



Ricerca di Sistema elettrico

Aggiornamento del software *SEAS* per diagnosi energetiche di edifici finalizzato al miglioramento delle valutazioni relative al condizionamento estivo

D. Testi, M. Barbieri, E. Schito, P. Conti,
P. Signoretti, D. Iatauro

AGGIORNAMENTO DEL SOFTWARE SEAS PER DIAGNOSI ENERGETICHE DI EDIFICI FINALIZZATO AL MIGLIORAMENTO DELLE VALUTAZIONI RELATIVE AL CONDIZIONAMENTO ESTIVO

D. Testi, M. Barbieri, E. Schito, P. Conti (DESTEC, Università di Pisa)

P. Signoretti, D. Iatauro (ENEA)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.2 – Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici mirata a conseguire il raggiungimento di edifici a energia quasi zero (nZEB)

Obiettivo: Riqualificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione nZEB

Responsabile del Progetto: Ing. Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Aggiornamento del software SEAS per diagnosi energetiche di edifici finalizzato al miglioramento delle valutazioni relative al condizionamento estivo"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Paolo Signoretti

Responsabile scientifico Università di Pisa: Prof. Ing. Daniele Testi

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
1.1 PREMESSA.....	6
1.2 CARATTERISTICHE DEL MODELLO SEAS LIGHT.....	6
1.2.1 <i>Equazioni che regolano i bilanci termici di involucro</i>	7
1.2.2 <i>Algoritmo di calcolo del modello</i>	14
1.2.3 <i>Modellazione dell'impianto</i>	15
2 PROCEDURA DI CALIBRAZIONE DEI PARAMETRI DINAMICI ESTIVI DEL MODELLO SEMPLIFICATO SEAS LIGHT.....	17
2.1 CARATTERISTICHE DEGLI EDIFICI.....	17
2.2 CARATTERISTICHE CLIMATICHE.....	19
2.3 CARATTERISTICHE GENERALI E PROFILI DI ATTIVAZIONE DELL'IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE.....	19
2.4 CARATTERISTICHE GENERALI DEI COMPONENTI VETRATI E PROFILI ORARI CHIUSURE OSCURANTI.....	19
2.5 CARATTERIZZAZIONE SPECIFICA DEI CASI STUDIO.....	20
2.5.1 <i>Tipologia ufficio</i>	20
2.5.2 <i>Tipologia appartamento</i>	23
2.5.3 <i>Tipologia villetta</i>	31
2.6 FASE DI CALIBRAZIONE.....	38
2.7 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI.....	39
3 VALIDAZIONE SECONDO NORMA EN 15265.....	52
4 IMPLEMENTAZIONE INFORMATICA DEL MODELLO DINAMICO SEAS LIGHT.....	55
4.1 ROUTINE SEAS_LIGHT.M: CREAZIONE DEL MODELLO DI INVOLUCRO.....	56
4.1.1 <i>File Custom.m sezione impianto di climatizzazione</i>	56
4.1.2 <i>File Custom.m - sezione geometria della zona termica</i>	57
4.1.3 <i>File Custom.m - sezione stratigrafia superfici opache</i>	59
4.1.4 <i>File Custom.m - sezione superfici finestrate</i>	59
4.1.5 <i>File Custom.m - sezione programmazione impianto climatizzazione e carichi interni</i>	60

4.2	ROUTINE SEAS_LIGHT.M: FASE DI COLLOCAZIONE GEOGRAFICA E LANCIO DELLA SIMULAZIONE.....	61
4.3	ROUTINE SEAS_LIGHT_INTERVENTO.M	63
4.4	ALTRE FUNZIONALITÀ INSERITE NELL'APPLICATIVO SEAS LIGHT.....	65
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	66
	BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEI MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO	68

Sommario

Nell'ambito di precedenti collaborazioni tra ENEA e DESTEC dell'Università di Pisa, e in particolare del PAR 2014, è stato sviluppato un modello energetico semplificato in regime dinamico, a parametri concentrati, denominato *SEAS Light*. Tramite tale modello, è possibile simulare i fabbisogni energetici di un edificio anche nel periodo estivo.

Attraverso la presente collaborazione, è proseguito lo sviluppo del primo applicativo nazionale per la diagnosi energetica degli edifici nel periodo estivo.

Il lavoro è stato suddiviso nelle seguenti fasi:

1. calibrazione dei parametri dinamici estivi del modello semplificato *SEAS Light* su edifici-tipo ad uso residenziale e uffici, rappresentativi del parco edilizio nazionale, e valutazione dell'accuratezza del simulatore rispetto ai risultati energetici estivi ottenuti tramite un software dinamico completo;
2. descrizione della procedura per la scelta e calibrazione dei parametri incerti del modello, in funzione dei dati storici (fatturazioni, dati di monitoraggio) riguardanti gli usi energetici per la climatizzazione estiva dell'edificio sottoposto a diagnosi energetica;
3. validazione del simulatore attraverso la procedura prescritta dalla norma UNI EN 15265 per i metodi dinamici, con particolare attenzione alla classe di accuratezza nel periodo estivo;
4. implementazione in un applicativo informatico interattivo del modello dinamico, calibrato e validato, per la simulazione e la diagnosi energetica di edifici ad uso residenziale e uffici nel periodo di climatizzazione estiva.

La procedura elaborata si è dimostrata efficace per la stima energetica dei fabbisogni estivi in tutti e 75 i casi studio analizzati. L'applicativo informatico sviluppato permette di svolgere diagnosi energetiche nel periodo estivo in modo rapido e semplificato per l'utente.

1 Introduzione

1.1 Premessa

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato in data 21 dicembre 2016 un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2015-2017 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

La presente relazione tecnica si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2017, per quanto attiene all'Area D "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici", tema di ricerca "D.2 Edifici a energia quasi zero (nZEB)", progetto D.2.1 "Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della PA centrale e locale) mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)", obiettivo a.5 "Aggiornamento del software SEAS per diagnosi energetiche di edifici finalizzato al miglioramento delle valutazioni relative al condizionamento estivo". Il tema sviluppato nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria, dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa riguarda la validazione e l'implementazione informatica del modello *SEAS Light* ai fini della simulazione energetica estiva in regime dinamico di edifici ad uso residenziale e uffici.

1.2 Caratteristiche del modello SEAS Light

Si descrive di seguito il modello *SEAS Light* impiegato nelle simulazioni, come riportato nel Report RdS/PAR2014/068 (settembre 2015), elaborato da DESTEC ed ENEA [1].

Il software *SEAS Light* introduce un modello dinamico a parametri concentrati, in cui sono definite per la zona termica analizzata una capacità termica efficace $K_z [Wh/K]$ e una temperatura di zona $T [°C]$ (modello a singolo nodo).

$$K_z = \frac{1}{3600} \cdot \sum_{p=pareti} K_{int_p} A_p,$$

Dove:

$K_{int_p} [J/m^2K]$ capacità termica periodica della parete calcolata secondo la norma ISO 13786 [2];

$A_p [m^2]$ superficie opaca della parete.

La zona termica è caratterizzata da equazioni di bilancio relative a due contributi richiesti all’impianto di climatizzazione: un contributo associato alla fase di carica necessaria per portare la temperatura di zona T al set point desiderato dopo periodi di evoluzione libera Q_{CA} [Wh], ed un contributo atto a sopperire alle dispersioni di involucro Q_{CB} [Wh] (in seguito a fenomeni di ventilazione, apporti interni, irraggiamento solare, trasmissione attraverso pareti opache e vetrate). Lo schema concettuale è riportato in Figura 1. La zona termica può essere schematizzata anche secondo un’analogia elettrica (Figura 2):

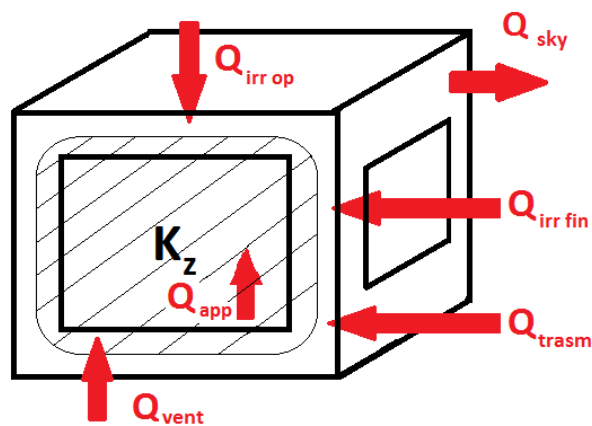


Figura 1: Schema concettuale della zona termica

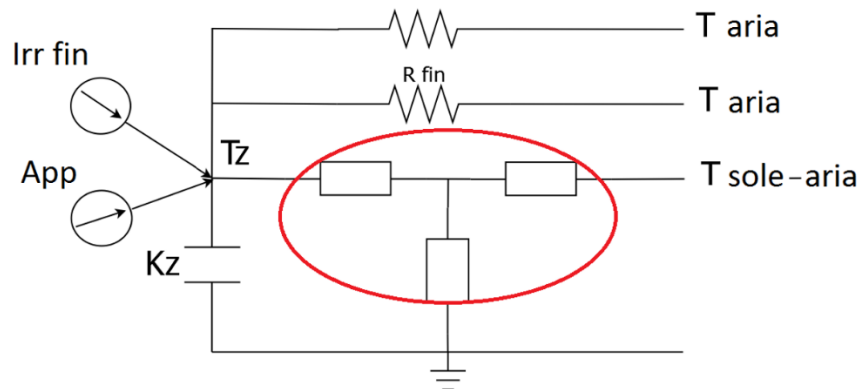


Figura 2: Analogia elettrica della zona termica (la parte del circuito cerchiata in rosso rappresenta il comportamento delle strutture disperdenti)

1.2.1 Equazioni che regolano i bilanci termici di involucro

Si esplicitano le equazioni per il calcolo dei due contributi richiesti all’impianto di climatizzazione in ogni time-step t :

$$Q_{C_A}(t) = \beta_C \cdot K_z (T_{set\ point} - T_z(t - 1))$$

$$K_z \frac{\Delta T_z}{\Delta t} = \sum_{disp} \dot{Q} = [\dot{Q}_{trasm} + \dot{Q}_{sky,op} - \dot{Q}_{irr_{op}}] + \dot{Q}_{trasm,fin} - \alpha_{SOLC} \cdot \dot{Q}_{irr_{fin}} + \dot{Q}_{vent} - \dot{Q}_{app}$$

$$Q_{C_B}(t) = \beta_C \sum_{disp} \dot{Q} \Delta t = \beta_C \cdot K_z \Delta T_z$$

Dove:

$Q_{C_A}(t)$ quota necessaria a portare la temperatura di zona al set-point definito [Wh];

$Q_{C_B}(t)$ quota necessaria a sopperire alle dispersioni di involucro [Wh];

\dot{Q}_{trasm} quota di scambio termico per trasmissione attraverso pareti opache [W];

$\dot{Q}_{trasm,fin}$ quota di scambio termico per trasmissione attraverso superfici vetrate [W];

$\dot{Q}_{sky,op}$ quota di scambio termico tramite scambi radiativi verso il cielo per pareti opache [W];

$\dot{Q}_{irr_{op}}$ quota di irraggiamento solare che incide su pareti opache [W];

$\dot{Q}_{irr_{fin}}$ quota di irraggiamento solare attraverso superfici vetrate [W];

\dot{Q}_{vent} quota di ventilazione [W];

\dot{Q}_{app} quota relativa agli apporti interni [W];

K_z capacità termica efficace della zona termica [Wh/K];

β_C parametro di tuning relativo alla capacità termica efficace;

α_{SOLC} parametro di tuning relativo agli apporti solari attraverso superfici vetrate.

[Differenza con SEAS Light del Report RdS/PAR2014/068](#)

La versione di *SEAS Light* presentata nel Report RdS/PAR2014/068 (settembre 2015) prevedeva l'uso di due coefficienti correttivi entrambi moltiplicativi della capacità termica efficace, uno riferito alla fase di carica, uno alla fase di compensazione delle dispersioni.

Il modello attuale è caratterizzato dalla definizione di due coefficienti dinamici α_{SOLC} e β_C ; il primo è un fattore di correzione degli apporti dovuto all'irraggiamento solare attraverso i componenti trasparenti

\dot{Q}_{irr_fin} , il secondo riguarda l'effetto correttivo sulla capacità termica efficace K_z già introdotto nelle precedenti versioni del modello *SEAS Light*. Il pedice C è riferito alle condizioni impiantistiche di raffrescamento (cooling). I valori numerici di tali coefficienti vengono ottenuti mediante un processo di tuning intrinseco nel modello che verrà illustrato in seguito.

Quota di scambio termico per trasmissione attraverso pareti opache

Nella trattazione seguente, la quota di scambio termico per trasmissione attraverso le pareti opache includerà anche i contributi della quota di dispersione tramite scambi radiativi verso il cielo per pareti opache e della quota di irraggiamento solare che incide su pareti opache, dal momento che nelle equazioni di bilancio si utilizza una temperatura operativa sole-aria:

$$\dot{Q}_{trasm_op} = \dot{Q}_{trasm} + \dot{Q}_{sky,op} - \dot{Q}_{irr_op}$$

La temperatura operativa sole-aria $T_{sol-air}$ [$^{\circ}C$] è una temperatura esterna equivalente capace di causare in un materiale una distribuzione di temperatura pari a quella risultante dovuta alla temperatura esterna reale e agli effetti della radiazione solare assorbita dalla superficie, apportando inoltre il medesimo flusso termico alla superficie [3].

La temperatura sole-aria è definita in modo tale da considerare gli effetti di scambio termico radiativo con il cielo $\dot{Q}_{sky,op}$ [W/m^2], supposto alla temperatura apparente T_{sky} [$^{\circ}C$], che in assenza di dati climatici specifici è ottenuta secondo una prescrizione presente nella UNI EN ISO 13790 [4], che assegna per le aree a clima temperato una differenza di temperatura equivalente $T_{ext} - T_{sky}$ pari a $11^{\circ}C$..

$$T_{sol-air} = T_{ext} + \frac{(\alpha_{abs} \cdot F_{sh,ob} \cdot Irr - \dot{Q}_{sky,op})}{\alpha_{out}}$$

$$\dot{Q}_{sky,op} = FV \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_{ext} + 273,15)^4 - (T_{sky} + 273,15)^4]$$

Dove:

Irr irradianza solare globale normale alla superficie [W/m^2];

$$FV = F_{sh,ob_diff} \cdot \frac{1 + \cos \beta_s}{2}$$

$F_{sh,ob}$ fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni

F_{sh,ob_diff} fattore di riduzione per ombreggiatura relativo alla sola radiazione diffusa

β_S angolo di inclinazione della superficie rispetto all'orizzontale

α_{abs} coefficiente di assorbimento della radiazione della superficie [-];

ε emissività della superficie [-];

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ costante di Stefann-Boltzmann [W/m^2K^4];

T_{ext} temperatura dell'aria esterna [$^{\circ}C$]

$T_{sky} = T_{ext} - 11$;

$F_{sh,ob}$ e F_{sh,ob_diff} , sono introdotti nel modello con lo stesso significato della norma UNI/TS 11300-1 [5].

Le pareti opache sono mezzi di scambio termico capacitivi, ed il modello proposto considera gli effetti dinamici causati dalle fluttuazioni di tutte le forzanti esterne (che si riassumono nella fluttuazione della temperatura sole-aria) tramite una sola equazione.

Per fare ciò si introducono due contributi per la quota di scambio termico \dot{Q}_{trasm_op} [W]: un contributo statico ($\dot{Q}_{trasm_statico}$) ed uno dinamico ($\dot{Q}_{trasm_dinamico}$), intesi entrambi come prodotto di un'opportuna trasmittanza per una differenza di temperatura.

$$\dot{Q}_{trasm_op} = \dot{Q}_{stat} + \dot{Q}_{din} = \sum_{p=pareti} (U_{stat}A_p\Delta T_{stat} + U_{din}A_p\Delta T_{din})$$

1. Per il termine statico si considera la trasmittanza statica della parete U_{stat} [W/m^2K] e la differenza tra la temperatura interna della zona e la temperatura esterna sole-aria, entrambe mediate sulle 24 ore precedenti.

$$\dot{Q}_{stat} = U_{stat}A_p(\bar{T}_z(t) - \bar{T}_{sol-air}(t)) \quad \text{con} \quad \bar{T}_{sol-air}(t) = \frac{\sum_{t-24}^t T_{sol-air}(t)}{24}$$

2. Per il termine dinamico si fa riferimento alle grandezze introdotte dalla ISO 13786. In tale norma si definisce la soluzione esatta di Fourier (attraverso le matrici di trasferimento) al problema di una parete multistrato con condizioni al contorno di temperature sinusoidali e isofrequenziali a media nulla. Tra le varie grandezze proposte dalla norma si è utilizzata la trasmittanza termica dinamica, numero complesso di modulo U_{din} [W/m^2K] e sfasamento ϕ [h], definito come il rapporto tra il

flusso termico calcolato sulla superficie interna e l'oscillazione della temperatura esterna (a media nulla), considerando la temperatura interna costante (pari a zero gradi centigradi). Dal momento che l'effetto delle medie delle temperature è stato considerato con il termine statico, si utilizzano proprio le due grandezze sopra citate per definire il termine dinamico:

$$\dot{Q}_{din} = U_{din} A_p (\bar{T}_{sol-air}(t) - T_{sol-air}(t - \phi))$$

La parete comporta che le forzanti esterne si risentano all'interno dopo un certo ritardo, per questo nel termine dinamico si considera al tempo t la temperatura esterna sfasata proprio di ϕ .

In caso di superficie opaca con funzione di pavimento contro-terra disperdente, la quota di scambio termico $\dot{Q}_{trasm-floor}$ [W] viene stimata riferendosi solo alla componente statica, considerando nel calcolo la trasmittanza statica del pavimento $U_{stat-floor}$ [W/m²K] e la differenza $\Delta T_{stat-floor}$ tra la temperatura interna della zona e la temperatura medio mensile del pavimento, quest'ultima pari alla temperatura medio mensile dell'aria esterna. Il parametro $b_{tr,U}$ è utilizzato per la correzione del coefficiente di scambio termico verso il terreno $U_{stat-floor} A_{floor}$, come illustrato nella norma UNI/TS 11300, che ne riporta nel prospetto 7 i valori suggeriti [5].

$$\dot{Q}_{trasm-floor} = b_{tr,U} \cdot U_{stat-floor} A_{floor} \Delta T_{stat-floor}$$

Quota di scambio termico per trasmissione attraverso componenti trasparenti

La quota $\dot{Q}_{trasm-fin}$ [W] di trasmissione attraverso le finestre:

$$\dot{Q}_{trasm-fin} = \sum_{fin=finestre} U_{fin} A_{fin} (T_z - T_{a\ finestra})$$

Dove:

U_{fin} trasmittanza termica della finestra [W/m²K];

A_{fin} superficie finestrata (compreso telaio) [m²]

$T_{a\ finestra} = T_{ext}$

Nelle ore in cui la finestra è coperta da una chiusura oscurante, il valore della trasmittanza termica della finestra U_{fin} può essere sostituito dal valore $U_{fin_{sh}}$ a causa di effetti di resistenza termica addizionale R_{sh} [m^2K/W] dovuti alla chiusura oscurante:

$$U_{fin_{sh}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_{fin}} + R_{sh}\right)}$$

Quota di scambio termico per apporti solari attraverso i componenti trasparenti

La quota $\dot{Q}_{irr_{fin}}$ [W] di irraggiamento entrante nella zona termica dalle finestre:

$$\dot{Q}_{irr_{fin}} = \sum_{fin=finestre} [F_{sh,ob} F_{sh,gl} (1 - F_f)]_{fin} g_{gl_{fin}} A_{fin} I_{fin}$$

Dove:

g_{gl} coefficiente di trasmissione del vetro alle radiazioni solari. I fattori di riduzione $F_{sh,ob}$ e $F_{sh,gl}$, relativi rispettivamente all'ombreggiamento per elementi esterni e per schermature mobili, sono introdotti nel modello con lo stesso significato della norma UNI/TS 11300-1. F_f è la frazione di area relativa al telaio, I_{fin} è il valore di irradianza solare totale normale alla superficie [W/m^2].

I valori del parametro $F_{sh,gl}$ si alternano seguendo delle dinamiche orarie, definibili come input numerico del modello, e dipendono dalla tipologia di schermatura associata alla finestra; durante le ore del giorno possono alternarsi schermature quali tende interne, chiusure oscuranti esterne chiuse sia completamente che parzialmente.

Quota di scambio termico per ventilazione

Quota \dot{Q}_{vent} [W] di scambio termico per effetto di ventilazione o infiltrazione:

$$\dot{Q}_{vent} = \dot{m}_{ric} c_p (T_z - T_{ext})$$

Dove:

\dot{m}_{ric} portata d'aria di rinnovo [kg/s];

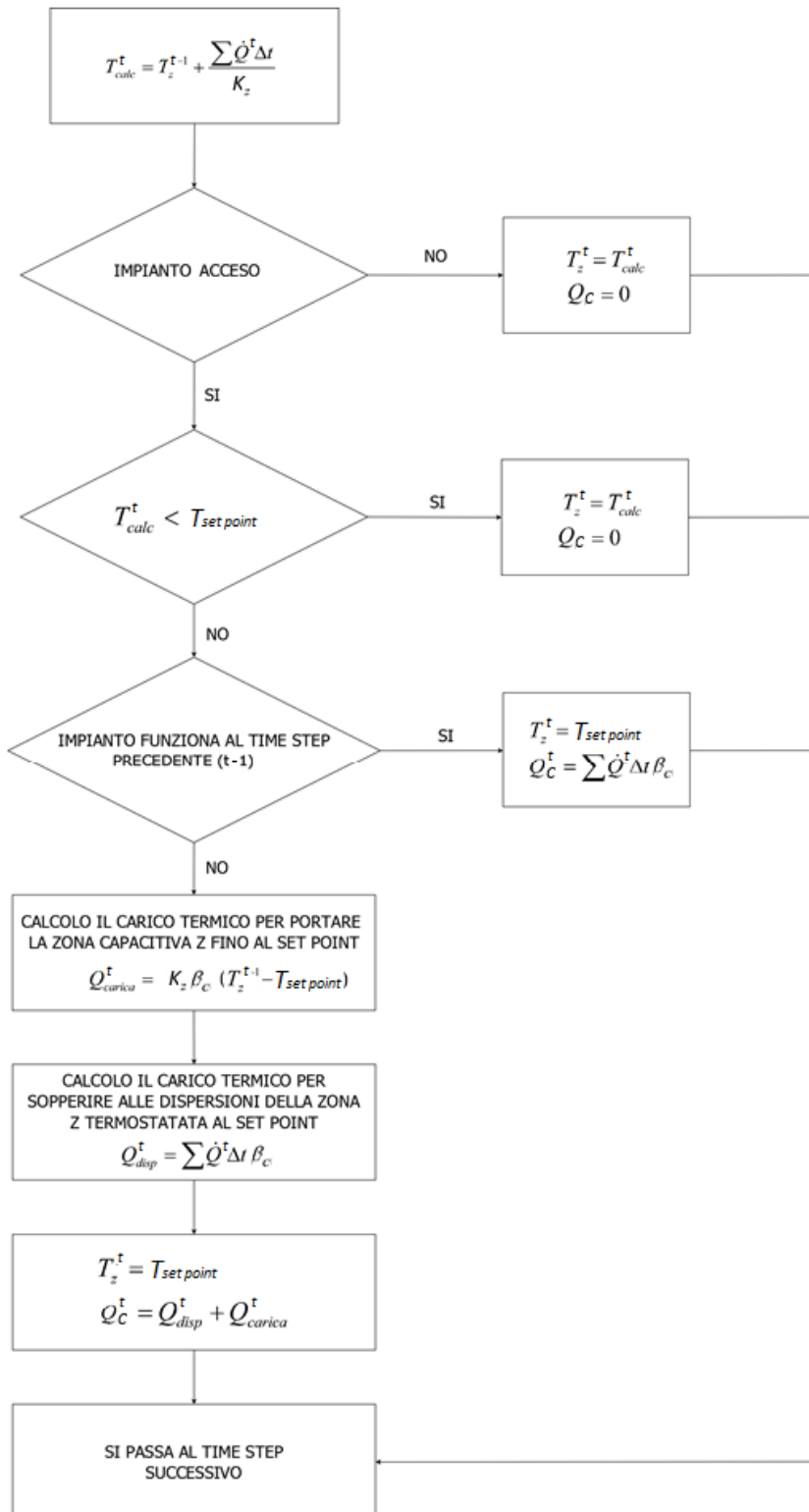
c_p calore specifico aria [J/kgK]

Quota relativa agli apporti interni

I carichi interni \dot{Q}_{app} [W] sono definiti tramite profili orari sotto forma di input numerico del modello.

1.2.2 Algoritmo di calcolo del modello

Nella pagina seguente si riporta lo schema concettuale dell'algoritmo:



1. Si calcola la temperatura al time-step t a partire dalla temperatura al time-step t-1 considerando il bilancio di energia della zona in evoluzione libera.
2. Si verifica se l'impianto nel time-step t è acceso o meno: se la programmazione dell'impianto impone che sia spento, la temperatura calcolata in 1 diventa la temperatura del time-step t, altrimenti si passa al punto 3.
3. Si verifica se la temperatura calcolata in 1 supera il set-point. Se non lo supera tale temperatura diventa la temperatura del time-step t, altrimenti si passa al punto 4.
4. Si verifica se l'impianto era acceso al time-step t-1. Se sì, non occorre caricare la zona (che ha capacità K_z), quindi si impone la temperatura di zona pari a $T_{set\ point}$ e si calcolano le dispersioni della zona, che costituiscono il fabbisogno di involucro; se l'impianto è spento al time-step t-1, al calcolo delle dispersioni si aggiunge la carica della capacità della zona. In entrambi i casi la temperatura della zona diventa $T_{set\ point}$.
5. Si passa al time-step successivo.

1.2.3 Modellazione dell'impianto

Il modello dell'involucro definisce il fabbisogno orario dell'edificio; per definire almeno in prima approssimazione il comportamento dell'impianto asservito all'involucro, il modello *SEAS Light* necessita di informazioni riguardo la potenza termica nominale erogata $\dot{Q}_{term_{MAX}}$ [kW] e il rendimento η_C , parametro che considera l'effetto dei rendimenti dei terminali e di distribuzione. La prestazione della macchina frigorifera (sottosistema di generazione) è inoltre determinata dal COP stagionale, in modo da determinare i consumi di energia elettrica dell'impianto di raffrescamento.

La temperatura della zona termica T_z non può essere utilizzata per definire i tempi di funzionamento dell'impianto, in quanto non è rappresentativa della temperatura dell'aria su cui agiscono i sistemi di controllo. In effetti, si attua un controllo non sulla temperatura ma sull'energia.

Attraverso i dati di input sulla configurazione impiantistica effettivamente installata, è possibile effettuare una ridistribuzione della potenza da fornire per compensare i carichi termici; verrà creato quindi un vettore $Q_{C-corr}(t)$ [kWh] definito come di seguito.

Sapendo che il terminale può sopperire nel time-step t al fabbisogno di involucro orario (comprensivo di eventuale surplus definito in seguito) $Q_C(t) + Q_{surplus}(t - 1)$ erogando al massimo una potenza termica nominale costante $\dot{Q}_{term_{MAX}}$ per tutto il time-step t ,

se $\dot{Q}_{term_{MAX}} \cdot t < Q_C(t) + Q_{surplus}(t - 1)$ si ha un surplus di energia da dover coprire nel time-step successivo,

$$Q_{surplus}(t) = Q_C(t) + Q_{surplus}(t - 1) - \dot{Q}_{term_{MAX}} \cdot t$$

$$Q_{C-corr}(t) = \dot{Q}_{term_{MAX}} \cdot t;$$

se $\dot{Q}_{term_{MAX}} \cdot t \geq Q_C(t) + Q_{surplus}(t - 1)$ l'impianto riesce a compensare nel time-step il fabbisogno di involucro orario, erogando una quantità di energia

$$Q_{C-corr}(t) = Q_C(t) + Q_{surplus}(t - 1),$$

$$Q_{surplus}(t) = 0$$

Quest'ultimo punto mostra come la potenza dell'impianto sia considerata modulabile tramite il generatore in ogni time-step.

Il modello di impianto proposto si può riferire ad impianti idronici o ad espansione diretta. Il modello di impianto non prevede sezioni di trattamento aria, infatti in *SEAS Light* non è presente un modello igrometrico

e non è attualmente possibile quantificare gli effetti di eventuali dispositivi di deumidificazione, UTA, ventilatori.

2 Procedura di calibrazione dei parametri dinamici estivi del modello semplificato *SEAS Light*

Per procedere con la fase di calibrazione e validazione del software *SEAS Light*, è stato scelto di testare il modello su edifici-tipo rappresentativi del parco edilizio nazionale con destinazione d'uso residenziale o ufficio, dei quali siano noti i fabbisogni energetici estivi. Attraverso combinazioni tra località geografica, tipologia geometrica degli edifici e stratigrafia degli elementi strutturali sono stati definiti 75 casi studio. I valori dei fabbisogni termici orari di involucro degli edifici scelti come riferimento sono stati ottenuti da simulazioni condotte con il software dinamico completo TRNSYS 17.

Ciascuno dei 75 casi è stato quindi elaborato anche dal software *SEAS Light*, conducendo la simulazione rispetto a TRNSYS 17 a parità di:

- caratteristiche climatiche;
- caratteristiche geometriche e stratigrafiche;
- caratteristiche e profili orari di attivazione dell'impianto di climatizzazione;
- profili orari dei carichi interni dovuti alle persone e alle loro attività;
- profili orari delle tende e chiusure oscuranti alle finestre;
- effetti di ombreggiatura sulle superfici (assenti)
- ricambio orario dell'aria nel locale (costante e pari 0,5 volumi/ora).

Gli output della simulazione sono:

- fabbisogni termici orari di involucro;
- temperatura media oraria della zona termica (nodo aria per *TRNSYS 17*, nodo operativo per *SEAS Light*).

2.1 Caratteristiche degli edifici

Per il modello di involucro sono state definite quattro tipologie di edificio di riferimento, che differiscono dal punto di vista geometrico e secondo il numero delle pareti disperdenti:

1. ufficio, con una singola parete verticale disperdente esposta ad ovest;
2. appartamento, con tre pareti verticali disperdenti esposte ad ovest, sud e nord;
3. villetta bi-familiare a due piani con copertura orizzontale, con tre pareti verticali disperdenti esposte ad ovest, sud e nord, e con copertura orizzontale e pavimentazione contro-terra anch'esse disperdenti;
4. villetta bi-familiare a due piani con tetto a doppia falda, con tre pareti verticali disperdenti esposte ad ovest, sud e nord, e con copertura inclinata (esposizione nord-sud) e pavimentazione contro-terra anch'esse disperdenti.

Per ciascuna tipologia di edificio (ufficio, appartamento, villetta bi-familiare) sono state adottate specifiche stratigrafie per la definizione delle caratteristiche termiche di pareti verticali, coperture, pavimenti, divisori interni. Nei successivi sottoparagrafi sono riportate per ciascun componente opaco le seguenti grandezze termiche: trasmittanza termica statica U [W/m^2K], calcolata secondo il metodo illustrato nella norma UNI EN ISO 6946:1999 [6], trasmittanza termica periodica U_{din} [W/m^2K], capacità termica periodica K_{int} [J/m^2K] e sfasamento ϕ [h], calcolate secondo la norma ISO 13786 [2]. Questi parametri sono forniti anche da tutti i software certificati dal Comitato Termotecnico Italiano in termini di conformità per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti.

Per gli uffici è stata scelta una singola tipologia di utenza, mentre per gli appartamenti e le villette sono previsti tre tipi di utenze diverse, che si riflettono in altrettanti profili orari di apporti interni, di gestione dell'impianto di climatizzazione e di scheduling delle chiusure oscuranti e delle tende interne delle finestre:

- utenza «Pensionato», famiglia di due persone, presenti con frequenza all'interno dell'edificio;
- utenza «Famiglia», famiglia di quattro persone (due adulti entrambi lavoratori nelle ore centrali del giorno, due figli);
- utenza «Impiegato», lavoratore che vive da solo.

Al fine di introdurre edifici-tipo rappresentativi del parco edilizio nazionale, è stato scelto di riferirsi a tre diverse zone geografiche: sud, centro e nord. Come riferimento sono state scelte le località di Catania, Pisa e Torino. Per ciascuna zona geografica sono state selezionate le strutture edilizie più idonee tra quelle presenti nella norma UNI/TR 11552 del 2014 [7]; tale scelta è stata effettuata consultando le indicazioni di massima, riportate nella norma, relative alla diffusione sul territorio delle strutture indicate nell'abaco.

2.2 Caratteristiche climatiche

Il software *SEAS Light* è dotato di una routine di calcolo che consente di definire i profili orari di temperatura dell'aria esterna e di irraggiamento in direzione normale per ciascuna delle superfici esterne dell'edificio. Per definire tali caratteristiche climatiche orarie è stato utilizzato il database del CTI, formato da archivi in formato foglio elettronico scaricabili gratuitamente dal sito del Comitato Termotecnico Italiano [8]: per ciascuna regione geografica sono disponibili i dati dell'anno meteorologico caratteristico, definiti attraverso valori medi orari di un periodo di misurazione ampio almeno dieci anni. Per ciascun capoluogo di provincia, rappresentato da una corrispondente stazione di rilevazione identificata attraverso nome, coordinate e altitudine, sono forniti tra gli altri i valori orari delle seguenti variabili meteo:

- temperatura dell'aria esterna [$^{\circ}C$];
- irradianza solare globale, diretta e diffusa su piano orizzontale [W/m^2].

La routine meteorologica interna a *SEAS Light* è stata quindi utilizzata per ottenere i dati climatici delle tre località (Pisa, Catania, Torino) scelte per la fase di calibrazione e valutazione del simulatore. I dati ottenuti sono stati utilizzati anche come input per le simulazioni condotte con *TRNSYS 17*.

2.3 Caratteristiche generali e profili di attivazione dell'impianto di climatizzazione

I profili orari di attivazione dell'impianto per i casi studio dipendono dai corrispondenti profili orari dei carichi interni, ed in particolare sono definiti secondo i seguenti parametri:

- La temperatura di set-point estivo è fissata a $26^{\circ}C$;
- L'impianto si attiva a partire dall'ora precedente all'ingresso nella zona termica delle persone, e si disattiva al momento dell'uscita delle stesse;
- L'impianto può attivarsi solo nelle ore diurne (dalle 06:00 fino alle 22:00);
- Per ciascuna utenza sono quindi definiti profili per giorni feriali e festivi, esattamente come avviene per i profili dei carichi interni.

2.4 Caratteristiche generali dei componenti vetrati e profili orari chiusure oscuranti

Per i casi studio i componenti finestrati sono stati assegnati a tutte e sole le pareti verticali disperdenti. Sono

state individuate due tipologie di finestre, tratte dalle librerie presenti nel software commerciale TRNSYS 17. Le caratteristiche dei componenti trasparenti selezionati sono elencate nella Tabella 1.

Le finestre sono dotate di chiusure oscuranti e tende con profili orari basati sui profili dei carichi interni: in caso di assenza delle persone nella zona termica le finestre sono sempre supposte completamente oscurate. Le finestre sono completamente oscurate anche nelle ore notturne (dalle 22:00 alle 06:00).

Le chiusure oscuranti sono supposte attive anche in caso di irraggiamento sulla superficie vetrata superiore ad un valore limite di riferimento fissato a 290 W/m^2 . In tale caso è valutata la capacità di chiusura parziale di una chiusura oscurante, che dipende dalla tipologia della stessa: le veneziane e gli avvolgibili ad esempio consentono tale aspetto, che si traduce nell'introduzione del valore del fattore di riduzione F_{sh,gl_ALTO_IRR} che viene pertanto utilizzato per la stima degli apporti solari e che si distingue dal valore di $F_{sh,gl} = 0$ che viene assegnato ad una chiusura oscurante completamente chiusa.

Nelle ore in cui le chiusure oscuranti non coprono la superficie vetrata, la radiazione solare subisce una riduzione per gli effetti delle tende interne, sintetizzate nel valore del fattore di riduzione F_{sh,gl_BASSO_IRR} . Le tende sono assenti nel caso ufficio ($F_{sh,gl_BASSO_IRR} = 1$) e presenti nelle casistiche residenziali.

Tabella 1: Caratteristiche dei componenti trasparenti

Cod.	Descrizione	Frazione area dovuta a telaio F_f [-]	Trasmittanza (incluso telaio) U_{window} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	Trasmittanza solare verso l'interno g_{gl} [-]
TRNSYS 1001	Singolo vetro	0,15	5,68	0,855
TRNSYS 1002	Doppio vetro	0,15	2,83	0,755

2.5 Caratterizzazione specifica dei casi studio

2.5.1 Tipologia ufficio

Modellazione geometrica e stratigrafica

Dal punto di vista geometrico, la categoria *ufficio* presenta una struttura rettangolare, analoga alla casistica *Geometry B* presente nella norma UNI EN ISO 13791 [9] (Tabella 2). L'edificio è dotato di una sola superficie disperdente, ossia la parete verticale finestrata esposta ad ovest. Dal punto di vista stratigrafico, sono state scelte 5 tipologie di strutture disperdenti, le cui caratteristiche sono elencate nella

Tabella 3 e nella Tabella 4. Le restanti superfici sono adiabatiche: le caratteristiche delle pareti verticali non disperdenti, del pavimento e del solaio interpiano sono elencate nella Tabella 5.

Il volume totale della zona termica è $55,44 \text{ m}^3$ (struttura rettangolare con superficie calpestabile pari a $19,8 \text{ m}^2$ e altezza pari a $2,8 \text{ m}$).

Tabella 2: Geometria ufficio

Parete	Tipologia	Superficie opaca [m^2]	Superficie finestrata [m^2]
Ovest	Disperdente	8,40	7
Est	Adiabatica	15,4	0
Nord	Adiabatica	10,08	0
Sud	Adiabatica	10,08	0
Copertura orizzontale	Adiabatica	19,80	0
Pavimentazione	Adiabatica	19,80	0

Tabella 3: Tipologie di pareti verticali disperdenti tipologia ufficio

Riferimenti Struttura UNI TR 11552	Descrizione	Zona Geografica	Tipologia Finestra
MPF03	Parete prefabbricata calcestruzzo isolato	Nord	Doppio vetro
MCV04	Muratura mattoni pieni con isolamento leggero	Nord/Centro	Doppio vetro
MLP01	Muratura mattoni pieni	Centro	Singolo vetro
MCV03	Muratura mattoni pieni con intercapedine	Sud	Doppio vetro
MCO03	Muratura blocchi forati calcestruzzo	Sud	Singolo vetro

Tabella 4: Caratteristiche termofisiche componenti opachi disperdenti tipologia ufficio.

Riferimenti Struttura UNI TR 11552	Spessore totale [cm]	Trasmittanza termica statica [W/m ² K]	Trasmittanza termica periodica [W/ m ² K]	Capacità termica periodica lato interno [kJ/ m ² K]	Sfasamento [h]
MPF03	37	0,671	0,081	28,7	12,71
MCV04	41	0,604	0,063	54,3	14,23
MLP01	42	1,339	0,136	64,4	14,62
MCV03	42	1,057	0,151	51,3	13,14
MCO03	34	1,221	0,239	61,3	12,00

Tabella 5: Caratteristiche termofisiche componenti opachi non disperdenti tipologia ufficio

Codice Struttura	Descrizione	Capacità termica periodica lato interno [kJ/m ² K]
-	Parete in cartongesso	53,4
SOL04	Solaio interpiano	76,8
SOL04	Pavimentazione	61,7

Modellazione chiusure oscuranti e tende

L'ufficio presenta una chiusura oscurante del tipo veneziana, non sono previste tende interne. I valori dei fattori di riduzione solare e delle resistenze termiche aggiuntive per la casistica *ufficio* sono elencati nella Tabella 6.

Tabella 6: Caratteristiche chiusure oscuranti e tende casistica ufficio

Chiusura oscurante	Fattore riduzione alto irraggiamento chiusura oscurante $F_{sh,gl_{ALTO_{IRR}}}$	Resistenza termica aggiuntiva chiusura oscurante $R_{shut} [m^2K/W]$	Tenda	Fattore riduzione tenda $F_{sh,gl_{BASSO_{IRR}}}$
Veneziana	0.3	0	assente	1

Modellazione carichi interni

L'utenza della casistica ufficio è una singola persona che occupa il locale tutti i giorni tranne il sabato e la domenica con orario 8:00 –18:00. I carichi interni totali sono stati assegnati considerando 180 W riferiti agli apporti da apparecchiature elettriche (PC, etc) e 125,28 W dovuti alle attività metaboliche del lavoratore, stimati secondo la norma UNI EN ISO 13792 [10]. La Tabella 7 illustra i profili orari dei carichi interni.

Tabella 7: Carichi interni casistica ufficio

Giorni settimana	Orario	Carichi interni [W]
Lunedì - Venerdì	00:00 – 08:00	0
	08:00 – 18:00	305,28
	18:00 – 24:00	0
Sabato - Domenica	00:00 – 24:00	0

2.5.2 Tipologia appartamento

Dal punto di vista geometrico, la categoria *appartamento* presenta una struttura rettangolare, tratta dal Report RdS/PAR2014/068 (settembre 2015) (Tabella 8) [1].

L'edificio presenta tre superfici disperdenti, ossia le pareti verticali finestrate esposta ad ovest, nord, sud. Dal punto di vista stratigrafico, sono state scelte 4 tipologie di strutture disperdenti, le cui caratteristiche sono elencate nella Tabella 9 e nella Tabella 10:

L'edificio presenta anche dei divisori interni di separazione tra i vari locali interni all'appartamento, con funzione esclusivamente capacitiva.

Le restanti superfici sono adiabatiche; le caratteristiche della parete verticale non disperdente (orientata ad est), dei divisori verticali interni, del pavimento e del solaio interpiano sono elencate nella Tabella 11.

Il volume totale della zona termica è $239,04 \text{ m}^3$ (struttura rettangolare con superficie calpestabile pari a $79,68 \text{ m}^2$ e altezza pari a 3 m).

Tabella 8: Geometria appartamento

Parete	Tipologia	Superficie opaca [m^2]	Superficie finestrata [m^2]
Ovest	Disperdente	41,80	8
Est	Adiabatica	49,80	0
Nord	Disperdente	10,40	4
Sud	Disperdente	10,40	4
Copertura orizzontale	Adiabatica	79,68	0
Pavimentazione	Adiabatica	79,68	0
Divisori verticali interni	Adiabatica	128,40	0

Tabella 9: Tipologie di pareti verticali disperdenti tipologia *appartamento*

Riferimenti Struttura UNI TR 11552	Descrizione	Zona Geografica	Tipologia Finestra
MCO05	Muratura blocchi pieni di calcestruzzo cellulare	Nord	Doppio vetro
MCV04	Muratura mattoni pieni con isolamento leggero	Nord/Centro	Doppio vetro
MLP03	Muratura laterizio semipieno	Centro/Sud	Singolo vetro
MCV03	Muratura mattoni pieni con intercapedine	Sud	Doppio vetro

Tabella 10: Caratteristiche termofisiche componenti opachi disperdenti tipologia *appartamento*

Riferimenti Struttura UNI TR 11552	Spessore totale [cm]	Trasmittanza termica statica [W/m^2K]	Trasmittanza termica periodica [W/m^2K]	Capacità termica periodica lato interno [kJ/m^2K]	Sfasamento [h]
MCO05	34	0,451	0,112	42,2	12,05
MCV04	54	0,545	0,018	53,86	18,96
MLP03	34	0,901	0,074	57,05	16,33
MCV03	55	0,887	0,044	49,62	17,86

Tabella 11: Caratteristiche termofisiche componenti opachi non disperdenti tipologia *appartamento*

Codice Struttura	Descrizione	Capacità termica periodica lato interno [kJ/m²K]
MCO05	Parete verticale adiabatica orientata ad est	41.78
MCV04	Parete verticale adiabatica orientata ad est	53.90
MLP03	Parete verticale adiabatica orientata ad est	56.89
MCV03	Parete verticale adiabatica orientata ad est	49.66
MLP01 modificato	Divisore verticale interno alla zona termica	55,7
SOL04	Solaio interpiano	76,8
SOL04	Pavimentazione	61,7

Modellazione chiusure oscuranti e tende

L'appartamento presenta una chiusura oscurante del tipo avvolgibile. In caso di irraggiamento superiore al valore di riferimento, l'avvolgibile è supposto abbassato fino a coprire il 70% della superficie finestrata, valore che giustifica l'assunzione del fattore di riduzione riportato in Tabella 12.

Tabella 12: Caratteristiche chiusure oscuranti e tende casistica appartamento

Chiusura oscurante	Fattore riduzione alto irraggiamento chiusura oscurante $F_{sh,gl_{ALTO_{IRR}}}$	Resistenza termica aggiuntiva chiusura oscurante $R_{shut} [m^2K/W]$	Tenda	Fattore riduzione tenda $F_{sh,gl_{BASSO_{IRR}}}$
Avvolgibile	0,3	0,26	tenda bianca	0,8

Modellazione orari di attivazione impianto climatizzazione e carichi interni

Per la casistica appartamento, e in generale per il residenziale, sono state definite tre tipologie di utenze, *pensionato*, *famiglia* e *impiegato*.

Utenza *pensionato*: uomo e donna che occupano la zona termica tutti i giorni per 21 ore al giorno. I carichi interni totali sono stati assegnati considerando 160 W riferiti agli apporti da apparecchiature elettriche (TV, lampadine, etc), 104,4 W dovuti alle attività metaboliche dell'uomo e 92,8 dovuti alle attività metaboliche della donna stimati secondo le norme UNI EN ISO 13792 e ISO 8996 [10, 11]. La Tabella 14 illustra i profili orari dei carichi interni.

Utenza *famiglia*: Nucleo familiare di 4 persone. I carichi interni totali sono stati assegnati considerando 240 W riferiti agli apporti da apparecchiature elettriche (PC, lampadine, etc), 394,4 W dovuti alle attività metaboliche delle 4 persone. La Tabella 16 illustra i profili orari dei carichi interni.

Utenza *impiegato*: uomo che non si trova nella zona termica nelle ore centrali del giorno. I carichi interni totali sono stati assegnati considerando 160 W riferiti agli apporti da apparecchiature elettriche (TV, lampadine, etc), 104,4 W dovuti alle attività metaboliche dell'uomo. La Tabella 18 illustra i profili orari dei carichi interni.

Tabella 13: Orari attivazione impianto casistica residenziale - pensionato

Giorni settimana	Orario	Attivazione impianto
Lunedì - Domenica	00:00 – 07:00	No
	07:00 – 09:00	Sì
	09:00 – 11:00	No
	11:00 – 22:00	Sì
	22:00 – 24:00	No

Tabella 14: Carichi interni casistica residenziale - pensionato

Giorni settimana	Orario	Carichi interni [W]
Lunedì - Domenica	00:00 – 09:00	197,2
	09:00 – 12:00	0
	12:00 – 22:00	357,2
	22:00 – 24:00	197,2

Tabella 15: Orari attivazione impianto casistica residenziale - famiglia

Giorni settimana	Orario	Attivazione impianto
Lunedì - Venerdì	00:00 – 06:00	No
	06:00 – 08:00	Sì
	08:00 – 17:00	No
	17:00 – 22:00	Sì
	22:00 – 24:00	No
Sabato - Domenica	00:00 – 07:00	No
	07:00 – 10:00	Sì
	10:00 – 12:00	No
	12:00 – 22:00	Sì
	22:00 – 24:00	No

Tabella 16: Carichi interni casistica residenziale - famiglia

Giorni settimana	Orario	Carichi interni [W]
Lunedì - Venerdì	00:00 – 08:00	394,4
	08:00 – 18:00	0
	19:00 – 23:00	634,4
	23:00 – 24:00	394,4
Sabato - Domenica	00:00 – 10:00	394,4
	10:00 – 13:00	0
	13:00 – 15:00	394,4
	15:00 – 16:00	574,4
	16:00 – 22:00	634,4
	22:00 – 24:00	394,4

Tabella 17: Orari attivazione impianto casistica residenziale - impiegato

Giorni settimana	Orario	Attivazione impianto
Lunedì - Venerdì	00:00 – 06:00	<i>No</i>
	06:00 – 08:00	<i>Sì</i>
	08:00 – 16:00	<i>No</i>
	16:00 – 22:00	<i>Sì</i>
	22:00 – 24:00	<i>No</i>
Sabato - Domenica	00:00 – 07:00	<i>No</i>
	07:00 – 10:00	<i>Sì</i>
	10:00 – 16:00	<i>No</i>
	16:00 – 22:00	<i>Sì</i>
	22:00 – 24:00	<i>No</i>

Tabella 18: Carichi interni casistica *residenziale* - *impiegato*

Giorni settimana	Orario	Carichi interni [W]
Lunedì - Venerdì	00:00 – 08:00	104,4
	08:00 – 17:00	0
	17:00 – 18:00	104,4
	19:00 – 22:00	264,4
	22:00 – 24:00	104,4
Sabato - Domenica	00:00 – 10:00	104,4
	10:00 – 17:00	0
	17:00 – 18:00	104,4
	19:00 – 22:00	264,4
	22:00 – 24:00	104,4

2.5.3 Tipologia villetta

Dal punto di vista geometrico, la categoria *villetta tetto piano* presenta una struttura rettangolare, atta a descrivere una singola unità abitativa disposta su due piani in una villetta bi-familiare. La geometria di riferimento è la stessa del caso ufficio, anche se le dimensioni caratteristiche della zona sono tutte raddoppiate (Tabella 19). Ad eccezione della parete verticale esposta ad est, l'edificio presenta tutte superfici esterne disperdenti, comprese la copertura orizzontale ed il pavimento contro-terra. Dal punto di vista stratigrafico, sono state scelte 4 tipologie di pareti verticali disperdenti, le cui caratteristiche sono elencate nella Tabella 22. Le coperture orizzontali disperdenti utilizzate sono le strutture COP03 e COP04 presenti nell'abaco delle strutture, con caratteristiche elencate nella Tabella 22 e nella Tabella 23.

Il volume totale della zona termica è $443,52 \text{ m}^3$ (struttura rettangolare su due piani con superficie calpestabile per piano pari a $79,2 \text{ m}^2$ e altezza totale pari a $5,6 \text{ m}$).

La categoria *villetta tetto inclinato a doppia falda* presenta invece una copertura inclinata esposta a nord-sud (Tabella 20). L'angolo di pendenza è stato fissato a $16^\circ 42'$ per le casistiche relative al sud e centro Italia, e a $19^\circ 17'$ per le casistiche relative al nord Italia; tali valori rappresentano rispettivamente pendenze al 30% e al 35%. Le tipologie di pareti verticali disperdenti sono le medesime del caso *villetta tetto piano*, ma coperture inclinate disperdenti utilizzate sono le strutture CIN02, CIN03 e CIN04 presenti nell'abaco delle strutture, con caratteristiche elencate nella Tabella 23, che illustra anche le caratteristiche del pavimento contro-terra SOL08.

Il volume totale della zona termica è $508,86 \text{ m}^3$ per le casistiche relative al sud e centro Italia, e $519,79 \text{ m}^3$ per le casistiche relative al nord Italia; (al volume della struttura rettangolare su due piani si aggiunge il volume della zona sottostante il tetto inclinato).

Per il generico caso villetta, la stratigrafia della parete verticale non disperdente (orientata ad est) è la medesima delle altre pareti verticali. Da queste ultime la parete verticale non disperdente si distingue a causa della grandezza resistenza termica superficiale esterna, che assume lo stesso valore della resistenza termica superficiale interna, visto che tale parete che non si affaccia sull'ambiente esterno ma è parete di confine tra due unità abitative (villetta bi-familiare). Le caratteristiche delle pareti adiabatiche, del pavimento e del solaio interpiano sono elencate nella Tabella 24.

Tabella 19: Geometria villetta tetto piano

Parete	Tipologia	Superficie opaca [m²]	Superficie finestrata [m²]
Ovest	Disperdente	47,60	14
Est	Adiabatica	61,60	0
Nord	Disperdente	33,32	7
Sud	Disperdente	33,32	7
Copertura orizzontale	Disperdente	79,20	0
Pavimentazione	Disperdente	79,20	0
Divisori verticali interni	Adiabatica	203,84	0
Divisori orizzontali interni	Adiabatica	79,20	0

Tabella 20: Geometria villetta tetto inclinato

Parete	Tipologia	Superficie opaca [m^2]	Superficie finestrata [m^2]
Ovest	Disperdente	56,68 (centro/sud) 58,19 (nord)	14
Est	Adiabatica	70,68 (centro/sud) 72,19 (nord)	0
Nord	Disperdente	33,32	7
Sud	Disperdente	33,32	7
Copertura inclinata Nord	Disperdente	41,34 (centro/sud) 41,96 (nord)	0
Copertura inclinata Sud	Disperdente	41,34 (centro/sud) 41,96 (nord)	0
Pavimentazione	Disperdente	79,20	0
Divisori verticali interni	Adiabatica	221,99 (centro/sud) 225,03 (nord)	0
Divisori orizzontali interni	Adiabatica	79,20	0

Tabella 21: Tipologie di pareti verticali disperdenti tipologia villetta

Riferimenti Struttura UNI TR 11552	Descrizione	Zona Geografica	Tipologia Copertura	Tipologia Finestra
MLP01	Muratura mattoni pieni	Nord	COP04/CIN04	Singolo vetro
MCO05	Muratura blocchi pieni di calcestruzzo cellulare	Nord/Centro	COP03/CIN02/CIN03	Doppio vetro
MCV04	Muratura mattoni pieni con isolamento leggero	Centro/Sud	COP03/CIN02/CIN03	Doppio vetro
MCV03	Muratura mattoni pieni con intercapedine	Sud	COP04/CIN04	Doppio vetro

Tabella 22: Caratteristiche termofisiche componenti opachi disperdenti verticali tipologia villetta

Riferimenti Struttura UNI TR 11552	Spessore totale [cm]	Trasmittanza termica statica [W/m ² K]	Trasmittanza termica periodica [W/ m ² K]	Capacità termica periodica lato interno [kJ/ m ² K]	Sfasamento [h]
MLP01	55	1,078	0,039	63,1	19,36
MCO05	44	0,347	0,037	40,9	16,26
MCV04	54	0,545	0,018	53,9	18,96
MCV03	55	0,887	0,044	49,6	17,86

Tabella 23: Caratteristiche termofisiche componenti opachi disperdenti orizzontali tipologia villetta

Riferimenti Struttura UNI TR 11552	Spessore totale [cm]	Trasmittanza termica statica [W/m ² K]	Trasmittanza termica periodica [W/ m ² K]	Capacità termica periodica lato interno [kJ/ m ² K]	Sfasamento [h]
COP04	34	1,459	0,339	58,0	10,04
COP03	39	0,557	0,051	53,8	11,35
CIN04	25,5	1,826	0,606	68,8	9,13
CIN03	30,5	0,603	0,060	61,4	11,21
CIN02	9,5	0,666	0,631	23,0	1,89
SOL08	54,5	1,195	0,087	68,3	16,40

Tabella 24: Caratteristiche termofisiche componenti opachi non disperdenti tipologia villetta

Codice Struttura	Descrizione	Capacità termica periodica lato interno [kJ/m²K]
MLP01	Parete verticale adiabatica orientata ad est	63,2
MCO05	Parete verticale adiabatica orientata ad est	40,9
MCV04	Parete verticale adiabatica orientata ad est	53,9
MCV03	Parete verticale adiabatica orientata ad est	49,7
MLP01 modificato	Divisore verticale interno alla zona termica	55,7
SOL04	Divisore orizzontale interno alla zona termica: solaio primo piano	76,8
SOL04	Divisore orizzontale interno alla zona termica: pavimentazione secondo piano	61,7

Modellazione chiusure oscuranti e tende

La villetta presenta una chiusura oscurante del tipo persiana. In caso di irraggiamento superiore al valore di riferimento, la persiana viene chiusa completamente.

Tabella 25: Caratteristiche chiusure oscuranti e tende casistica villetta

Chiusura oscurante	Fattore riduzione alto irraggiamento chiusura oscurante $F_{sh,gl_{ALTO_{IRR}}}$	Resistenza termica aggiuntiva chiusura oscurante $R_{shut} [m^2 K/W]$	Tenda	Fattore riduzione tenda $F_{sh,gl_{BASSO_{IRR}}}$
Persiane	0	0	tenda colorata	0,57

Modellazione orari di attivazione impianto climatizzazione e carichi interni

Per la casistica villetta, sono previste le medesime tre tipologie di utenza, *pensionato*, *famiglia* e *impiegato* citate nel precedente paragrafo relativo agli appartamenti.

2.6 Fase di calibrazione

La sommatoria dei fabbisogni termici orari estivi risultanti dalle simulazioni con *TRNSYS 17* fornisce la stima del fabbisogno d'involucro per la stagione di raffrescamento Q_{cREF} [kWh]. Tale grandezza è utilizzata come dato di riferimento con cui calibrare i parametri di tuning delle simulazioni condotte con il software *SEAS Light*. I valori dei due parametri α_{SOLC} e β_C ; si ottengono attraverso un processo iterativo a tre iterazioni automatizzato nel modello.

Prima iterazione

La simulazione con *SEAS Light* viene condotta ponendo i coefficienti correttivi α_{SOLC} e β_C pari ad 1.

Il fabbisogno d'involucro per la stagione di raffrescamento risultante dalla prima iterazione del software *SEAS Light* (Q_{cTOT}^I [kWh]) viene confrontato con i valori di riferimento (Q_{cREF} [kWh]) ottenuto come risultato delle simulazioni condotte con il software *TRNSYS 17*.

Si definisce un errore relativo percentuale:

$$err_{SOL}^I = \frac{Q_{cTOT}^I - Q_{cREF}}{Q_{cREF}} \cdot 100$$

L' err_{SOL}^I è l'output della prima iterazione, e viene utilizzato per correggere il coefficiente di calibrazione α_{SOL} .

Rispetto al valore iniziale unitario, si ottiene infatti:

$$\alpha_{SOLNEW} = \frac{\alpha_{SOL}}{1 + \frac{err_{SOL}^I}{100}}$$

Seconda iterazione

La simulazione con *SEAS Light* viene condotta mantenendo β_C pari ad 1 e ponendo il fattore di correzione degli apporti dovuti all'irraggiamento solare $\alpha_{SOLC} = \alpha_{SOLNEW}$, valore ottenuto al termine della I iterazione.

Si ottiene quindi dalle simulazioni condotte con *SEAS Light* una nuova stima del fabbisogno d'involucro per la stagione di raffrescamento Q_{cTOT}^{II} [kWh]. Si definisce un errore relativo percentuale:

$$err_C^{II} = \frac{Q_{cTOT}^{II} - Q_{cREF}}{Q_{cREF}} \cdot 100$$

L' err_C^{II} è l'output della seconda iterazione, con il quale viene corretto il coefficiente di calibrazione β_C . Rispetto al valore iniziale unitario, si ottiene infatti:

$$\beta_{C_{NEW}} = \frac{\beta_C}{1 + \frac{err_C^{II}}{100}}$$

Terza iterazione

La simulazione viene condotta ponendo i coefficienti correttivi $\alpha_{SOL_C} = \alpha_{SOL_{NEW}}$ e $\beta_C = \beta_{C_{NEW}}$. L'output fornito da questa terza iterazione è la stima definitiva del fabbisogno termico di raffrescamento Q_{CTOT} [kWh] fornita da *SEAS Light*. Per verificare la bontà della taratura dei due coefficienti, è opportuno confrontare i fabbisogni stimati con i valori di riferimento, introducendo quindi un errore relativo percentuale:

$$err_C = \frac{Q_{CTOT} - Q_{CREF}}{Q_{CREF}} \cdot 100$$

2.7 Risultati delle simulazioni

Nel seguito sono illustrati i risultati delle simulazioni condotte con *SEAS Light*. Nelle tabelle successive sono riportati i parametri di calibrazione e i fabbisogni stagionali dei 75 casi studio, indicati secondo caratteristiche geometriche, utenza, zona geografica e codice della stratigrafia delle pareti disperdenti.

In casi di fabbisogno estivo inferiore ai 100 kWh (12 casi) è stato scelto di non procedere con la calibrazione in quanto il fabbisogno è supposto trascurabile: mantenendo i parametri α_{SOL_C} e β_C pari ad 1, il processo iterativo si ferma alla prima iterazione e l'errore relativo percentuale err_C è pari quindi a err_{SOL}^I .

Le restanti 63 simulazioni mostrano la tendenza ad una significativa riduzione dell'errore percentuale tra la prima e la seconda iterazione (ultime due colonne delle tabelle), dovuta esclusivamente alla calibrazione del parametro di utilizzazione degli apporti solari α_{SOL_C} . Al termine della fase di calibrazione viene restituito anche il coefficiente β_C ; l'applicazione dei due coefficienti correttivi α_{SOL_C} e β_C opportunamente tarati ha sempre causato una riduzione dell'errore percentuale molto al di sotto di un valore di soglia posto a 10^{-3} .

I 12 casi studio con fabbisogno supposto trascurabile sono comunque un valido esempio per mostrare la robustezza del modello: anche in assenza di calibrazione l'ordine di grandezza del fabbisogno estivo stimato

con *SEAS Light* rispetta i valori di riferimento, e l'errore assoluto, definito come $err_{abs} = Q_{TOT} - Q_{REF}$, presenta un massimo pari a 145,9 kWh.

I profili orari dei fabbisogni di involucro ottenuti dalle simulazioni condotte con *SEAS Light* sono stati confrontati con gli omologhi profili ottenuti con il software dinamico completo TRNSYS 17. È stato possibile riscontrare nei 75 casi studio una tendenza generale alla sincronia temporale delle dinamiche dei flussi termici di involucro restituite dai due modelli utilizzati; tuttavia il software *SEAS Light* è caratterizzato da fasi di carica con picchi energetici orari superiori a quelli riscontrati con il software *TRNSYS 17*, che prevede invece una distribuzione dei flussi più omogenea (esempi da Figura 3 a Figura 6).

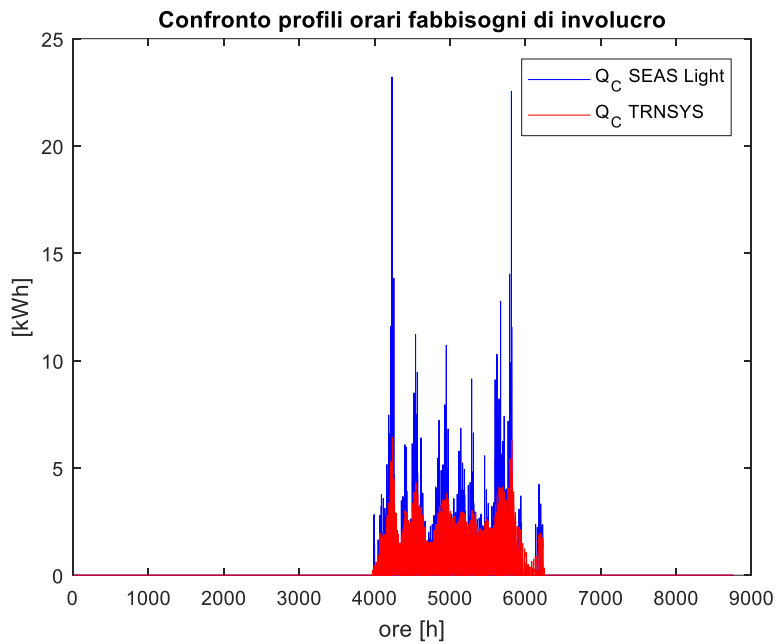


Figura 3 Profilo orario fabbisogni estivi casistica *Villetta_Tetto_Piano_Pensionato_Catania_MLP01_COP04*

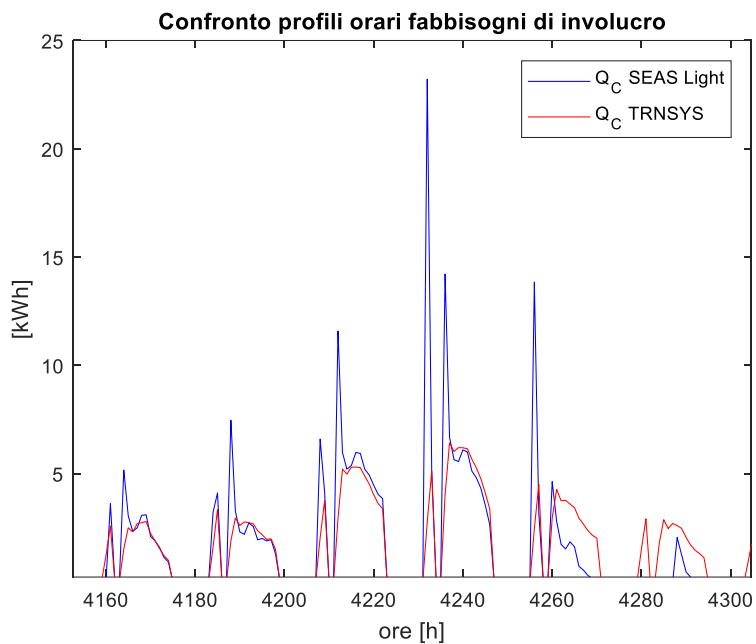


Figura 4 Profilo orario fabbisogni estivi casistica *Villetta_Tetto_Piano_Pensionato_Catania_MLP01_COP04*
(zoom grafico su un periodo di 6 giorni)

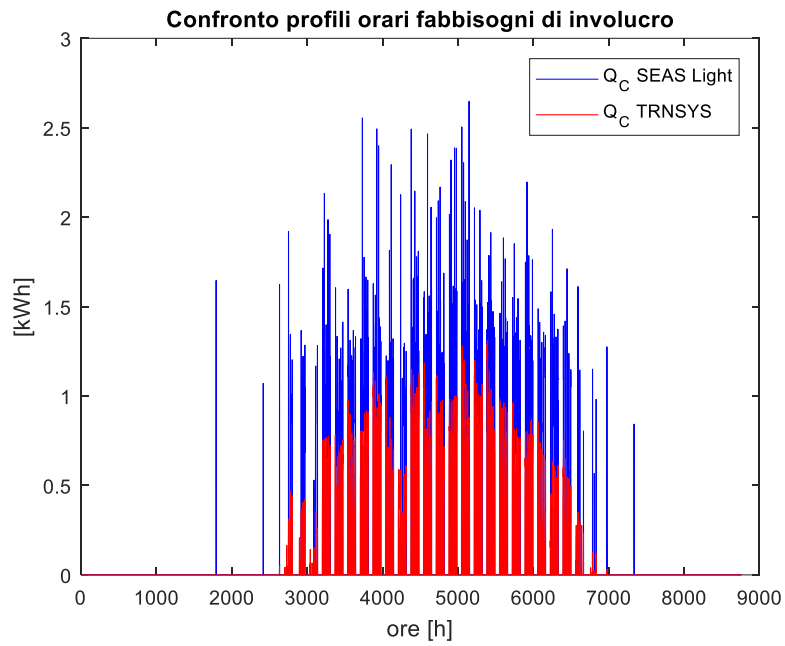


Figura 5 Profilo orario fabbisogni estivi casistica Ufficio_Pisa_MCV04

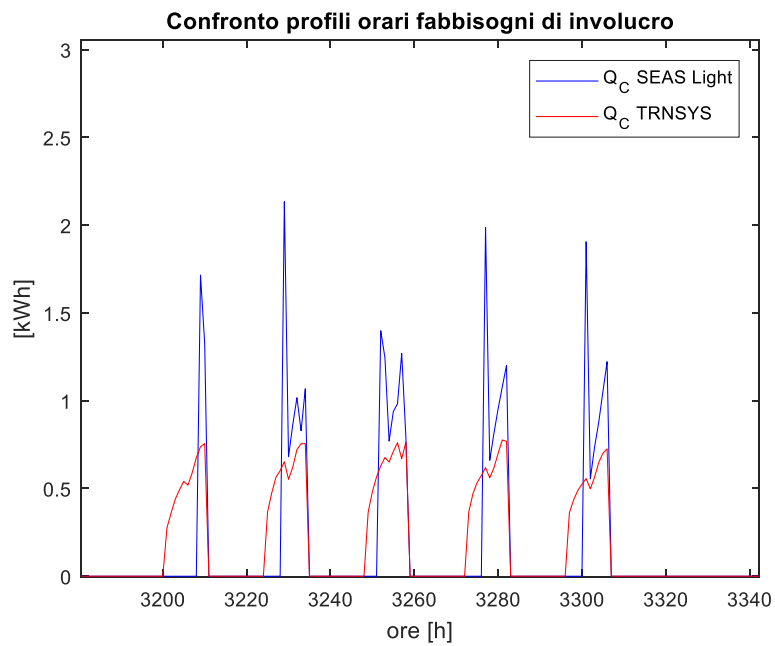


Figura 6 Profilo orario fabbisogni estivi casistica Ufficio_Pisa_MCV04 (zoom grafico su un periodo di 5 giorni feriali)

Tabella 26: Risultati simulazione casi studio Catania – uffici e appartamenti

Casisitica	α_{SOLC}	β_C	Q_{CREF} [kWh]	Q_{CTOT} [kWh]	err_{abs} [kWh]	err_C [%]	err_C^{II} [%]	err_{SOL}^I [%]
Ufficio								
_CT_MCO03	0.82	0.98	748.58	748.58	0	0	1.57	22.34
Ufficio								
_CT_MCV03	0.9	1	825.94	825.94	0	0	0.37	11.31
Appartamento_Pensionato								
_CT_MLP03	0.73	0.88	1345.05	1345.05	0	0	14.23	37.36
Appartamento_Pensionato								
_CT_MCV03	0.82	0.92	1367.81	1367.81	0	0	8.21	22.54
Appartamento_Famiglia								
_CT_MLP03	0.8	0.85	954.58	954.58	0	0	17.71	25.66
Appartamento_Famiglia								
_CT_MCV03	0.86	0.9	998.17	998.17	0	0	11.49	16.32
Appartamento_Impiegato								
_CT_MLP03	0.82	0.86	455.85	455.85	0	0	16.57	22.28
Appartamento_Impiegato								
_CT_MCV03	0.88	0.91	460.05	460.05	0	0	7.82	10.49

Tabella 27: Risultati simulazione casi studio Catania – villette tetto piano

Casisitica	α_{SOLC}	β_C	Q_{cREF} [kWh]	Q_{cTOT} [kWh]	err_{abs} [kWh]	err_C [%]	err_C^{II} [%]	err_{SOL}^I [%]
Villetta_TP_Pensionato _CT_MLP01_COP04	0.85	0.89	2251.84	2251.84	0	0	12.74	17.52
Villetta_TP_Pensionato _CT_MCV03_COP04	0.87	0.9	2138.96	2138.96	0	0	10.5	14.46
Villetta_TP_Famiglia _CT_MLP01_COP04	0.71	0.73	1569.34	1569.34	0	0	36.11	41.04
Villetta_TP_Famiglia _CT_MCV03_COP04	0.75	0.77	1573.58	1573.58	0	0	29.88	33.77
Villetta_TP_Impiegato _CT_MLP01_COP04	0.65	0.67	1147.68	1147.68	0	0	48.89	53.79
Villetta_TP_Impiegato _CT_MCV03_COP04	0.7	0.72	1148.49	1148.49	0	0	38.06	42.05

Tabella 28: Risultati simulazione casi studio Catania – villette tetto inclinato

Casistica	α_{SOLC}	β_C	Q_{cREF} [kWh]	Q_{cTOT} [kWh]	err_{abs} [kWh]	err_C [%]	err_C^{II} [%]	err_{SOL}^I [%]
Villetta_INC_Pensionato _CT_MLP01_CIN04	0.87	0.9	2564.9	2564.9	0	0	11.65	15.43
Villetta_INC_Pensionato _CT_MCV03_CIN04	0.89	0.91	2452.04	2452.04	0	0	9.49	12.51
Villetta_INC_Famiglia _CT_MLP01_CIN04	0.72	0.75	1826.87	1826.87	0	0	34.22	38.23
Villetta_INC_Famiglia _CT_MCV03_CIN04	0.76	0.78	1835.53	1835.53	0	0	28.25	31.36
Villetta_INC_Impiegato _CT_MLP01_CIN04	0.68	0.7	1406.69	1406.69	0	0	43.79	47.47
Villetta_INC_Impiegato _CT_MCV03_CIN04	0.73	0.75	1413.7	1413.7	0	0	34.1	37.02

Tabella 29: Risultati simulazione casi studio Pisa – uffici e appartamenti

Casistica	α_{SOLC}	β_C	Q_{cREF} [kWh]	Q_{cTOT} [kWh]	err_{abs} [kWh]	err_C [%]	err_C^{II} [%]	err_{SOL}^I [%]
Ufficio								
_PI_MLP01	0.77	1.07	564.88	564.88	0	0	-6.77	29.83
Ufficio								
_PI_MCV04	0.92	1.02	731.85	731.85	0	0	-2.75	11.65
Appartamento_Pensionato								
_PI_MLP03	0.48	1.1	622.83	622.83	0	0	-9.12	109.94
Appartamento_Pensionato								
_PI_MCV04	0.65	1.09	860.61	860.61	0	0	-8.34	54.57
Appartamento_Famiglia								
_PI_MLP03	0.57	0.89	369.84	369.84	0	0	12.73	74.98
Appartamento_Famiglia								
_PI_MCV04	0.74	0.95	516.84	516.84	0	0	5.17	34.34
Appartamento_Impiegato								
_PI_MLP03	1	1	97.37	243.26	145.89	149.85	-	149.85
Appartamento_Impiegato								
_PI_MCV04	0.59	1.18	130.57	130.57	0	0	-15.26	68.92

Tabella 30: Risultati simulazione casi studio Pisa – villette tetto piano

Casistica	α_{SOLC}	β_C	Q_{cREF} [kWh]	Q_{cTOT} [kWh]	err_{abs} [kWh]	err_C [%]	err_C^{II} [%]	err_{SOL}^I [%]
Villetta_TP_Pensionato _PI_MLP01_COP04	0.79	0.95	318.73	318.73	0	0	5.45	26.63
Villetta_TP_Pensionato _PI_MCV04_COP03	0.93	1.02	211.52	211.52	0	0	-1.82	7.09
Villetta_TP_Famiglia _PI_MLP01_COP04	0.58	0.72	176.17	176.17	0	0	39.85	71.22
Villetta_TP_Famiglia _PI_MCV04_COP03	0.64	0.86	102.63	102.63	0	0	16.36	57.06
Villetta_TP_Impiegato _PI_MLP01_COP04	1	1	72.34	180.52	108.18	149.54	-	149.54
Villetta_TP_Impiegato _PI_MCV04_COP03	1	1	19.45	53.56	34.11	175.37	-	175.37

Tabella 31: Risultati simulazione casi studio Pisa – villette tetto inclinato

Casistica	α_{SOLC}	β_C	Q_{cREF} [kWh]	Q_{cTOT} [kWh]	err_{abs} [kWh]	err_C [%]	err_C^{II} [%]	err_{SOL}^I [%]
Villetta_INC_Pensionato _PI_MLP01_CIN04	0.86	0.95	395.42	395.42	0	0	5.02	16.7
Villetta_INC_Pensionato _PI_MCV04_CIN03	0.92	1.02	209.72	209.72	0	0	-1.72	8.33
Villetta_INC_Pensionato _PI_MCV04_CIN02	0.68	0.97	220.61	220.61	0	0	3.22	46.79
Villetta_INC_Famiglia _PI_MLP01_CIN04	0.68	0.78	244.05	244.05	0	0	28.1	46.72
Villetta_INC_Famiglia _PI_MCV04_CIN03	0.64	0.85	105.53	105.53	0	0	17.77	56.08
Villetta_INC_Famiglia _PI_MCV04_CIN02	0.49	0.7	117.19	117.19	0	0	42.65	102.26
Villetta_INC_Impiegato _PI_MLP01_CIN04	0.53	0.65	122.06	122.06	0	0	54.22	89.61
Villetta_INC_Impiegato _PI_MCV04_CIN03	1	1	23.52	58.3	34.78	147.85	-	147.85
Villetta_INC_Impiegato _PI_MCV04_CIN02	1	1	28.52	102.52	74	259.49	-	259.49

Tabella 32: Risultati simulazione casi studio Torino – uffici e appartamenti

Casistica	α_{SOLC}	β_C	Q_{CREF} [kWh]	Q_{CTOT} [kWh]	err_{abs} [kWh]	err_C [%]	err_C^{II} [%]	err_{SOL}^I [%]
Ufficio								
_TO_MCV04	0.76	1.02	501.62	501.62	0	0	-2.21	32.2
Ufficio								
_TO_MPF03	0.75	1.02	499.13	499.13	0	0	-2.17	33.34
Appartamento_Pensionato								
_TO_MCV04	0.64	0.98	664.09	664.09	0	0	2.01	57.45
Appartamento_Pensionato								
_TO_MCO05	0.65	0.99	695.41	695.41	0	0	1.09	53.3
Appartamento_Famiglia								
_TO_MCV04	0.73	0.86	406.99	406.99	0	0	16.25	36.06
Appartamento_Famiglia								
_TO_MCO05	0.75	0.87	425.67	425.67	0	0	14.3	32.71
Appartamento_Impiegato								
_TO_MCV04	1	1	97.57	148.02	50.45	51.7	-	51.7
Appartamento_Impiegato								
_TO_MCO05	0.74	0.91	106.98	106.98	0	0	10.48	34.43

Tabella 33: Risultati simulazione casi studio Torino – villette tetto piano

Casistica	α_{SOLC}	β_C	Q_{cREF} [kWh]	Q_{cTOT} [kWh]	err_{abs} [kWh]	err_C [%]	err_C^{II} [%]	err_{SOL}^I [%]
Villetta_TP_Pensionato _TO_MLP01_COP04	0.74	0.87	653.72	653.72	0	0	14.63	34.47
Villetta_TP_Pensionato _TO_MCV04_COP03	0.83	0.97	441.72	441.72	0	0	2.58	20.49
Villetta_TP_Pensionato _TO_MCO05_COP03	0.87	0.99	456.19	456.19	0	0	0.61	14.38
Villetta_TP_Famiglia _TO_MLP01_COP04	0.58	0.66	364.05	364.05	0	0	52.34	71.39
Villetta_TP_Famiglia _TO_MCV04_COP03	0.66	0.78	214.96	214.96	0	0	28.46	51.49
Villetta_TP_Famiglia _TO_MCO05_COP03	0.72	0.83	222.12	222.12	0	0	20.29	39.37
Villetta_TP_Impiegato _TO_MLP01_COP04	0.47	0.53	193.46	193.46	0	0	87.94	113.41
Villetta_TP_Impiegato _TO_MCV04_COP03	1	1	62.66	136.37	73.71	117.64	-	117.64
Villetta_TP_Impiegato _TO_MCO05_COP03	1	1	63.44	120.39	56.95	89.78	-	89.78

Tabella 34: Risultati simulazione casi studio Torino – villette tetto inclinato

Casisitica	α_{SOLC}	β_C	Q_{cREF} [kWh]	Q_{cTOT} [kWh]	err_{abs} [kWh]	err_C [%]	err_C^{II} [%]	err_{SOL}^I [%]
Villetta_INC_Pensionato _TO_MLP01_CIN04	0.78	0.88	766.04	766.04	0	0	14.04	28.65
Villetta_INC_Pensionato _TO_MCV04_CIN03	0.83	0.97	447.2	447.2	0	0	3.27	20.01
Villetta_INC_Pensionato _TO_MCV04_CIN02	0.71	0.91	461.82	461.82	0	0	9.72	40.41
Villetta_INC_Pensionato _TO_MCO05_CIN03	0.88	0.99	462.08	462.08	0	0	1.5	13.13
Villetta_INC_Pensionato _TO_MCO05_CIN02	0.75	0.94	478.93	478.93	0	0	6.58	33.93
Villetta_INC_Famiglia _TO_MLP01_CIN04	0.63	0.69	460.42	460.42	0	0	45.81	59.48
Villetta_INC_Famiglia _TO_MCV04_CIN03	0.69	0.79	231.94	231.94	0	0	26.14	45.15
Villetta_INC_Famiglia _TO_MCV04_CIN02	0.58	0.68	239.98	239.98	0	0	46.98	72.89
Villetta_INC_Famiglia _TO_MCO05_CIN03	0.73	0.83	232.77	232.77	0	0	20.13	37.04
Villetta_INC_Famiglia _TO_MCO05_CIN02	0.63	0.73	249.07	249.07	0	0	37.71	59.88
Villetta_INC_Impiegato _TO_MLP01_CIN04	0.55	0.6	286.51	286.51	0	0	65.31	80.34
Villetta_INC_Impiegato _TO_MCV04_CIN03	1	1	73.07	148.77	75.7	103.59	-	103.59
Villetta_INC_Impiegato _TO_MCV04_CIN02	1	1	85.11	217.8	132.69	155.91	-	155.91
Villetta_INC_Impiegato _TO_MCO05_CIN03	1	1	74.5	131.61	57.11	76.65	-	76.65
Villetta_INC_Impiegato _TO_MCO05_CIN02	1	1	88.56	200.78	112.22	126.72	-	126.72

3 Validazione secondo norma EN 15265

Il modello di involucro è stato testato con la norma UNI EN 15265 [12], la quale definisce i criteri di validazione di modelli dinamici. La metodologia di calibrazione illustrata nel Paragrafo 2.6 è stata applicata anche ai 12 casi studio descritti nella norma UNI EN 15265. Per ciascun caso studio sono stati inseriti in *SEAS Light* i corrispondenti parametri geometrici, stratigrafici e di gestione dell'impianto.

Il modello è stato esteso anche al funzionamento invernale, con una metodologia del tutto analoga a quella già presentata nei capitoli precedenti, definendo un altro parametro correttivo β_H che sostituisce nei periodi invernali il parametro β_C per quanto riguarda l'effetto correttivo sulla capacità termica efficace K_z . Nei periodi di riscaldamento il parametro di utilizzazione degli apporti solari continua ad essere α_{SOLC} , che pertanto risulta tarato solo sui fabbisogni estivi e non è specifico per i fabbisogni invernali. Pertanto il valore di β_H risente nella propria taratura anche della non specifica stima di un fattore di apporto solare invernale.

La Tabella 35 mostra i risultati ottenuti dal modello *SEAS Light*, con la calibrazione effettuata anche per le casistiche 3,7,11 che presentano fabbisogno estivo inferiore ai 100 kWh. Confrontando i fabbisogni di involucro calcolati con quelli di riferimento presentati nella norma, gli errori rispettano in tutti i casi i requisiti di validazione minimi definiti dalla UNI EN 15265 ed il modello rientra nella classe A.

La Tabella 36 mostra i risultati ottenuti dal modello *SEAS Light* non effettuando la calibrazione per le casistiche 3,7,11 che presentano fabbisogno estivo inferiore ai 100 kWh. Anche in questo caso il modello rientra nella classe A se ci si limita alla considerazione della fase di raffrescamento.

I parametri di calibrazione per le casistiche 3,7,11 si discostano notevolmente da quelli degli altri 9 casi. Se si definiscono sulla base di questi 9 casi dei valori medi di α_{SOLC} , β_C , β_H , e si utilizzano per tutti i casi studio, il modello risulta ancora in classe A per quanto riguarda la fase di raffrescamento (Tabella 37).

Tabella 35: Confronti output SEAS Light con i test case UNI EN 15265

Casistica	α_{SOLC}	β_C	β_H	Q_{CREF} [kWh]	Q_{CTOT} [kWh]	$errore_C$ [%]	Q_{HREF} [kWh]	Q_{HTOT} [kWh]	$errore_H$ [%]
1	0.76	1.10	0.85	233.8	233.8	-2.03E-14	748.00	748.00	-1.97E-13
2	0.76	1.14	0.86	200.5	200.5	9.24E-15	722.70	722.70	3.08E-13
3	0.54	4.50	0.84	43	43	-1.01E-15	1368.50	1368.50	-7.09E-13
4	0.79	1.11	0.72	1530.9	1530.9	-8.67E-14	567.40	572.77	0.256129
5	0.71	1.08	0.77	201.7	201.7	-2.14E-14	463.10	463.16	0.008947
6	0.74	1.13	0.77	185.1	185.1	-1.64E-14	509.80	509.80	6.54E-14
7	0.34	23.52	0.80	19.5	19.5	-2.61E-15	1067.40	1067.40	-1.88E-13
8	0.71	1.14	0.61	1133.2	1133.2	-6.29E-14	313.20	323.04	0.680099
9	0.71	1.08	0.71	158.3	158.3	6.28E-15	747.10	747.12	0.002649
10	0.73	1.05	0.75	192.4	192.4	1.11E-14	574.20	574.22	0.002794
11	0.29	49.08	0.75	14.1	14.1	6.30E-16	1395.10	1395.10	-3.23E-14
12	0.69	1.20	0.61	928.3	928.3	-6.22E-14	533.50	536.77	0.22338

Tabella 36: Confronti output SEAS Light con i test case UNI EN 15265, calibrazione non effettuata per i casi 3,7,11

Casistica	α_{SOLC}	β_C	β_H	Q_{CREF} [kWh]	Q_{CTOT} [kWh]	$errore_C$ [%]	Q_{HREF} [kWh]	Q_{HTOT} [kWh]	$errore_H$ [%]
1	0.76	1.10	0.85	233.8	233.8	-2.03E-14	748.00	748.00	-1.97E-13
2	0.76	1.14	0.86	200.5	200.5	9.24E-15	722.70	722.70	3.08E-13
3	1	1	1	43	79.8	2.60	1368.50	1418.20	3.52
4	0.79	1.11	0.72	1530.9	1530.9	-8.67E-14	567.40	572.77	0.256129
5	0.71	1.08	0.77	201.7	201.7	-2.14E-14	463.10	463.16	0.008947
6	0.74	1.13	0.77	185.1	185.1	-1.64E-14	509.80	509.80	6.54E-14
7	1	1	1	19.5	57.5	3.49	1067.40	1080.50	1.21
8	0.71	1.14	0.61	1133.2	1133.2	-6.29E-14	313.20	323.04	0.680099
9	0.71	1.08	0.71	158.3	158.3	6.28E-15	747.10	747.12	0.002649
10	0.73	1.05	0.75	192.4	192.4	1.11E-14	574.20	574.22	0.002794
11	1	1	1	14.1	49.5	2.51	1395.10	1573.20	12.64
12	0.69	1.20	0.61	928.3	928.3	-6.22E-14	533.50	536.77	0.22338

Tabella 37: Confronti output SEAS Light con i test case UNI EN 15265, uso di coefficienti di tuning costanti

Casistica	α_{SOLC}	β_C	β_H	Q_{cREF} [kWh]	Q_{cTOT} [kWh]	$errore_c$ [%]	Q_{HREF} [kWh]	Q_{HTOT} [kWh]	$errore_H$ [%]
1	0.73	1.11	0.74	233.8	228.69	-0.52	748.00	658.66	-9.10
2	0.73	1.11	0.74	200.5	186.65	-1.50	722.70	631.41	-9.89
3	0.73	1.11	0.74	43	31.99	-0.78	1368.50	1138.23	-16.31
4	0.73	1.11	0.74	1530.9	1368.83	-7.72	567.40	595.47	1.34
5	0.73	1.11	0.74	201.7	217.51	2.38	463.10	443.45	-2.96
6	0.73	1.11	0.74	185.1	180.59	-0.65	509.80	493.58	-2.33
7	0.73	1.11	0.74	19.5	22.46	0.27	1067.40	870.86	-18.08
8	0.73	1.11	0.74	1133.2	1152.53	1.34	313.20	364.82	3.57
9	0.73	1.11	0.74	158.3	169.03	1.19	747.10	774.29	3.00
10	0.73	1.11	0.74	192.4	205.03	1.65	574.20	572.60	-0.21
11	0.73	1.11	0.74	14.1	21.39	0.52	1395.10	1240.98	-10.94
12	0.73	1.11	0.74	928.3	939.94	0.80	533.50	629.29	6.55

4 Implementazione informatica del modello dinamico *SEAS Light*

Le equazioni di bilancio che regolano il modello e la procedura di calibrazione illustrate nei capitoli precedenti sono state implementate in ambiente MATLAB: il modello dinamico *SEAS Light* è stato tradotto in un software interattivo che consente all'utente di procedere in primo luogo con la simulazione e la caratterizzazione di edifici di cui sono noti i fabbisogni nel periodo di climatizzazione estiva, utilizzando un numero ridotto di input ed una interfaccia semplice.

Mediante l'utilizzo della routine *Seas_Light.m* l'utente ottiene una stima delle dinamiche orarie dei fabbisogni di involucro e della temperatura media oraria della zona termica; inoltre sono restituiti come output i valori dei parametri di tuning α_{SOLC} e β_C .

Il modello di edificio così definito e parametrizzato può essere introdotto in una successiva routine *Seas_Light_intervento.m*, con l'utente che potrà simulare molteplici categorie di intervento finalizzate al risparmio energetico, tra cui:

- modifica del modello di involucro, dal punto di vista geometrico e stratigrafico;
- modifica della gestione dell'impianto di climatizzazione (temperatura di set point , profili di attivazione, potenza termica dei terminali);
- modifica dei profili orari dei carichi interni.

L'esito dell'intervento di modifica è reso noto all'utente sotto forma di confronto ante e post operam tra i valori stagionali dei fabbisogni di involucro, delle dinamiche orarie dei flussi termici e della temperatura della zona termica. È prevista anche una semplice analisi economica che definisce il tempo di ritorno economico dell'intervento e l'indice di profittabilità.

4.1 Routine SEAS_Light.m: creazione del modello di involucro

Lanciando la routine Seas_Light.m e cliccando sulla casella Casistiche Custom, l'utente può selezionare tre opzioni da un menu all'interno di un'interfaccia grafica:

- selezionando l'opzione "New" definisce ex novo il modello di edificio associato alla zona termica, andando a modificare e salvare il file Custom.m che si apre in formato testo. Il modello di edificio viene quindi salvato all'interno della cartella Custom_Storage;
- selezionando l'opzione "Load Existing File", l'utente può richiamare una casistica di edificio precedentemente salvata nella cartella Custom_Storage e rilanciare direttamente una nuova simulazione
- selezionando l'opzione "Edit Existing File", l'utente può richiamare una casistica di edificio precedentemente salvata nella cartella Custom_Storage, modificarla a piacimento, salvarla di nuovo come nuovo modello nella medesima cartella. e lanciare contestualmente una nuova simulazione.

4.1.1 File Custom.m sezione impianto di climatizzazione

La prima sezione di customizzazione riguarda le caratteristiche dell'impianto di climatizzazione:

- l'utente può modificare i dati di default riguardanti temperatura di set point (fissata a 26 °C) e della temperatura iniziale del ciclo di calcolo relative alla zona interna;
- l'utente è tenuto ad inserire il fabbisogno elettrico di raffrescamento totale stagionale $En_{th-CREF}$ [kWh], il COP stagionale della macchina frigorifera, η_C rendimento di distribuzione e la potenza termica nominale di impianto $Q_{termMAX}$ [kW]

I fabbisogni termici di involucro Q_{CREF} [kWh] sono calcolati come il prodotto $En_{th-CREF} \cdot COP \cdot \eta_C$.

Se l'utente è già in possesso dei dati sui fabbisogni termici di involucro, può inserire direttamente tale valore numerico al posto della formula di calcolo.

Il file Custom.m presenta anche una sezione relativa alle caratteristiche di intervento sull'impianto di climatizzazione, che sarà approfondita nell'ambito della descrizione della fase di analisi energetica ed economica relativa a SEAS_Light_intervento.m. In caso di utilizzo della routine SEAS_Light.m questa sezione non viene considerata, quindi l'utente può lasciare inalterati i parametri di default.

4.1.2 File Custom.m - sezione geometria della zona termica

In primo luogo l'utente deve definire le caratteristiche di orientamento e inclinazione delle pareti di confine della zona termica. I vettori β_S e γ_S [deg] si riferiscono rispettivamente agli angoli di tilt e di azimut della superficie, e devono essere compilati dall'utente seguendo un preciso ordine:

- Il primo elemento dei due vettori si riferisce alla superficie di copertura orizzontale, pertanto si raccomanda di lasciare invariati i valori $\beta_S = 0$ e $\gamma_S = 0$;
- gli elementi da 2 a 5 riguardano le superfici verticali. Si raccomanda l'utente di lasciare invariati i valori di $\beta_S = 90^\circ$, mentre l'orientamento di tali superfici è a discrezione dell'utente, che deve comunque rispettare l'ordine di inserimento riferendosi in ordine alla parete esposta prevalentemente a sud, poi a quella ad est, ad ovest e infine nord;
- gli elementi da 6 a 9 riguardano le superfici inclinate di copertura. L'ordine di inserimento di β_S e γ_S si riferisce ancora in primo luogo alla parete esposta prevalentemente a sud, poi a quella ad est, ad ovest e infine nord.

Nel caso di assenza di superfici inclinate, l'utente può lasciare invariati i valori di default relativi a tali superfici, dato che comunque non verranno considerate nei successivi processi di simulazione dell'edificio.

Convenzione adottata: angolo di azimut $\gamma_S = 0$ a sud. Positivo verso ovest, negativo verso est.

Tabella 38: valori di default angoli di tilt e azimut delle superfici

	Copertura orizzontale	Parete verticale e sud	Parete verticale e est	Parete verticale e ovest	Parete verticale e nord	Copertura inclinata sud	Copertura inclinata est	Copertura inclinata ovest	Copertura inclinata nord
β_S [deg]	0	90	90	90	90	16.7	16.7	16.7	16.7
γ_S [deg]	0	0	-90	90	180	0	-90	90	180

Definito l'orientamento delle pareti di confine, si inseriscono per le superfici interessate i valori mensili dei fattori di riduzione per ombreggiatura F_{sh,ob_diff} e $F_{sh,ob}$ secondo la norma UNI/TS 11300-1 [5]. Per superfici non esposte all'ambiente esterno possono essere mantenuti i valori di default, che verranno comunque ignorati in fase di simulazione.

L'utente seleziona quali pareti sono adiabatiche (identificatore ID=0) e quali sono disperdenti (identificatore ID=1). In seguito sono inseriti i valori di volume totale della zona termica [m^3] e di ampiezza delle superfici [m^2], questi ultimi secondo il seguente ordine:

- superficie opaca delle pareti disperdenti verticali ovest, est, nord e sud;
- superficie opaca delle pareti non disperdenti verticali ovest, est, nord e sud;
- elementi vetrati (compreso telaio) per le pareti disperdenti verticali ovest, est, nord e sud;
- copertura orizzontale (sia esso tetto disperdente o solaio adiabatico, la diversificazione è stabilita nell'identificatore ID definito in precedenza);
- elementi vetrati (compreso telaio) per la superficie di copertura orizzontale
- superficie opaca delle coperture inclinate, ad ovest, est, nord e sud;
- elementi vetrati (compreso telaio) per le superfici di copertura inclinate, ad ovest, est, nord e sud;
- pavimentazione contro-terra non adiabatica;
- superficie pareti orizzontali adiabatiche (pavimentazione adiabatica)
- superficie pareti verticali adiabatiche (divisori interni alla zona termica)

4.1.3 File Custom.m - sezione stratigrafia superfici opache

L'utente inserisce per ciascun componente opaco disperdente definito nella sezione precedente da una superficie diversa da 0, le grandezze trasmittanza termica statica U [W/m^2K], trasmittanza termica periodica U_{din} [W/m^2K], capacità termica periodica K_{int} [J/m^2K] e sfasamento ϕ [h]. Ordine di inserimento:

- pareti opache verticali disperdenti orientate ad ovest, est, nord e sud;
- copertura orizzontale disperdente (tutte le grandezze) / solaio adiabatico (necessaria solo K_{int});
- copertura inclinata disperdente;
- pavimentazione contro terra disperdente.

La grandezza capacità termica periodica K_{int} [J/m^2K] deve essere inserita successivamente anche per i restanti componenti opachi non disperdenti:

- pareti opache verticali non disperdenti orientate ad ovest, est, nord e sud;
- pareti orizzontali adiabatiche (pavimentazione adiabatica);
- pareti verticali adiabatiche (divisori interni alla zona termica);

4.1.4 File Custom.m - sezione superfici finestrate

Chiusure oscuranti e tende

Nel modello è presente un valore di default di irraggiamento normale alla superficie finestrata oltre il quale le chiusure oscuranti sono supposte attive anche di giorno. Il valore è modificabile dall'utente.

In successione l'utente definisce le caratteristiche di fattore di riduzione apporti solari in caso di elevato irraggiamento solare giornaliero per le chiusure oscuranti (se $F_{sh,gl_{ALTOIRR}} = 0$ chiusura oscurante completamente chiusa, se pari ad 1 la chiusura oscurante è completamente aperta). Il modello prevede che le finestre siano completamente oscurate nelle ore notturne (dalle 22:00 alle 06:00).

Nelle ore giornaliere in cui il valore limite di irraggiamento non è superato, le chiusure oscuranti sono aperte e l'effetto di riduzione degli apporti solari è dovuto alle tende, con la definizione dei valori del parametro

$F_{sh,gl_{BASSOIRR}}$ che potranno essere tratti dalla UNI 11300 [5].

Elementi trasparenti

L'utente caratterizza la tipologia di finestra utilizzata con le seguenti grandezze:

- trasmittanza termica finestra U_{fin} [W/m^2K];
- trasmittanza termica finestra con chiusura oscurante completamente chiusa $U_{fin_{sh}}$ [W/m^2K];
- trasmittanza solare finestra g_{gl} [-];
- fattore di riduzione telaio F_f [-] (superficie telaio/superficie totale finestrata).

4.1.5 File Custom.m - sezione programmazione impianto climatizzazione e carichi interni

L'utente definisce in due vettori di 24 elementi le ore di giorni feriali e festivi in cui l'impianto è attivo o non è attivo (rispettivamente assegnando valore 1 o 0 alla singola ora). Il medesimo approccio è mantenuto per la caratterizzazione degli apporti interni [W]: l'utente definisce con due vettori di 24 elementi i valori dei carichi interni medi orari (feriali e festivi). Il modello *SEAS Light* è caratterizzato da una suddivisione della settimana tipo tra i primi 5 giorni feriali e gli ultimi 2 giorni festivi.

4.2 Routine SEAS_Light.m: fase di collocazione geografica e lancio della simulazione

Completata la definizione delle caratteristiche dell'edificio, l'utente è tenuto a chiudere la finestra del file Custom.m e a cliccare sul comando "save". La successiva finestra di dialogo richiede all'utente di selezionare un nome per il file di involucro appena creato che verrà depositata nella cartella Custom_Storage. È importante non modificare la posizione della cartella, né salvare il file in una directory diversa da essa.

L'utente è tenuto a selezionare dai successivi menu la collocazione geografica dell'edificio creato: la prima schermata consiste nella scelta della regione d'Italia, la seconda schermata è relativa alla scelta del capoluogo di provincia in cui si trova l'edificio. L'utente dovrà aver preventivamente provveduto a effettuare i download gratuiti dei file meteorologici dal sito <https://shop.cti2000.it/> del Comitato Termotecnico Italiano [8] e alla collocazione dei file (nominati secondo Tabella 39) nella cartella SEAS_Light/Script/Meteo.

A questo punto la simulazione si avvia e una volta terminata, l'utente riceve su video informazioni riguardo il fabbisogno di involucro di riferimento Q_{cREF} [kWh] (dato di input) e sulla stima del fabbisogno termico di raffrescamento Q_{cTOT} [kWh] fornita da SEAS Light, il relativo errore percentuale e i valori dei parametri di calibrazione α_{SOLC} e β_C ottenuti ed utilizzati da SEAS Light per ottenere tale stima sui fabbisogni.

Tali informazioni sono automaticamente salvate in un file di testo, con medesimo nome del file di involucro associato, nella cartella SEAS Light Output, a disposizione dell'utente per consultazione. È importante non modificare la posizione della cartella, né rimuovere il file di testo creato da essa.

Gli output grafici di simulazione sono il profilo orario dei fabbisogni termici di involucro e il profilo orario di temperatura della zona termica.

Tabella 39: Corretto nome dei file contenenti i dati meteorologici delle regioni italiane (da Comitato Termotecnico Italiano [8])

Regione	Nome file
Abruzzo	Abruzzo.xlsx
Basilicata	Basilicata.xlsx
Calabria	Calabria.xlsx
Campania	Campania.xlsx
Emilia-Romagna	Emilia Romagna.xlsx
Friuli-Venezia Giulia	FVG.xlsx
Lazio	Lazio.xlsx
Liguria	Liguria.xlsx
Lombardia	Lombardia.xlsx
Marche	Marche.xlsx
Molise	Molise.xlsx
Piemonte	Piemonte.xlsx
Puglia	Puglia.xlsx
Sardegna	Sardegna.xlsx
Sicilia	Sicilia.xlsx
Toscana	Toscana.xlsx
Trentino Alto Adige	Trentino Alto Adige.xlsx
Umbria	Umbria.xlsx
Valle d'Aosta	Valle d'Aosta.xlsx
Veneto	Veneto.xlsx

4.3 Routine SEAS_Light_intervento.m

L'utente può utilizzare la routine SEAS_Light_intervento.m per testare l'efficacia di interventi effettuati su una casistica simulata in precedenza dal modello SEAS Light, agendo su ciascuno dei parametri definibili in un file Custom.m.

Attraverso una finestra di dialogo, l'utente è tenuto a richiamare dalla cartella Custom_Storage la casistica precedentemente salvata che vuole sottoporre ad intervento.

Una volta selezionata, l'utente può definire le nuove caratteristiche dell'edificio agendo sul file Custom_intervento.m, che presenta tutti i parametri già aggiornati alla simulazione precedente di riferimento.

L'utente può inserire anche informazioni che saranno utilizzate nella fase di analisi economica dell'intervento: tali parametri sono il periodo di vita utile, il costo in Euro dell'intervento, i valori del rendimento globale effettivo dell'impianto pre e post operam, il costo dell'energia elettrica in Euro pre e post operam, la potenza nominale dell'impianto post operam.

Effettuate le modifiche desiderate, l'utente è tenuto a chiudere la finestra del file Custom_intervento.m e a cliccare sul comando "save". La successiva finestra di dialogo richiede all'utente di selezionare un nome per il file di involucro modificato appena creato che verrà depositata nella cartella Custom_Storage_Interventi (Il programma suggerisce un nome basato sul nome del file originale, al quale è associato il suffisso "_intervento").

A questo punto la simulazione si avvia, ottenendo automaticamente dal file di testo associato alla casistica originaria i dati di collocazione geografica e i parametri di calibrazione α_{SOLC} e β_C che verranno utilizzati nella nuova simulazione.

Una volta terminata, l'utente riceve su video informazioni riguardo il fabbisogno di involucro di riferimento Q_{CREF} [kWh] e sulla stima del nuovo fabbisogno termico di raffrescamento $Q_{CTOT-Int}$ [kWh] fornita da SEAS Light, si definisce un delta percentuale indice dell'effetto di risparmio energetico rispetto al caso originario:

$$\Delta_C = \frac{Q_{CTOT-Int} - Q_{CREF}}{Q_{CREF}} \cdot 100$$

Tali risultati sono automaticamente salvati in un file di testo, con medesimo nome del file di involucro associato, nella cartella SEAS Light Output Interventi, a disposizione dell'utente per consultazione. È importante non modificare la posizione della cartella.

Gli output grafici di simulazione sono:

- Profilo orario dei nuovi fabbisogni termici di involucro;
- Nuovo profilo orario di temperatura media della zona.
- In caso di inserimento di dati riguardanti l'analisi economica, l'utente otterrà come output anche informazioni sul payback period (anni) e sull'indice di profittabilità relativi all'intervento effettuato.

4.4 Altre funzionalità inserite nell'applicativo SEAS Light

Per agevolare l'utente nella fase di apprendimento, sono stati inseriti nella cartella Custom_Storage file di involucro già compilati corrispondenti ai seguenti casi studio utilizzati come riferimento per la fase di calibrazione:

- Ufficio, con parete disperdente MCV04, Pisa;
- Appartamento, con pareti disperdenti MCV03, utenza "Impiegato", Catania;
- Villetta tetto piano, con pareti disperdenti MLP01, copertura COP04, utenza "Pensionato", Catania;
- Villetta tetto inclinato, con pareti disperdenti MCV04, copertura CIN03, utenza "Famiglia", Torino

L'utente può consultare tali file lanciando la routine SEAS_Light.m e selezionando il comando Edit Existing File o lanciare le simulazioni associate con il comando Load Existing File, ottenendo per i casi studio i risultati già inseriti nelle tabelle riportate nel Paragrafo 2.7

L'utente può anche riprodurre direttamente ciascuna delle simulazioni relative ai 75 casi studio lanciando la routine SEAS_Light.m e cliccando sulla casella Casi Studio. La successiva finestra di dialogo richiede all'utente di selezionare un file di testo in cui sono presenti i dati relativi ai fabbisogni di involucro della casistica scelta. Attraverso successivi menu grafici interattivi l'utente richiama le caratteristiche di involucro già predefinite all'interno del modello e associate al caso studio scelto.

L'utente riceve su video informazioni riguardo il fabbisogno di involucro di riferimento Q_{cREF} [kWh] e sulla stima del fabbisogno termico di raffrescamento Q_{cTOT} [kWh] fornita da SEAS Light, il relativo errore percentuale e i valori dei parametri di calibrazione α_{SOLC} e β_C ottenuti ed utilizzati da SEAS Light per ottenere tale stima sui fabbisogni.

Tra gli output grafici restituiti dalla routine "SEAS_Light.m – Casi Studio" sono presenti anche i profili orari dei fabbisogni termici estivi stimati dal modello dinamico completo TRNSYS 17, che possono essere così confrontati con le dinamiche dei fabbisogni stimate da SEAS Light.

Riferimenti bibliografici

- [1] D. Testi, E. Schito, E. Menchetti, P. Conti, D. D. Vista, G. Pellegrini, E. Tiberi, W. Grassi, - DESTEC, Università di Pisa, G. Fasano e P. Signoretti - ENEA, «Il software SEAS per le diagnosi energetiche: interventi di assistenza e formazione e sviluppo di un modello semplificato per gli edifici ad uso residenziale, Report RdS/PAR2014/068,» 2015.
- [2] UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI EN ISO 13786 - Prestazione termica dei componenti per edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo,» 2008.
- [3] P. W. O'Callaghan e S. D. Probert, «Technical note - Sol Air Temperature,» *Applied Energy*, vol. Volume 3, n. Issue 4, pp. Pages 307-311, October 1977.
- [4] UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI EN ISO 13790 - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento,» [Online].
- [5] UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI 11300: 2014. Parte 1. Prestazioni energetiche degli edifici. Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale,» 2014.
- [6] CTI - Comitato Termotecnico Italiano, «UNI EN ISO 6946:1999 Componenti e elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica -,» Settembre 1999.
- [7] CTI - Comitato Termotecnico Italiano, «UNI/TR 11552:2014 Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici,» Ottobre 2014.
- [8] CTI - Comitato Termotecnico Italiano, «Dati Climatici,» [Online]. Available: <https://shop.cti2000.it/>.
- [9] UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI EN ISO 13791 - Prestazione termica degli edifici. Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione. Criteri generali e procedure di validazione,» 2005.

- [10] UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI EN ISO 13792 - Prestazione termica degli edifici. Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione. Metodi semplificati,» 2012.
- [11] International Organization for Standardization, «ISO 8996 - Ergonomics of the thermal environment - Determination of metabolic rate».
- [12] UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNi EN 15265 - Prestazione energetica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti mediante metodi dinamici. Criteri generali e procedimenti di validazione,» 2008.

Breve curriculum scientifico dei membri del gruppo di lavoro

Daniele Testi, nato a Pietrasanta (LU) nel 1977, dal 2014 è Professore Associato di Fisica Tecnica presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa. Laureato con lode in Ingegneria Aerospaziale (2002), Dottore di Ricerca in Energetica Elettrica e Termica (2006), Assegnista di Ricerca (2006-2009), Borsista di Ricerca (2010-2011) e Ricercatore Universitario a tempo indeterminato (2011-2014) presso l'Università di Pisa. Ha svolto supporto alla didattica per i corsi di Termodinamica Applicata, Fisica Tecnica e Termoenergetica dell'Edificio. È stato codocente dei corsi di Teoria dei Sistemi, Laurea in Ingegneria Energetica, e di Risparmio Energetico in Edilizia, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. Attualmente è Presidente del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e titolare dei corsi di Fisica Tecnica, Laurea in Ingegneria dell'Energia, Energia e Sistemi Energetici, Laurea in Ingegneria Gestionale, e Trasmissione del Calore e Termofluidodinamica, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. Principali campi di studio: termofluidodinamica monofase e bifase, tecniche d'incremento dello scambio termico convettivo, tecniche di misura nella fisica tecnica, scambiatori e dissipatori di calore, microgravità, termofisica degli ambienti abitati, impianti di climatizzazione, efficienza energetica in edilizia, simulazione, integrazione e ottimizzazione di sistemi energetici, pianificazione energetica. Per la sua Tesi di Dottorato di Ricerca, ha ottenuto il premio europeo "EUROTHERM Young Scientist Award", conferito con cadenza quadriennale. Autore di oltre 100 pubblicazioni su riviste internazionali o in atti di congressi. Docente in numerosi corsi di formazione, master e seminari sulla gestione dell'energia, la diagnosi e la certificazione energetica degli edifici e gli impianti termotecnici. Titolare di consulenze o collaboratore per vari contratti di ricerca nell'ambito della diagnosi, dell'efficienza, della normativa, della pianificazione e della conversione energetica. Socio dell'Unione Italiana Termofluidodinamica (UIT) e dell'Associazione della Fisica Tecnica Italiana (FTI). Dal 2014 è responsabile scientifico dello sviluppo del software nazionale SEAS per la diagnosi energetica negli edifici.

Michele Barbieri, nato a Livorno nel 1987, ha conseguito la Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica presso l'Università di Pisa (marzo 2018), discutendo la tesi dal titolo "Modellazione e simulazione termoenergetica dinamica di coperture verdi". Borsista del Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC), Università di Pisa, con Borsa di Ricerca dal titolo "Analisi delle prestazioni energetiche di coperture verdi", nell'ambito del progetto "Soluzioni per la riqualificazione energetica degli edifici in diverse zone climatiche". Ha collaborato al Progetto della Regione Toscana (Bando FAR-FAS 2014) "Sistema integrato geotermico solare di riscaldamento e raffrescamento in logica smart grid (SIGS)".

Eva Schito, nata a Pisa nel 1990, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria dell'Energia, Sistemi, Territorio e Costruzioni presso l'Università di Pisa, nel giugno 2017, discutendo la tesi "Methods and tools for a rational and efficient use of energy in museum environments". Ha conseguito con lode la Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica presso l'Università di Pisa (luglio 2013), discutendo la tesi dal titolo "Modellazione dinamica di un sistema pompa di calore – edificio". Ha ottenuto l'Attestato di Merito previsto per gli studenti del Percorso di Eccellenza. Attualmente è Assegnista di Ricerca in Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni presso l'Università di Pisa e codocente del corso "Risparmio Energetico in

Edilizia” del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. I suoi principali campi di interesse sono: modellizzazione cycle-based delle pompe di calore e progettazione ottimizzata, simulazione dinamica e riqualificazione energetica degli edifici, anche di valore storico. Nel 2008 è risultata vincitrice del Primo Posto nella Categoria Singoli Studenti del Concorso Nazionale “IV Edizione delle Olimpiadi della Scienza – Premio Green Scuola – Energie alternative e ambiente: la produzione sostenibile di energia”, indetto dal Ministero dell’Istruzione, Università e Ricerca e dal Consorzio Interuniversitario “La Chimica per l’Ambiente” (INCA). Esperto Junior CasaClima e Socia FTI e dell’Associazione Italiana Condizionamento dell’Aria Riscaldamento e Refrigerazione (AiCARR). Ha collaborato come Borsista col DESTEC, Università di Pisa, nell’ambito di contratti di ricerca e consulenza nel campo della diagnosi e simulazione energetica degli edifici e dei sistemi energetici.

Paolo Conti nato a Jesi (AN) nel 1987, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria “Leonardo da Vinci” Energetica Elettrica e Termica presso l’Università di Pisa, discutendo la tesi “Sustainable design of ground-source heat pump systems: optimization of operative life performances”. Dal 2015 al 2017 è stato Assegnista di Ricerca e Borsista presso il DESTEC, Università di Pisa. Da aprile 2017 è Ricercatore a Tempo Determinato, sempre presso il DESTEC, ed è titolare del corso "Termoenergetica degli edifici" del Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia. La sua attività riguarda la progettazione e la gestione ottimizzata degli impianti geotermici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici. I suoi settori principali d’interesse professionale sono: gli impianti di climatizzazione ad acqua e ad aria, lo sviluppo di modelli al computer per la simulazione e la valutazione delle prestazioni energetiche dei sistemi edificio – impianto, lo studio e sviluppo di metodologie per la diagnosi energetica negli edifici, l’individuazione di buone pratiche di progettazione e gestione dei sistemi edifici-impianto. Socio AiCARR, UGI, FTI e dell’American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Membro dell’International Geothermal Association (IGA) Resources & Reserves Committee e Co-chair del Subcommittee A per la promozione e l’aggiornamento delle specifiche riguardanti l’applicazione del protocollo UNFC alle applicazioni geotermiche (pompe di calore incluse).