



## Ricerca di Sistema elettrico

# Sistemi impiantistici ad alta efficienza energetica operanti con basse differenze di temperatura: abaco delle soluzioni, metodi di dimensionamento e nuove tecnologie (IEA – EBC Annex 59)

A. Capozzoli, S. Corgnati, E. Fabrizio, V. Monetti, M. Perino, G. Serale

SISTEMI IMPIANTISTICI AD ALTA EFFICIENZA ENERGETICA OPERANTI CON BASSE DIFFERENZE DI TEMPERATURA: ABACO DELLE SOLUZIONI, METODI DI DIMENSIONAMENTO E NUOVE TECNOLOGIE (IEA – EBC ANNEX 59)

A. Capozzoli , S. Corgnati, E. Fabrizio, V. Monetti, M. Perino, G. Serale (Politecnico di Torino)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Edifici pubblici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso ufficio e scuole. Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Sistemi impiantistici ad alta efficienza energetica operanti con basse differenze di temperatura: abaco delle soluzioni, metodi di dimensionamento e nuove tecnologie”*

Responsabile scientifico ENEA: Gaetano Fasano

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Stefano Corgnati

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 DESCRIZIONE DEL PROGETTO ANNEX 59.....	5
1.1 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ.....	7
1.2 CONCLUSIONI.....	16
2 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	17
3 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	18

## Sommario

L'attività condotta dal gruppo di ricerca TEBE ([www.polito.it/tebe](http://www.polito.it/tebe)) del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino si è sviluppata all'interno delle linee di approfondimento dettate dai progetti EBC-Annex 59 "High Temperature Cooling & Low Temperature Heating In Buildings" [8], Annex 65 "Long Term Performance of Super-Insulation in Building Components & Systems" [9] e Annex 66 "Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings" [1] della International Energy Agency.

Il gruppo ha anche intrapreso, a partire dalla prima riunione, la partecipazione all'Annex 31 "Energy storage with Net Zero Energy Buildings and Districts: Optimization and Automation" (IEA ECES).

Nel presente report viene riportata l'attività relativa all'Annex 59. Viene inoltre anche fornita una indicazione relativamente all'Annex 31.

### *Annex 59 "High Temperature Cooling & Low Temperature Heating in Buildings"*

L'Annex 59 "High Temperature Cooling & Low Temperature Heating In Buildings" [8] è iniziato nel corso dell'anno 2012 ed è incentrato su metodologie di analisi e soluzioni tecniche per evitare o ridurre le perdite dovute alle differenze di temperatura nei diversi processi coinvolti nella climatizzazione di un ambiente chiuso. Infatti, precedenti progetti ECBCS come l'Annex 37 o l'Annex 49 hanno messo in evidenza come l'aumento dell'efficienza exergetica (o di secondo principio) venga ottenuto tramite una riduzione della differenza fra la temperatura dell'ambiente interno e quella del fluido operativo in uscita dalla centrale termica (tipicamente aria e/o acqua). Le perdite dovute a questa differenza di temperatura possono essere classificate come: (1) perdite per scambio di calore e di massa (umidità), (2) perdite per trasmissione di calore durante la circolazione del fluido operativo e (3) perdite nei terminali che scambiano calore (rilascio o assorbimento) con l'ambiente interno.

Pertanto, la riduzione della differenza di temperatura a cui viene scambiato il calore e la rimozione o riduzione degli scambi termici non strettamente necessari al condizionamento dell'ambiente interno sono la chiave per la realizzazione di sistemi HVAC più efficienti.

Dal punto di vista tecnologico, quest'obiettivo può essere raggiunto tramite l'adozione di terminali appropriati integrati nel sistema HVAC. Dal punto di vista progettuale, invece, è necessario modellizzare in maniera accurata lo scambio termico fra i terminali e l'ambiente interno, al fine di ottenere un dimensionamento accurato (e non solo "cautelativo") del sistema e una riduzione consistente degli scambi termici inefficienti.

L'attività del gruppo TEBE all'interno della Subtask A dell'Annex 59 ha riguardato le operazioni per la definizione e calibrazione di un edificio di riferimento da adottare all'interno dell'Annex per la valutazione di nuove soluzioni impiantistiche. L'attività è stata svolta in due fasi distinte. La prima fase dell'attività, che ha riguardato la definizione del modello energetico dell'edificio di riferimento per uffici all'interno del programma di simulazione dinamica EnergyPlus, è stata conclusa. Lo scopo della creazione di tale modello è stato l'utilizzo dello stesso per la definizione di un sistema impiantistico di riferimento da mettere a confronto con soluzioni impiantistiche differenti. La seconda fase dell'attività, all'interno della Subtask A, è attualmente in corso ed è finalizzata alla definizione del sistema impiantistico di riferimento da applicare al modello stesso dell'edificio.

L'attività del gruppo TEBE all'interno della Subtask D dell'Annex 59 è stata legata allo studio di sistemi solari termici a bassa temperatura. Lo studio si è focalizzato sulla riduzione dei livelli termici sia nell'accumulo che nel circuito primario del solare termico. In particolare, si è approfondito l'uso di materiali a cambiamento di fase (PCM) e dei possibili benefici derivanti dallo sfruttamento del calore latente. La prima fase dell'attività è consistita nella ricerca bibliografica sulla letteratura esistente in materia e nella costruzione di un valido modello teorico di descrizione in grado di descrivere un sistema solare termico alimentato a PCM fluidizzati. La seconda fase della ricerca ha visto una notevole attività di sperimentazione in laboratorio delle proprietà

termofisiche dei materiali in questione e la realizzazione di un prototipo in scala reale di un sistema solare termico innovativo. L'ultima fase, ancora in corso di realizzazione, prevede il monitoraggio in continuo di tale sistema ed il confronto, in termini di rendimento medio stagionale, con le tecnologie attualmente presenti sul mercato.

### *Annex 31 “Energy storage with Net Zero Energy Buildings and Districts: Optimization and Automation”*

L'Annex 31, ufficialmente partito con la prima riunione in giugno 2014 a Lione, ha l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica a livello di singolo edificio e di quartiere attraverso lo stoccaggio di energia termica ed elettrica. Le attività dell'Annex si sviluppano sia sul piano teorico con la costruzione di modelli di analisi, sia attraverso casi studio dimostrativi. Il gruppo TEBE del Politecnico di Torino partecipa a questo annex attraverso la condivisione di tre progetti attualmente in corso sul tema, ovvero un progetto riguardante l'ottimizzazione di un impianto a pompa di calore geotermica elio assistita, un progetto riguardante l'installazione di accumuli elettrolitici in un sito industriale dotato di micro-smart grid e un progetto di dottorato (Marie Curie) in tema di ottimizzazione a scala di quartiere di accumuli di energia termica attraverso tecniche di simulazione.

#### 1 Descrizione del progetto Annex 59

Il progetto IA-EBC Annex 59, dopo una fase preparatoria nel 2011, è iniziato con il primo “Expert Meeting” tenutosi ad Aalborg, in Danimarca nell'Aprile 2012. Il gruppo TEBE ha preso parte al progetto come capofila delle sub task A e D. L'ultimo Expert Meeting del progetto si è tenuto a Torino presso Il Politecnico.

L'obiettivo primario dell'Annex 59 è quello di sviluppare una nuova metodologia di analisi dei sistemi impiantistici (HVAC) a servizio di edifici terziari e/o commerciali di grandi dimensioni, quali ad esempio edifici per uffici.

Il progetto ha come scopo quello di presentare nuove prospettive e un nuovo concetto per analizzare gli impianti di climatizzazione negli edifici. Evitare compensazioni nei processi di riscaldamento raffreddamento, umidificazione e deumidificazione, mescolamento di fluidi caldi e freddi, perdite energetiche dovute a un non necessario o inappropriato scambio termico sono le principali direttrici sulle quali il progetto è orientato.

All'interno di tali soluzioni impiantistiche, gli impianti per riscaldamento a bassa temperatura e per raffrescamento ad alta temperatura, basati sulla riduzione della differenza di temperature nello scambio termico, sono oggetto di uno studio particolare all'interno dell'Annex. A tale proposito infatti l'Annex persegue come fine ultimo l'applicazione della nuova metodologia di analisi a sistemi impiantistici per riscaldamento a bassa temperatura e per raffrescamento ad alta temperatura. Il progetto è organizzato in modo da perseguire l'obiettivo di ridurre le perdite di mescolamento e trasferimento di calore, e i quattro subtask sono organizzati e pensati in modo tale superare le attuali limitazioni dei sistemi impiantistici per la climatizzazione.

I principali obiettivi della ricerca possono essere riassunti nei seguenti tre aspetti:

- Stabile e definire una metodologia per l'analisi degli impianti di climatizzazione con la finalità di ridurre le perdite di mescolamento e di scambio termico;
- Proporre un nuovo progetto dei terminali di emissione del calore e nuovi processi di trasformazione dell'aria negli impianti di ventilazione;
- Sviluppare sistemi di riscaldamento a bassa temperatura e sistemi di raffrescamento ad alta temperatura per gli edifici, caratterizzati da un elevata efficienza nel trasporto dell'energia e con appropriati terminali di emissione del calore interni.

A fine di raggiungere i presenti obiettivi, un'analisi approfondita per inquadrare le tecnologie impiantistiche in uso e la progettazione di sistemi impiantistici adeguati e non è necessaria e propedeutica. A tale proposito, al fine di colmare l'attuale inadeguatezza e carenza dei sistemi HVAC, il progetto è suddiviso in quattro Subtask:

#### **Subtask A: Principles and Methodology**

L'obiettivo di questo subtask è quello di individuare una metodologia di ricerca unificata e condivisa. In questo subtask sono state univocamente definiti alcune grandezze o parametri (entransia, exergia ecc.) e il loro campo di applicazione. I principali obiettivi di questo subtask possono essere così definiti:

- Analisi critica sulle attuali metodologie di progetto degli impianti di climatizzazione evidenziando criticità e limiti.
- Individuare casi di studio tipologici da prendere a riferimento per tutti i subtask.
- Studio sulla metodologia e sulla tecnologie dei componenti e processi negli impianti di climatizzazione, come scambiatori di calore, pompe di calore, torri di raffreddamento ecc.
- Introdurre una nuova visione e metodologia per il progetto e l'analisi degli impianti di climatizzazione sulla base degli obiettivi posti nel progetto.

#### **Subtask B: Indoor temperature/ humidity field and Terminal**

Il subtask B è focalizzato sul tema della temperatura e dall'umidità interna. L'obiettivo di questo subtask è proporre appropriati terminali interni che permettono di evitare perdite di mescolamento nello spazio interno. Nell'ambito del subtask sono analizzati i processi di scambio termico sensibile e latente dei terminali interni (pannelli radianti, fan coil ecc) nel raffreddamento ad alta temperatura e nel riscaldamento a bassa temperatura.

I principali obiettivi di questo subtask possono essere così definiti:

- Analizzare le caratteristiche delle sorgenti di calore e massa interni per differenti tipologie di edifici.
- Analisi del campo termico e igrometrico o interno per casi tipologici. Stabilire un metodo di analisi volto a evitare perdite di mescolamento per differenti terminali di emissione del calore.
- Ricerca sui flussi di aria in ambiente, specialmente per i terminali di ventilazione locali. Analizzare l'opportunità di aumentare la temperatura interna attraverso la ventilazione locale.
- Caso di studio: nuove forme e progetto di terminali di emissione e applicazione dei terminali radianti in edifici di grandi dimensioni.

#### **Subtask C: Outdoor air handling process**

Questo subtask è focalizzato sugli impianti per il trattamento dell'aria esterna e in particolare per il trattamento igrometrico. L'obiettivo è quello di stabilire i principi di progettazione per sistemi di deumidificazione con raffreddamento ad alta temperatura.

I principali obiettivi di questo subtask possono essere così definiti:

- Analisi sui processi di trasformazione nei sistemi a deumidificazione chimica solida o liquida con recupero di calore. Analisi del processo di trattamento dell'aria esterna e conversione tra calore e umidità nei flussi d'aria.
- Analisi delle proprietà di accoppiamento dello scambio di calore e massa nei processi di trattamento dell'aria.
- Stabilire i principi di progettazione dei processi di trattamento dell'aria e in particolar modo il processo di deumidificazione.

#### **Subtask D: Total system analysis.**

Il subtask D è focalizzato sul Sistema. L'obiettivo di questo subtask è la progettazione di sistemi di raffrescamento ad alta temperatura e di sistemi di riscaldamento a bassa temperatura considerando sia i terminali che le sorgenti di riscaldamento/raffreddamento.

In questo subtask sarà analizzato tutto il sistema di scambio termico, dagli scambiatori di calore, ai ventilatori, pompe di circolazione pompe di calore ecc. Saranno analizzati le proprietà dei flussi d'aria e il consumo energetico di ventilatori, pompe di circolazione e pompe di calore.

I principali obiettivi di questo subtask possono essere così definiti:

- Analisi delle caratteristiche di carico termico (carico latente, carico di raffreddamento e riscaldamento) per differenti tipologie di edificio e per differenti località climatiche.
- Utilizzo di possibili sorgenti di calore e serbatoi per raffreddamento ad alta temperatura e riscaldamento a bassa temperatura.
- Studio dei consumi energetici per i sistemi di trasporto e distribuzione e analisi della relazione tra la differenza di temperatura e il consumo energetico delle pompe di circolazione
- Analisi di un caso di studio: sistemi di raffreddamento ad alta temperatura e di riscaldamento a bassa temperatura in edifici per uffici per differenti località climatiche. Applicazione e analisi sperimentali di sistemi con trattamento separato della temperatura e dell'umidità.

## 1.1 Descrizione delle attività

L'attività condotta dal gruppo di ricerca TEBE ([www.polito.it/tebe](http://www.polito.it/tebe)) del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino si è sviluppata all'interno di tre Subtask (A B e D) del progetto ECBCS-Annex 59 "Annex 59 High Temperature Cooling and Low Temperature Heating in Buildings" della International Energy Agency.

### 1. SubTask A. Definizione dell'edificio di riferimento

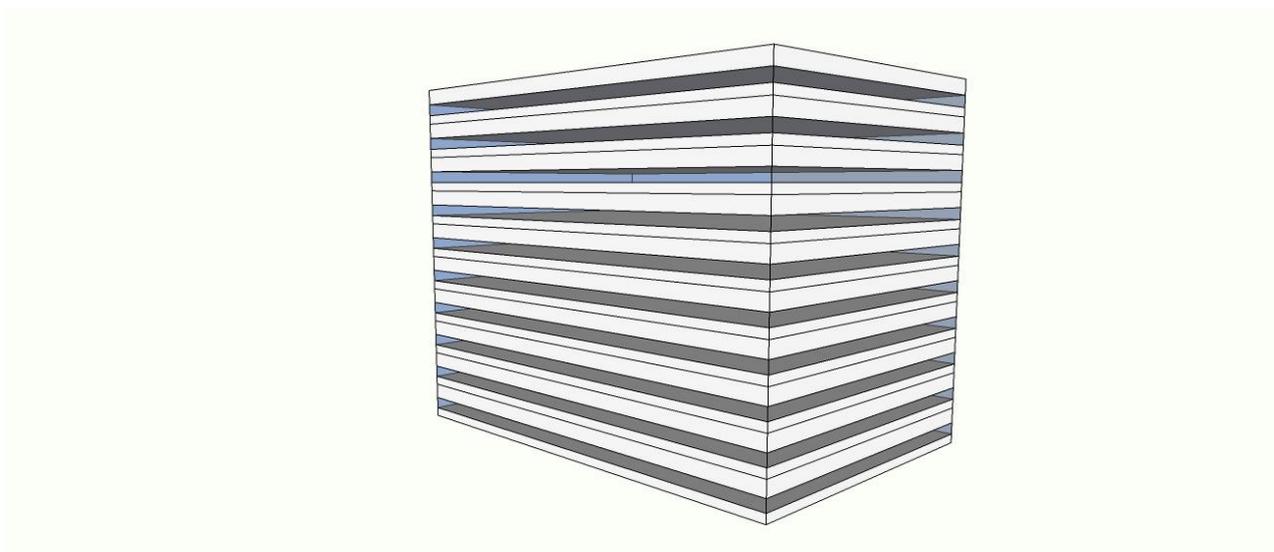
Al fine di analizzare nuove tipologie impiantistiche, è stato definito un modello di edificio di riferimento e condiviso da tutti i partner del progetto, al quale applicare le nuove soluzioni impiantistiche studiate. Il gruppo TEBE, in qualità di capofila della presente Subtask, ha curato la definizione del presente modello di edificio insieme al gruppo belga dell'Università di Liegi.

L'attività di definizione del modello dell'edificio può essere suddivisa in due fasi distinte, una prima, conclusa, che ha riguardato la creazione del modello, a livello geometrico, a livello di involucro edilizio e di utilizzo; una seconda fase, attualmente in corso di definizione, che si è soffermata sulla scelta di un sistema impiantistico di riferimento che possa essere utilizzato per il confronto con altre soluzioni impiantistiche più avanzate, basate sul principio dell'entrasia.

L'edificio scelto è un edificio per ufficio di medie dimensioni. Vari modelli termoenergetici dell'edificio sono stati creati attraverso programmi di simulazione dinamica quali EES, EnergyPlus e Trnsys. Il gruppo TEBE ha sviluppato il modello con il programma di origine statunitense, EnergyPlus.

Il modello di seguito presentato è stato creato a partire da un modello di edificio esistente e facente parte dell'archivio di modelli di edifici del Dipartimento di Energia degli Stati Uniti [11]. L'edificio è stato tuttavia modificato e customizzato in base ad abitudini più tipicamente europee, sia di progettazione che di utilizzo degli edifici per uffici. In particolare sono state apportate delle variazioni al numero di piani dell'edificio, alle caratteristiche termo-fisiche dell'involucro edilizio e alla configurazione impiantistica, rispetto a quelle del modello originale statunitense.

Nel dettaglio l'edificio di riferimento, riportato in Figura 1, è un edificio per uffici di 10 p.f.t. e circa 16600m<sup>2</sup>.

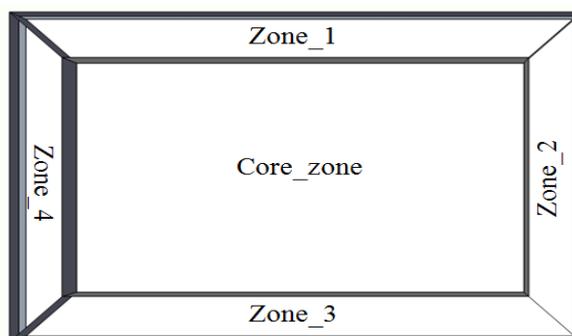


**Figura 1. Vista assonometrica dell'edificio di riferimento per uffici**

Al fine di semplificare il modello energetico, creato all'interno del programma EnergyPlus, il modello dell'edificio risulta composta da tre piani tipo, in funzione delle condizioni al contorno di ciascuno: il primo, che corrisponde a quello a contatto il terreno; il secondo, al quale è stato applicato un moltiplicare di 8, e che corrisponde al piano intermedio; il terzo che rappresenta il decimo ed ultimo piano con la copertura dell'edificio. Ciascun piano dell'edificio è stato inoltre suddiviso in 5 zone termiche climatizzate ed una non climatizzata, in base all'esposizione: una zona centrale, quattro zone perimetrali climatizzate, come indicato nella Figura 2, ed un controsoffitto, che si estende per tutta la superficie in pianta, che ha funzioni di vano tecnico per il passaggio degli impianti.

L'altezza interpiano di ciascuna zona climatizzata è di 2,74 m per un'altezza complessiva di piano, incluso il controsoffitto, di 3,96 m.

Come località climatica di riferimento è stata scelta la città di Francoforte. I dati climatici utilizzati per la definizione del modello dell'edificio, sono contenuti all'interno di un apposito anno tipo, che è stato scaricato dalla banca dati del programma EnergyPlus [12].



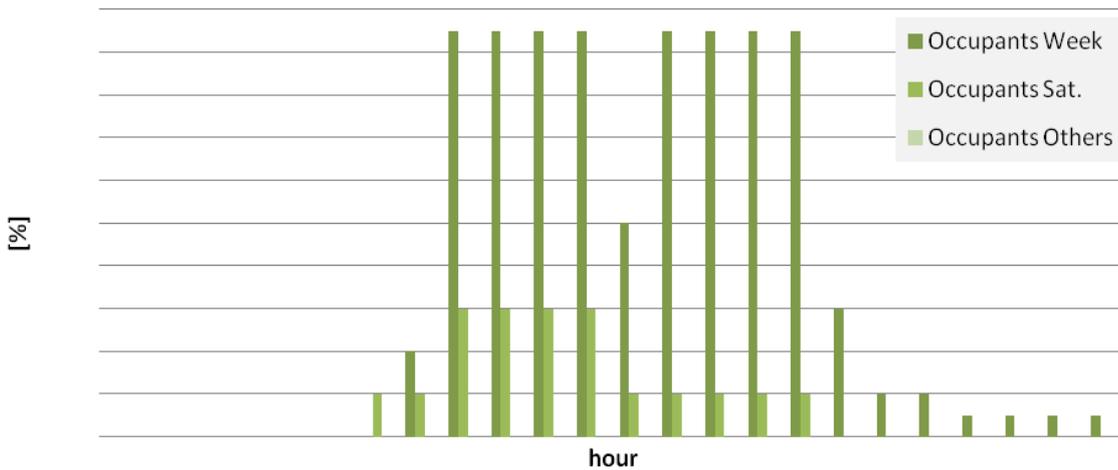
**Figura 2. Zonizzazione termica della pianta tipo dell'edificio di riferimento**

Per quanto riguarda l'involucro edilizio, esso è stato modificato e reso più massivo rispetto a quello del modello originale statunitense, caratterizzato invece da una struttura più leggera. Per i componenti verticali di involucro è stata adottata una muratura in calcestruzzo, isolata con cappotto esterno e caratterizzata da una trasmittanza termica di 0,69 W/m<sup>2</sup>K. La copertura, di tipo piano ed isolata sul lato esterno, presenta una trasmittanza di 0,3 W/m<sup>2</sup>K. Le finestre, sono composte da vetrocamera con Argon all'interno ed una trasmittanza termica di 1,6 W/m<sup>2</sup>K. Non sono presenti sistemi per il controllo della radiazione solare.

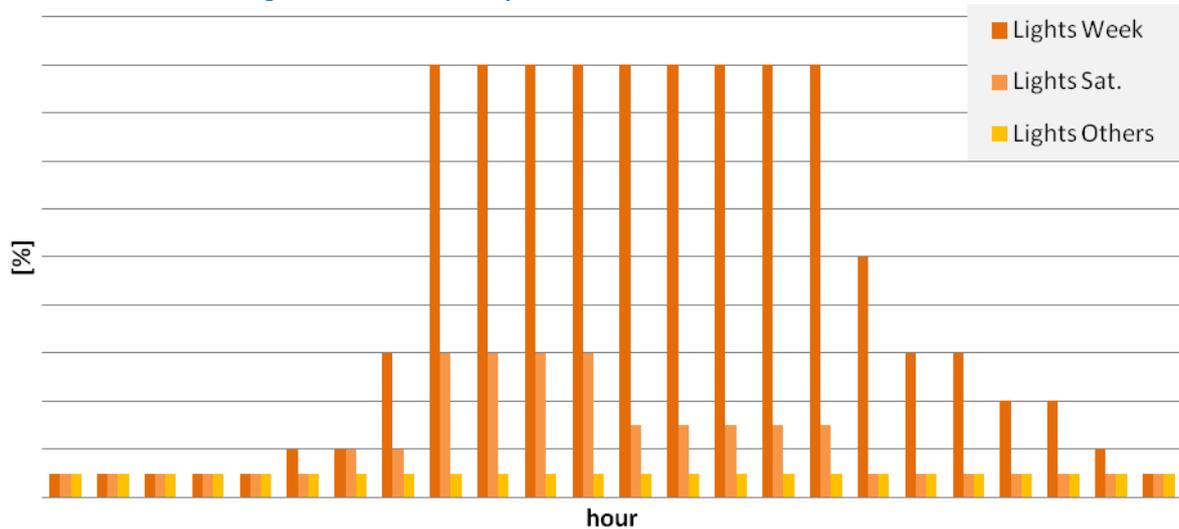
Per quanto riguarda l'utilizzo dell'edificio e gli apporti interni gratuiti ad esso relativi, sono stati definiti degli appositi profili di utilizzo utilizzando come riferimento la norma europea EN 15232 [13]. In particolare

per l'occupazione è stato adottato un tasso di 0,08 pers/m<sup>2</sup>. Per quanto concerne invece l'illuminazione e l'utilizzo di apparecchiature elettriche è stato fissato un valore per la potenza installata rispettivamente di 13 e 10 W/m<sup>2</sup>. Nel caso specifico della zona termica centrale, il tasso di occupazione, insieme alla potenza installata delle apparecchiature elettriche sono state ridotte del 40% rispetto alle altre zone, in quanto nella zona centrale sono previste anche aree di servizio quali ascensori, scale e servizi igienici.

A tale riguardo, sono stati definiti dei profili giornalieri, su base oraria, dell'occupazione, dell'illuminazione e delle apparecchiature elettriche, a ciascun dei quali è stato associato il rispettivo tasso o potenza. Di seguito nelle Figure 3,4 e 5 sono riportati i profili utilizzati per la definizione del modello dell'edificio.



**Figura 3. Profilo di occupazione dell'edificio di riferimento**



**Figura 4. Profilo dell'illuminazione dell'edificio di riferimento**

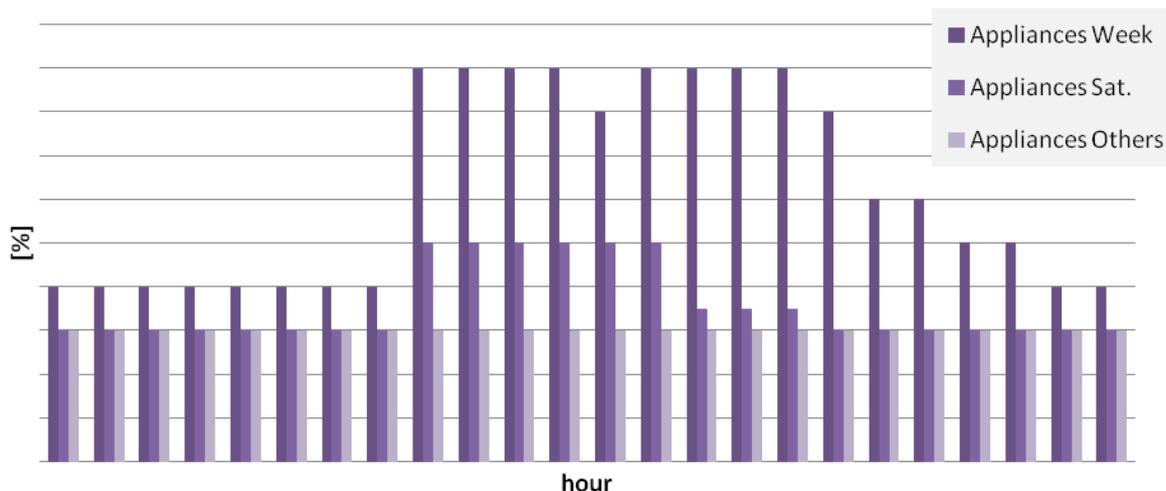


Figura 5. Profilo dell'utilizzo di apparecchiature elettriche dell'edificio di riferimento

Inoltre per quanto concerne la ventilazione è stato fissato un profilo di utilizzo costante durante il periodo di occupazione dell'edificio nei giorni lavorativi, dalle ore 6:00 alle ore 19:00, e dalle ore 6:00 alle ore 17:00 il sabato. Il tasso di ventilazione è stato definito, per ciascuna zona termica, come riportato di seguito nella Tabella 1.

Tabella 1 – Tasso di ventilazione per le zone termiche dell'edificio di riferimento.

Zone Name	Ventilation (m <sup>3</sup> /h)
Perimeter_ZN_1	576
Perimeter_ZN_2	360
Perimeter_ZN_3	576
Perimeter_ZN_4	360
Core	2664
<b>Total</b>	<b>45360</b>

Inoltre per una prima stima del fabbisogno di energia per il riscaldamento ed il raffrescamento dell'edificio, è stato definito un sistema impiantistico ideale. Come riportato di seguito in Figura 6, il set point di temperatura dell'ambiente interno per il riscaldamento è stato fissato a 21°C durante il periodo di occupazione e 16°C durante le rimanenti ore; invece il set point di temperatura per il raffrescamento è impostato a 25°C durante le ore di occupazione e 30°C. nelle restanti ore.

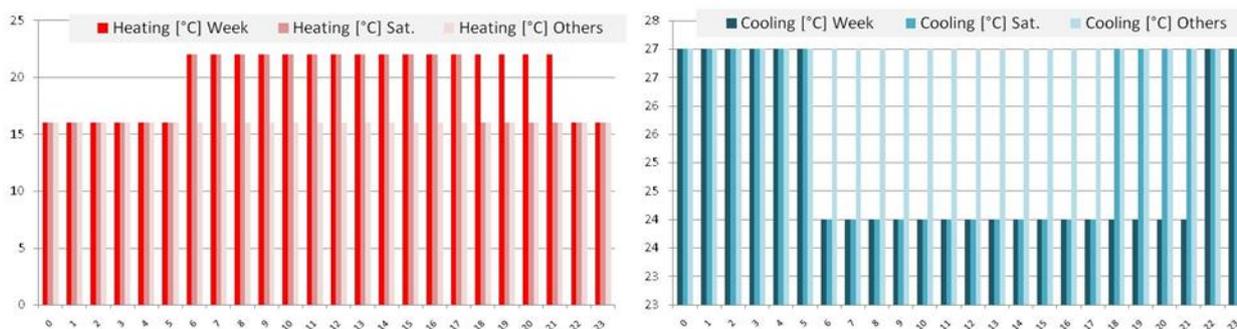


Figura 6. Profilo del set point di temperatura per riscaldamento (a sinistra) e per raffrescamento (a destra) dell'impianto ideale

Il fabbisogno di energia per riscaldamento e per raffrescamento sono pari rispettivamente a 45,5 kWh/m<sup>2</sup> e 42,9 kWh/m<sup>2</sup>. Inoltre, al fine di simulare una situazione più realistica, sono stati definiti, per ciascun zona termica, dei volumi di ricambio orari di infiltrazione ed è stato ricalcolato il fabbisogno di energia per riscaldamento e raffrescamento dell'edificio, pari rispettivamente a 53,4 kWh/m<sup>2</sup> e 42,2 kWh/m<sup>2</sup>.

La prima parte di definizione del modello dell'edificio è stata conclusa ed attualmente risulta in corso di svolgimento l'implementazione dell'impianti di riferimento all'interno del modello creato.

## 2. Subtask B. Analisi dei sistemi radianti.

La modellizzazione accurata della rimozione del calore da parte dei sistemi radianti (soffitti, pareti, pavimenti) ha permesso di evidenziarne prestazioni notevolmente differenti a seconda delle caratteristiche costruttive dell'edificio in cui tali sistemi sono installati e soprattutto del tipo di carico termico che essi devono smaltire. In particolare, si è dimostrato che in presenza di ambienti caratterizzati da un'elevata quantità di radiazione solare diretta entrante l'efficacia, nella rimozione del calore, dei sistemi radianti è notevolmente più elevata di quanto tradizionalmente considerato.

Lo studio condotto è consistito dunque in una prima fase di studio teorica in cui si è elaborato un nuovo modello dei meccanismi di scambio termico tra sistemi radianti e ambiente interno in presenza di elevati carichi termici solari. La progettazione convenzionale dei sistemi radianti considera infatti che la rimozione del calore avvenga unicamente tramite uno scambio termico fra la superficie fredda e gli elementi strutturali dell'ambiente circostante. Tale carico superficiale (Surface Load, SL) è quindi limitato a valori di  $50 - 100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  (a seconda del tipo di superficie radiante) sia dal coefficiente di scambio termico liminare fra superficie e ambiente che dalla temperatura minima della superficie radiante, che non può essere inferiore alla temperatura di rugiada per evitare problemi di condensazione. Il carico termico che non è rimosso dal sistema radiante deve quindi essere "assegnato" ad un sistema ad aria parallelo che garantisca il mantenimento delle condizioni termo igrometriche desiderate. Lo schema seguente riassume la modellizzazione tradizionale, in cui i carichi termici convettivi e radiativi formano il carico dell'ambiente interno (Room Load, RL) che deve essere poi smaltito tramite l'azione combinata del sistema radiante (tramite il Surface Load) e del sistema ad aria (tramite il Cooling Air Load).

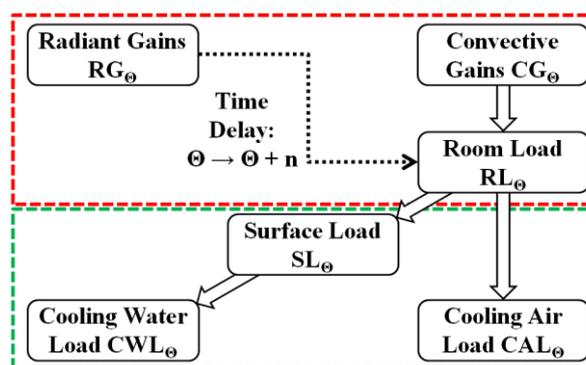


Figura 7. Modello tradizionale

In presenza di elevati carichi termici derivanti dalla radiazione solare diretta, invece, l'ipotesi per cui la rimozione del calore avviene unicamente per effetto della superficie fredda risulterebbe errata e porterebbe ad un dimensionamento errato della totalità del sistema HVAC. Infatti, in presenza di un elevato carico solare diretto il sistema radiante rimuove una consistente frazione di tale carico prima che questo si trasformi in un carico sull'ambiente, quindi prima che abbia una conseguenza sulle condizioni termoigrometriche dell'ambiente: la radiazione solare viene infatti in parte riflessa e in parte trasmessa dalle pareti, dal pavimento e dagli elementi strutturali dell'ambiente interno. La frazione "F" che viene

trasmessa all'interno della superficie in cui è presente il sistema radiante (Direct Water Load, DWL) deve quindi essere esclusa dal calcolo del fabbisogno termico dell'ambiente, poiché è rimossa "direttamente" dal sistema HVAC. Solo la frazione "1-F" che viene riflessa all'interno dell'ambiente concorre a formare il carico termico ambientale che deve essere smaltito, come è evidenziato nello schema seguente.

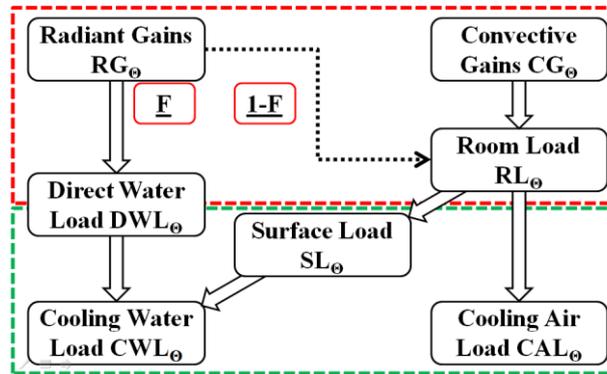


Figura 8. Modello innovativo

Secondo questa nuova prospettiva, dunque, i sistemi radianti consentono di smaltire una quantità di calore notevolmente superiore rispetto a quanto tradizionalmente considerato. Pertanto, il carico termico da smaltire tramite il sistema ad aria è notevolmente inferiore a quanto tradizionalmente considerato, e il dimensionamento di tale sistema può essere notevolmente ridotto.

### 3. Subtask D. Analisi degli impianti di condizionamento. Sistemi solari termici a bassa temperatura

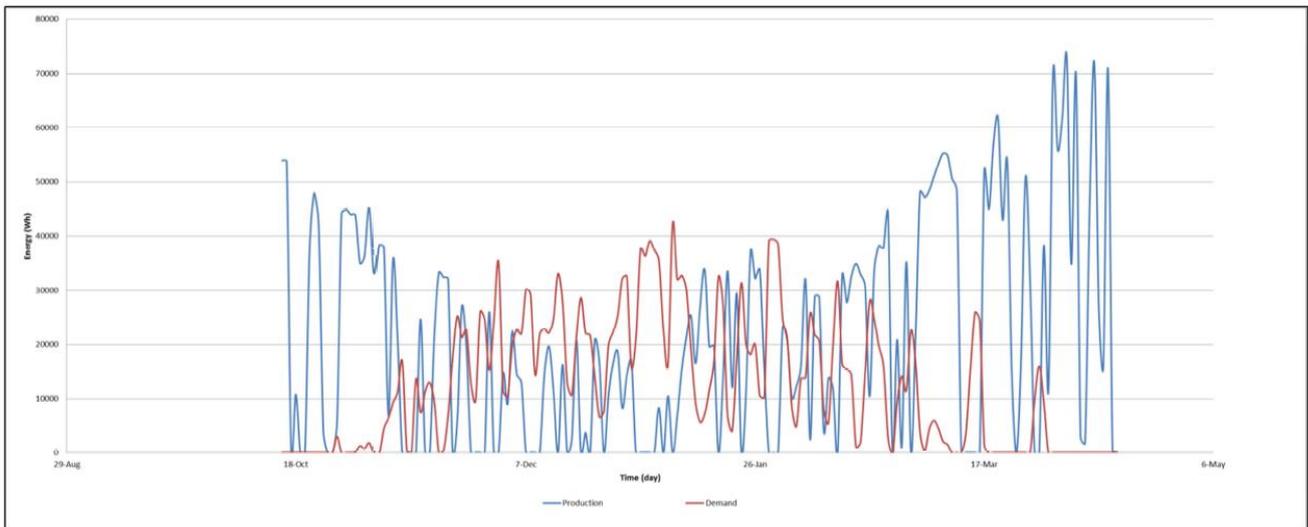
Nel Subtask D il gruppo TEBE si è soffermato sull'approfondimento di soluzioni tecnologiche e progettuali di un particolare sistema impiantistico: i sistemi solari termici. Si è cercato di valutare delle soluzioni in grado di abbassare le temperature di questo sistema e di ridurre il numero di salti termici presenti tra i vari componenti del sistema.

Sebbene l'utilizzo di livelli termici non elevati e la sostanziale riduzione delle temperature negli impianti di riscaldamento abbia migliorato i rendimenti di questi ultimi, non è possibile affermare la stessa cosa per gli accumuli termici. Infatti, sebbene anche in questo caso le temperature inferiori ridurrebbero le dispersioni, esse comporterebbero un drastico aumento delle dimensioni dei serbatoi di accumulo. Poiché, in generale, l'accumulo avviene tramite il solo calore sensibile, la riduzione delle temperature sarebbe la causa di densità energetiche meno elevate e pertanto occorrerebbe incrementare il volume al fine di immagazzinare la stessa quantità di energia. Per questo motivo, spesse volte, impianti con salti termici ridotti risultano comunque combinati con accumuli a temperatura più elevata.

Il grande incremento del ricorso a fonti energetiche rinnovabili, quali ad esempio il solare termico, ha fatto assumere agli accumuli termici un'importanza sempre maggiore. Infatti, è stato necessario sopperire al problema della scarsa contemporaneità tra domanda ed offerta di energia tramite sistemi in grado di accumulare calore in un momento di disponibilità e di rilasciarlo in un secondo momento, quando richiesto dall'utenza. Questo principio è stato oggetto di svariati studi negli anni recenti e ha portato anche il nostro gruppo di ricerca ad approfondire l'argomento, ad esempio cercando di tracciare i profili di carico e scarico dei serbatoi di accumulo (su scala giornaliera o stagionale), mediante una serie di simulazioni energetiche di un'utenza residenziale tipo (alcuni risultati sono riportati in Figura ).

Per i motivi sopra elencati, la possibilità di accumulare energia a bassa temperatura, diventa quindi una scommessa sempre più importante. La riduzione dei salti termici tra le diverse componenti di un impianto termico e delle differenze di temperatura con l'esterno può essere il motivo di un elevato risparmio energetico. Tuttavia questa cosa non può essere fatta a discapito delle dimensioni dei volumi di accumulo,

che devono comunque rimanere contenuti e rispondenti alle necessità progettuali. Per questo motivo, recentemente sono stati studiati ed introdotti in letteratura una serie di accumuli a calore latente (in generale indicati con l'acronimo LHTES Latent Heat Thermal Energy Storage) [16], che riescono a contenere al loro interno grandi quantità/densità energetiche senza innalzare eccessivamente la propria temperatura.



**Figura 9. Confronto, per un'utenza residenziale standard, tra l'energia richiesta giornalmente per il riscaldamento (in rosso) e l'energia prodotta giornalmente da un sistema solare termico (in blu) durante la stagione di riscaldamento**

In particolare risulta di notevole interesse per le ricerche in questione l'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM: Phase Change Material) all'interno degli accumuli termici [17]. I PCM sono delle sostanze chimiche di diversa natura (paraffine, sostanze inorganiche, sali idrati, miscele eutettiche...) in grado di cambiare di fase alle più svariate temperature. Al giorno d'oggi è possibile produrre materiali a cambiamento di fase che temperature di fusione/solidificazione che coprono la maggior parte dei range di temperatura di interesse pratico. Un particolare interesse è stato rivolto ai materiali a cambiamento di fase fluidizzati (slurry PCM o PCS): materiali a cambiamento di fase sospesi o micro-incapsulati all'interno di un fluido (nella maggior parte dei casi acqua) che rimane sempre liquido, indipendentemente dallo stato di aggregazione del PCM [15]. Questi materiali, oltre ad avere migliore diffusività termica, presentano il vantaggio di potere essere utilizzati per il trasporto attivo di calore a temperatura costante. Questa caratteristica permette di inserirli all'interno di tubazioni in impianti che devono trasportare energia termica da un posto all'altro.

Nello specifico, è stata approfondito lo studio riguardante l'inserimento di PCS all'interno di sistemi solari termici. La letteratura scientifica in materia presenta diversi studi al riguardo, nei quali PCM e PCS sono presenti all'interno dei pannelli solari stessi [25], degli accumuli termici [23] o di specifici nodi di accumulo latente [24]. L'obiettivo di queste soluzioni è proprio quello di cercare di ridurre il livello termico di uno specifico componente per garantire rendimenti maggiori. La nostra ricerca ha evidenziato che l'utilizzo di PCS fluidizzati direttamente come fluido termovettore in sostituzione della tradizionale acqua glicolata, potrebbe essere un modo per garantire la presenza del materiale in contemporanea in tutti questi componenti e incrementare notevolmente l'efficienza del sistema riducendo le dispersioni ed il numero di salti termici tra i sotto-sistemi. In Figura vengono presentate due possibili soluzioni tecnologiche di sistemi solari termici a materiali a cambiamento di fase.

Le proprietà termofisiche del nuovo fluido termovettore a PCS saranno funzione del materiale scelto e della concentrazione dello stesso. Una ricerca di letteratura ha portato a comprendere che i PCM micro-incapsulati sono quelli che garantiscono una migliore stabilità e durabilità. Sul mercato sono presenti numerosi materiali di questo tipo ed il range di temperature coperto da questi PCM risulta piuttosto vasto. Partendo dal presupposto che la soluzione ottimale per la ricerca in questione è quella che minimizza il

livello termico e le differenze di temperatura, si è cercato di far coincidere la temperatura di cambiamento di fase con quella cui è necessario far funzionare il sistema. Nella fattispecie, si è supposto di abbinare il sistema solare con un impianto di riscaldamento con pannelli radianti termici come terminali (range di funzionamento 30-35°C). Per questo motivo la temperatura ottimale risulta essere quella leggermente superiore a questo range, in modo da garantire lo scambio termico in tutte le occasioni. Il materiale che meglio aderisce a queste disposizioni è l'n-eicosano micro-incapsulato, il quale transisce di fase tra i 38 ed i 40°C. Per realizzare lo slurry PCS si dovrà disperdere le microcapsule in un fluido termovettore che si è supposto essere acqua glicolata. La concentrazione relativa dei due componenti della sospensione sarà valutata in un secondo momento per ottimizzare lo scambio termico e minimizzare la viscosità del fluido.

**Model 1: Two open loops circuit**

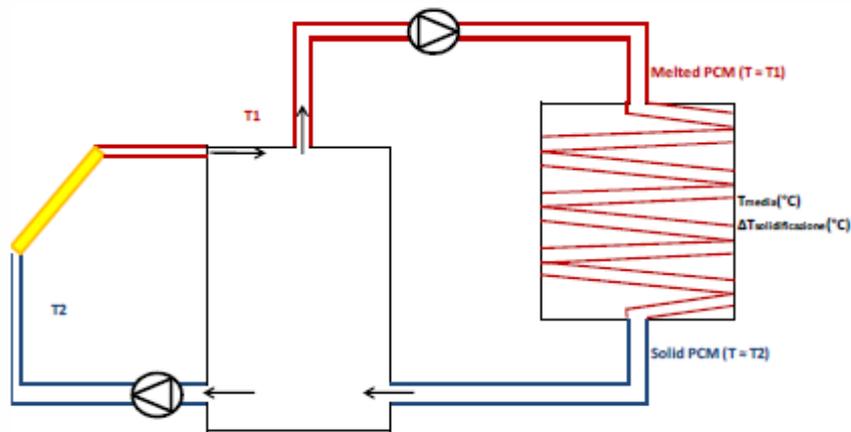


Figure 2. Two open loops circuit diagram

**Model 2: One open loop circuit**

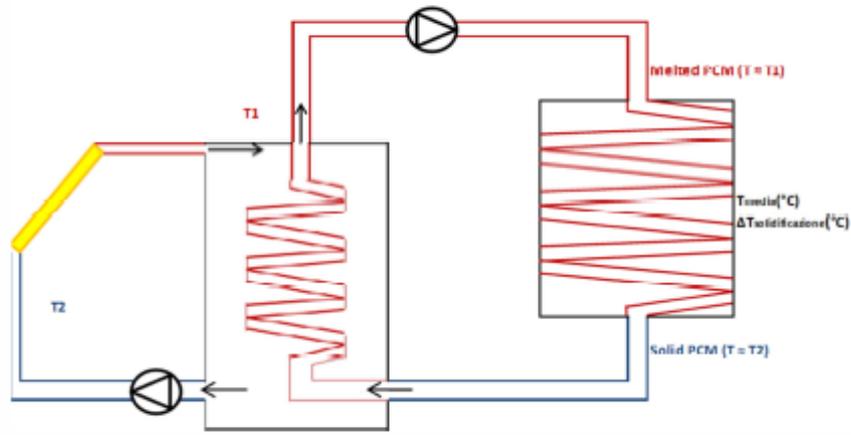


Figure 3. One open loop circuit diagram

**Figura 10. Due possibili configurazioni tecnologiche del sistema solare innovativo. Il modello 1 rappresenta quello energeticamente più efficiente, ma anche più difficile da realizzare tecnologicamente**

In una prima fase sono stati ricercati i benefici di una tecnologia solare termica alimentata a PCS, trovando che la riduzione del livello termico del fluido termovettore comporta sia una riduzione delle dispersioni verso l'esterno di alcuni componenti (tra cui il pannello solare stesso); sia l'aumento del numero di ore utili per produrre energia (a seguito di un abbassamento della radiazione critica minima per produrre energia). Queste supposizioni sono state validate attraverso lo sviluppo di un modello fisico in grado di descrivere il comportamento del pannello solare alimentato con PCS. Partendo dalle note equazioni di Hotter - Willier si è elaborato un modello in grado di considerare lo scambio di calore latente e di quantificare il calore prodotto e l'efficienza istantanea. Combinando questo modello con le condizioni al contorno di tre località italiane site a diverse latitudini (Palermo, Roma e Torino) è stata valutato il calore prodotto nel corso dell'anno mediante questa tecnologia ed il rendimento medio stagionale. Comparando questo risultato con

quanto produrrebbe un pannello solare tradizionale alimentato ad acqua è stato dimostrato che la nuova tecnologia incrementerebbe l'efficienza globale di una quantità che varia 5% al 9% a seconda delle condizioni al contorno considerate (in Figura vengono confrontati il sistema innovativo e quello tradizionale ad acqua glicolata).

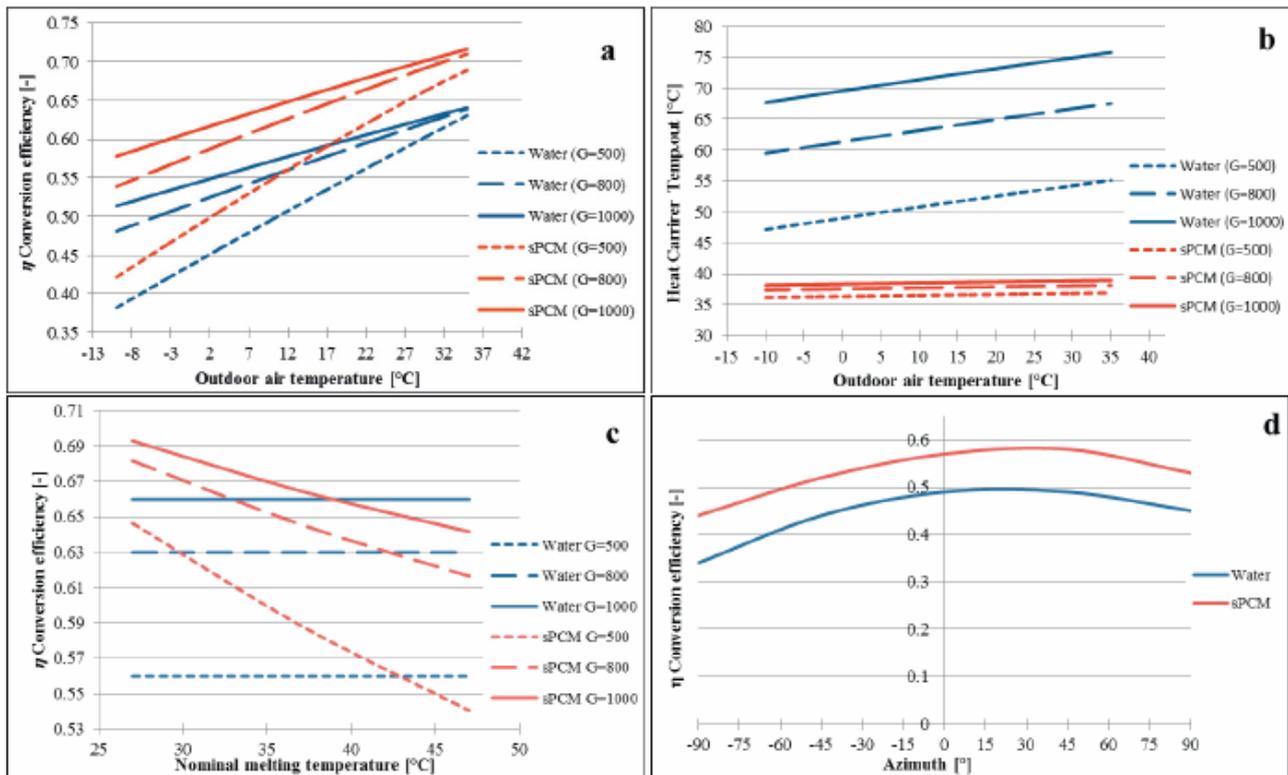


Fig. 3. (a) conversion efficiency ; (b) outlet temperature of the heat carrier fluid; (c) conversion efficiency with different mPCM nominal melting temperature; (d) annual efficiency vs. azimuth angle (CFA climate, Torino, Italy)

**Figura 11. Confronti tra pannelli alimentati a PCS e ad acqua glicolata per diverse condizioni al contorno**

A queste considerazioni va aggiunto un ulteriore miglioramento legato all'abbassamento del livello termico all'interno dell'accumulo termico stesso e le conseguenti minori dispersioni con l'esterno e con il fluido termovettore dei circuiti di distribuzione del riscaldamento all'utenza. D'altro canto il fluido risulta avere una viscosità superiore a quella dell'acqua ed il consumo energetico delle pompe per la movimentazione del fluido termo-vettore aumenterà in modo proporzionale all'incremento di tale caratteristica. In questo ambito sono stati eseguiti numerosi studi di laboratorio, i quali, combinati ad una ricerca di letteratura, hanno portato a dimostrare che per concentrazioni di PCM inferiori al 40% i benefici legati al miglioramento delle proprietà termofisiche sono sempre superiori al maggiore consumo dovuto alla movimentazione [22]. In seguito alle considerazioni di carattere teorico effettuate fino a questo punto, si è provveduto a realizzare un prototipo di sistema solare termico con accumulo alimentato a slurry PCM. Il dimostratore è stato costruito in scala reale e disposto sul tetto del Politecnico di Torino, onde permettere il monitoraggio del rendimento e del calore utile prodotto durante un'intera stagione di riscaldamento. La costruzione di tale sistema ha costretto il gruppo di ricerca a pensare alcune soluzioni tecnologiche apposite, le quali fossero in grado di ovviare ad alcune piccole problematiche legate alla presenza di un fluido termovettore bicomponente [21]. Ad esempio è stato adottato un sistema di controllo diverso dai tradizionali algoritmi di funzionamento di un sistema solare e sono state previste apposti circuiti di by-pass per limitare il fenomeno della sedimentazione delle particelle solide sospese [20].



**Figura 12. Il dimostratore in scala reale montato sul tetto del Politecnico di Torino**

L'attività di ricerca in questione ha visto anche la redazione di alcune relazioni presentate in convegni internazionali e oggetto di pubblicazione su riviste scientifiche internazionali Elsevier (Energy Procedia [18, 21]) e Springer (Lecture Notes in Electrical Engineering [19]). Vedi allegato. Inoltre, la ricerca in questione è stata oggetto anche di approfondimenti da parte degli studenti del Politecnico di Torino e sono state elaborate e discusse al riguardo 3 tesi di Laurea Magistrale ed 1 tesi di Laurea. Inoltre, si apprestano ad essere concluse nei prossimi mesi ulteriori 2 tesi di Laurea Magistrale.

## 1.2 Conclusioni

L'attività del gruppo TEBE all'interno della Subtask A è stata svolta in due fasi distinte, aventi come fine ultimo la definizione di un modello di edificio di riferimento, comprensivo di impianto, da utilizzare per la valutazione di nuove soluzioni impiantistiche, basate su tipologie di riscaldamento ad bassa temperatura e raffrescamento ad alta temperatura. La prima fase dell'attività, che ha riguardato la definizione del modello energetico dell'edificio di riferimento per uffici all'interno del programma di simulazione dinamica EnergyPlus, è stata conclusa. Lo scopo della creazione di tale modello è stato l'utilizzo dello stesso per la definizione di un sistema impiantistico di riferimento da mettere a confronto con soluzioni impiantistiche differenti. La seconda fase dell'attività, all'interno della Subtask A, è attualmente in corso ed è finalizzata alla definizione del sistema impiantistico di riferimento da applicare al modello stesso dell'edificio.

Per quanto riguarda il Subtask D, al momento, le simulazioni svolte e gli studi di letteratura portati avanti fanno prevedere che la tecnologia in questione produrrà ottimi risultati. I primi mesi di ricerca sulle proprietà termofisiche del fluido hanno evidenziato una forte rispondenza tra quanto misurato nella realtà e quanto previsto dei modelli teorici riguardo i PCM. D'altro canto sono emersi alcuni problemi, specialmente per quanto riguarda la stabilità del fluido e la presenza di fenomeni di sedimentazione del particolato solido sospeso. Il ricorso ad alcune specifiche soluzioni tecnologiche ha comunque permesso di ovviare queste limitazioni e portato a realizzare un prototipo di sistema solare termico funzionante. Attualmente, il sistema in questione sta venendo testato con l'acqua come fluido termovettore tradizionale, in modo da poter costruire un campione di riferimento e da validare-verificare i risultati con l'ampio background di esperienze al riguardo. Nei prossimi mesi e nella stagione invernale il sistema verrà testato con il nuovo fluido termo-vettore e i risultati verranno monitorati in continuo. Infine, sono previste ulteriori ricerche sulle proprietà termofisiche dei PCS e analisi di ottimizzazione delle componenti fisico-geometriche. Dai risultati ottenuti verranno eventualmente prodotti ulteriori lavori scientifici sul tema.

## 2 Riferimenti bibliografici

1. IEA – EBC Annex 66. “Definition and simulation”. 2014-2017.
2. Haldi F., Robinson D., Interactions with window openings by office occupants, *Building and Environment* 44 (2009) 2378-2395.
3. Rijal H. B., Tuohy P., Humphreys M. A., Nicol J. F., Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings, *Energy and Buildings* 39 (2007) 823-836.
4. Andersen R.V., Olesen B.W., Toftum J. Modelling window opening behavior in Danish dwellings. *Proceedings of Indoor Air 2011: the 12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Austin, Texas.
5. Nicol J.F., Humphreys M., A Stochastic Approach to Thermal Comfort-Occupant Behavior and Energy Use in Buildings, *ASHRAE Transactions* 110(2):554-568 (2004).
6. Yun G.Y., Steemers K, Baker N. Natural ventilation in practice: linking facade design, thermal performance, occupant perception and control. *Building Research and Information* 2008; 36 (6): 608-624.
7. Herkel S., Knapp U., Pfafferott J., Towards a model of user behavior regarding the manual control of windows in office buildings, *Building and environment* 43 (2008) 588-600
8. Schweiker M., Shukuya M., Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-usage behavior in a residential setting under Japanese climatic conditions, *Building and Environment* 44 (2009) 2137-2149.
9. IEA – EBC Annex 59 “High Temperature Cooling & Low Temperature Heating In Buildings”. 2012-2015
10. IEA – EBC Annex 65 “Long Term Performance of Super-Insulation in Building Components & Systems”. 2013- 2017
11. Reference Buildings at the Department of Energy (DOE) website  
[http://www1.eere.energy.gov/buildings/commercial/ref\\_buildings.html](http://www1.eere.energy.gov/buildings/commercial/ref_buildings.html)
12. Weather File Database from EnergyPlus website  
[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_about.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm)
13. European standard EN15232 : 2007 on “Energy Efficiency in buildings – Influence of Building Automation and Control and Building Management
14. Youssef, Z., Delahaye, A., Huang, L., Trinquet, F., Fournaison, L., Pollerberg, C., Doetsch, C. (2013). State of the art on phase change material slurries. *Energy Conversion and Management*, 65, 120-132.
15. Delgado, M., Lázaro, A., Mazo, J., Zalba, B. (2012). Review on phase change material emulsions and microencapsulated phase change material slurries: materials, heat transfer studies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 253-273.
16. Bugaje, I. M. (1997). Enhancing the thermal response of latent heat storage systems. *International journal of energy research*, 21(9), 759-766.
17. Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
18. Serale, G., Baronetto, S., Goia, F., Perino, M., Characterization and Energy Performance of a Slurry PCM-based Solar Thermal Collector: A Numerical Analysis, in *Proceedings of SHC*, Freiburg, Germany, 23-25 September 2013.
19. Baronetto S., Serale G., Goia F., Perino M., Numerical model of a Slurry PCM based solar Thermal collector, in: *Lecture Notes in Electrical Engineering*, volume 263, 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Xi'an (China) University of Architecture and Technology, 19-21 October 2013. pp. 13-20.
20. Delgado, M., Lázaro, A., Peñalosa, C., Mazo, J., Zalba, B. (2013). Analysis of the physical stability of PCM slurries. *International Journal of Refrigeration*, 36(6), 1648-1656.

21. Serale, G., Cascone Y., Capozzoli A., Fabrizio E., Perino M., Potentialities of a low temperature solar heating system based on slurry phase change materials (PCS) in Proceedings of SEB2014 and Energy Procedia.
22. Delgado, M., Lázaro, A., Mazo, J., Marín, J. M., Zalba, B. (2012). Experimental analysis of a microencapsulated PCM slurry as thermal storage system and as heat transfer fluid in laminar flow. *Applied Thermal Engineering*, 36, 370-377.
23. Kousksou, T., Bruel, P., Cherreau, G., Leoussoff, V., & El Rhafiki, T. (2011). PCM storage for solar DHW: From an unfulfilled promise to a real benefit. *Solar Energy*, 85(9), 2033–2040. doi:10.1016/j.solener.2011.05.012
24. Hailot, D., Franquet, E., Gibout, S., & Bédécarrats, J.-P. (2013). Optimization of solar DHW system including PCM media. *Applied Energy*, 109, 470–475. doi:10.1016/j.apenergy.2012.09.062
25. Rabin, Y., Bar-Niv, I., Korin, E., & Mikic, B. (1995). Integrated solar collector storage system based on a salt-hydrate phase-change material. *Solar Energy*, 55(6), 435-444.

### 3 Abbreviazioni ed acronimi

IEA - International Energy Agency

EBC – Energy in Buildings and Community Programme

IDA – Indoor Climate and Energy

Allegati



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect

Energy Procedia 48 (2014) 223 – 232

Energy

Procedia

SHC 2013, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry  
September 23-25, 2013, Freiburg, Germany

## Characterization and energy performance of a slurry PCM-based solar thermal collector: a numerical analysis

Gianluca Serale<sup>a</sup>, Sara Baronetto<sup>a</sup>, Francesco Goia<sup>a,b</sup>, Marco Perino<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>TEBE research group, Department of Energy, Politecnico di Torino, corso Duca degli Abruzzi 24, Torino 10129, Italy

<sup>b</sup>The Research Centre on Zero Emission Buildings, Faculty of Architecture and Fine Arts, Norwegian University of Science and Technology, Alfred Getz vei 3, Trondheim N-7491, Norway

---

### Abstract

Flat plate solar thermal collector is the most common technology for solar energy conversion at the building scale. This technology has been established since long time and continuous developments have been achieved as time passed by; significant improvements of flat plate solar thermal collectors are thus now limited.

A novel approach to increase further the performance of this technology is based on the exploitation of the latent heat of the heat carrier fluid. In order to assess this strategy, a previously developed numerical model of flat plate solar thermal collector with slurry PCM as heat carrier is herewith used to simulate the technology. The characterization and energy performance of such a system are herewith presented, based on the outcome of the numerical analysis. The results demonstrate that the novel approach is able to improve the performance of the system under different boundary conditions and in different climates: the improvement in the instantaneous efficiency is in the range 5-10%, while during the winter season the converted heat by the slurry PCM-based system is 20-40% higher than that of a conventional water based solar collector, depending on the climates – the colder the climate, the larger the improvement.

© 2014 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Selection and peer review by the scientific conference committee of SHC 2013 under responsibility of PSE AG

**Keywords:** slurry PCM ; flat plate solar thermal collector ; numerical simulation ; parametric analysis ; energy performance

---

\* Corresponding author. Tel.: +39-011-090-4423; fax: +39-011-090-4499.

E-mail address: [marco.perino@polito.it](mailto:marco.perino@polito.it)



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SciVerse ScienceDirect

Energy Procedia 00 (2013) 000–000

Energy  
Procedia

[www.elsevier.com/locate/procedia](http://www.elsevier.com/locate/procedia)

Sustainability in Energy and Buildings, SEB-14

## Potentialities of a low temperature solar heating system based on slurry phase change materials (PCS)

Gianluca Serale<sup>a</sup>, Ylenia Cascone<sup>a</sup>, Alfonso Capozzoli<sup>a</sup>, Enrico Fabrizio<sup>b</sup>, Marco Perino<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Politecnico di Torino, DENERG, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 - Torino (TO), Italy

<sup>b</sup>University of Torino, DISAFA, Via Leonardo da Vinci, 44, 10095 - Grugliasco (TO), Italy

### Abstract

Flat-plate solar thermal collectors are the most common devices to convert solar energy into heat. Water-based fluids are commonly adopted as heat carrier for this technology, although their efficiency is limited by some thermodynamic and heat storage constraints. To overcome some of these limitations, an innovative approach is the use of latent heat, which can be available by means of microencapsulated slurry PCMs (mixtures of microencapsulated Phase Change Materials, water and surfactants). The viscosity of these fluids is similar to that of water and they can be easily pumped. In the present work, some of the thermo-physical and rheological properties and material behaviour that interest flat-plate solar thermal collectors with slurry PCM as the heat carrier fluid are analysed. Concepts of solar thermal systems filled with a slurry phase change material are proposed and a prototypal system is presented. Possible advantages and drawbacks of this technology are also discussed.

© 2014 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Selection and peer-review under responsibility of KES International

*Keywords:* PCMs slurries; Solar thermal collectors; PCS thermo-physical properties; n-eicosane

### 1. Introduction

Flat-plate solar thermal collectors are the most common devices to convert solar energy into heat. Recent studies reported an installed capacity of 234.6 GWh by the end of 2011, which correspond to a total of 335.1 million square meters of collector area in operation [1]. Conventional water-based solar thermal collectors have been widely investigated since the '40s [2] and, since then, several improvements have been achieved in their overall performance and efficiency. Nevertheless, since heating demand takes

\* Corresponding author. Tel.: +39-011-090-4423; fax: +39-011-090-4499.

E-mail address: [marco.perino@polito.it](mailto:marco.perino@polito.it)

## Chapter 2

# Numerical Model of a Slurry PCM-Based Solar Thermal Collector

Sara Baronetto, Gianluca Serale, Francesco Goia and Marco Perino

**Abstract** Flat-plate solar thermal collector is the most common device to convert solar energy into heat. This technology, which mostly adopts water-based fluids, has been widely investigated and improved since it was introduced, yet the exploitation of solar energy is limited by innate technological constraints. An interesting approach to overcome the limitations of these systems is based on the exploitation of the latent heat of fusion/solidification of the fluid—e.g., using a microencapsulated PCM suspended in a water fluid phase, also called slurry PCM. In this chapter, the numerical model of a PCM-based flat-plate solar thermal collector is presented and discussed. Starting from the well-known Hottel–Whillier equation, the physical–mathematical model of a water-based flat-plate solar is suitably modified to incorporate the phase change equations and to account for the different thermophysical properties of a non-Newtonian fluid, such as the slurry PCM. Examples of applications are also given, developing the simulation of the solar collector for different boundary conditions and showing the improved performance of the PCM-based technology in comparison with a conventional solar thermal collector.

**Keywords** Slurry PCM · Solar thermal collector · Numerical model · Simulation

---

S. Baronetto · G. Serale · F. Goia · M. Perino (✉)  
TEBE Research Group, Department of Energy, Politecnico di Torino,  
Corso Duca degli Abruzzi 24 10129 Turin, Italy  
e-mail: marco.perino@polito.it

F. Goia  
The Research Centre on Zero Emission Buildings, Faculty of Architecture  
and Fine Arts, Norwegian University of Science and Technology,  
Alfred Getz vei 3 7491 Trondheim, Norway

A. Li et al. (eds.), *Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning*, Lecture Notes in Electrical Engineering 263, DOI: 10.1007/978-3-642-39578-9\_2, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

13