

METODOLOGIA

Allo scopo di sviluppare una metodologia per l'utilizzo della simulazione dinamica degli edifici per la riqualificazione energetica in ottica nZEB e redarre le relative Linee guida sono state svolte delle analisi di carattere metodologico sui seguenti temi:

- a) la simulazione dinamica di involucri edilizi appartenenti ad edifici storici e/o ad elevata capacità termica;
- b) la calibrazione di modelli di simulazione energetica dell'esistente, sulla base di due casi studio. Tale analisi è stata svolta in collaborazione con l'UO2 (UniRoma 2) e con l'UO5 (PoliTO), permettendo il confronto tra programmi di simulazione e approcci di modellazione differenti.

Per quanto riguarda il tema a) si è analizzata la qualità delle simulazioni ottenute applicando il metodo delle Conduction Transfer Functions (CTF) per risolvere la conduzione in regime variabile in pareti ad elevata capacità termica, quali quelle di edifici storici. Le CTF sono infatti adottate nei più comuni programmi di simulazione energetica dinamica, come EnergyPlus e TRNSYS. L'accuratezza del metodo delle CTF è regolata dal cosiddetto Time Base (TB), a sua volta vincolato ad essere un multiplo del passo temporale di simulazione o Time Step (TS), dal numero di coefficienti delle CTF utilizzati e dal metodo di calcolo di tali coefficienti. Normalmente il numero massimo di coefficienti utilizzabili è fissato a priori e non modificabile, sia in TRNSYS sia in Energy Plus, pari a 20, per non rallentare eccessivamente il calcolo. Essendo vincolato il numero massimo di coefficienti, per pareti di elevato spessore può essere quindi necessario aumentare il TB delle CTF a diverse ore, perché queste risultino convergere sulla soluzione esatta. Per quanto riguarda il Time Step di simulazione invece la tendenza attuale è ad utilizzare valori inferiori all'ora, specialmente nei casi in cui si voglia analizzare un sistema di controllo. Per pareti con elevata capacità termica si ha quindi frequentemente il caso in cui il Time Step e il Time Base siano diversi e, in particolare, il TB maggiore del TS, il che impone l'uso di un algoritmo per l'utilizzo delle CTF al passo temporale della simulazione.

Per l'applicazione delle CTF a pareti spesse, usuali nei nostri edifici d'epoca, si è quindi sviluppato un caso studio di simulazione, costituito da una zona termica con pareti omogenee di spessore crescente, da un minimo di 30 cm fino ad un massimo di 190 cm. Si è scelto un materiale con densità di 1500 kg/m^3 , calore specifico di 840 J/(kg.K) e conduttività termica di $0,66 \text{ W/(m.K)}$. Le pareti sono state sottoposte ad un regime periodico stabilizzato, in modo da avere a disposizione una soluzione esatta del problema di conduzione con cui confrontare i risultati delle simulazioni, riproducendo lo scenario del test TC3 "Transient Conduction: Sinusoidal Driving Temperature and Multi-layer Wall" dell'ASHRAE 1052-RP. Nello specifico sono state applicate le seguenti condizioni al contorno:

- temperatura dell'aria esterna variabile in modo sinusoidale con periodo giornaliero, con valore medio 20°C e ampiezza 15°C ,
- temperatura dell'aria interna costante a 20°C mantenuta da un impianto di riscaldamento/raffrescamento ideale,
- assenza di radiazione solare, di carichi interni e di radiazione a grande lunghezza d'onda.

Sono quindi state effettuate simulazioni annuali con EnergyPlus e TRNSYS con due Time Step, pari a 15 minuti e a 60 minuti. Nel caso di TRNSYS si è impostato sempre il Time Base minimo possibile (cioè il più piccolo tale per cui il programma fornisce le CTF), mentre nel caso di EnergyPlus la scelta del Time Base è effettuata in automatico dal programma. I casi simulati sono riassunti in Tabella 1, dove è possibile osservare che per simulare pareti di spessore elevato si è reso in alcuni casi necessario spezzare in due la parete stessa per riuscire ad ottenere i coefficienti delle CTF. Si osserva inoltre che per le pareti con spessore da 60 cm compresi in su, il Time Base risulta sempre maggiore del Time Step di 15 minuti, e che per le pareti molto spesse arriva fino alle 9 ore.

Il confronto tra risultati delle simulazioni e soluzione analitica è stato effettuato in termini di temperature superficiali e flussi termici superficiali, utilizzando le metriche dell'errore medio e quadratico medio, riferiti ai valori di picco e alle ampiezze di oscillazione.

La scelta di avere un unico strato omogeneo è legata al fatto di poter confrontare i coefficienti delle CTF prodotti dai diversi algoritmi implementati nel due software, TRNSYS e Energy Plus, con la soluzione esatta per l'impulso termico triangolare di base 2 volte il Time Base, e quindi poter esprimere un giudizio di qualità sue due algoritmi.

Wall Type	BPS _t	CTF TimeBase [h]	Sim Time Step [h]
WALL 30	TRNSYS	0.25	0.25
		1	1
	Eplus	0.25	0.25
		1	1
WALL60	TRNSYS	0.75	0.25
		1	1
	Eplus	0.5	0.25
		1	1

WALL 100*	TRNSYS	2.25*	0.25
		3*	1
Eplus		1.5	0.25
		1	1
WALL 160	TRNSYS	Not allowed	Not allowed
		Not allowed	Not allowed
Eplus		3.75	0.25
		Not allowed	Not allowed
WALL 160split in Half	TRNSYS	5.75	0.25
		6	1
Eplus		2.5	0.25
		3	1
WALL 190 split in two	TRNSYS	8.25	0.25
		9	1
Eplus		3.5	0.25
		Not allowed	Not allowed
WALL 190 split in four	TRNSYS	8.25	0.25
		9	1
Eplus		3	0.25
		Not allowed	Not allowed

Tabella 1. Simulazioni effettuate per verificare il metodo delle CTF: Time Base e Time Step per ogni parete e tool di simulazione (Pasini e Mazzarella, 2017).

Per quanto riguarda il tema b) si è proceduto al confronto tra:

- programmi di simulazione dinamica diversi; in particolare sono stati utilizzati in parallelo sullo stesso caso studio TRNSYS, EnergyPlus, IDA ICE e OpenBPS;
- approcci di calibrazione differenti, ovvero di tipo manuale, guidati dall'analisi di sensitività ai parametri e dall'esperienza del modellatore, oppure di tipo automatico, basati cioè su codici di ottimizzazione;
- diverse disponibilità di dati di monitoraggio dell'esistente, in termini sia di numero di punti di misura che di tipologia di grandezze misurate (condizioni interne, dettaglio comportamento chiusure, consumi, azioni degli occupanti);
- diverso livello della calibrazione (componente edilizio, intero involucro in evoluzione libera, involucro con impianto di emissione attivo, edificio con/senza gli occupanti).

In particolare, la metodologia di ricerca relativa alla calibrazione di modelli di simulazione energetica dinamica dell'esistente si è sviluppata in due fasi:

- b1) la calibrazione delle proprietà del componente edilizio, effettuata sul caso studio di seguito denominato UO6-1;
- b2) la calibrazione dell'involucro edilizio in evoluzione libera e in presenza di occupanti, tramite il caso studio di seguito indicato come UO6-2.

b1) Nel caso studio di calibrazione delle proprietà termofisiche delle chiusure opache si è sviluppato un modello della singola parete perimetrale. In alcuni programmi di simulazione esistono modelli del componente edilizio pronti all'uso (IDA ICE, OpenBPS), mentre in altri no (EnergyPlus, TRNSYS). Pertanto nel caso di EnergyPlus si è sviluppata una metodologia specifica, di seguito denominata "metodo della zona termica fittizia", costituita dai seguenti passi:

- si crea una zona termica delimitata da componenti edilizi (solette, pareti) con la stessa composizione della parete in esame;
- si impone un set point di temperatura dell'aria interna variabile, uguale al profilo misurato della temperatura superficiale interna della parete in esame;
- si impone una temperatura dell'aria esterna variabile, pari al profilo misurato della temperatura superficiale esterna;
- la resistenza convettiva interna ed esterna sono poste pari ad un valore estremamente piccolo, in modo tale che rispettivi coefficienti convettivi siano così elevati da trasformare le condizioni al contorno di III specie (convettive) in I specie (temperature superficiali);
- si specifica che le superfici esterne di tutti i componenti edilizi non sono esposte né all'azione del vento né all'irraggiamento solare.

Pertanto gli scambi termici radiativi netti tra le superfici interne della zona sono nulli perché tutte le superfici si portano alla stessa temperatura. Le caratteristiche della zona termica fittizia sono riassunte in Figura 1.

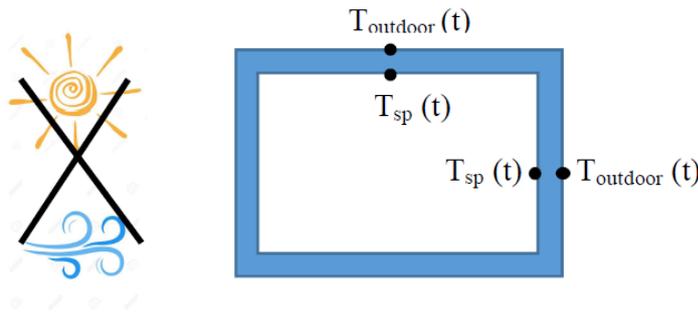


Figura 1. Metodo della zona termica fittizia

Oltre ai dati di monitoraggio relativi alle temperature superficiali interna ed esterna, utilizzate come appena illustrato come condizioni al contorno, sono stati utilizzati come dati di confronto per la calibrazione delle proprietà termofisiche della parete le temperature alle interfacce tra gli strati e le densità di flusso termico alle superfici interna ed esterna (Figura 4).

I modelli di parete sono stati implementati in parallelo in diversi programmi di simulazione: IDA ICE, OpenBPS e EnergyPlus, adottando in ogni caso un metodo numerico alle differenze finite (schema Cranck-Nicholson) per la risoluzione della conduzione nel componente edilizio.

Si è scelto come periodo di calibrazione l'intervallo di tempo tra il 30/5/13 e il 6/6/13 nel quale l'edificio era in evoluzione libera. I modelli sono stati inizialmente utilizzati con una stratigrafia base, costruita integrando dati di progetto, specifiche fornite dai produttori e dati di letteratura tecnica. I risultati ottenuti sono stati confrontati con i dati di monitoraggio sulla base delle seguenti metriche di prestazione:

- lo scarto quadratico medio

$$RMSE = \left[\frac{\sum_k (Y_k - S_k)^2}{N} \right]^{0.5}$$

- lo scarto quadratico medio normalizzato sull'intervallo di variazione della grandezza, nel caso delle temperature di interfaccia, i.e.

$$RN_RMSE = \frac{RMSE}{[\max(Y_k) - \min(Y_k)]}$$

- lo scarto quadratico medio normalizzato sul valore efficace della grandezza, nel caso delle densità di flusso termico, i.e.

$$CV_RMSE = \frac{RMSE}{Y_{eff}}$$

ponendosi l'obiettivo di ottenere scarti tra simulazione e misura inferiori all'accuratezza dei sensori impiegati, ovvero $RMSE < 0,5^{\circ}C$ per le temperature di interfaccia e $CV_RMSE < 3\%$ per le densità di flusso termico. Le proprietà dei materiali sono quindi state variate secondo una metodologia manuale (PoliMI-OpenBPS, PoliTO-EnergyPlus) oppure automatica basata sull'accoppiamento tra il tool di simulazione dinamica e lo strumento di ottimizzazione GenOpt (UniRoma2-IDA ICE) fino ad ottenere i modelli calibrati. I modelli ottenuti dai diversi gruppi di ricerca in parallelo sono quindi stati oggetto di confronto e di discussione.

La procedura adottata è sintetizzata nel diagramma a blocchi in Figura 2.

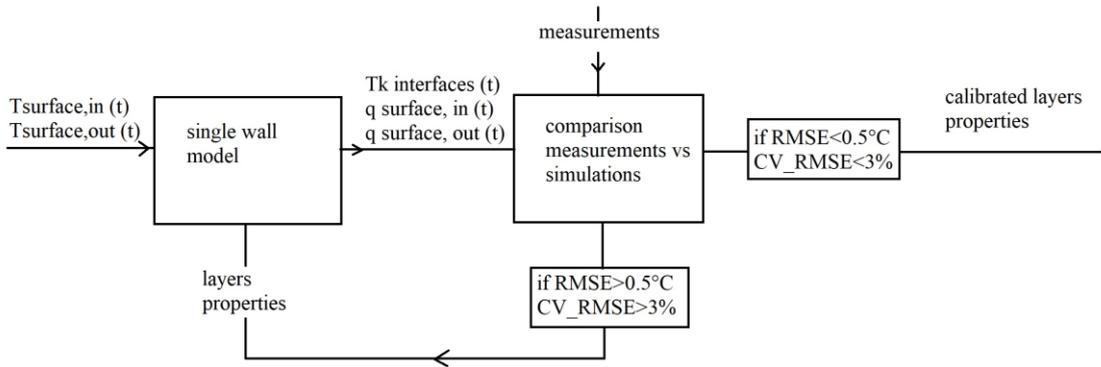


Figura 2. Diagramma a blocchi per la procedura di calibrazione delle proprietà di parete

b2) Nel caso studio di calibrazione dell'involucro edilizio in evoluzione libera e in presenza di occupanti, è stato costruito un modello relativo ad un piano intermedio dell'edificio residenziale UO6-2 (Figura 5). Tale piano è composto da 3 appartamenti, denominati A, B e C, e dal vano scale. Il piano intermedio ed il contesto dell'edificio, costituito da edifici ed alberi ad alto fusto limitrofi, sono stati modellati in termini geometrici all'interno di OpenStudio (Figura 3).

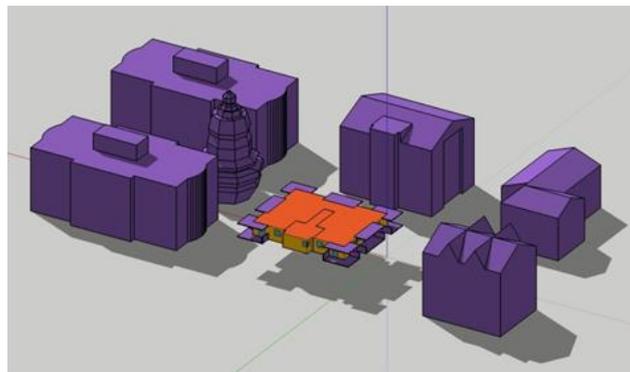


Figura 3. Modellazione del piano intermedio dell'edificio in esame e del contesto (caso studio UO6-2)

Per valutare l'impatto della qualità e della quantità di misure disponibili sulla modellazione e potenzialmente sulla calibrazione, sono stati creati due insiemi di dati di monitoraggio, denominati "Dettagliato" e "Base". Come è possibile osservare in Tabella 2, dove sono elencate le grandezze monitorate disponibili in ciascun insieme, in quello Dettagliato sono disponibili le temperature di ciascun appartamento e di alcune stanze per appartamento, temperature e flussi all'interno di alcune stratigrafie, ed in uno dei tre appartamenti il segnale di apertura delle finestre e la temperatura di immissione dell'aria di ventilazione meccanica. Al contrario nell'insieme "Base" è disponibile la temperatura media dei tre appartamenti. In generale la frequenza del monitoraggio è maggiore nell'insieme Dettagliato rispetto a quello "Base" (ogni 10 minuti contro ogni ora).

A tre gruppi di ricerca è stato fornito l'insieme "Base", mentre ad un quarto è stato assegnato l'insieme Dettagliato. La diversa disponibilità di misure con cui confrontare i risultati delle simulazioni ha portato i modellatori con accesso ai dati dell'insieme "Base" a modellare il piano dell'edificio come composto da sole due zone termiche, ovvero una zona unica per i tre appartamenti ed una zona per il vano scale. Al contrario i modellatori con accesso all'insieme Dettagliato hanno creato più zone termiche, distinguendo non solo fra gli appartamenti ma anche tra diversi ambienti di un appartamento, per un totale di 15 zone termiche.

Quantity	Detailed set	Base set
Meteorological data	Every 10 minutes	Every hour
Floor indoor air temperature	For different rooms in Apartment A For the main room for Apartments B, C	Average among apartments A, B and C
Neighbouring floors air temperature	For every apartment in the upper and in the lower floor	Upper floor average Lower floor average
External wall surface temperatures/ heat flow densities	Every 10 minutes	Not provided

Windows opening switch	Every 10 minutes for every window in apartment A	Not provided
Mech. ventilation supply temperature	Every 10 minutes for apartment A	Not provided

Tabella 2. Grandezze monitorate nel caso studio UO6-2 inserite nell'insieme "Dettagliato" e "Base"

Sono quindi stati creati dei modelli base in cui:

- le chiusure opache e trasparenti sono state descritte come nella documentazione di progetto;
- i carichi interni sono stati modellati secondo profili orari per appartamenti da normativa (UNI/TS 11300-1);
- si è assunta una portata di ricambio oraria per ventilazione meccanica di 0,5 vol/h;
- le tapparelle sono state supposte in uso solo nelle ore notturne;
- le temperature misurate dei piani soprastante e sottostante sono state assegnate come condizioni al contorno.

Coloro che hanno avuto accesso all'insieme di dati Dettagliato hanno modellato anche le partizioni interne e utilizzato i dati meteorologici ogni 10 minuti, mentre gli altri hanno ignorato le partizioni interne e utilizzato i dati meteorologici con frequenza oraria.

Si è individuato come periodo di simulazione il mese di Ottobre 2017, nel quale l'impianto di riscaldamento è risultato non attivo; la prima settimana è stata utilizzata come periodo di addestramento per i modelli e le successive tre settimane come periodo di calibrazione.

La metrica di valutazione della prestazione della simulazione adottata è stata lo scarto quadratico medio RMSE nella temperatura dell'aria interna, relativo alla temperatura media dei tre appartamenti per l'insieme di misure "di Base", relativamente a ciascuno dei tre appartamenti per l'insieme di misure "Dettagliato".

Come illustrato in Tabella 3, nella quale è riassunta l'articolazione del lavoro tra i diversi gruppi di ricerca, due gruppi hanno adottato un metodo di calibrazione manuale, mentre altri due gruppi hanno adottato una procedura di calibrazione automatica.

Gruppo di ricerca	Strumento di simulazione	Insieme di misure	Metodo di calibrazione
PoliTO (UO5)	EnergyPlus	"Base"	manuale
PoliMI (UO6)	TRNSYS 17	"Base"	manuale
UniRoma2 (UO2)	IDA ICE 4.8	"Base"	automatico
UniTN (UO6)	TRNSYS 17	"Dettagliato"	automatico

Tabella 3. Articolazione del lavoro di calibrazione sul caso studio UO6-2.

I parametri di calibrazione adottati possono essere suddivisi in parametri dell'involucro edilizio (proprietà dei materiali delle chiusure opache, ponti termici, fattore solare delle chiusure trasparenti, capacità termica interna delle zone) e parametri relativi all'utenza (profilo dei guadagni interni, uso delle protezioni solari, ventilazione naturale dovuta all'apertura delle finestre). La diversa suddivisione in zone termiche del piano dell'edificio, conseguenza del diverso accesso all'insieme di misure "Base" o Dettagliato, nonché il diverso approccio alla ricerca dell'ottimo, di tipo manuale oppure automatico, hanno naturalmente comportato possibilità diverse di variazione dei parametri di calibrazione. A titolo di esempio si riportano i casi de:

- l'uso delle protezioni solari, regolato da un valore di soglia di irradianza solare sul piano della finestra; mentre PoliMI e PoliTO hanno considerato un'unica soglia di attivazione per tutte le finestre del piano dell'edificio, UniRoma2 ha considerato una soglia di attivazione differenziata per orientamento della facciata, ed infine UniTN ha assunto una soglia di attivazione differenziata per appartamento;
- la ventilazione naturale derivante dall'apertura delle finestre; mentre PoliMI, PoliTO e UniRoma2 hanno assunto un unico valore di portata per l'intero piano, UniTN ha differenziato per ambiente e per appartamento.

Inoltre il gruppo UniTN (UO6), avendo accesso ai dati di dettaglio di comportamento della chiusura opaca verticale (Tabella 2), ha effettuato una modellazione in due stadi: al primo stadio ha modellato solo la chiusura verticale calibrandone le proprietà, secondo la metodologia sviluppata sul caso studio UO6-1, e successivamente ha modellato l'intero piano dell'edificio calibrando su ulteriori parametri relativi a involucro ed utenza.

Casi studio applicativi (se presenti)

Unità operativa 6:

La calibrazione di modelli di simulazione dinamica è stata effettuata su due casi studio corrispondenti ad altrettanti edifici situati in Provincia di Trento: un edificio monofamiliare ed un condominio residenziale. I due edifici, essendo di recente

costruzione, sono caratterizzati da un involucro edilizio con buone prestazioni energetiche. Entrambi gli edifici sono stati strumentati dall'Università di Trento con diversi sensori (temperature, flussi termici, energie termiche, apertura delle finestre) consentendo un monitoraggio termico ed energetico di dettaglio e di lungo periodo. Ciò ha consentito di studiare metodi di calibrazione basati sul confronto non solo con i tipici dati di consumo delle utenze, bensì con dati di monitoraggio di dettaglio diverso.

Il primo caso studio (UO6-1) è un edificio monofamiliare a due piani (Figura 4), con una superficie di 62 m² per piano. L'edificio presenta una struttura in legno ed un involucro ad elevato isolamento termico, con trasmittanze termiche delle chiusure opache comprese tra 0,12 W/(m².K) e 0,16 W/(m².K) e serramenti con triplo vetro basso emissivo con Argon e telaio in legno con trasmittanza termica 0,91 W/(m².K).

L'edificio è stato strumentato con sensori per la misura di temperatura dell'aria negli ambienti interni e parametri meteorologici esterni. Inoltre nella stratigrafia della chiusura verticale S-SE e della copertura sono stati inseriti diversi sensori di temperatura e termoflussimetri (Figura 4). Il passo temporale delle acquisizioni è stato impostato a 5 minuti. L'edificio è stato monitorato in evoluzione libera ed in assenza di occupazione.

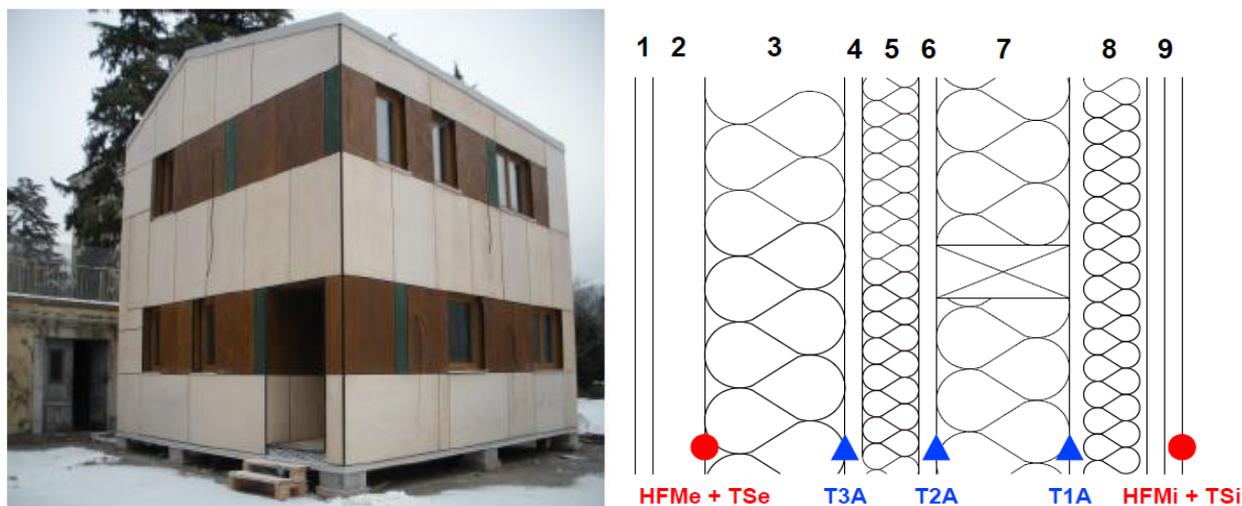


Figura 4. Edificio monofamiliare caso studio UO6-1 (sinistra); stratigrafia della chiusura verticale con posizione delle termocoppie (T) e dei termoflussimetri (HFM) (destra).

Il secondo caso studio (UO6-2) riguarda una palazzina residenziale di 5 piani fuori terra (Figura 5) per un totale di 14 appartamenti. Realizzata con una struttura "light frame", presenta anch'essa un involucro edilizio energeticamente performante (trasmittanza termica delle chiusure opache verticali 0,12 W/(m².K), trasmittanza termica dei vetricamera 0,5-0,6 W/(m².K)). L'edificio è provvisto di un impianto di riscaldamento con caldaia a condensazione e pannelli radianti e di un impianto di ventilazione meccanica con recupero termico. Gli occupanti possono interagire con il sistema impiantistico attraverso la regolazione dei termostati ambiente e l'apertura delle finestre.

Un sistema di monitoraggio rileva ad intervalli di 10 minuti le condizioni termoigrometriche interne agli appartamenti ed i consumi di riscaldamento, in termini di energia termica resa dal sistema radiante su base giornaliera. Sono inoltre monitorate alcune stratigrafie, attraverso sensori di temperatura e termoflussimetri appositamente installati all'interno di esse. In alcuni appartamenti è inoltre monitorata l'apertura delle finestre attraverso appositi switch.

L'edificio è stato monitorato sia in evoluzione libera che in regime di funzionamento invernale degli impianti, sempre in presenza degli occupanti.



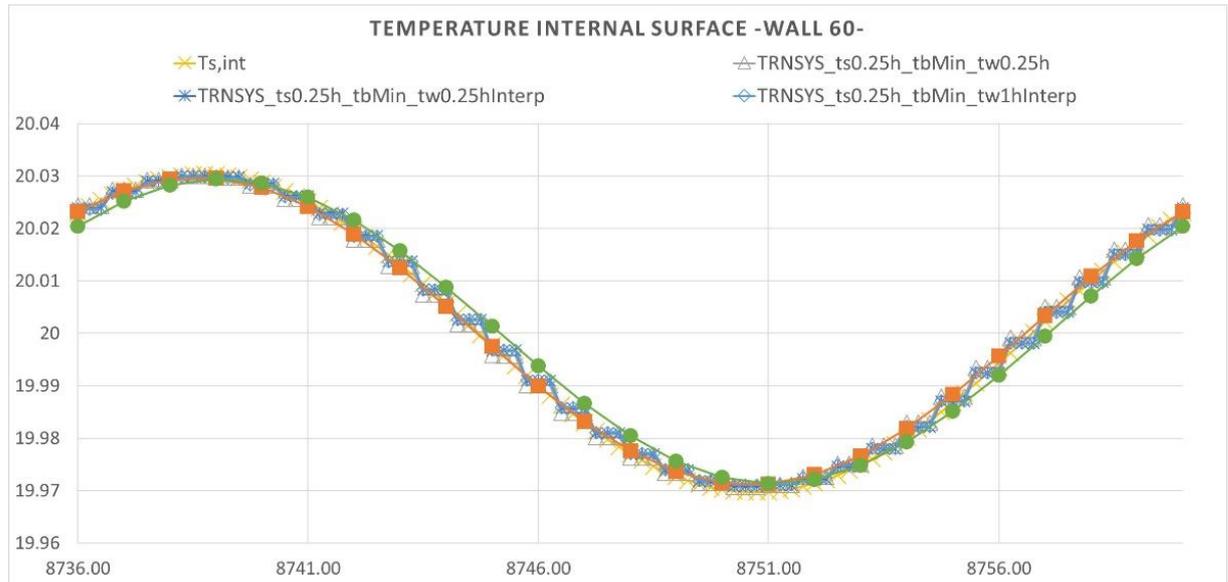
Figura 5. Condominio residenziale caso studio UO6-2

Risultati

Unità operativa 6:

a) Le analisi effettuate sull'uso delle Conduction Transfer Functions per la risoluzione della conduzione in regime variabile in pareti di elevato spessore hanno portato ai seguenti risultati (Pasini e Mazzarella, 2017):

- in TRNSYS non è consentito definire uno strato di spessore maggiore o uguale ad 1 m, limite che si può aggirare suddividendo lo strato complessivo in due; si è osservato che una suddivisione ulteriore non comporta variazioni nei risultati. Al contrario non ci sono limiti formali allo spessore di uno strato in EnergyPlus ma di fatto è risultato necessario suddividere strati così spessi per ottenere convergenza nei risultati. In questo caso, avendo osservato una dipendenza dei risultati dal numero di suddivisioni, si raccomanda di effettuare un'analisi di sensitività alla modellazione di parete; è stato comunque osservato un limite invalicabile per Energy Plus, che non risulta in grado di trattare pareti con spessore maggiore di circa 180 cm.
- per quanto riguarda il metodo di calcolo dei coefficienti delle CTF, il metodo numerico State Space (SS) adottato in EnergyPlus tende a individuare Time Base minori o uguali a quelli consentiti dal metodo Direct Root Finding (DRF) utilizzato in TRNSYS;
- rispetto alla soluzione analitica per impulso di temperatura triangolare, a parità di Time Base e numero di coefficienti massimo (20) delle CFT, il DRF di TRNSYS risulta essere più accurato del SS di Energy Plus;
- quando si effettuano simulazioni con Time Step inferiori al Time Base, gli algoritmi che consentono di gestire lo sfasamento tra i due passi temporali danno risultati differenti: mentre l'algoritmo implementato in EnergyPlus tende a dare andamenti più dolci, l'algoritmo implementato in TRNSYS può produrre risultati discontinui e a volte spuri, benché comunque non divergenti rispetto alla soluzione analitica. Di ciò è opportuno tenere conto in simulazioni nelle quali sia prevista una strategia di regolazione legata alle temperature superficiali; Un esempio di risultati ottenuti, relativo alla temperatura superficiale e al flusso termico interni per la parete da 60 cm, è



- Figura 6;
- quando il ricorso a questi algoritmi di accoppiamento non è necessario, il metodo di calcolo delle CTF di tipo DRF (TRNSYS) fornisce in generale risultati più accurati del metodo SS (EnergyPlus).

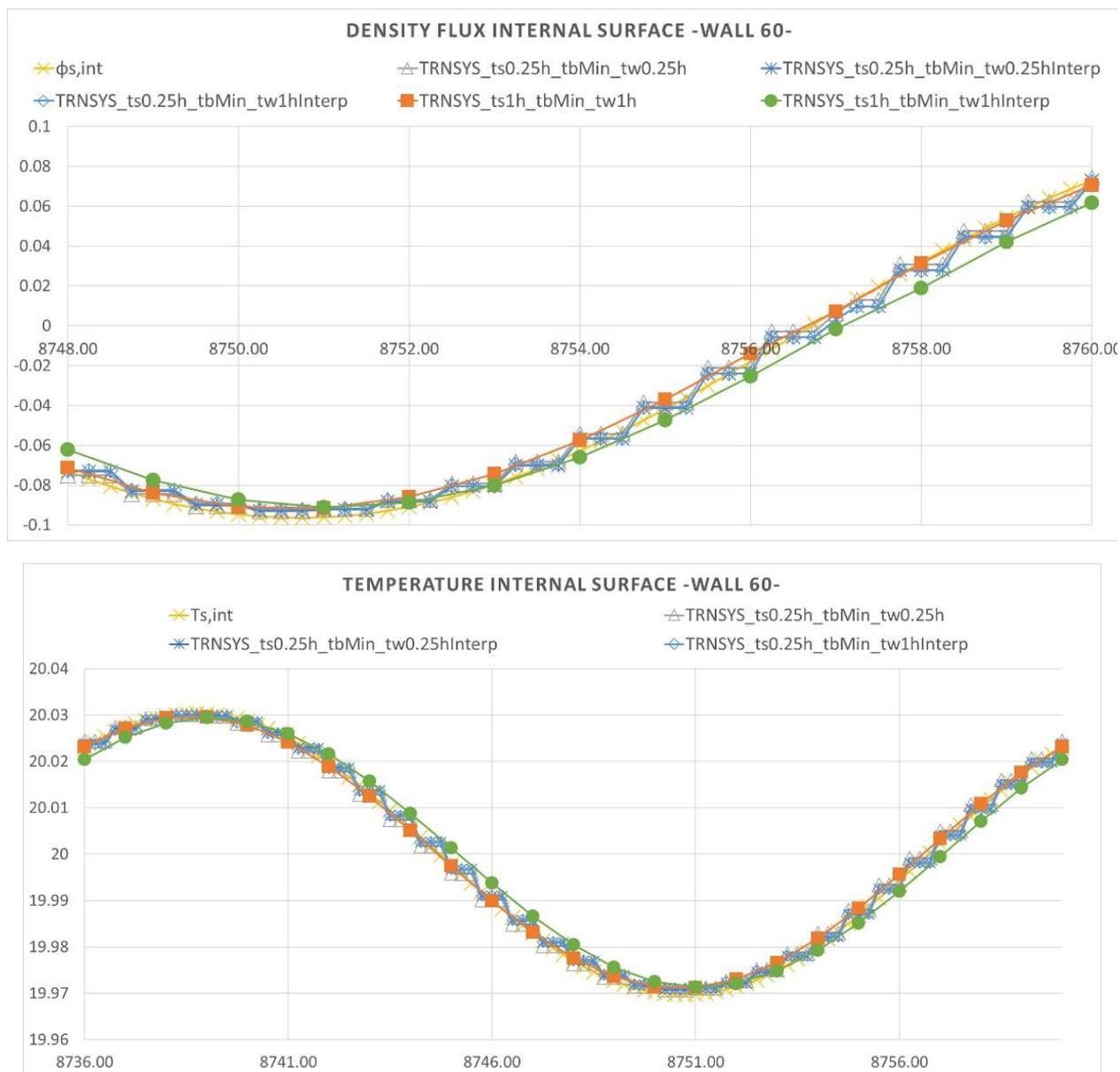


Figura 6. Effetto dell’algoritmo di accoppiamento tra Time Base e Time Step sulla densità di flusso (in alto) e sulla temperatura superficiale (in basso) interne con EnergyPlus e TRNSYS – parete da 60 cm

b1) Per quanto riguarda i risultati ottenuti nella simulazione in parallelo dei modelli di parete perimetrale (caso studio UO6-1), le predizioni dei modelli base ottenute in parallelo con i diversi programmi di simulazione (EnergyPlus, OpenBPS, IDA ICE) hanno dato luogo a risultati simili (Tabella 4). Questo ha costituito di fatto una validazione del metodo della zona termica fittizia per simulare la singola chiusura edilizia con programmi di simulazione energetica che richiedono la modellazione di almeno una zona termica.

I risultati dei modelli basi sono in generale in discreto accordo con le misure di temperatura alle interfacce tra strati diversi, mentre sono in modesto accordo con le misure di flusso termico. Tuttavia, dal momento che l’accuratezza nominale dei sensori di flusso del 3% si riferisce a una misura di 100 W/m^2 , mentre in una stratigrafia ben isolata come quella in esame i flussi termici assumono valori decisamente inferiori, si è ritenuta plausibile un’accuratezza dei sensori nell’intervallo di misura in esame inferiore a quella nominale.

		EnergyPlus	OpenBPS	IDA ICE
T3A	RMSE (°C)	0.70	0.67	0.58
	RN_RMSE (%)	5%	5%	5%
T2A	RMSE (°C)	0.59	0.59	0.47
	RN_RMSE (%)	6%	6%	5%
T1A	RMSE (°C)	0.30	0.30	0.25
	RN_RMSE (%)	4%	4%	4%
q _e	RMSE (W/m ²)	1.82	1.77	2.24
	RN_RMSE (%)	4%	4%	4%
	CV_RMSE (%)	25%	24%	31%
q _i	RMSE (W/m ²)	0.44	0.36	0.33
	RN_RMSE (%)	8%	6%	6%
	CV_RMSE (%)	43%	36%	33%

Tabella 4. Risultati simulazione modelli base di parete caso studio UO6-1 con diversi software di simulazione e relativamente alle temperature di interfaccia (T1A, T2A, T3A) e alle densità di flusso termico (q_i, q_e).

La calibrazione manuale operata in maniera indipendente dai gruppi Polito (UO5) e PoliMI (UO6) sulla base di un'analisi di sensitività ha portato a stratigrafie ottimali molto simili, nelle quali è stata aumentata la conduttività termica degli strati isolanti, diminuita la densità della lana di roccia e tenuto conto della presenza di distanziatori in legno in termini di proprietà equivalenti dello strato in cui si trovano. La calibrazione automatica operata dal gruppo UniRoma2 (UO2), potendo agire contemporaneamente su più parametri degli strati, ha portato ad una stratigrafia ottimale abbastanza diversa da quelle degli altri due gruppi. Come illustrato in Figura 7 per quanto riguarda una delle temperature superficiali (T3A), i diversi modelli calibrati sono tutti in ottimo accordo con le misure, ovvero caratterizzati da uno scarto quadratico medio nelle temperature RMSE < 0,5°C.

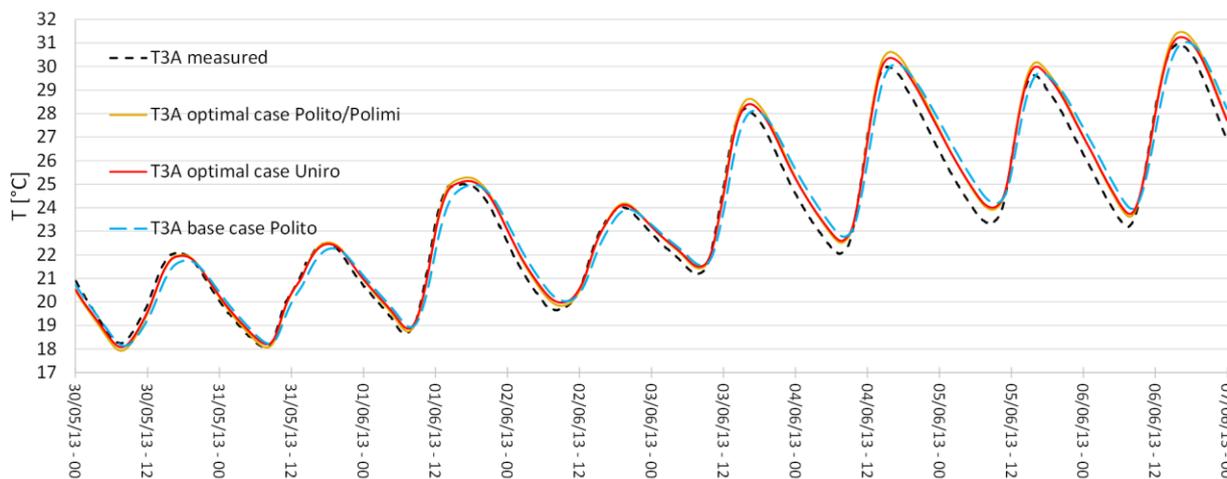


Figura 7. Profili di temperatura all'interfaccia tra due strati di parete (T3A): da misura, da simulazione con modello base, da simulazione con modelli di ottimo – caso studio UO6-1

L'indipendenza della prestazione dei modelli di ottimo dallo strumento di simulazione è stata anche verificata incrociando modelli e strumenti, come riassunto in Tabella 5.

In sintesi, il caso studio di calibrazione dei modelli di simulazione a livello del componente edilizio ha portato alle seguenti conclusioni (Angelotti et al. 2018):

- la calibrazione delle proprietà termofisiche di una stratigrafia con un modello a livello del componente edilizio è possibile anche con strumenti di simulazione che richiedono la modellazione di almeno una zona termica, attraverso il metodo appositamente sviluppato e verificato della “zona termica fittizia”;
- per operare la calibrazione della stratigrafia sono necessarie misure a livello della parete stessa; tra queste, per involucri edilizi molto isolati, è preferibile avere a disposizione misure di temperatura alle interfacce, in quanto le misure di flusso termico risultano poco accurate per bassi valori;
- nella simulazione della singola stratigrafia, l'utilizzo di programmi di simulazione diversi ha dato luogo a risultati molto confrontabili;

- si ottengono invece modelli calibrati diversi se si adottano metodi di calibrazione manuali e automatici; la molteplicità delle soluzioni è coerente con la tipologia di problema inverso, che appare sottodeterminato.

-		RMSE (°C)		
		T3A	T2A	T1A
Modello calibrato	Software di simulazione			
PoliTO	EnergyPlus	0.49	0.50	0.30
UniRoma2	IDA ICE	0.36	0.35	0.27
PoliTO	IDA ICE	0.37	0.38	0.24
UniRoma2	EnergyPlus	0.54	0.53	0.30

Tabella 5. RMSE nelle temperature di interfaccia per i modelli calibrati ottenuti da PoliTO e UniRoma 2, sia con i software di partenza che con altri software per verifica.

b2) Per quanto riguarda i risultati ottenuti nella simulazione a livello di edificio (caso studio UO6-2), le previsioni dei modelli base ottenute in parallelo con i diversi programmi di simulazione (EnergyPlus, Trnsys, IDA ICE) hanno dato luogo a risultati simili fra loro, ma distanti dai profili di temperatura interna misurati, come si può osservare in Figura 8.

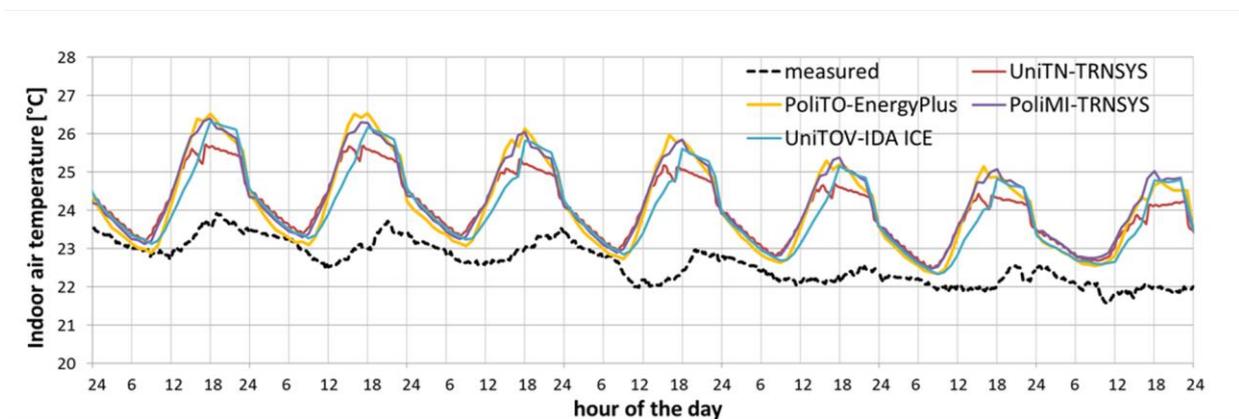


Figura 8. Temperatura dell'aria interna del piano - risultati delle simulazioni dei modelli base a confronto con la misura (III settimana di Ottobre 2017 – caso studio UO6-2)

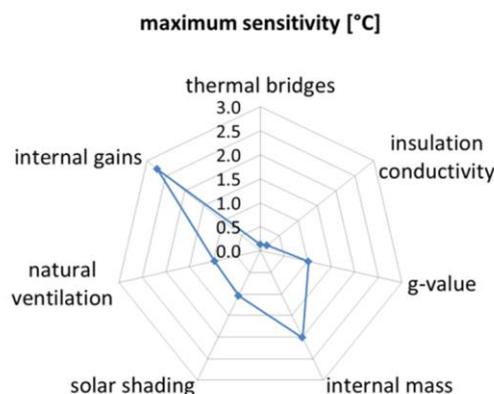


Figura 9. Sensitività ai principali parametri di involucro e utenza – modello base TRNSYS-PoliMI caso studio UO6-2

L'analisi di sensitività ai principali parametri di involucro e di utenza, effettuata dai modellatori che hanno adottato una procedura di calibrazione manuale, ha individuato i parametri più influenti, ovvero (Figura 9): il fattore di guadagno solare delle chiusure finestrate, la capacità termica interna della zona, il profilo dei guadagni interni, la portata di ventilazione naturale in aggiunta alla ventilazione meccanica e l'utilizzo di protezioni solari. I modelli calibrati ottenuti dai gruppi PoliMI (UO6) e PoliTO (UO5) sono quindi stati individuati combinando tali parametri.

Ciascuno dei due gruppi è pervenuto a diverse soluzioni di ottimo, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 6. In tutti i casi si è reso necessario incrementare la massa termica interna della zona, attraverso un moltiplicatore della capacità termica del volume d'aria (ACM) e/o l'introduzione esplicita di partizioni (di estensione S_{part}). L'azione degli occupanti, in termini di attivazione delle protezioni solari o di apertura delle finestre con conseguente aumento dei ricambi orari (ACH_{NV}), è sempre risultata necessaria. I guadagni interni sono spesso stati variati rispetto a quelli della normativa nel senso di una riduzione complessiva del guadagno giornaliero.

In Tabella 6 è anche illustrato il modello di ottimo ottenuto con una procedura automatica di minimizzazione dello scarto quadratico RMSE nella temperatura dell'aria interna dal gruppo UniRoma2 (UO2), nel quale si nota, accanto ad alcuni parametri simili rispetto ai modelli calibrati di PoliMi e PoliTO, la minima ventilazione naturale aggiuntiva connessa all'apertura delle finestre.

	Modello	Massa termica interna	Correzione per ponti termici	Ventilazione naturale	Guadagni interni	Protezioni solari	RMSE [°C]
PoliTO-EnergyPlus	PoliTO 1	ACM = 5 $S_{part} = 259 \text{ m}^2$	-	$ACH_{NV} = 0.5$ 1 p.m. – 10 p.m.	-	$G_{min} = 300 \text{ W/m}^2$	0.51
	PoliTO 2	ACM = 5 $S_{part} = 259 \text{ m}^2$	-	$ACH_{NV} = 0.5$ 1 p.m. – 10 p.m.	Profilo PoliTO	$G_{min} = 300 \text{ W/m}^2$	0.43
	PoliTO 3	ACM = 8 $S_{part} = 0$	-	$ACH_{NV} = 0.5$ 1 p.m. – 10 p.m.	Profilo PoliTO	$G_{min} = 300 \text{ W/m}^2$	0.44
	PoliTO 4	ACM = 5 $S_{part} = 259 \text{ m}^2$	-	$ACH_{NV} = 0.5$ 11 a.m. – 9 p.m.	Profilo PoliTO	$G_{min} = 300 \text{ W/m}^2$	0.38
PoliMI-TRNSYS	PoliMI 1	ACM = 5 $S_{part} = 259 \text{ m}^2$	-	-	-	$G_{min} = 200 \text{ W/m}^2$	0.49
	PoliMI 2	ACM = 3 $S_{part} = 1034 \text{ m}^2$	-	-	-	$G_{min} = 200 \text{ W/m}^2$	0.46
	PoliMI 3	ACM = 5 $S_{part} = 259 \text{ m}^2$	-	$ACH_{NV} = 0.5$ 1 p.m. – 10 p.m.	-	$G_{min} = 300 \text{ W/m}^2$	0.50
	PoliMI 4	ACM = 5 $S_{part} = 259 \text{ m}^2$	-	$ACH_{NV} = 1.5$ se $T_{ext} > 18^\circ\text{C}$	-	$G_{min} = 200 \text{ W/m}^2$	0.46
	PoliMI 5	ACM = 3 $S_{part} = 1034 \text{ m}^2$	-	$ACH_{NV} = 1.5$ se $T_{ext} > 16^\circ\text{C}$	Base ridotto del 25%	-	0.42
	PoliMI 6	ACM = 3 $S_{part} = 1034 \text{ m}^2$	-	$ACH_{NV} = 0.5$ 1 p.m. – 10 p.m.	Base ridotto del 25%	-	0.42
UniRoma2-IDA ICE	UniTOV	ACM = 11	$\Psi_L = 0.32$ W/K	$ACH_{NV} = 0.08$	Profilo UniTOV	$G_{min} = 350 \text{ W/m}^2$ N $G_{min} = 65 \text{ W/m}^2$ E $G_{min} = 611 \text{ W/m}^2$ S $G_{min} = 64 \text{ W/m}^2$ W	0.27

Tabella 6. Parametri dei modelli calibrati per il caso studio UO6-2 ottenuti da PoliMI, PoliTO e UniRoma2.

Per quanto riguarda il modello di ottimo ottenuto con la procedura automatica da UniTN (UO6), la calibrazione delle proprietà della parete perimetrale, resa possibile dall'accesso all'insieme di misure Dettagliato, ha comportato minime variazioni rispetto ai valori di partenza, che hanno mantenuto la trasmittanza termica della parete al valore di $0,12 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Per quanto riguarda il modello di ottimo a livello di edificio, le caratteristiche sono riportate in Tabella 7. Si può notare come si sia ottenuta una portata di ventilazione diversa nei 3 appartamenti, ovvero la portata nell'appartamento B sia la metà di quella nell'appartamento A, mentre sia nulla nell'appartamento C.

La prestazione complessiva del modello calibrato di UniTN, rappresentata dallo scarto quadratico medio nella temperatura media di piano, essendo pari a $0,46^\circ\text{C}$, è risultata confrontabile con quella dei modelli ottenuti dagli altri gruppi, nonostante la maggiore disponibilità di dati e informazioni. Questa prestazione complessiva è tuttavia il risultato di un'ottima prestazione per l'appartamento A, ovvero quello maggiormente monitorato, in particolare in termini di apertura delle finestre, e di una prestazione discreta per gli altri appartamenti, come illustrato in Figura 10.

	Range	Calibrated		Range	Calibrated
Solar irradi. shading closed Ap. A	200-1400	200 W m^{-2}	ACH_{MV}	0.5-0.65	0,55
Solar irradi. shading closed Ap. B	200-1400	300 W m^{-2}	Stairwell zone infiltration ACH	0.1-0.6	0,3

Solar irradi. shading closed Ap. C	200-1400	1400 W m ⁻²	(T _{supply} -T _{ext}) Ap. B/Ap. A	0.5-1.5	0,5
Solar irradi. difference shading closed-open Ap. A	0-200	200 W m ⁻²	(T _{supply} -T _{ext}) Ap. C/Ap. A	0.5-1.5	0,5
Solar irradi. difference shading closed-open Ap. B	0-200	200 W m ⁻²	Time shift internal gains profile compared to base profile	-2,+2	-1.167 h
Solar irradi. difference shading closed-open Ap. C	0-200	50 W m ⁻²	Morning gain ampl. living area	0.5-1.5	1.1
Window opening angle Ap. A Zone KS	10-90	10 deg	Afternoon gain ampl. living area	0.5-1.5	1.3
Window opening angle Ap. A Zone WC	10-90	40 deg	Evening gain ampl. living area	0.5-1.5	0.5
Window opening angle Ap. A Zone LS	10-90	10 deg	Morning gain ampl. sleeping area	0.5-1.5	0.7
Window opening angle Ap. A Zone LM	10-90	10 deg	Afternoon gain ampl. sleeping area	0.5-1.5	1.3
ACH _{NV} Ap. B/ Ap. A	0-1.5	0,5	Evening gain ampl. sleeping area	0.5-1.5	1.5
ACH _{NV} Ap. C/ Ap. A	0-1.5	0	Air capacity multiplier	1	2.25

Tabella 7. Parametri del modello calibrato per il caso studio UO6-2 ottenuto da UniTN.

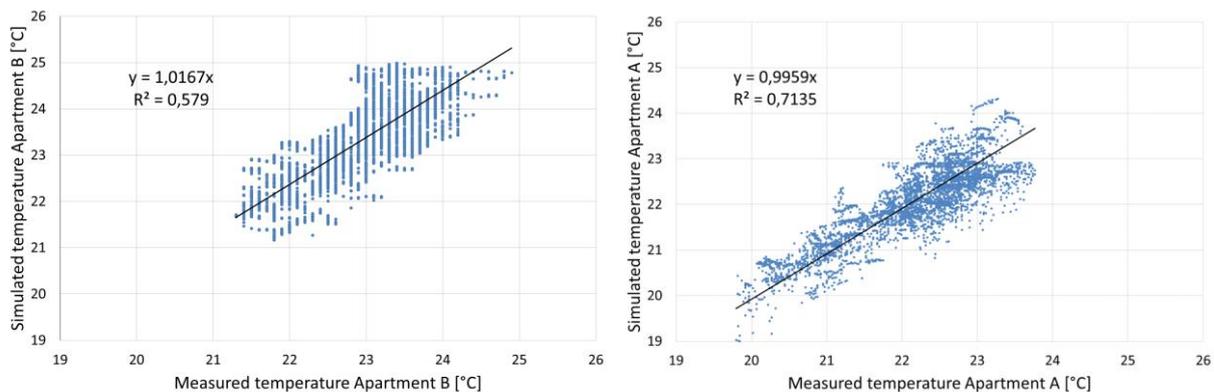


Figura 10. Temperatura interna simulata versus misurata nell'appartamento B (sinistra) e nell'appartamento A (destra) – simulazioni con modello calibrato UniTN sul caso studio UO6-2.

Ciò indica che la conoscenza del comportamento degli occupanti è fondamentale, ma anche che tale comportamento può cambiare molto da persona a persona, da cui la necessità di una modellazione adeguata. A tal proposito, i diversi modelli calibrati ottenuti da PoliMI (UO6) sono stati sottoposti a validazione su un ulteriore periodo di simulazione corrispondente ad Agosto 2018. La validazione ha consentito di discriminare tra i vari modelli, individuando come ottimali quelli nei quali la modellazione dell'azione di apertura delle finestre da parte degli occupanti è descritta attraverso un driver dell'azione (la temperatura dell'aria esterna, si vedano i modelli POLIMI 4 e 5 in Tabella 6) piuttosto che attraverso una più semplice schedule oraria (si vedano i modelli POLIMI 3 e 6).

In sintesi, la calibrazione dei modelli relativi al caso studio UO6-2 ha consentito di ottenere i seguenti risultati (Angelotti et al. 2019):

1. l'esemplificazione dell'importanza del comportamento degli occupanti nel determinare la prestazione energetica dell'edificio, da cui la convenienza di disporre di dati di monitoraggio relativi a periodi di minima presenza, oppure di monitorare quanto più possibile la loro presenza e il loro intervento (uso degli oscuranti e delle aperture, impostazione dei termostati ecc.);
2. l'individuazione dei vantaggi e degli svantaggi di una procedura di calibrazione automatica rispetto ad una manuale, riassumibili nella maggiore capacità della prima di gestire l'incertezza in molti parametri, di giungere ad una soluzione di minima discrepanza rispetto ai dati di misura e in maniera più indipendente dall'abilità dell'utente del programma di simulazione, richiedendo però una capacità di individuare correttamente intervalli di variazione dei parametri di calibrazione;
3. l'evidenza che la calibrazione è un processo con molte soluzioni, per limitare le quali è opportuno aumentare il numero e la tipologia di monitoraggi da un lato, dall'altro utilizzare procedure di validazione su periodi di monitoraggio diversi da quelli usati per la calibrazione.

c) I risultati ottenuti dall'UO6 ai punti a, b1 e b2 sono confluiti all'interno delle Linee guida per l'utilizzo della simulazione dinamica degli edifici per la riqualificazione in ottica nZEB, che delineano le diverse fasi della modellazione (raccolta dati di ingresso e di confronto, sviluppo del modello iniziale, metodi di calibrazione, uso del modello). L'indice delle Linee Guida è riportato in Figura 11.

Linee guida per l'utilizzo della simulazione dinamica degli edifici per la riqualificazione energetica in ottica nZEB

Capitolo 1 – Introduzione

- 1.1. La sfida della riqualificazione energetica del costruito in ottica nZEB
- 1.2. Lo strumento della simulazione energetica dinamica per la valutazione degli interventi
- 1.3. Il tema della calibrazione dei modelli di simulazione dell'esistente

Capitolo 2 – Raccolta dati di ingresso al modello

- 2.1. Dati meteorologici
- 2.2. Caratteristiche termofisiche dell'involucro edilizio
- 2.3. Caratteristiche dei sistemi impiantistici
- 2.4. Modalità d'uso dell'edificio da parte degli occupanti
- 2.5. Individuazione delle incertezze

Capitolo 3 – Raccolta dati di confronto

- 3.1. Consumi relativi alle utenze energetiche
- 3.2. Dati di monitoraggio
 - 3.2.1. Tipologie di sensori e modalità di installazione
 - 3.2.2. Considerazioni sui periodi di monitoraggio

Capitolo 4 – Costruzione del modello di simulazione iniziale

- 4.1. Creazione delle zone termiche
- 4.2. Considerazioni sui modelli di simulazione della conduzione attraverso le pareti
- 4.3. Creazione dei profili di occupazione e di utilizzo
- 4.4. Modellazione della ventilazione naturale

Capitolo 5 – Calibrazione e utilizzo del modello

- 5.1. Protocolli di calibrazione
- 5.2. Metriche di confronto tra risultati della simulazione e risultati delle misure
- 5.3. Metodi di calibrazione
- 5.4. Analisi di sensitività
- 5.5. Individuazione del modello calibrato
- 5.6. Considerazioni sull'uso del modello calibrato per simulare interventi di riqualificazione

Capitolo 6 – Casi studio di calibrazione

- 6.1. Edificio monofamiliare
- 6.2. Condominio residenziale

Bibliografia

Figura 11. Indice delle Linee guida per l'utilizzo della simulazione dinamica degli edifici per la riqualificazione in ottica nZEB