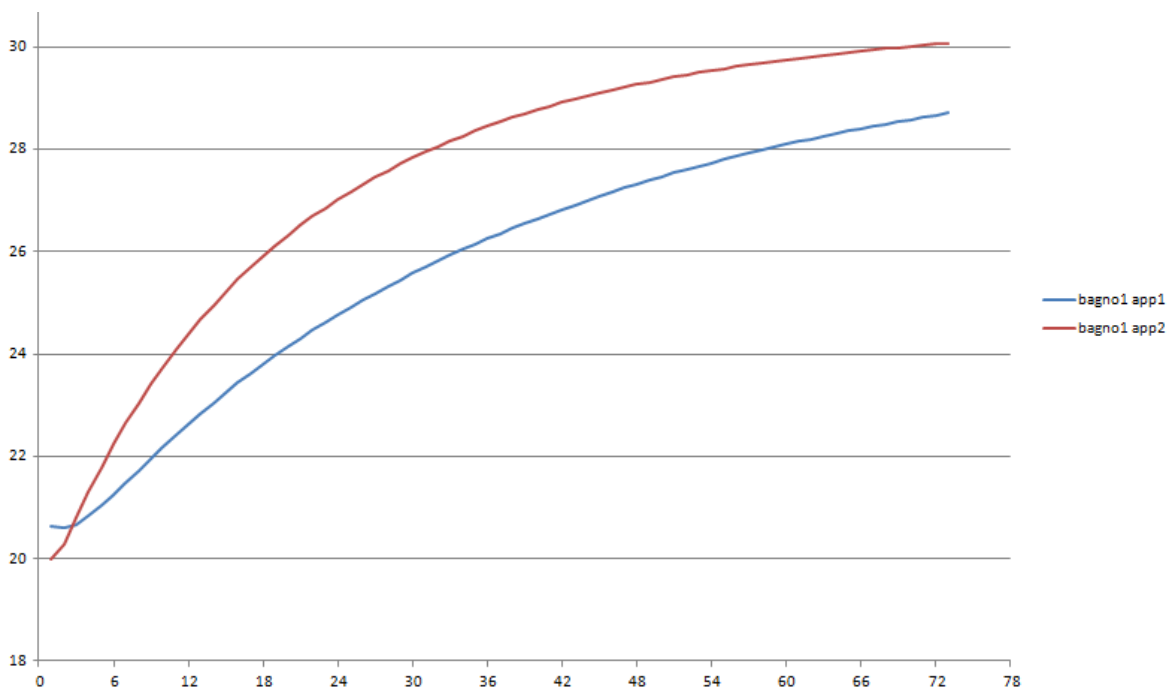


**Fig. 4.29 - Grafico di confronto  $dT/d\tau$  – pacchetto Camera1**

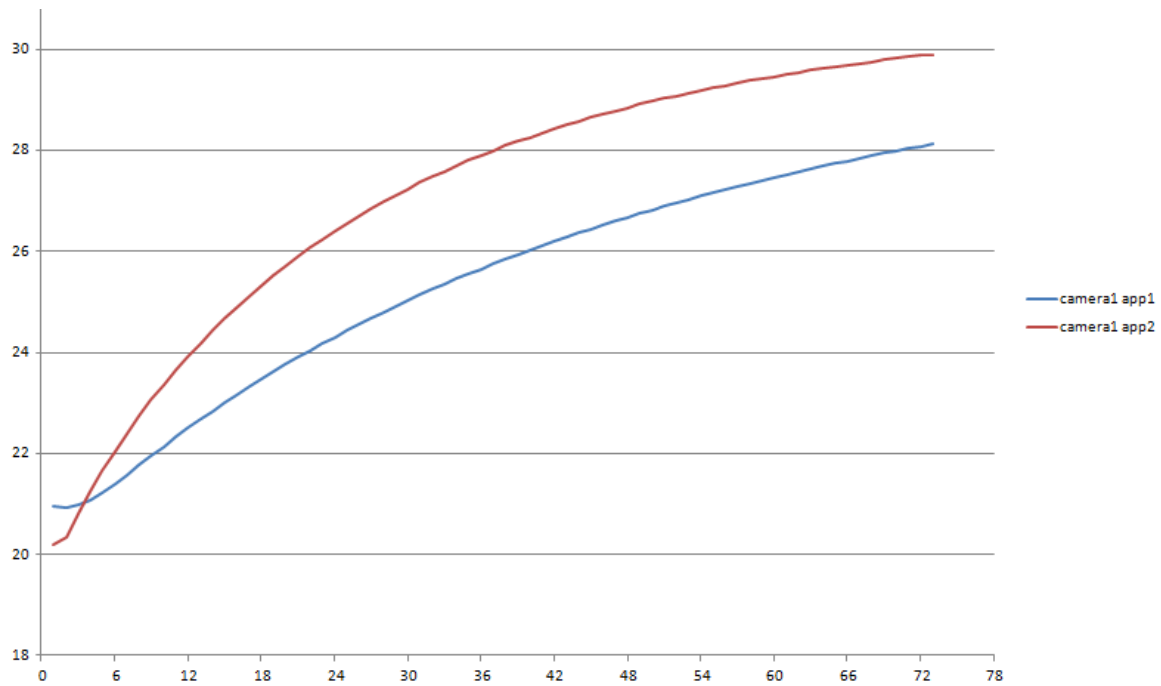
Da questi grafici di confronto si nota visivamente come la temperatura della pavimentazione aumenti più velocemente nella prima fase del periodo di riscaldamento. Questa caratteristica del sistema installato nell'appartamento 2 si riduce però nel tempo e si nota come dopo circa 3 ore l'aumento di temperatura al secondo sia maggiore nel pacchetto solaio dell'appartamento 1. Questo comportamento lo si può vedere anche nei grafici che mostrano l'andamento di T1 e Q3, infatti la pendenza delle curve riferite all'appartamento 2 è minore nella seconda parte del periodo di riscaldamento rispetto a quella dell'appartamento 1.

Nei grafici successivi è stata isolata la fase di riscaldamento serale dell'ultimo giorno analizzato per poter vedere la modalità di funzionamento appena descritta.

Sull'asse Y sono riportati i valori di temperatura in [°C] mentre sull'asse X il tempo, suddiviso in intervalli di 6 unità che rappresentano 30 minuti.

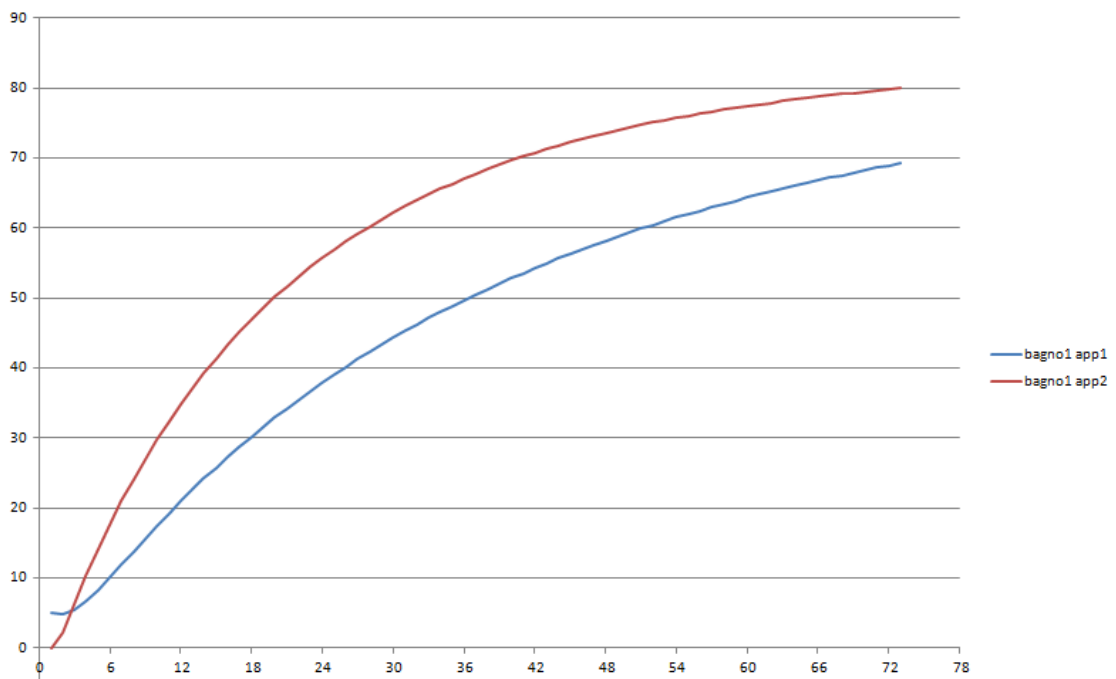


**Fig. 4.30 - Grafico di confronto T1 – pacchetto Bagno1**

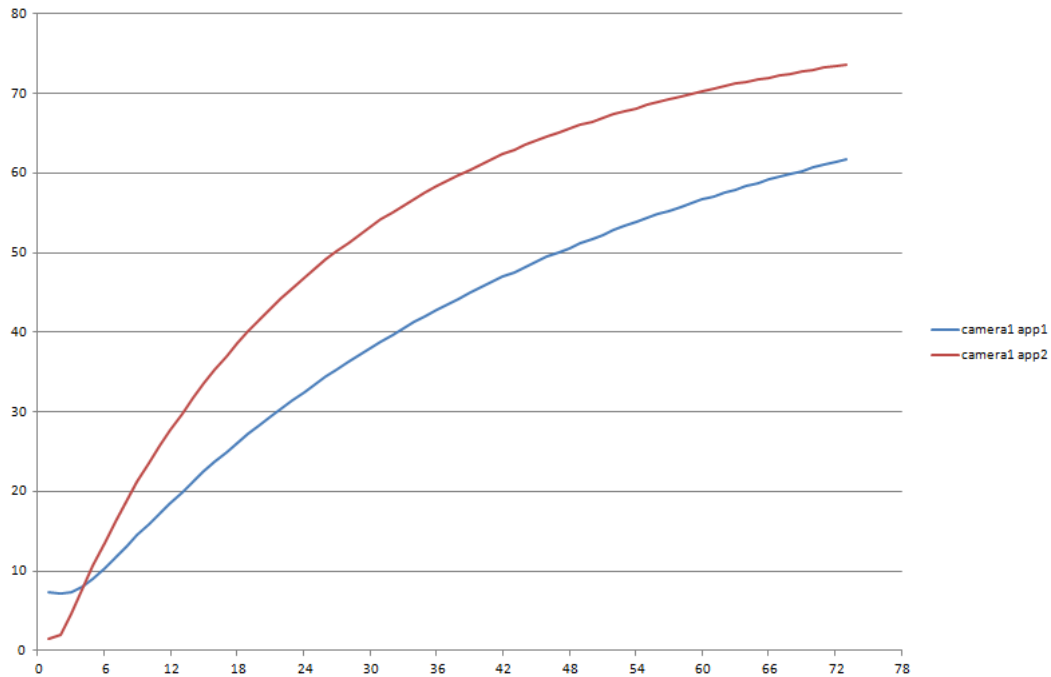


**Fig. 4.31 - Grafico di confronto T1 – pacchetto Bagno1**

Sull'asse Y sono riportati i valori di flusso termico in  $[W/m^2K]$  mentre sull'asse X il tempo, suddiviso in intervalli di 6 unità che rappresentano 30 minuti.



**Fig. 4.32 - Grafico di confronto Q3 – pacchetto Bagno1**



**Fig. 4.33 - Grafico di confronto Q3 – pacchetto Camera1**

Le simulazioni effettuate con Heat2 portano ad affermare che il pacchetto solaio dell'appartamento 2 sia più performante rispetto all'altro sistema perché a parità di flusso termico e in un periodo di riscaldamento che cerca di simulare la realtà produce valori più alti di temperatura superficiale e flussi termici passanti la pavimentazione.

Le maggiori perdite dovute al minor isolamento del sistema installato nel sistema dell'appartamento 2 non incidono quanto la maggiore velocità di trasferimento di calore dalla tubazione alla pavimentazione dell'edificio, per questo tale sistema può essere definito migliore da un punto di vista delle prestazioni termiche.

## ***CAPITOLO 5***

### **DEFINIZIONE E ANALISI DEI SISTEMI RADIANTI A PAVIMENTO CON TRNSYS**

#### **5.1 PREMESSA**

TRNSYS è un software di simulazione dinamica caratterizzato da una struttura modulare. Ai fini della simulazione del sistema oggetto di analisi, all'utente è richiesto di specificare i componenti che costituiscono il sistema e la maniera nelle quali questi interagiscono tra loro.

Il pacchetto di installazione consiste in una serie di moduli, tra questi:

- Simulation Studio, il programma di interfaccia dedicato all'impostazione e all'esecuzione delle simulazioni;
- TRNBuild, il programma di interfaccia dedicato alla descrizione dettagliata dell'edificio;
- TRNEdit/TRNSED, lo strumento per la modifica manuale dei file input e la creazione di applicazioni "stand alone" in ambiente TRNSYS.

La simulazione in ambiente TRNSYS è costituita dall'assemblaggio di una serie di componenti ("Types") opportunamente interconnessi in modo tale da svolgere una sequenza ordinata di operazioni. Tutti i componenti utilizzati e le modalità secondo le quali questi saranno chiamati ad interagire sono raccolti in un file (".dck") che rappresenta l'input vero e proprio al programma, tale file viene creato e modificato mediante il programma di interfaccia Simulation Studio.

Affinchè una simulazione possa essere eseguita devono essere soddisfatti i punti che seguono:

- vanno selezionati tutti i componenti (Types) necessari alla descrizione del problema oggetto di indagine;
- impostazioni di lavoro e valori iniziali devono essere definiti per ciascun componente;
- devono essere completati i collegamenti tra i vari componenti in modo da ottenere un flusso ordinato di informazioni, in modo cioè che ciascuna Type abbia a disposizione i dati di input necessari ai fini del calcolo.

In Simulation Studio è presente un elenco di tutte le Type, da questo le inserisco nell'Assembly Panel cioè la finestra attraverso la quale l'utente è in grado di creare, modificare ed eseguire i modelli creati.

Ogni Type presenta le informazioni necessarie al buon utilizzo del componente, la possibilità di impostare le modalità operative, di vedere quali siano le informazioni di ingresso necessarie e quali siano i risultati disponibili come output.

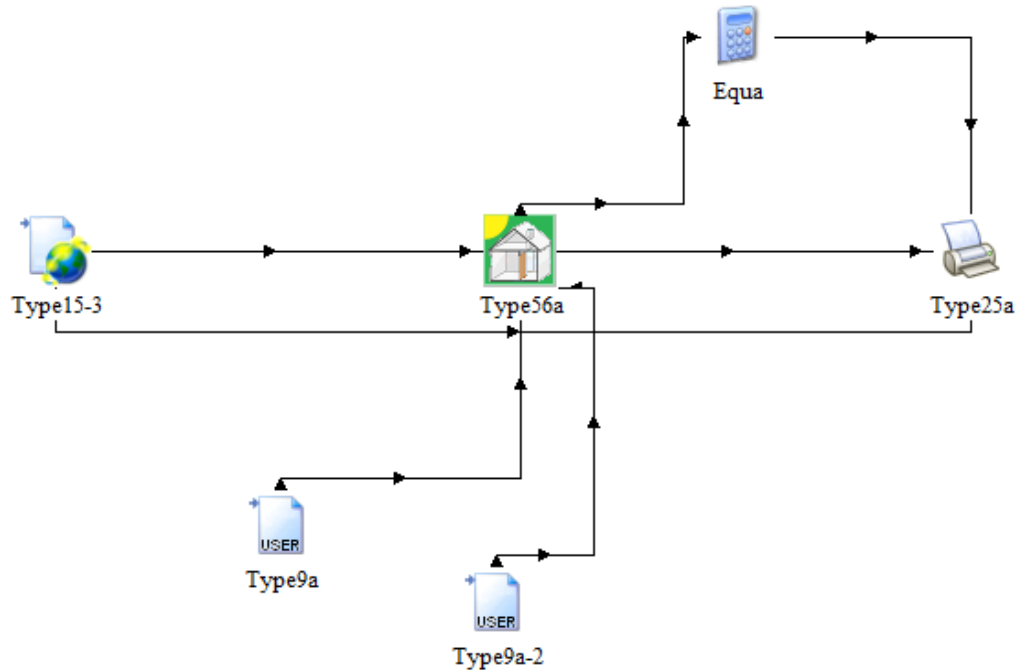
Per quanto riguarda la modellazione dell'edificio la Type da utilizzare è la numero 56. Il modello dell'edificio è contenuto in un file dedicato (".bui") che si crea tramite TRNBuild.

## **5.2 UTILIZZO DI TRNSYS**

Nel lavoro di tesi TRNSYS è stato utilizzato per valutare il funzionamento dei due diversi sistemi di riscaldamento a pavimento non più come singoli pacchetti, ma posti all'interno degli appartamenti di riferimento descritti nel capitolo 3.

I due modelli sono stati creati allo stesso modo, le differenze consistono nella modellazione con differenti solai verso terra (per orientazione e dimensione delle pareti). Il risultato è un diverso file ".bui" creato da TRNBuild.

Lo schema del modello creato in Simulation Studio risulta identico per entrambi gli appartamenti ed è quello rappresentato nella figura seguente.



**Fig. 5.1 – Schema del modello creato in Simulation Studio**

Le Type utilizzate nel modello sono le seguenti:

- Type 15-3 “Energy+ Weather: ha lo scopo di leggere un file esterno contenente le caratteristiche meteorologiche che, inclusa la radiazione solare, di un determinato luogo a intervalli minori di un’ora. Il formato utilizzato per leggere le informazioni è stato Energy+ format (.EPW) e queste riferite a Venezia Tessera.

Nella sezione “Parametri” della Type è importante indicare la pendenza delle superfici e il relativo orientamento, quindi in questo caso  $90^\circ$  come pendenza perché superfici verticali essendo riferite alle pareti esterne e valori 180, 0 e 90 (relativamente alle superfici 1,2 e 3) per indicare Nord, Sud e Ovest. Non è stato riportato il valore relativo al punto cardinale Est perché nessuna superficie d’interesse per lo studio da effettuare è rivolta verso tale direzione.

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
7	Tracking mode-1	1	-			More...
8	Slope of surface-1	90	degrees			More...
9	Azimuth of surface-1	180	degrees			More...
10	Tracking mode-2	1	-			More...
11	Slope of surface-2	90	degrees			More...
12	Azimuth of surface-2	0	degrees			More...
13	Tracking mode-3	1	-			More...
14	Slope of surface-3	90	degrees			More...
15	Azimuth of surface-3	90	degrees			More...

**Fig. 5.2 – Inserimento parametri nella Type 15-3**

- Type 9a: ha lo scopo di leggere file di vario genere che contengano valori con intervalli regolari che questo componente converte nell'unità di misura richiesta. Nel modello è stata utilizzata due volte: per inserire i valori di contributo energetico dato dalla presenza delle persone, apparecchi elettrici e illuminazione ("Gain") e per inserire le funzioni di temperatura e portata dell'acqua come fluido termovettore dell'impianto a pavimento.

I valori di contributo energetico "Gain" sono calcolati:

Occupanti → Coeff. di utilizzo x Parametro energetico unitario [ $W/m^2$ ] x Area [ $m^2$ ]

Apparecchi elettrici → Coeff. di utilizzo x Parametro energetico unitario [ $W/m^2$ ] x Area [ $m^2$ ]

Illuminazione → Valore energetico costante [W]

**Tab. 5.1 – Parametri energetici**

Parametro energetico unitario occupanti	5 [ $W/m^2$ ]
Parametro energetico unitario apparecchi elettrici	3 [ $W/m^2$ ]
Valore energetico costante Illuminazione	5 [W/stanza]

**Tab. 5.2 – Coefficienti di utilizzo**

Ora	Coefficienti di utilizzo	
	Occupanti	Apparecchi elettrici
1	1	0.5
2	1	0.5
3	1	0.5
4	1	0.5
5	1	0.5
6	1	0.5
7	0.5	0.5
8	0.5	0.7
9	0.5	0.7
10	0.1	0.5
11	0.1	0.5
12	0.1	0.6
13	0.1	0.6
14	0.2	0.6
15	0.2	0.6
16	0.2	0.5
17	0.5	0.5
18	0.5	0.7
19	0.5	0.7
20	0.8	0.8
21	0.8	0.8
22	0.8	0.8
23	1	0.6
24	1	0.6

**Tab. 5.3 – Internal gain: Occupanti in [W]**

Ora	Stanze							
	Cucina / Soggiorno	Disimpegno	Camera 1	Bagno 1	Camera 2	Camera 3	Bagno 2	Ripostiglio
1	197.15	41.4	52.95	29.3	76.25	54.9	25.9	10.9
2	197.15	41.4	52.95	29.3	76.25	54.9	25.9	10.9
3	197.15	41.4	52.95	29.3	76.25	54.9	25.9	10.9
4	197.15	41.4	52.95	29.3	76.25	54.9	25.9	10.9
5	197.15	41.4	52.95	29.3	76.25	54.9	25.9	10.9
6	197.15	41.4	52.95	29.3	76.25	54.9	25.9	10.9
7	98.575	20.7	26.475	14.65	38.125	27.45	12.95	5.45
8	98.575	20.7	26.475	14.65	38.125	27.45	12.95	5.45

9	98.575	20.7	26.475	14.65	38.125	27.45	12.95	5.45
10	19.715	4.14	5.295	2.93	7.625	5.49	2.59	1.09
11	19.715	4.14	5.295	2.93	7.625	5.49	2.59	1.09
12	19.715	4.14	5.295	2.93	7.625	5.49	2.59	1.09
13	19.715	4.14	5.295	2.93	7.625	5.49	2.59	1.09
14	39.43	8.28	10.59	5.86	15.25	10.98	5.18	2.18
15	39.43	8.28	10.59	5.86	15.25	10.98	5.18	2.18
16	39.43	8.28	10.59	5.86	15.25	10.98	5.18	2.18
17	98.575	20.7	26.475	14.65	38.125	27.45	12.95	5.45
18	98.575	20.7	26.475	14.65	38.125	27.45	12.95	5.45
19	98.575	20.7	26.475	14.65	38.125	27.45	12.95	5.45
20	157.72	33.12	42.36	23.44	61	43.92	20.72	8.72
21	157.72	33.12	42.36	23.44	61	43.92	20.72	8.72
22	157.72	33.12	42.36	23.44	61	43.92	20.72	8.72
23	197.15	41.4	52.95	29.3	76.25	54.9	25.9	10.9
24	197.15	41.4	52.95	29.3	76.25	54.9	25.9	10.9

**Tab. 5.4 – Internal gain: Apparecchi elettrici in [W]**

Ora	Stanze							
	Cucina / Soggiorno	Disimpegno	Camera 1	Bagno 1	Camera 2	Camera 3	Bagno 2	Ripostiglio
1	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27
2	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27
3	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27
4	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27
5	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27
6	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27
7	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27
8	82.803	17.388	22.239	12.31	32.025	23.058	10.878	4.578
9	82.803	17.388	22.239	12.31	32.025	23.058	10.878	4.578
10	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27
11	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27
12	70.974	14.904	19.062	10.55	27.45	19.764	9.324	3.924
13	70.974	14.904	19.062	10.55	27.45	19.764	9.324	3.924
14	70.974	14.904	19.062	10.55	27.45	19.764	9.324	3.924
15	70.974	14.904	19.062	10.55	27.45	19.764	9.324	3.924
16	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27

17	59.145	12.42	15.885	8.79	22.875	16.47	7.77	3.27
18	82.803	17.388	22.239	12.31	32.025	23.058	10.878	4.578
19	82.803	17.388	22.239	12.31	32.025	23.058	10.878	4.578
20	94.632	19.872	25.416	14.06	36.6	26.352	12.432	5.232
21	94.632	19.872	25.416	14.06	36.6	26.352	12.432	5.232
22	94.632	19.872	25.416	14.06	36.6	26.352	12.432	5.232
23	70.974	14.904	19.062	10.55	27.45	19.764	9.324	3.924
24	70.974	14.904	19.062	10.55	27.45	19.764	9.324	3.924

**Tab. 5.5 – Internal gain: Illuminazione in [W]**

Ora	Stanze							
	Cucina / Soggiorno	Disimpegno	Camera 1	Bagno 1	Camera 2	Camera 3	Bagno 2	Ripostiglio
1	10	5	5	5	5	5	5	5
2	10	5	5	5	5	5	5	5
3	10	5	5	5	5	5	5	5
4	10	5	5	5	5	5	5	5
5	10	5	5	5	5	5	5	5
6	10	5	5	5	5	5	5	5
7	10	5	5	5	5	5	5	5
8	10	5	5	5	5	5	5	5
9	10	5	5	5	5	5	5	5
10	10	5	5	5	5	5	5	5
11	10	5	5	5	5	5	5	5
12	10	5	5	5	5	5	5	5
13	10	5	5	5	5	5	5	5
14	10	5	5	5	5	5	5	5
15	10	5	5	5	5	5	5	5
16	10	5	5	5	5	5	5	5
17	10	5	5	5	5	5	5	5
18	10	5	5	5	5	5	5	5
19	10	5	5	5	5	5	5	5
20	10	5	5	5	5	5	5	5
21	10	5	5	5	5	5	5	5
22	10	5	5	5	5	5	5	5
23	10	5	5	5	5	5	5	5
24	10	5	5	5	5	5	5	5

**Tab. 5.6 – Internal gain: Totale in [W]**

Ora	Stanze							
	Cucina / Soggiorno	Disimpegno	Camera 1	Bagno 1	Camera 2	Camera 3	Bagno 2	Ripostiglio
1	266.295	58.82	73.835	43.09	104.125	76.37	38.67	19.17
2	266.295	58.82	73.835	43.09	104.125	76.37	38.67	19.17
3	266.295	58.82	73.835	43.09	104.125	76.37	38.67	19.17
4	266.295	58.82	73.835	43.09	104.125	76.37	38.67	19.17
5	266.295	58.82	73.835	43.09	104.125	76.37	38.67	19.17
6	266.295	58.82	73.835	43.09	104.125	76.37	38.67	19.17
7	167.72	38.12	47.36	28.44	66	48.92	25.72	13.72
8	191.378	43.088	53.714	31.96	75.15	55.508	28.828	15.028
9	191.378	43.088	53.714	31.96	75.15	55.508	28.828	15.028
10	88.86	21.56	26.18	16.72	35.5	26.96	15.36	9.36
11	88.86	21.56	26.18	16.72	35.5	26.96	15.36	9.36
12	100.689	24.044	29.357	18.48	40.075	30.254	16.914	10.014
13	100.689	24.044	29.357	18.48	40.075	30.254	16.914	10.014
14	120.404	28.184	34.652	21.41	47.7	35.744	19.504	11.104
15	120.404	28.184	34.652	21.41	47.7	35.744	19.504	11.104
16	108.575	25.7	31.475	19.65	43.125	32.45	17.95	10.45
17	167.72	38.12	47.36	28.44	66	48.92	25.72	13.72
18	191.378	43.088	53.714	31.96	75.15	55.508	28.828	15.028
19	191.378	43.088	53.714	31.96	75.15	55.508	28.828	15.028
20	262.352	57.992	72.776	42.50	102.6	75.272	38.152	18.952
21	262.352	57.992	72.776	42.50	102.6	75.272	38.152	18.952
22	262.352	57.992	72.776	42.50	102.6	75.272	38.152	18.952
23	278.124	61.304	77.012	44.85	108.7	79.664	40.224	19.824
24	278.124	61.304	77.012	44.85	108.7	79.664	40.224	19.824

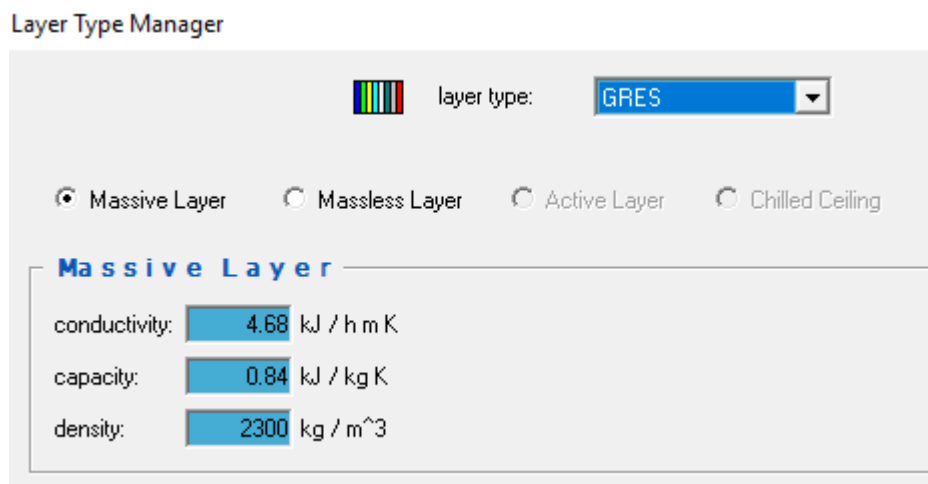
- Type 56a: ha lo scopo di leggere le caratteristiche dell'edificio modellato con TRNBuild attraverso il file “.bui” generato da questo. Vengono indicati anche i dati di Input da collegare con le Type precedentemente descritte e i risultati che si vogliono ottenere in Output.

In TRNBuild gli appartamenti vengono divisi in zone, ognuna di queste rappresenta una stanza.



**Fig. 5.3 – Zone definite in TRNBuild**

Dopo aver definito le zone degli appartamenti sono state inserite le caratteristiche di ciascun materiale presente nelle strutture di pareti e solai attraverso il “Layer Type Manager”. Si inserisce il nome del materiale e viene richiesto il valore di conducibilità termica, capacità termica e densità.



**Fig. 5.4 – Esempio di compilazione del “Layer Type Manager”**

Nella finestra “Wall Type Manager” si creano le strutture dell’edificio. E’ presente la lista dei materiali inseriti, basta sceglierli e inserire lo spessore, importante è ricordare

che nell'elenco dei componenti della struttura, quello più in alto rappresenta quello più interno all'edificio, mentre l'ultimo quello esterno.

Wall Type Manager

front / inside

No.	Layer	Thickness	Type
1	INTONACO/GS09	0.025	massive
2	LEGNOCEMENTO	0.043	massive
3	CLS	0.160	massive
4	EPSMURD	0.130	massive
5	LEGNOCEMENTO	0.042	massive
6	INTONACO/FGK12	0.025	massive

back

total thickness: 0.425 m

u - value: 0.191 W/m<sup>2</sup> K for reference only  
(incl. alpha<sub>i</sub>=7.7 W/m<sup>2</sup> K and alpha<sub>o</sub>=25 W/m<sup>2</sup> K !)

Solar Absorptance of Wall

front: 0.6

back: 0.6

Convective Heat Transfer Coefficient of Wall

Front:  userdefined  internal calculation  
 11 kJ/h m<sup>2</sup> K

Back:  userdefined  internal calculation  
 64 kJ/h m<sup>2</sup> K

Fig. 5.5 – Esempio di compilazione del “Wall Type Manager”

I layer mancanti nell'elenco sono gli “active layer”. A questi non viene assegnato uno spessore, ma servono per simulare il comportamento dell'impianto radiante attraverso la possibilità di definire le caratteristiche della tubazione e del fluido termovettore.

Active Layer

specific heat coefficient of water: 4.18 kJ / kg K

pipe spacing (center to center): 0.05 m

pipe outside diameter: 0.017 m

pipe wallthickness: 0.002 m

pipe wall conductivity: 1.26 kJ / h m K

Fig. 5.6 – Esempio di compilazione di un “active layer”

Nella compilazione delle strutture, per quanto riguarda la struttura del solaio contro terra dell'appartamento 2, è stata apportata una modifica agli spessori reali nelle zone dove l'impianto aveva passo tra le tubazioni di 10 cm perché veniva richiesto uno spessore minimo del materiale sopra e sotto l'active layer di almeno 3 cm, mentre il massetto Q-mas Slim Bio nella realtà presenta dimensioni minori.

Per non creare una struttura che differisse dalla realtà per caratteristiche termiche, è stata definita una densità equivalente ed una conducibilità termica equivalente di tale massetto:

Lo spessore reale è di 3.2 cm, mentre quello definito in TRNBuild è di 6.2 cm.

$$Massa_{superficiale} = \rho_{reale} * spessore_{reale} = \rho_{equivalente} * spessore_{equivalente} \left[ \frac{Kg}{m^2} \right]$$

Sono note:

$$\rho_{reale} = 2000 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$spessore_{reale} = 0.032 \left[ m \right]$$

$$spessore_{equivalente} = 0.062 \left[ m \right]$$

Quindi posso ricavare:

$$\rho_{equivalente} = \frac{\rho_{reale} * spessore_{reale}}{spessore_{equivalente}} = \frac{2000 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] * 0.032 \left[ m \right]}{0.062 \left[ m \right]} = 1032.26 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$Resistenza_{termica} = \frac{spessore_{reale}}{\lambda_{reale}} = \frac{spessore_{equivalente}}{\lambda_{equivalente}} \left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$$

Sono note:

$$\lambda_{reale} = 1.87 \left[ \frac{W}{mK} \right]$$

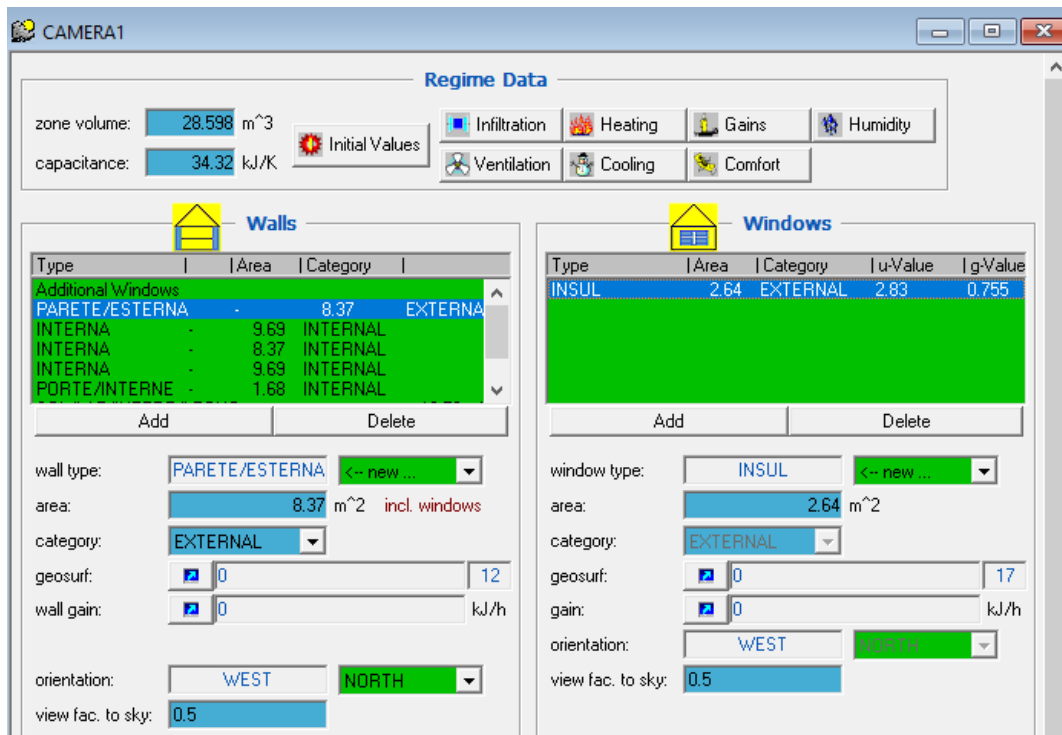
$$spessore_{reale} = 0.032 \left[ m \right]$$

$$spessore_{equivalente} = 0.062 \left[ m \right]$$

Quindi posso ricavare:

$$\lambda_{equivalente} = \frac{\lambda_{reale} * spessore_{equivalente}}{spessore_{reale}} = \frac{1.87 \left[ \frac{W}{mK} \right] * 0.062 \left[ m \right]}{0.032 \left[ m \right]} = 3.62 \left[ \frac{W}{mK} \right]$$

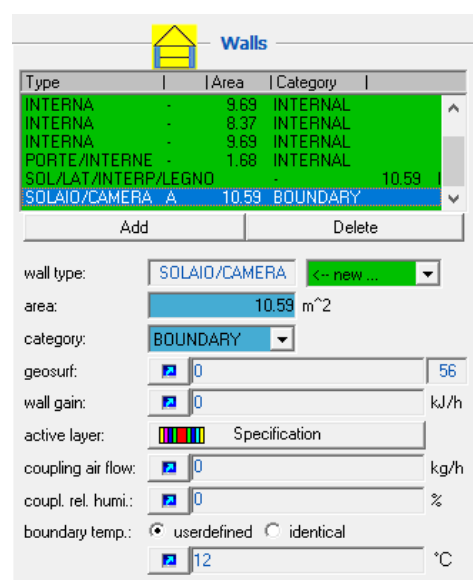
Una volta creata la struttura si definiscono le varie stanze. Per ogni relativa zona si inseriscono le strutture, definendo area, orientamento e condizione al contorno, cioè se è una struttura interna (internal), esterna (external) o confinante con un ambiente con condizioni particolari (boundary), ad esempio in questo caso garage, terreno, ecc. .



**Fig. 5.7 – Esempio di definizione strutturale di una stanza**

In questa finestra, dopo aver inserito le strutture, si può indicare se sono presenti dei serramenti rivolti verso ambienti con condizioni diverse da quelle interne, quindi cliccando ad esempio su una parete esterna si può rappresentare una porta o finestra con le proprie caratteristiche e dimensioni.

**Fig. 5.8 – Struttura con “Active Layer”**

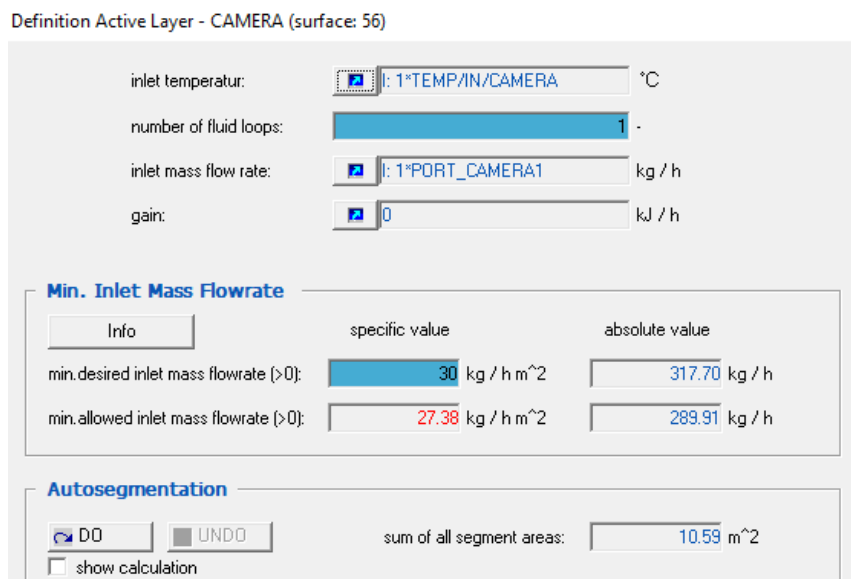


I solai contro terra presentano l'Active Layer dove posso definire le caratteristiche dell'impianto di riscaldamento a pavimento, quindi è stata definita la temperatura d'ingresso e la portata del fluido termovettore:

**Tab. 5.7 – Valori di temperatura d'ingresso in [°C] e portata in [Kg/h] del fluido termovettore dell'impianto a pavimento**

Stanze	Temperatura d'ingresso [°C]	Portata [Kg/h]
Soggiorno/cucina	28	1490
Bagno 1	28	370
Camera 1	28	320
Camera 2	28	460
Camera 3	28	330
Bagno 2	28	320
Ripostiglio	28	45
Disimpegno	28	250

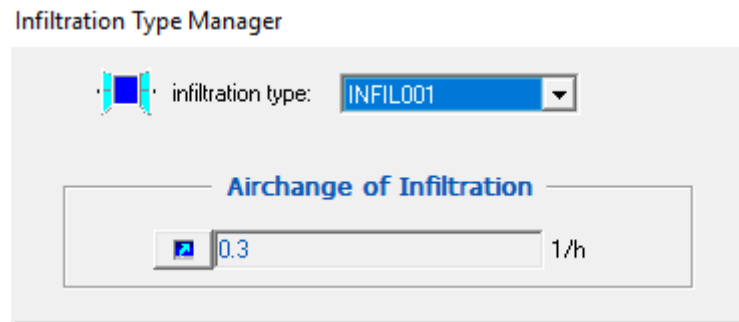
Cliccando su “Specification”, vedi Fig. 5.8, si possono impostare le caratteristiche di funzionamento dell'impianto. Non essendo il riscaldamento sempre acceso non si può definire i valori costanti, ma una funzione in ingresso al file (Input) sia per quanto riguarda la temperatura sia per quanto riguarda la portata. Le funzioni saranno poi definite tramite dei file .txt che come spiegato in precedenza verranno inserite in Simulation Studio tramite le Type 9a.



**Fig. 5.9 – Inserimento funzioni d'ingresso di temperatura e portata**

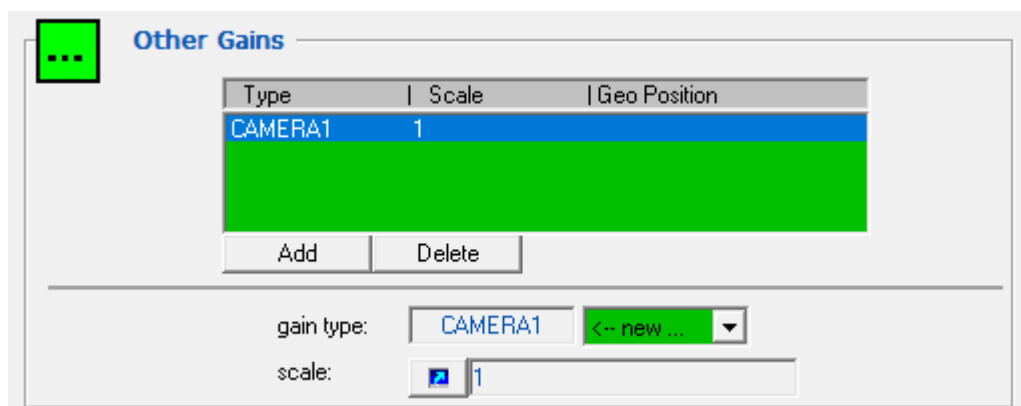
Il funzionamento dell'impianto è stato definito in due fasce orarie definibili come riscaldamento mattutino e riscaldamento serale. Gli orari di accensione dell'impianto sono: dalle 5 alle 8 e dalle 17 alle 19.

Per un buon benessere ambientale si deve considerare un certo valore di ricambi d'aria, impostabile su TRNBuild tramite un'apposita finestra. In questo progetto si considera un ricambio di 0.3 volumi/ora.



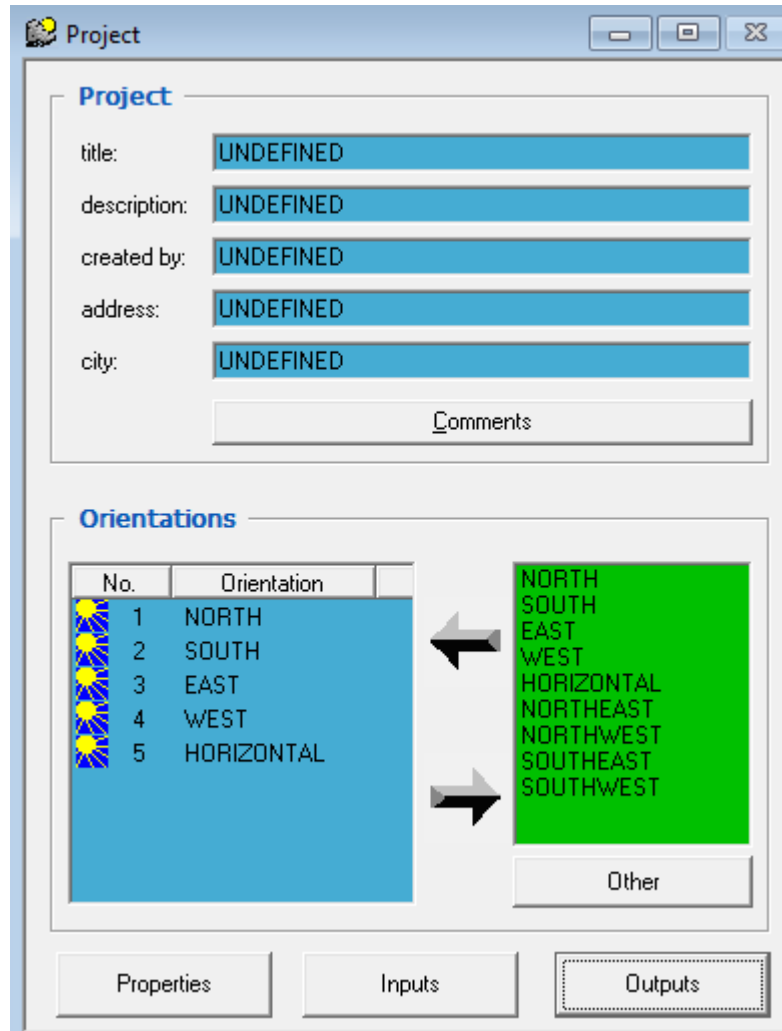
**Fig. 5.10 – Inserimento valore di ricambio d'aria**

Per ogni zona è stato indicato il valore di “Internal Gains” assegnando una funzione d'ingresso che poi è simulata in Simulation Studio grazie ad una Type 9a che legge un file .txt dove sono scritti tutti i valori relativi alla presenza di persone, apparecchi elettrici ed illuminazioni interni agli appartamenti.



**Fig. 5.11 – Esempio di inserimento funzione d'ingresso per “Internal Gains”**

L'ultima operazione eseguita in TRNBuild è la definizione dei risultati che si desiderano ottenere. Nella finestra principale del progetto è presente la sezione outputs, da lì è possibile selezionare vari grandezze da misurare.



**Fig. 5.12 – Finestra principale di progetto dove si nota la sezione “Outputs”**

I risultati che si vogliono ottenere dalla simulazione sono :

- $T_{AIR}$  : temperatura media dell’aria della zona definita
- $T_{OPERATIVA}$  : temperatura uniforme dell’aria e delle pareti dell’ambiente che provocherebbero per il soggetto lo stesso scambio termico per convezione e radiazione che si ha nell’ambiente reale:

$$T_{OPERATIVA} = \frac{T_{mr} \cdot h_r + T_{air} \cdot h_c}{h_c + h_r}$$

con:  $T_{mr}$  = temperatura media radiante: temperatura uniforme di una cavità nera fittizia nella quale un soggetto scambierebbe la stessa quantità di energia termica radiante che scambia nell’ambiente reale non uniforme.

$T_{air}$  = temperatura media dell’aria

$h_c$  = coefficiente di scambio convettivo

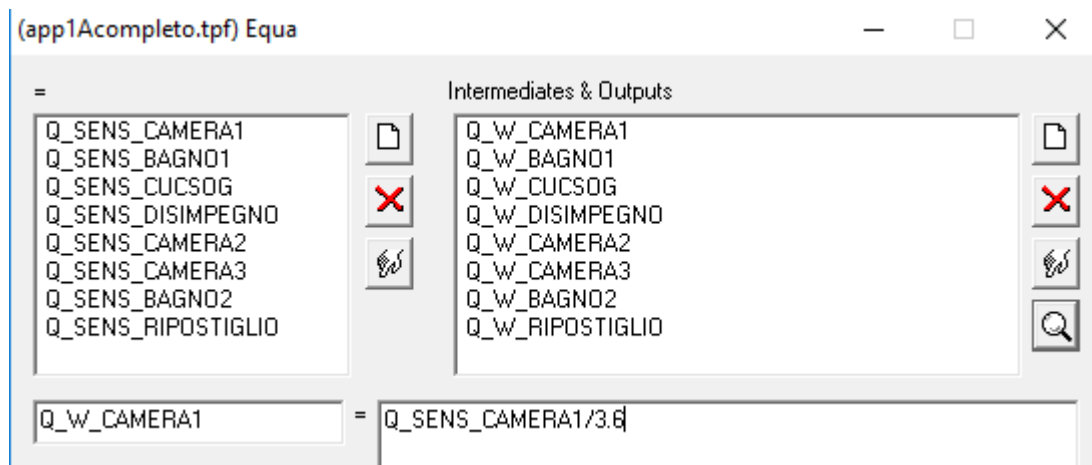
$h_r$  = coefficiente di scambio radiante

Nella pratica la temperatura operativa si può definire anche come la media tra la temperatura media radiante e la temperatura media dell'aria:

$$T_{OPERATIVA} = \frac{T_{mr} + T_{air}}{2}$$

- $T_{SUP\ INSIDE}$  : temperatura della superficie indicata interna all'edificio
- $T_{SUP\ OUTSIDE}$  : temperatura della superficie indicata esterna all'edificio
- $T_{OUTLET}$  : temperatura di uscita del fluido termovettore dell'impianto di riscaldamento a pavimento
- $Q_{ACTIVE\ LAYER}$  : energia trasmessa dal fluido termovettore definito nell'active layer

Type "Insert new equation": da la possibilità di convertire dei valori. Nel modello viene utilizzata per convertire il valore di  $Q_{ACTIVE\ LAYER}$  da kJ/h a W, quindi dividendo il valore in uscita dalla Type 56a per 3.6.



**Fig. 5.13 – Esempio di conversione di un valore di flusso termico**

- Type 25a: è l'ultimo componente presente nel modello e permette di definire i risultati in uscita e creare un file .txt con tutti i risultati. Si devono inserire il numero di valore in uscita e il nome che si desidera dare a questi.

(app1Acompleteo.tpf) Type25a

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Input to be printed-1	Tair_CAMERA1	any	More...		
2	Input to be printed-2	Top_CAMERA1	any	More...		
3	Input to be printed-3	Toutf_CAMERA1	any	More...		
4	Input to be printed-4	Q_CAMERA1	any	More...		
5	Input to be printed-5	Tinf_CAMERA1	any	More...		
6	Input to be printed-6	Tair_CUCSOG	any	More...		
7	Input to be printed-7	Top_CUCSOG	any	More...		
8	Input to be printed-8	Toutf_CUCSOG	any	More...		
9	Input to be printed-9	Q_CUCSOG	any	More...		

1	How many variables are to be printed by this component?	49
---	---------------------------------------------------------	----

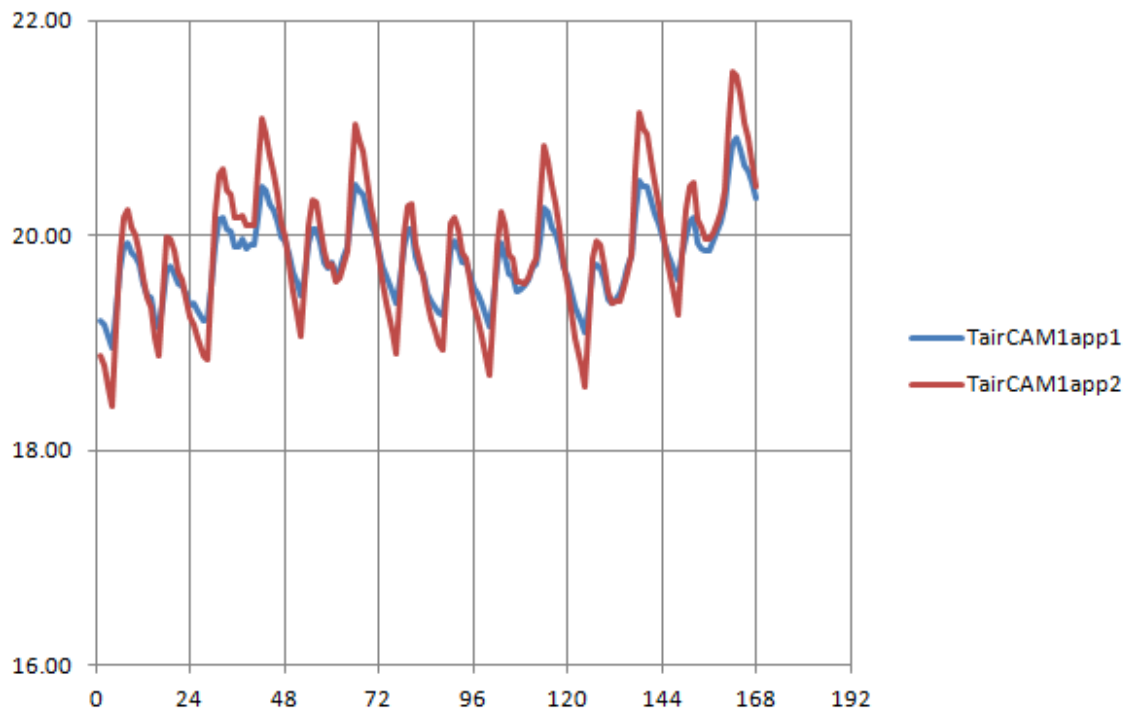
**Fig. 5.14 – Definizione numero e nome dei risultati in uscita**

### 5.3 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

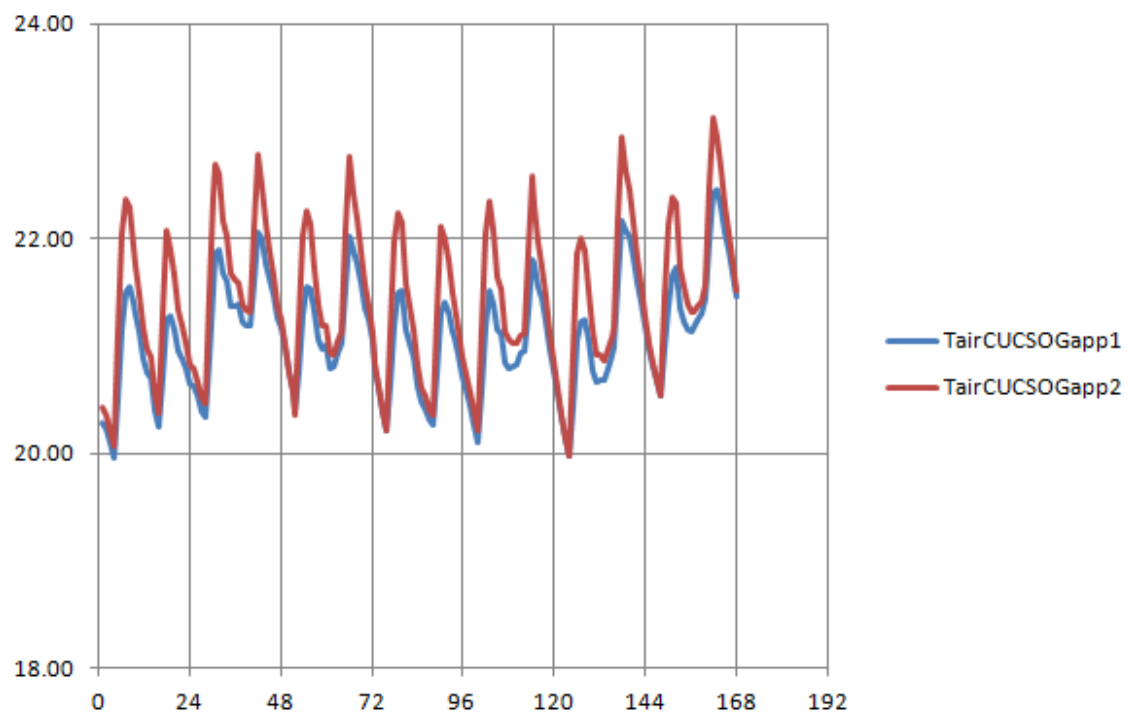
Le simulazioni per l'appartamento 1 e 2 hanno rilevato il funzionamento dell'impianto per due anni per avere meno interferenze possibili dovute alle condizioni iniziali e definire una funzionalità del sistema realistico per tutte le stagioni, concentrandosi sui periodi dove necessario il riscaldamento.

Le modalità operative, come descritte in precedenza, definiscono l'impianto acceso in riscaldamento negli orari dalle 5 alle 8 e dalle 17 alle 19, quindi 5 ore al giorno, con un fluido termovettore all'ingresso dell'impianto alla temperatura di 28 °C.

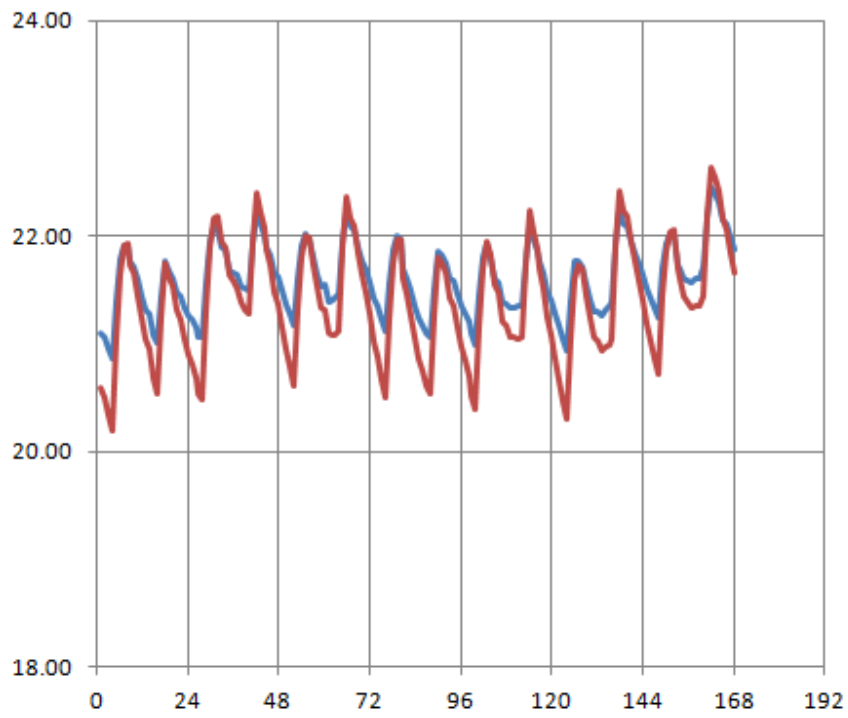
Per valutare i risultati verranno illustrati i grafici ricavati in Excel dai dati elaborati da TRNSYS prima analizzando tutte le zone, poi soffermandoci solamente su una per un motivo che sarà descritto successivamente. I valori rappresentati si riferiscono ad un periodo di sette giorni rilevati con un intervallo di un'ora a partire dal ventiduesimo giorno del secondo anno, quindi indicativamente la quarta settimana dell'anno. E' stata scelta questa settimana perché tra le più fredde dell'anno e preceduta già da alcuni mesi in cui l'impianto è in funzione e questo permette di avere valori non influenzati dal comportamento nel periodo estivo.



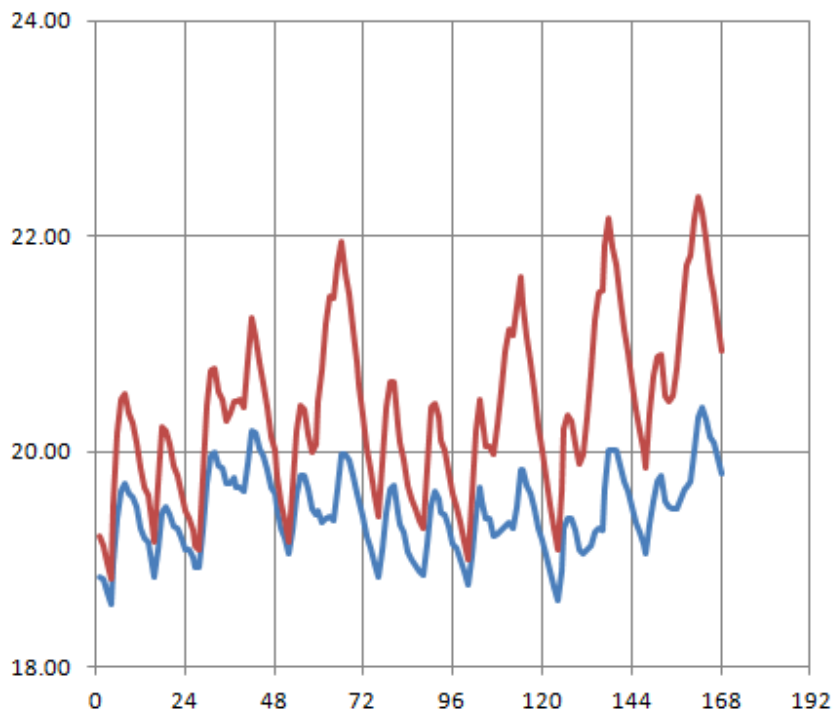
**Fig. 5.15 – Grafico  $T_{AIR}$  zona CAMERA 1**



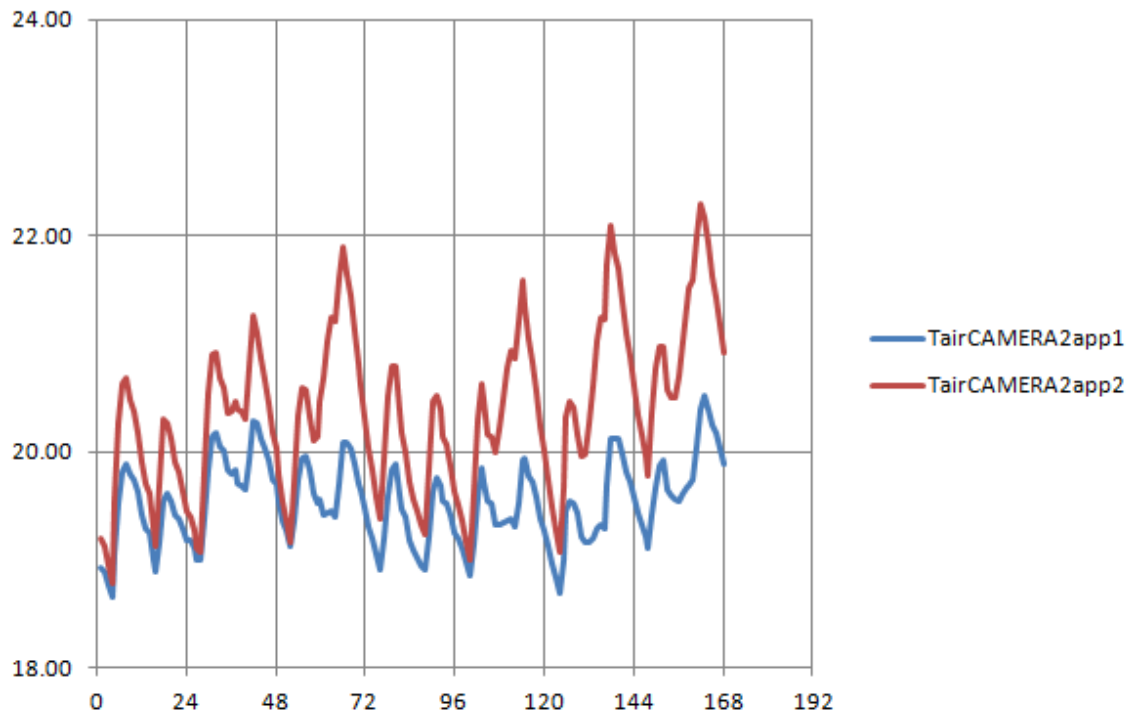
**Fig. 5.16 – Grafico  $T_{AIR}$  zona CUCINA - SOGGIORNO**



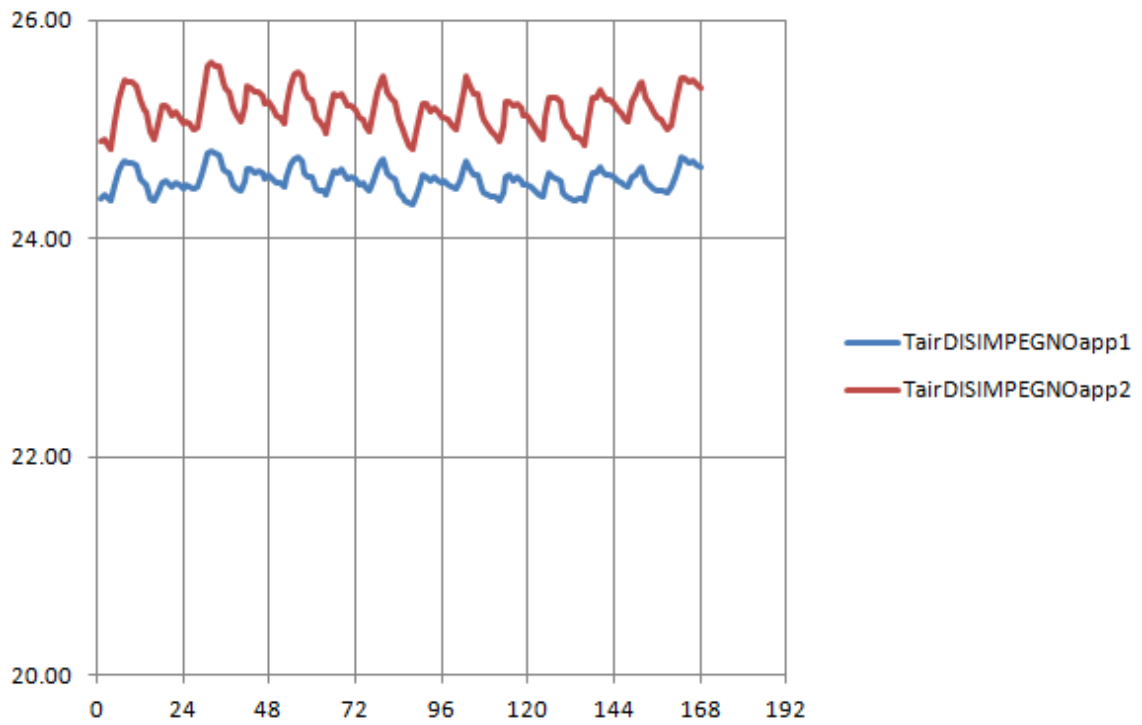
**Fig. 5.17 – Grafico  $T_{AIR}$  zona BAGNO 1**



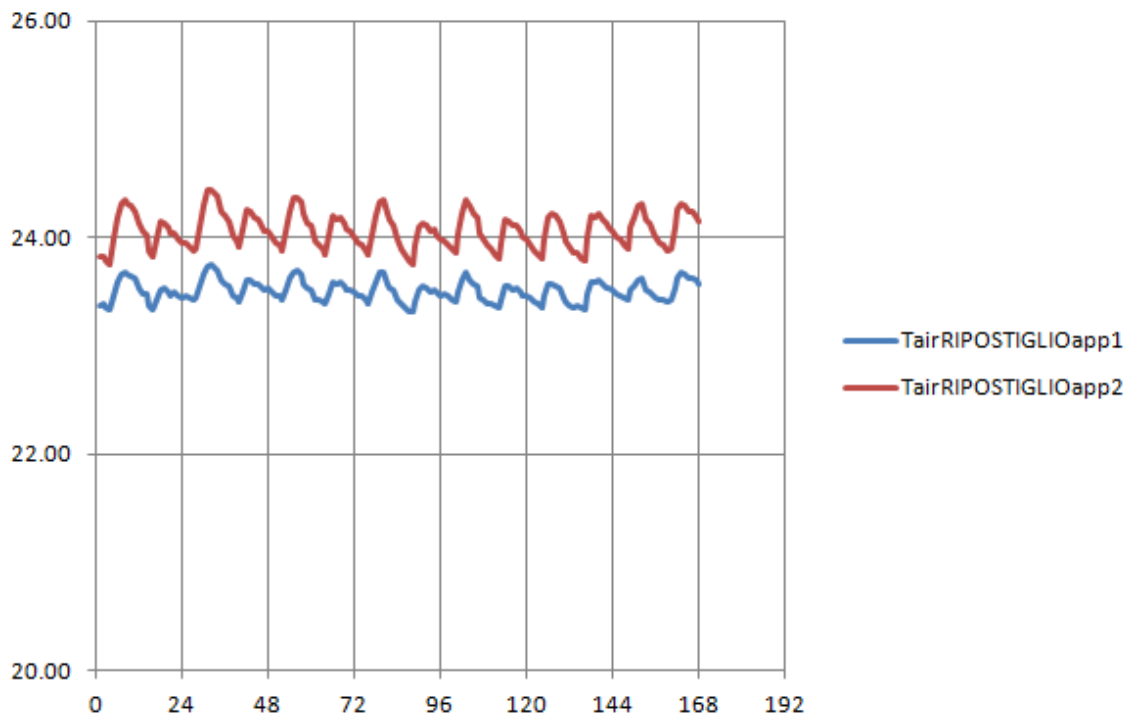
**Fig. 5.18 – Grafico  $T_{AIR}$  zona CAMERA 3**



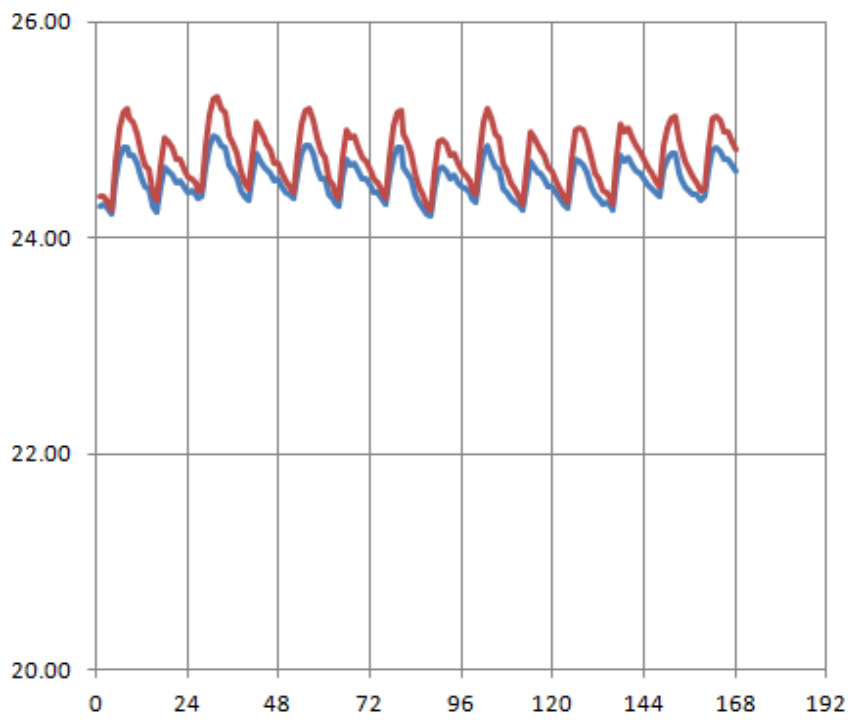
**Fig. 5.19 – Grafico  $T_{AIR}$  zona CAMERA 2**



**Fig. 5.20 – Grafico  $T_{AIR}$  zona DISIMPEGNO**



**Fig. 5.21 – Grafico  $T_{AIR}$  zona RIPOSTIGLIO**



**Fig. 5.22 – Grafico  $T_{AIR}$  zona BAGNO 2**

I grafici rappresentano gli andamenti della temperatura media dell'aria. Sull'asse Y è indicata la temperatura in [°C], mentre sull'asse X è rappresentato il tempo in ore, quindi 24 rappresenta l'intervallo di un giorno.

Possiamo vedere che nelle stanze senza aperture verso l'esterno, la variazione della temperatura durante l'arco della giornata è molto bassa, meno di 1 °C, mentre nelle altre si può notare una fase di raffreddamento e riscaldamento più marcata nelle differenti fasi, ma comunque non superiore ai 3 °C, mantenendo quindi una temperatura che non si allontana molto da quella derivata dal riscaldamento.

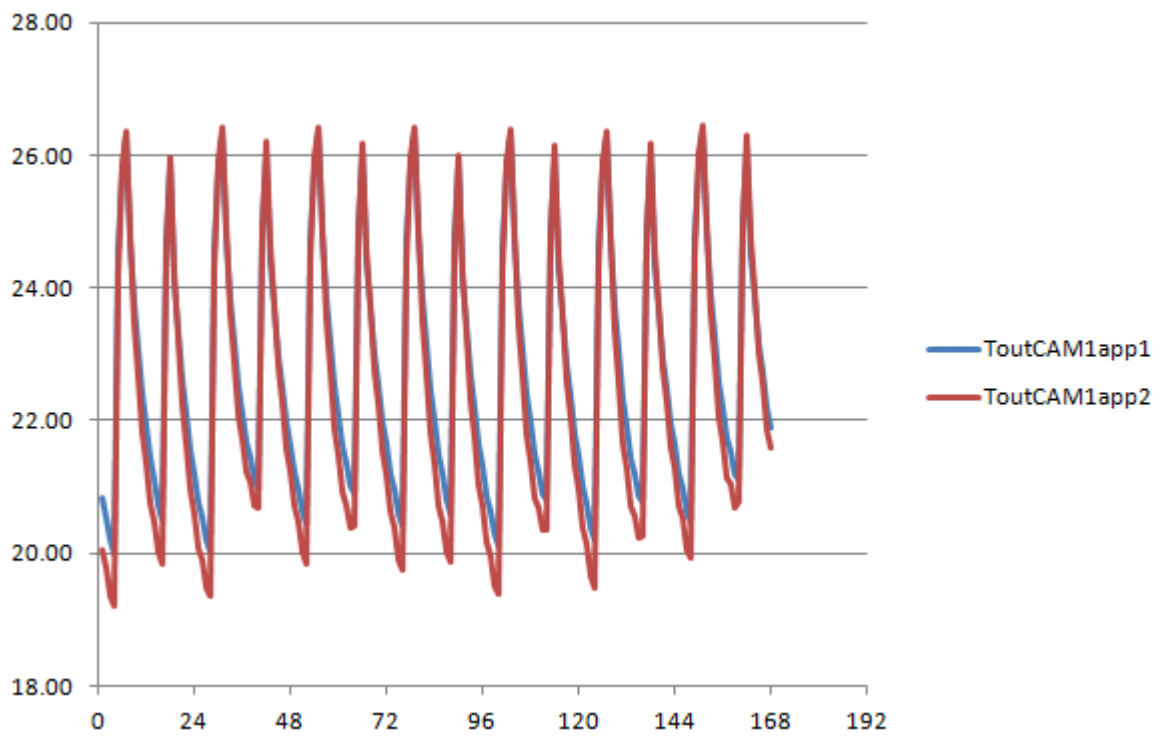
Una valutazione importante per lo studio dei sistemi si può fare notando che l'orientazione è un fattore che non possiamo trascurare nel confronto dei due sistemi, basti guardare gli andamenti nella zona Camera 1 e quelli della Camera 3. Queste due zone hanno aree molto simili, ma la zona Camera 1 non presenta pareti con orientazione diversa tra l'appartamento 1 e il 2, mentre la Camera 3 presenta la parete esterna rivolta verso due punti cardinali opposti: parete esterna rivolta verso Nord per l'appartamento 1 e verso Sud per l'appartamento 2.

In queste due zone si notano comportamenti termici abbastanza differenti tra i due sistemi riscaldanti, motivo per il quale si può affermare che la differenza di orientamento non ci permette di valutare oggettivamente la differenza di comportamento di questo.

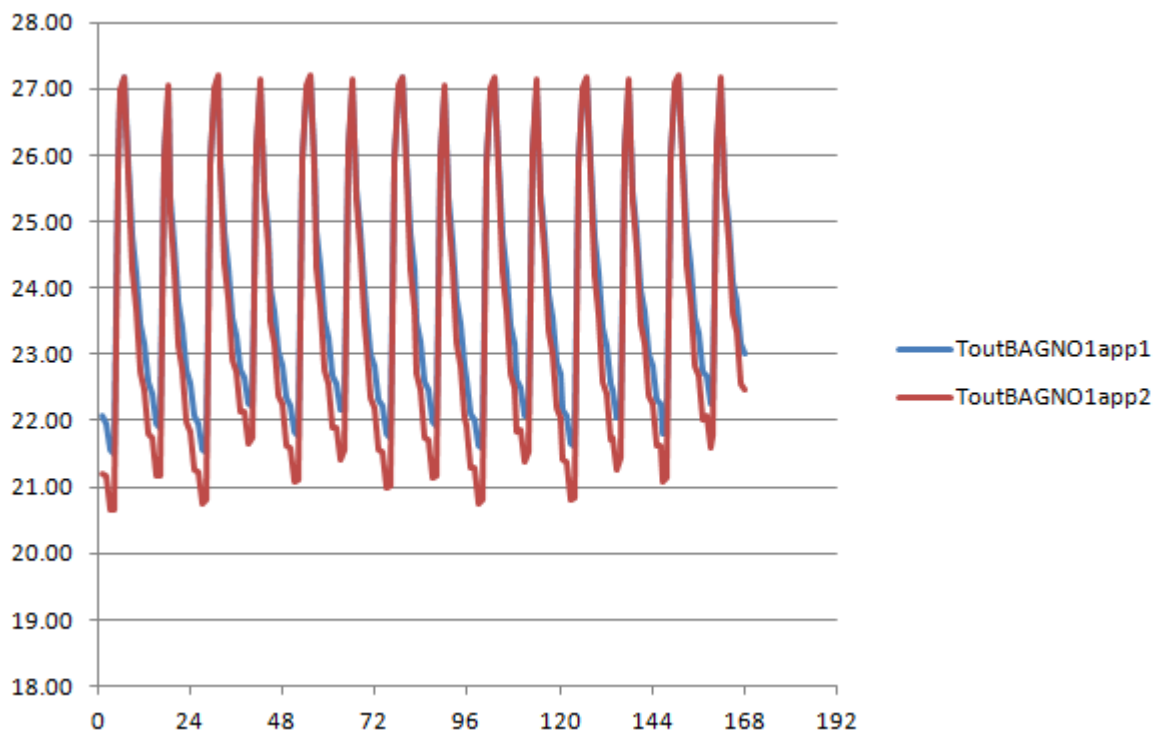
Quindi per avere un confronto significativo ho preso come riferimento la zona Camera 1: in tutti e due gli appartamenti l'unica parete di questa stanza rivolta verso l'esterno è orientata ad Ovest, quindi il fattore radiazione è lo stesso per tutti e due i casi.

Dal grafico di  $T_{AIR}$  si può già notare che nella Camera 1 i valori derivanti dai due differenti pacchetti solaio sono molto simili, ma per poter definire questi due sistemi praticamente uguali da un punto di vista del comportamento termico bisogna valutare tutte le caratteristiche analizzate con TRNSYS.

La  $T_{OUTLET}$  è stabile per quanto riguarda i vari sistemi, si nota solamente che dove i sistemi sono installati con passo delle tubazioni di 10 cm la differenza tra la temperatura d'ingresso del fluido termovettore e quella d'uscita è di circa 2°C, mentre nelle zone Bagno dove il passo delle tubazioni è di 5 cm la differenza di temperatura praticamente si dimezza ed è quindi di circa 1°C.



**Fig. 5.23 – Grafico  $T_{OUTLET}$  zona CAMERA 1**



**Fig. 5.24 – Grafico  $T_{OUTLET}$  zona BAGNO 1**

#### 5.4 ZONA CAMERA 1: CONFRONTI E ANALISI

L'analisi della zona Camera 1 diventa importante per poter trovare conferma riguardo al comportamento notato nell'esposizione precedente dei grafici riguardanti la  $T_{AIR}$ : i due sistemi sembrano avere comportamenti termici molto simili posti all'interno dell'edificio.

Con l'analisi anche della temperatura operativa, di quella del fluido termovettore in uscita dal circuito e della temperatura superficiale si può avere un quadro esauriente del funzionamento dei due sistemi e dare una valutazione oggettiva di questi e delle loro differenze.

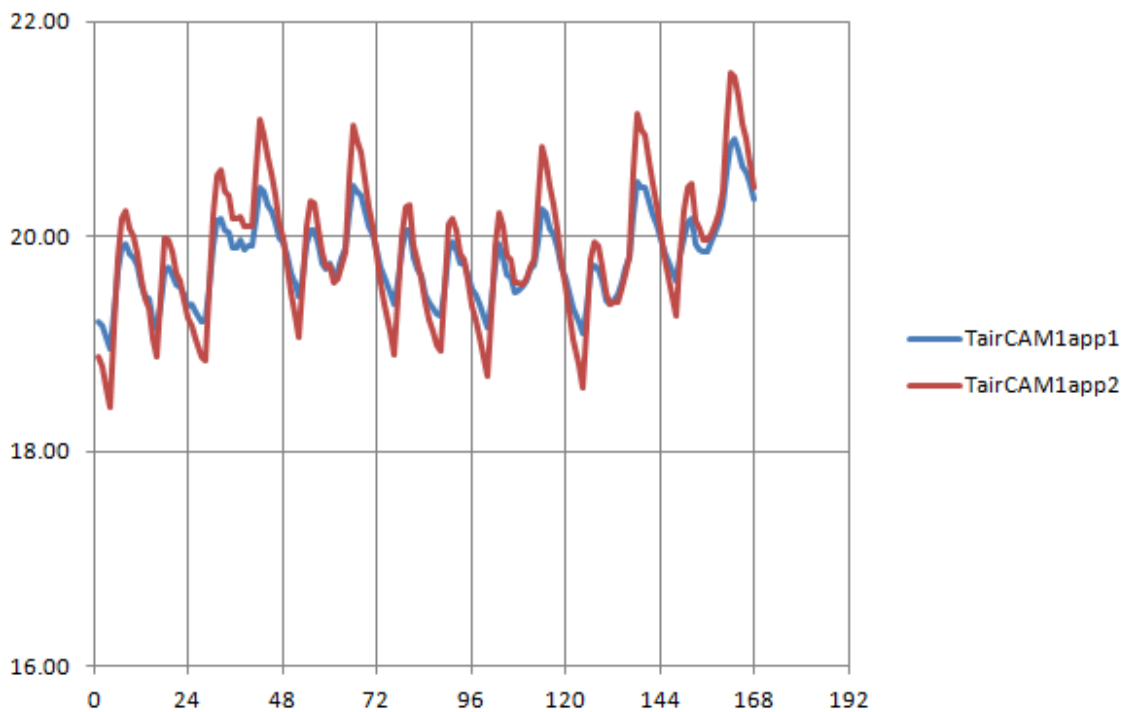
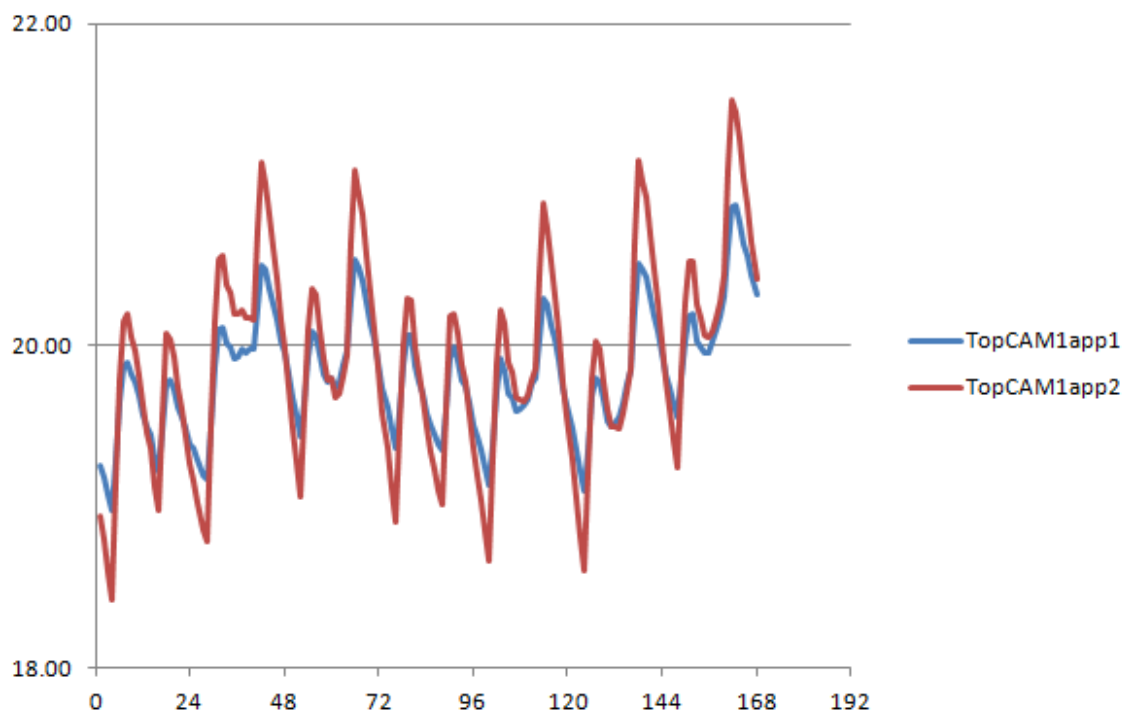
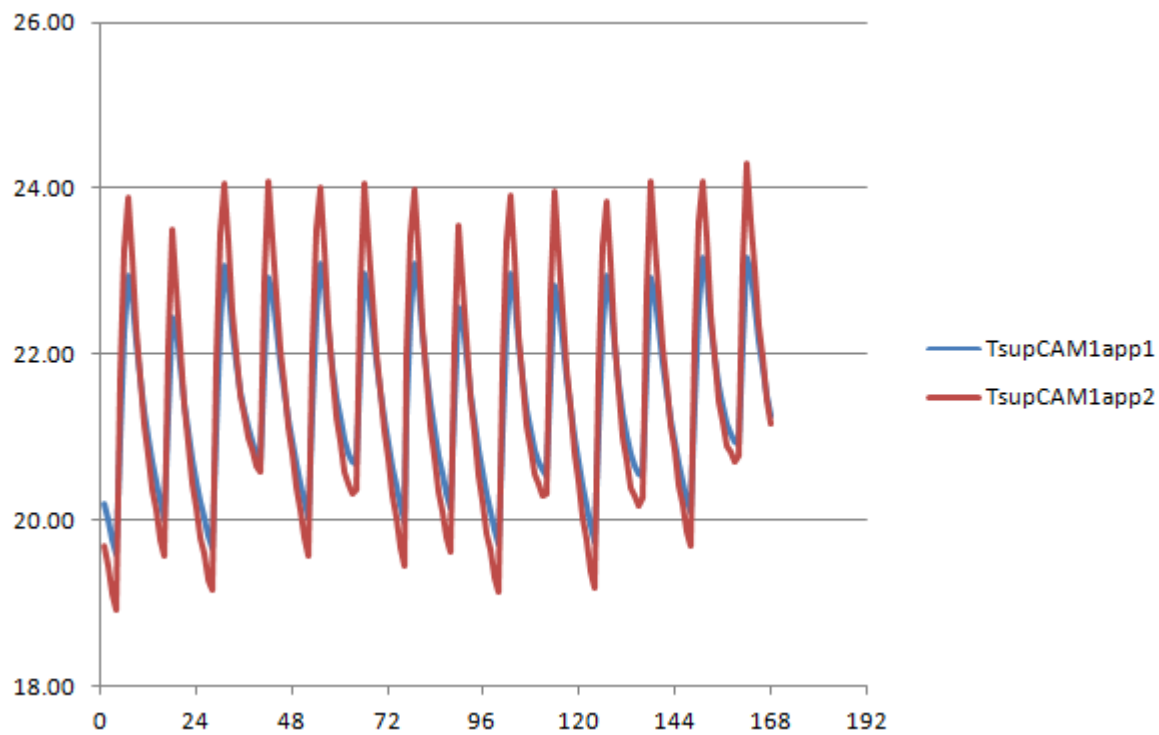


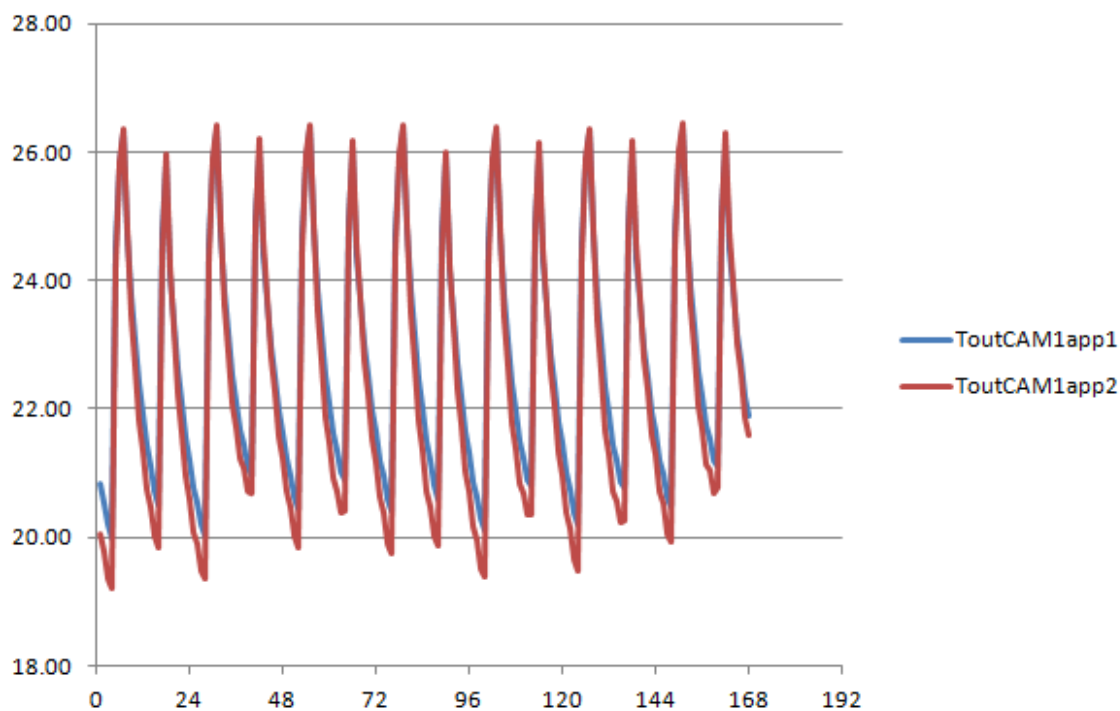
Fig. 5.25 – Grafico  $T_{AIR}$  zona CAMERA 1



**Fig. 5.26 – Grafico  $T_{OPERATIVA}$  zona CAMERA 1**



**Fig. 5.27 – Grafico  $T_{SUP\ INSIDE}$  zona CAMERA 1**



**Fig. 5.28 – Grafico  $T_{OUTLET}$  zona CAMERA 1**

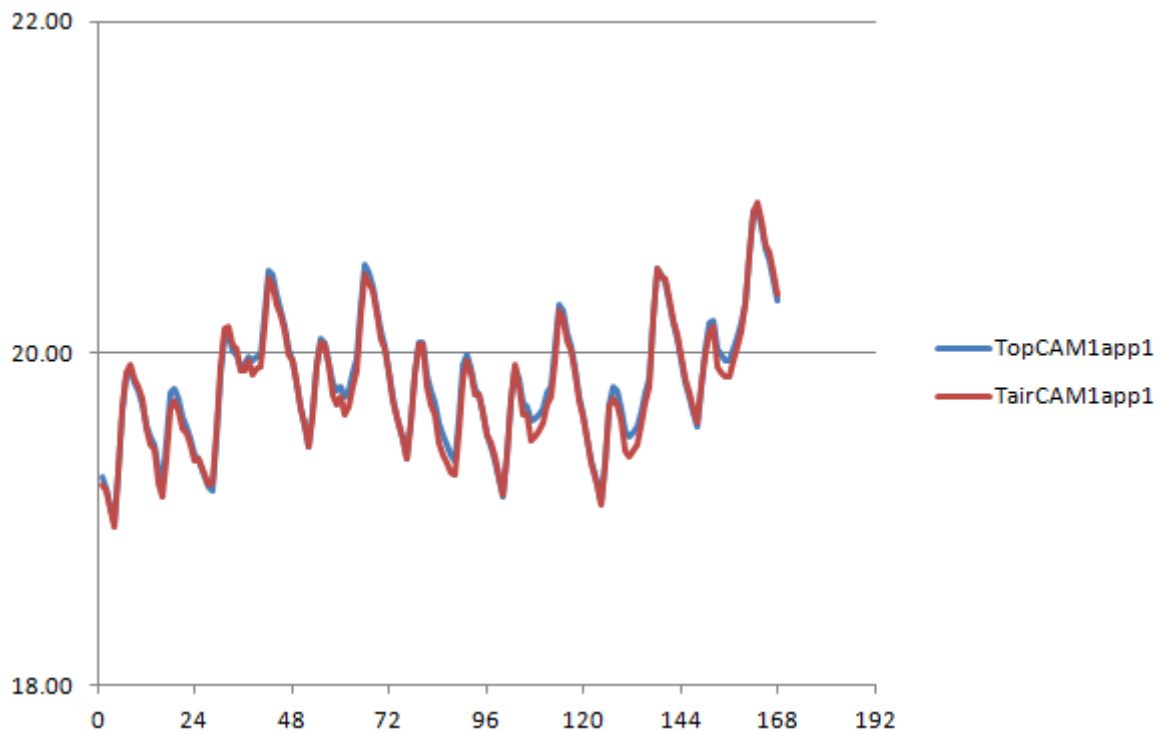
I grafici rappresentano gli andamenti della temperatura media dell'aria. Sull'asse Y è indicata la temperatura in [°C], mentre sull'asse X è rappresentato il tempo in ore, quindi 24 rappresenta l'intervallo di un giorno.

Dal grafico della  $T_{AIR}$  si nota che con solo poche ore di riscaldamento al giorno i due sistemi riescono a mantenere delle temperature confortevoli per tutta la giornata anche nella settimana presa come riferimento che è tra le più fredde dell'anno. I due sistemi permettono lo sviluppo di una temperatura media dell'aria molto simile nei due casi, si nota solo delle piccole differenze: nella fase di riscaldamento l'impianto installato nell'appartamento 2 produce un innalzamento della temperatura leggermente maggiore e più veloce, ma anche una diminuzione della temperatura maggiore in fase di impianto spento. Mediamente possiamo considerare trascurabile la differenza di funzionamento dei due sistemi dal punto di vista della  $T_{AIR}$ .

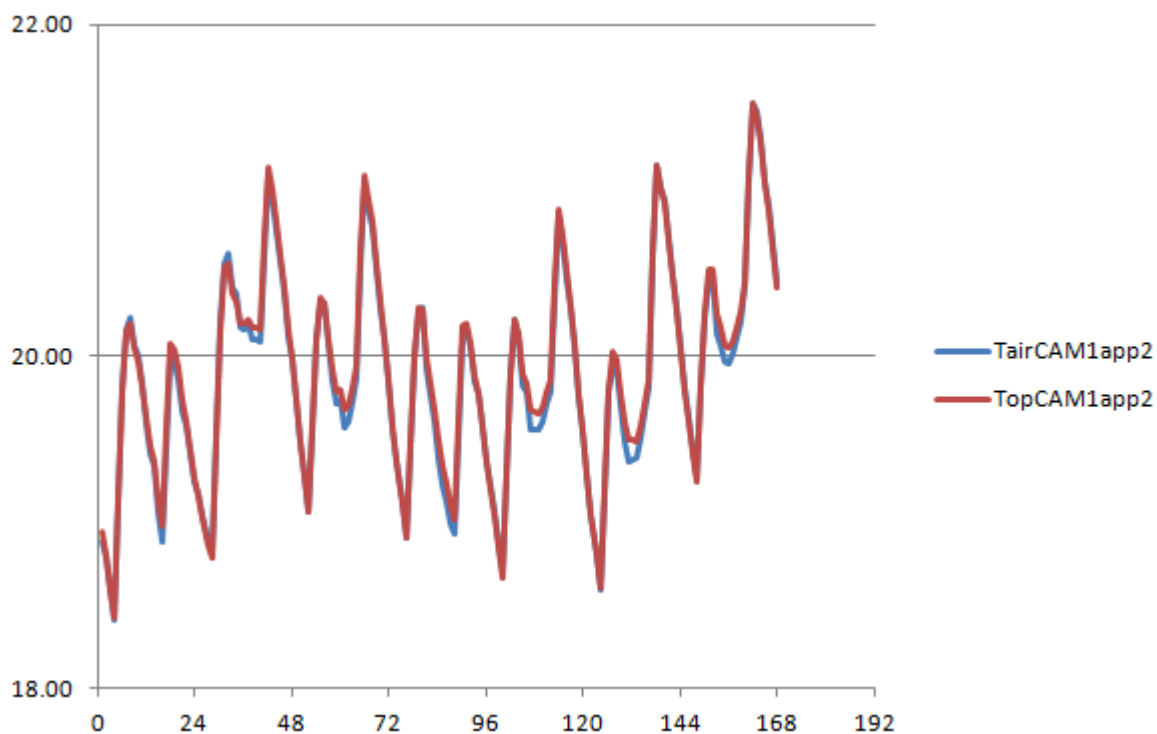
Lo stesso vale per quanto riguarda la temperatura operativa. Il grafico ci mostra lo stesso comportamento visto per la  $T_{AIR}$  che quindi ci porta alle stesse conclusioni.

Il grafico delle temperature superficiali mostra delle buone temperature per quanto riguarda il comfort ambientale: per il sistema appartamento 1 si va dai 20°C ai 23°C mentre per il sistema appartamento 2 dai 19°C ai 24°C con una andamento di queste che rispecchia il comportamento descritto in precedenza. Anche qui si notano differenze minime tra i due funzionamenti.

La Fig. 5.28 rappresenta i valori della temperatura dell'acqua in uscita dal circuito di riscaldamento, si vede che quando l'impianto è a regime la differenza di temperatura tra ingresso e uscita del fluido termovettore è di circa 2°C.



**Fig. 5.29 – Confronto  $T_{AIR}$  –  $T_{OPERATIVA}$  appartamento 1**



**Fig. 5.30 – Confronto  $T_{AIR}$  –  $T_{OPERATIVA}$  appartamento 1**

Confrontando i valori della temperatura media dell'aria e della temperatura operativa si nota come questi siano molto simili, praticamente uguali. Nel primo gli andamenti sono relativi all'appartamento 1 e il secondo al 2 e si vede come il comportamento sia lo stesso.

Potendo nella pratica semplificare il valore di  $T_{OPERATIVA}$  come la media tra la  $T_{AIR}$  e la temperatura media radiante possiamo notare come questi sistemi creino un'ottima omogeneità della temperatura all'interno dell'edificio e questo è un aspetto importante per quanto riguarda il benessere termico.

## ***CAPITOLO 6***

### **CONCLUSIONE**

Le simulazioni fatte con Heat2 dimostrano che a parità di flusso termico e con condizioni al contorno simili e realistiche il sistema di impianto di riscaldamento a pavimento installato nell'appartamento 2 presenta caratteristiche energetiche nel complesso migliori. Il minor isolamento del pacchetto solaio è compensato da una maggiore velocità di trasmissione di calore che permette all'impianto di trasmettere una quantità maggiore di calore in un periodo di riscaldamento limitato a qualche ora come realmente ipotizzabile all'interno di un edificio residenziale.

I risultati ottenuti da questa analisi vede l'impianto come sistema indipendente; le simulazioni sviluppate con TRNSYS modellano invece il pacchetto solaio all'interno come parte integrante del sistema "edificio-impianto" e i risultati ottenuti ci fanno osservare come le differenze tra i due impianti si riducono a valori minimi che possiamo considerare trascurabili.

Esempio è la temperatura superficiale del pavimento che nelle simulazioni su Heat2 presenta differenze circa costanti tra i due pacchetti di 2°C con periodo di riscaldamento di qualche ora, mentre analizzando le temperature con TRNSYS queste differenze praticamente si dimezzano.

Da un punto di vista energetico le due tipologie di impianto, poste all'interno di un edificio energeticamente efficiente come quello studiato in questo elaborato, si possono considerare simili, con differenze di funzionamento trascurabili.

Nel preferire un pacchetto solaio all'altro allora entreranno in gioco altre considerazioni come ad esempio quelle economiche, strutturali, semplicità di lavorazione. Si può pensare che il sistema di impianto installato nell'appartamento 2 possa avere riscontri favorevoli in lavori di ristrutturazione dove possono presentarsi dei limiti di spessori disponibili per l'installazione delle tubazioni.

I risultati dell'elaborato, oltre a definire le caratteristiche dei due sistemi studiati, è un esempio di quanto sia importante non trascurare il fatto che nello studio delle impiantistiche edili non si possa non considerare la tipologia di edificio che queste andranno a servire.

Il concetto di "edificio-impianto" visto come sistema unico permette di ottimizzare le scelte progettuali evitando l'utilizzo e lo sviluppo di tecnologie non utili.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Nicola Rossi, Manuale del termotecnico, Hoepli
- Cavallini A., Mattarolo L., “Termodinamica applicata”, Cleup Editore, Padova
- Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo e del Consiglio dell’Unione Europea
- Direttiva (UE) 2010/31 del Parlamento Europeo e del Consiglio dell’Unione Europea
- Direttiva (UE) 2012/27 del Parlamento Europeo e del Consiglio dell’Unione Europea
- Presentazione Energetica Nazionale 2017 – GSE
- Monitoraggio statistico degli obiettivi nazionali e regionali sulle fonti rinnovabili di energia, anni 2012-2016 – GSE
- Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2018 – ENEA

## **SITI INTERNET**

- [www.casaclima.it](http://www.casaclima.it)
- [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
- [www.airnova.it](http://www.airnova.it)
- [www.furlancostruzioni.it](http://www.furlancostruzioni.it)
- [www.enea.it](http://www.enea.it)
- [www.gse.it](http://www.gse.it)