

Ricerca di Sistema elettrico



Sviluppo del tool e di strumenti di supporto agli interventi di efficientamento energetico di edifici residenziali oggetto di riqualificazione (LA2.16)

F. Cumo, E. Pennacchia, C. Zylka

CENTRO DI RICERCA
INTERDISCIPLINARE TERRITORIO
EDILIZIA RESTAURO AMBIENTE CITERA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

SVILUPPO DEL TOOL E DI STRUMENTI DI SUPPORTO AGLI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DI EDIFICI RESIDENZIALI OGGETTO DI RIQUALIFICAZIONE (LA2.16)

F. Cumo (CITERA), E. Pennacchia (CITERA), C. Zylka (DIAEE)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: 2.16

Responsabile del Progetto: Giovanni, Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Giovanni, Puglisi, ENEA

Responsabile Linea di Attività: UNIRM1_CITERA

Mese inizio previsto: Luglio 2023

Mese inizio effettivo: Luglio 2023

Mese fine previsto: Dicembre 2024

Mese fine effettivo: Dicembre 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo del tool e di strumenti di supporto agli interventi di efficientamento energetico di edifici residenziali oggetto di riqualificazione".

Responsabile scientifico ENEA: Carlo Romeo

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Elisa Pennacchia

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	9
6	Sintesi delle attività svolte	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Descrizione del tool	13
7.2	Fabbisogno di energia utile per riscaldamento e raffrescamento.....	13
7.2.1	Bilancio energetico	13
7.2.2	Scambio termico per trasmissione	15
7.2.3	Scambio termico per ventilazione.....	17
7.2.4	Apporti interni.....	17
7.2.5	Apporti solari da componenti trasparenti.....	17
7.3	Fabbisogno di energia utile per la preparazione di acqua calda sanitaria.....	17
7.4	Impianti di riscaldamento, raffrescamento e preparazione acqua calda sanitaria - Calcolo dei rendimenti.....	18
7.5	Impianti solari termici e fotovoltaici	18
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	19
9	Pubblicazioni scientifiche.....	20
10	Eventi di disseminazione	21

Indice delle figure

Figura 1 - Schema metodologico	12
Figura 2 - Esempio di trasformazioni psicrometriche invernali ed estive realizzabili.....	15
Figura 3 - Schema esplicito alle differenze finite utilizzato per la risoluzione dello scambio termico dinamico delle pareti. Sull'asse delle ascisse sono presenti gli spessori e sulle ordinate i tempi.....	16
Figura 4 - Schema elettrico equivalente alla modellazione termica della parete. R_{we} e R_{wi} rappresentano rispettivamente le resistenze termiche [W/m^2K] della porzione interna ed esterna della parete. Ct_w rappresenta la capacità termica della parte interna della parete [J/kgK]. T_e e T_i rappresentano rispettivamente le temperature dell'ambiente esterno ed interno [$^{\circ}C$].....	16

1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente

- sviluppo del Tool "*BEST - Building Energy Saving Tool*" per supportare il progettista nella scelta della soluzione precalcolata più efficace per l'incremento dell'efficienza energetica delle più diffuse tipologie di chiusura orizzontale superiore attraverso la valutazione dell'esito dell'adozione delle soluzioni individuate in termini di convenienza tecnica/economica a valle degli scenari simulati.

2 Risultati ottenuti

Tool *BEST* in grado di:

- creare un modello energetico dell'edificio oggetto di interventi di riqualificazione nella situazione ante operam grazie all'abaco delle chiusure verticali e orizzontali esistenti che contraddistinguono il patrimonio edilizio residenziale nazionale definito nella precedente linea di attività 2.15 "Studio stato dell'arte di soluzioni prefabbricate per sistemi di copertura e creazione catalogo best practices" e nel triennio 2019-2021 nell'ambito del Progetto 1.6 "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali", del Work package 2 "Miglioramento dell'efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito" e della Linea di attività "Stato dell'arte di soluzioni tecnologiche di involucro edilizio esistenti come base per interventi di Deep Renovation del patrimonio immobiliare nel settore abitativo";
- valutare la prestazione energetica dell'edificio reale allo stato attuale attraverso indicatori sintetici;
- guidare la scelta attraverso l'utilizzo di database di soluzioni ottimizzate individuate nelle precedenti Linee di Attività riguardanti le chiusure verticali - pareti perimetrali (LA 2.5 LA. 2.6 WP2 PTR 2019-2021) e le chiusure orizzontali - coperture (LA 2.15 WP2 PTR 2022-2024);
- costruire un modello dell'edificio post operam;
- valutare l'esito dell'adozione delle soluzioni individuate in termini di convenienza tecnica/economica a valle degli scenari simulati;
- creare una "graduatoria" di priorità di azione di riqualificazione energetica confrontando diverse soluzioni tra loro.

Il risultato descritto consente di ottenere significativi benefici per il sistema elettrico nazionale e per gli utenti, tra cui:

- *Riduzione dei consumi energetici* attraverso il supporto fornito per l'ottimizzazione degli interventi di riqualificazione energetica degli edifici residenziali nazionali. Tale riduzione si traduce in una diminuzione della domanda energetica a livello nazionale, contribuendo al miglioramento complessivo dell'efficienza del sistema elettrico;
- *Miglioramento della stabilità del sistema* tramite l'implementazione diffusa di interventi di riqualificazione energetica incide positivamente sulla stabilità del sistema elettrico nazionale, mitigando i picchi di domanda energetica e promuovendo un utilizzo più razionale e sostenibile delle risorse disponibili;
- *Benefici economici per gli utenti* valutabili attraverso l'analisi della convenienza tecnico-economica degli interventi proposta dal tool garantisce l'identificazione di soluzioni mirate e ottimizzate, in grado di massimizzare il rapporto costo-beneficio. Ciò determina una riduzione significativa dei costi energetici a carico dei cittadini e delle famiglie, migliorando la sostenibilità economica degli interventi.
- *Promozione della sostenibilità ambientale* tramite interventi di riqualificazione energetica, implementati su vasta scala, che contribuiscono alla riduzione delle emissioni di CO₂, favorendo il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità stabiliti a livello europeo e nazionale. Questo approccio produce ricadute positive sia sull'ambiente che sulla qualità della vita delle comunità.

- *Supporto alla diffusione di tecnologie innovative* grazie alla promozione di soluzioni tecnologiche prefabbricate e ottimizzate che promuove la crescita del mercato delle tecnologie avanzate e sostenibili. Tale dinamica stimola l'innovazione nel settore delle costruzioni e rafforza la competitività delle imprese coinvolte.
- *Strumento di pianificazione strategica per le istituzioni*, in quanto offre la possibilità di generare graduatorie di priorità degli interventi costituendo un valido strumento per la pianificazione energetica e urbanistica a livello territoriale. Questo consente alle istituzioni di programmare azioni mirate, garantendo un'allocazione efficiente delle risorse e un impatto positivo sulla gestione del patrimonio edilizio.

3 Prodotti attesi

Tool BEST finalizzato a guidare il progettista nell'individuazione della casistica che meglio corrisponda alla situazione reale dell'immobile da riqualificare, in base alla classe di epoca di costruzione, alla tipologia edilizia e costruttiva, alla zona climatica e nella selezione delle soluzioni tecnologiche più efficaci (standardizzate, energeticamente efficienti e sostenibili) in grado di garantire il rispetto dei requisiti prestazionali previsti dalla normativa vigente in regime invernale seguendo le indicazioni dell'edilizia Off-Site. Il tool è stato implementato e reso accessibile da parte degli utenti all'interno della linea di attività 2.14, a cura dell'Università di Messina, attraverso il portale accessibile al seguente sito www.ambientecostruito.enea.it

4 Prodotti sviluppati

Tool a supporto del progettista per la selezione della soluzione precalcolata più efficiente ai fini dell'incremento dell'efficienza energetica delle tipologie più comuni di chiusure orizzontali superiori. Tale strumento consente di valutare l'impatto delle soluzioni individuate, analizzandone la convenienza tecnica ed economica sulla base dei risultati derivanti dagli scenari simulati. Il tool è stato finalizzato su un motore di calcolo funzionante tramite Excel contenente all'interno delle macro in visual basic, che attinge ai dati di output della matrice dinamica relativi alle soluzioni di efficientamento precalcolate.

L'accesso al tool da parte degli utenti avviene tramite il sito www.ambientecostruito.enea.it.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si sono verificati scostamenti tecnici/economici rispetto al preventivo

6 Sintesi delle attività svolte

È stato sviluppato un tool, denominato BEST, basato su un motore di calcolo funzionante tramite Excel contenente all'interno delle macro in visual basic, che attinge ai dati di output della matrice dinamica (718 configurazioni) relativi alle soluzioni di efficientamento precalcolate. I parametri di calcolo sono desunti dalla normativa vigente in materia di efficientamento energetico.

Lo strumento proposto potrà guidare il progettista per individuare la casistica che meglio corrisponda alla situazione reale dell'immobile da riqualificare, in base alla classe di epoca di costruzione, alla tipologia edilizia e costruttiva, alla zona climatica.

Attraverso il tool è possibile simulare diversi interventi di riqualificazione energetica confrontando soluzioni alternative. Esso consente di valutare l'esito dell'adozione delle soluzioni individuate in termini di convenienza tecnica/economica a valle degli scenari simulati.

7 Dettaglio delle attività svolte

L'obiettivo di tutta l'attività di ricerca riguarda il miglioramento dell'efficienza energetica del patrimonio edilizio residenziale nazionale finalizzato a realizzare edifici ad alta efficienza per la transizione energetica prevista dalla normativa vigente. La ricerca è finalizzata alla definizione di un tool che guiderà i progettisti nell'individuazione delle soluzioni più adeguate di riqualificazione delle chiusure orizzontali e verticali, in funzione dell'epoca di costruzione, della tipologia edilizia e costruttiva, e della zona climatica dell'immobile. Gli esiti delle attività precedenti hanno costituito il core per lo sviluppo di uno strumento di supporto agli interventi di efficienza energetica degli edifici residenziali in caso di ristrutturazione.

Il tool BEST, basato su un motore di calcolo in Excel con macro in Visual Basic, integra i dati delle soluzioni precalcolate tramite una matrice dinamica contraddistinta da 718 configurazioni, seguendo i parametri definiti dalla normativa vigente.

Basandosi su un database di soluzioni ottimizzate, il sistema consente di selezionare tecnologie standardizzate, efficienti e sostenibili, in grado di soddisfare i requisiti prestazionali stabiliti dalla normativa vigente per l'edilizia invernale, con riferimento alle pratiche Off-Site.

Lo strumento offre una pre-analisi energetica che permette di valutare l'impatto di interventi di riqualificazione sull'involucro edilizio opaco, fornendo indicazioni su risparmi energetici ed economici. Attraverso simulazioni prestazionali, il tecnico professionista potrà pertanto confrontare diverse soluzioni ottimizzate, supportato da una matrice dinamica che combina criteri legati all'involucro edilizio esistente e alla normativa. Il calcolo includerà fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, considerando sia l'involucro sia le tipologie impiantistiche più diffuse.

Un elemento distintivo del tool è la capacità di selezionare le chiusure verticali e orizzontali superiori in base a criteri specifici, riducendo la complessità legata alla descrizione delle stratigrafie. Le soluzioni di efficientamento proposte, specifiche per ogni casistica, permettono di calcolare risparmi economici, valore attuale netto (VAN). L'utente potrà inoltre scaricare schede dettagliate con stratigrafie, risultati delle simulazioni, verifiche termogrammetriche e indicatori di sostenibilità.

Il tool consente di:

- 1 creare un modello energetico ante operam dell'edificio;
- 2 valutare le prestazioni energetiche attuali tramite indicatori sintetici;
- 3 selezionare soluzioni di riqualificazione ottimizzate basate su dati consolidati;
- 4 costruire un modello post operam e analizzare i benefici economici e tecnici;
- 5 confrontare diverse soluzioni per definire priorità di intervento.

L'approccio metodologico che ha guidato la presente linea di attività si è basato sulla definizione di uno schema di flusso che ha permesso di individuare i dati di input minimi fondamentali per guidare il progettista nell'individuazione della casistica che meglio corrisponda alla situazione reale dell'immobile da riqualificare, in base alla classe di epoca di costruzione, alla tipologia edilizia e costruttiva, alla zona climatica. In Figura 1 si riporta lo schema metodologico con i principali step seguiti per lo sviluppo del tool. In grigio sono

indicate le attività e i risultati della L.A. 2.15 fondamentali per elaborare un database di soluzioni ottimizzate precalcolate.

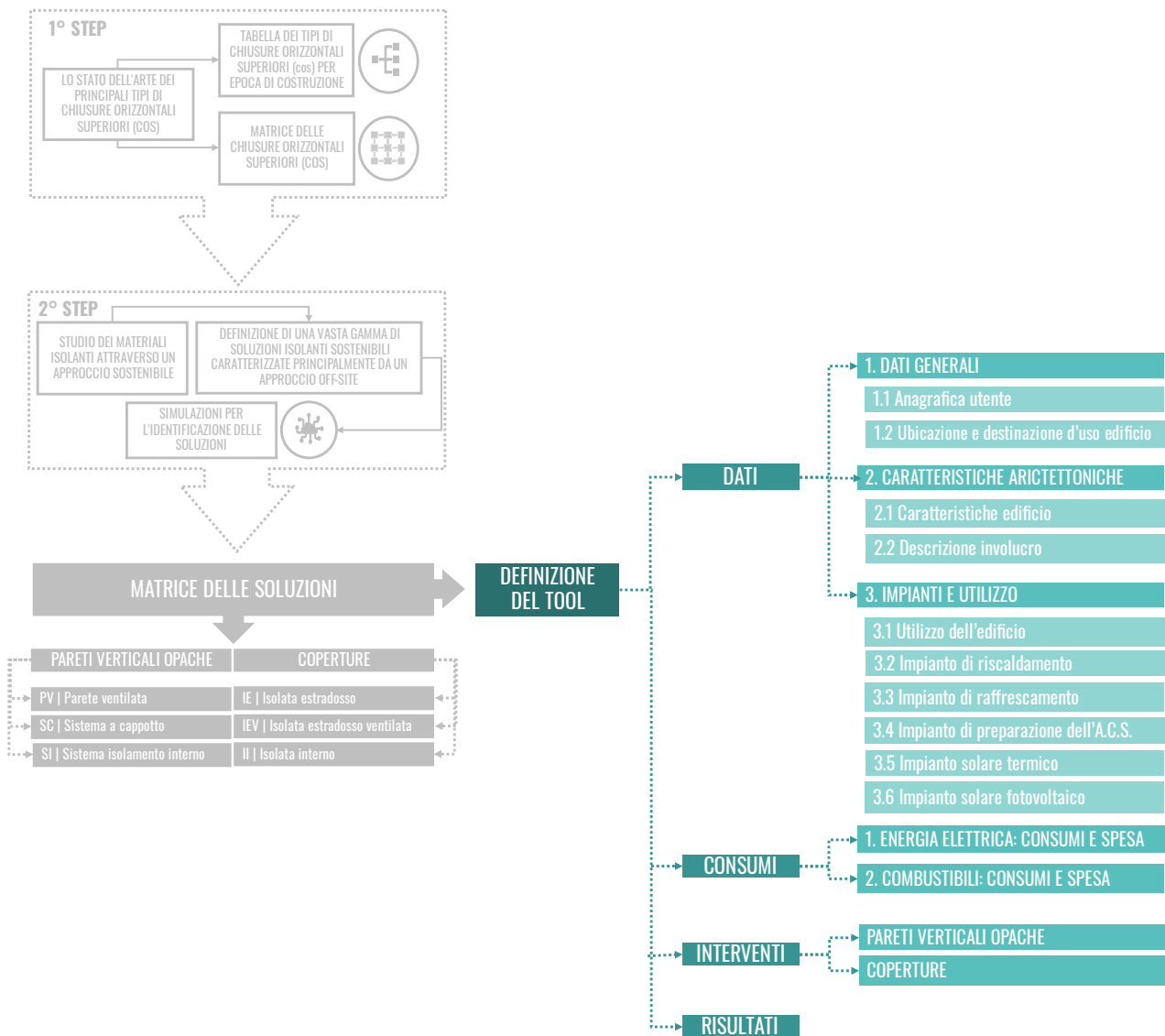


Figura 1 – Schema metodologico

La prima attività condotta ha riguardato lo sviluppo di un database contenente i dati tecnici relativi alle pareti perimetrali verticali e alle coperture maggiormente diffuse a livello nazionale, classificate in base all'epoca di costruzione e rappresentative di diverse tipologie costruttive.

Per entrambi gli elementi di chiusura sono stati riportati i parametri prestazionali dello stato di fatto e quelli ottenibili con l'applicazione delle soluzioni individuate, sulla medesima tipologia di copertura e parete perimetrale verticale su cui sono applicabili.

Le soluzioni proposte mirano a ridurre il fabbisogno energetico degli edifici esistenti, con particolare attenzione ai consumi energetici associati alla climatizzazione invernale ed estiva. I dati riportati sono stati estratti dalle schede prestazionali sviluppate nell'ambito della precedente linea di ricerca 2.15, denominata "Studio dello stato dell'arte di soluzioni prefabbricate per sistemi di copertura e creazione di un catalogo delle best practices", e durante il triennio 2019-2021, nell'ambito del Progetto 1.6 "Efficienza energetica dei prodotti e

dei processi industriali”, inserito nel Work Package 2, “Miglioramento dell’efficienza energetica nei processi di produzione e nella gestione dell’ambiente costruito”.

Il database contiene:

- 30 tipologie di pareti perimetrali verticali e 30 coperture che contraddistinguono il patrimonio edilizio residenziale nazionale;
- I risultati delle 150 simulazioni condotte sulle pareti perimetrali verticali relativi a 2 soluzioni di isolamento a cappotto, 1 ventilata e 2 applicabili sulla superficie interna;
- I risultati di 539 simulazioni svolte sulle coperture relative a soluzioni per lo più prefabbricate, di cui 13 applicabili all’estradosso non ventilate, 4 ventilate e 4 applicabili all’intradosso.

7.1 Descrizione del tool

La successiva attività ha riguardato lo sviluppo del vero e proprio strumento di simulazione, concepito per essere applicato nell’ambito della valutazione di interventi volti all’efficientamento energetico di edifici a destinazione d’uso residenziale, classificati come segue:

- **E.1(1)** - abitazioni residenziali con occupazione continuativa (quali abitazioni, collegi, conventi, case di pena, caserme);
- **E.1(2)** - abitazioni residenziali con occupazione saltuaria (ad esempio case vacanza e strutture analoghe).

Lo strumento di calcolo è pensato per coniugare la semplicità dei metodi statici con l’accuratezza delle simulazioni dinamiche, con una serie di funzionalità aggiuntive in grado di valutare l’entità degli investimenti ed il relativo ritorno economico, anche alla luce dei regimi di incentivazione vigenti in Italia.

Per questo motivo, si è scelto di simulare la prestazione dell’edificio con un metodo dinamico semplificato (una singola zona termica) che consente di stimare i consumi annui dell’edificio, sia dal punto di vista elettrico che termico.

7.2 Fabbisogno di energia utile per riscaldamento e raffrescamento

7.2.1 Bilancio energetico

Si procede a descrivere l’algoritmo di calcolo del bilancio termico utilizzato nell’implementazione del foglio di calcolo oggetto del presente lavoro che risulta essere maggiormente dettagliato rispetto a quello delle norme UNI TS 11300.

L’elaborazione di un metodo dettagliato scaturisce principalmente da due limitazioni della norma UNI TS 11300:

- l’impossibilità di valutare in modo adeguato un utilizzo intermittente dell’impianto di riscaldamento;
- l’ipotesi che la temperatura esterna sia sempre costante e pari alla temperatura media nell’arco delle 24 ore.

L’impostazione dinamica prevede la stesura di un bilancio energetico su un intervallo di tempo massimo pari ad un’ora, che la procedura provvede a ridurre automaticamente (logica *multirate*) in base alla velocità di variazione delle temperature, al fine di densificare i calcoli nei periodi di maggiore variazione e risparmiare tempo nei periodi in cui le temperature restano pressoché costanti.

È possibile scegliere il numero massimo di time-step orari, che determina quindi il periodo minimo del bilancio termico. Il bilancio comprende i diversi scambi termici che interessano l'edificio: trasmissione, ventilazione, apporti interni e apporti solari. Gli scambi sono suddivisi tra "sensibili" e "latenti" in quanto viene effettuato un calcolo puntuale delle trasformazioni psicrometriche.

Sia per la stagione invernale che per quella estiva i bilanci assumono la forma seguente:

$$Q_{bil,sens} = Q_{tr+sol,o} + Q_{ve,sens} + Q_{int,sens} + Q_{sol,t} + Q_{core} + Q_{restart} \quad (7.1)$$

$$Q_{bil,lat} = Q_{ve,lat} + Q_{int,lat} \quad (7.2)$$

Nella stagione invernale, se i bilanci delle equazioni (7.1) e (7.2) risultano positivi, significa che il calore entrante supera quello uscente ed il carico termico risulta nullo. In caso contrario è presente un carico termico da soddisfare attraverso gli impianti.

La procedura simula ogni sistema di emissione come un sistema ad aria, con opportuni valori delle portate d'aria di ricircolo e di prelievo dall'esterno.

I valori variano in base al tipo di emissione, alle temperature del fluido termovettore, alla quota di ricircolo, alla presenza di recuperatori di calore, al tipo di ventilatori presenti, ecc.

Per ogni time-step, a seconda del sistema di emissione presente, attraverso la procedura si determina il punto di immissione necessario per soddisfare le richieste termiche determinate dalle equazioni (7.1) e (7.2).

Se il sistema non è in grado di controllare l'umidità relativa (es. radiatori, ventilconvettori, pavimento radiante, ecc.), il punto di immissione prevedrà la sola compensazione della componente sensibile, in caso contrario considererà anche la correzione dell'umidità, sia in umidificazione che in deumidificazione.

Una volta determinato il punto di immissione, la procedura costruisce la reale trasformazione psicrometrica che viene realizzata dai sistemi impiantistici, in base ai parametri ambientali e ai parametri specifici delle macchine presenti. Viene poi ricavata l'energia termica e frigorifera necessaria alla trasformazione che costituisce il carico termico netto invernale $Q_{H,nd}$ o estivo $Q_{C,nd}$.

Le trasformazioni psicrometriche realizzate sono simili a quelle riportate in Figura 2.

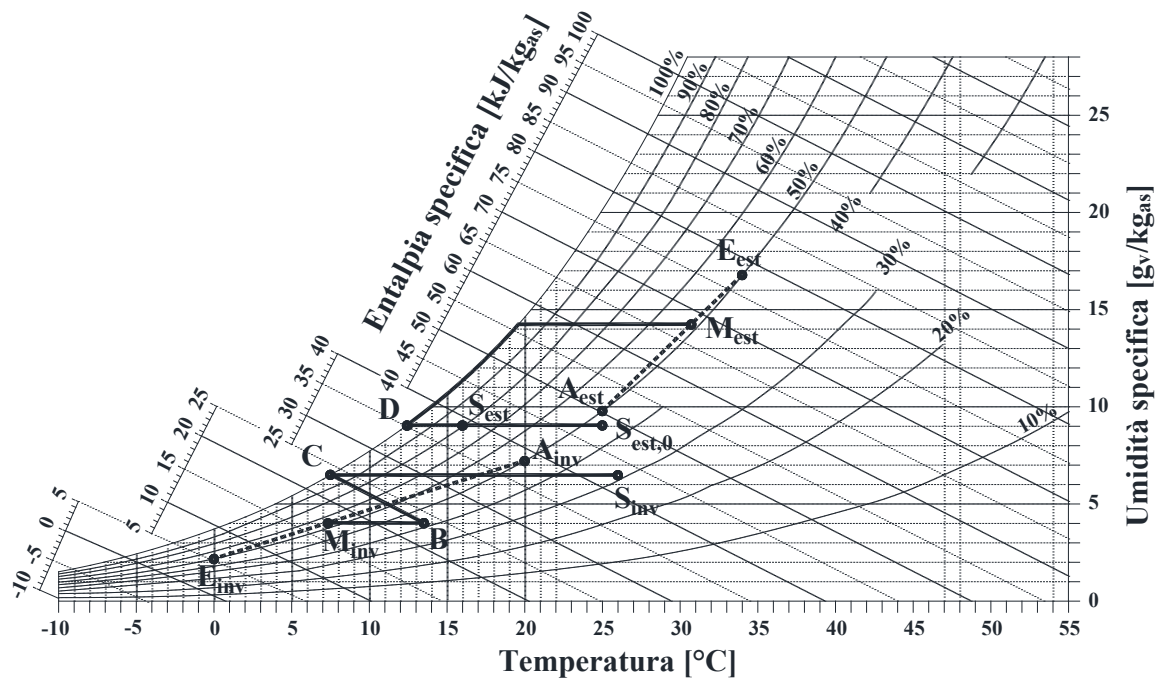


Figura 2 – Esempio di trasformazioni psicrometriche invernali ed estive realizzabili.

L'impostazione appena descritta considera in modo nativo e naturale eventuali variazioni orarie dei parametri ambientali, così come gli effetti dell'inerzia termica delle strutture e non necessita quindi di un metodo per approssimare tali effetti, come l'utilizzo del fattore di utilizzazione degli apporti termici.

7.2.2 Scambio termico per trasmissione

Lo scambio termico per trasmissione si compone dello scambio termico verso l'aria esterna, verso il terreno e verso spazi non climatizzati. Fanno parte dello scambio per trasmissione anche l'extra-flusso dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste e l'apporto termico solare entrante per trasmissione dai componenti opachi.

Il metodo si fonda direttamente sulla risoluzione numerica dell'equazione generale dello scambio termico tramite schemi alle differenze finite.

L'equazione di Fourier si presenta come un'equazione differenziale del secondo ordine:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (7.3)$$

dove:

- $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ = diffusività termica [m^2/s] = rapporto tra la conducibilità λ del materiale [W/mK] e il prodotto tra la densità ρ [kg/m^3] ed il calore specifico c_p [J/kgK].

La risoluzione analitica dell'equazione è complessa e mal si adatta ad una procedura informatica. Per questo motivo il problema dello scambio termico dinamico attraverso una parete viene normalmente risolto con metodi numerici. Il metodo alle differenze finite, talvolta

chiamato "Heat Balance" (HB) o "Conduction Finite Difference" (CondFD) method è il più aderente alla realtà tra i possibili metodi risolutivi esistenti. Non presenta le problematiche dei metodi a funzione di trasferimento "Conduction Transfer Function Method" (CTF o TFM) e tantomeno al metodo di quelli a risposta impulsiva "Radiant Time Series" (RTS) legate ai componenti con grande massa per i quali tali metodi presentano inaccurately e instabilità. Il CondFM è anche il più flessibile e si adatta a simulare anche materiali speciali come quelli a cambiamento di fase (PCM), sebbene non siano ancora presenti nell'attuale versione della procedura. Per la risoluzione è stato scelto uno schema alle differenze finite in avanti di tipo esplicito, schematizzabile come in Figura 3.

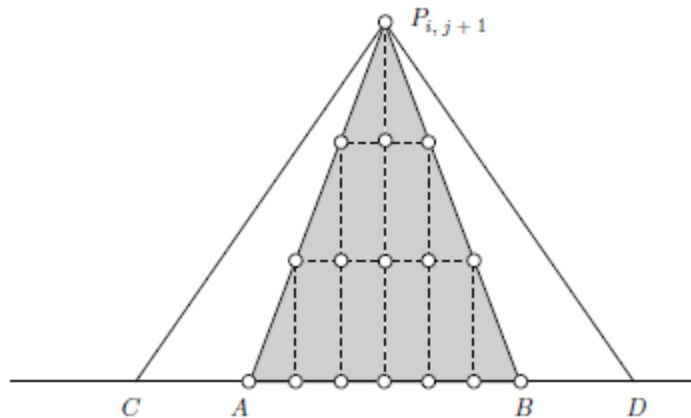


Figura 3 - Schema esplicito alle differenze finite utilizzato per la risoluzione dello scambio termico dinamico delle pareti. Sull'asse delle ascisse sono presenti gli spessori e sulle ordinate i tempi.

La discretizzazione spaziale della parete è stata effettuata in modo semplificato, suddividendola in tre parti non uguali. Due zone superficiali di spessore molto ridotto (circa il 3% ciascuno della capacità della parete), la cui capacità termica è stata accorpata rispettivamente a quella dello spazio interno ed esterno, ed una zona interna che contiene in resto della capacità termica. Le zone superficiali sono state introdotte per modellare correttamente l'effetto inerziale degli strati superficiali delle pareti, che partecipano attivamente alla stabilizzazione della temperatura degli ambienti interni. Ogni parete ha una temperatura interna associata alla capacità termica interna. Tale discretizzazione è rappresentabile anche graficamente sotto forma di circuito elettrico equivalente (Figura 4).

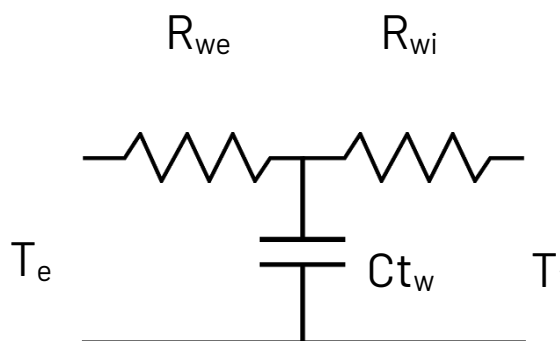


Figura 4 - Schema elettrico equivalente alla modellazione termica della parete. R_{we} e R_{wi} rappresentano rispettivamente le resistenze termiche $[W/m^2K]$ della porzione interna ed esterna della parete. Ct_w rappresenta la capacità termica della parte interna della parete $[J/kgK]$. T_e e T_i rappresentano rispettivamente le temperature dell'ambiente esterno ed interno $[^\circ C]$.

Particolare attenzione è dedicata ad evitare che il time-step sia sempre sufficientemente inferiore alla costante di tempo termica della parete $\tau = R \cdot Ct_s [s]$ per evitare instabilità del metodo di calcolo e temperature irrealistiche. Per quanto riguarda lo scambio termico verso il

terreno, si è adottata una metodologia del tutto simile a quanto appena illustrato, con alcune piccole modifiche.

7.2.3 Scambio termico per ventilazione

Lo scambio termico per ventilazione viene modellato sempre su base mensile e si compone dello scambio termico verso l'aria esterna e verso spazi non climatizzati.

La metodologia di calcolo prevede il calcolo esatto delle trasformazioni psicrometriche e della relativa energia. Per ventilazione naturale o meccanica senza trattamenti, lo scambio termico viene calcolato ad ogni intervallo di tempo in base alle temperature e alle portate effettive.

7.2.4 Apporti interni

L'approccio dettagliato prevede il calcolo puntuale dei singoli apporti di calore sensibile e latente sia degli occupanti che di tutte le apparecchiature elettriche e a combustione presenti.

Gli apporti interni vengono inseriti istante per istante nel bilancio energetico dinamico dell'edificio sotto forma di flussi termici direttamente iniettati nell'aria interna.

7.2.5 Apporti solari da componenti trasparenti

L'apporto solare viene normalmente suddiviso in base al componente su cui incide l'irraggiamento.

Se incide su componenti opachi, come pareti o solai, esso viene in parte assorbito dalla parete ed entra a far parte del bilancio termico della parete, sotto forma di flusso termico iniettato in corrispondenza della superficie della parete. L'irraggiamento opaco entra dunque in ambiente sotto forma conduttiva attraversando le pareti opache.

Se incide su componenti trasparenti, come le vetrate, esso viene in buona parte trasmesso all'interno ed assorbito dalle pareti interne e dall'arredamento. Questa seconda modalità è chiaramente più diretta, produce maggiori carichi e presenta tempi di propagazione molto contenuti. L'approccio dettagliato calcola i flussi di origine solare $\Phi_{sol,op,mn,k}$ e $\Phi_{sol,w,k}$ in modalità simile al calcolo normativo, con alcune differenze (soprattutto per l'apporto opaco) e salvo il fatto che vengono calcolati con intervallo orario anziché mensile.

L'apporto solare opaco del metodo dettagliato non può essere espresso direttamente con una formula in quanto entra a far parte del bilancio termico dinamico della parete opaca sotto forma di un flusso termico che viene iniettato nello strato superficiale della parete, tra la resistenza superficiale esterna e la resistenza della porzione esterna della parete. L'apporto solare trasparente viene calcolato invece con modalità del tutto simile a quella normativa, non essendo soggetto ad accumulo da parte delle strutture (l'accumulo interno viene trascurato).

7.3 Fabbisogno di energia utile per la preparazione di acqua calda sanitaria

Il fabbisogno di energia legato al consumo di acqua calda sanitaria viene calcolato in modalità del tutto conforme alla norma UNI TS 11300-2 (par. 7).

7.4 Impianti di riscaldamento, raffrescamento e preparazione acqua calda sanitaria – Calcolo dei rendimenti

Una volta determinato il fabbisogno energetico netto dell'edificio deve essere valutato il rendimento degli impianti, per valutare il consumo energetico effettivo dell'edificio e la conseguente spesa energetica.

La modellazione degli impianti è realizzata conformemente a quanto specificato nelle norme UNI TS 11300 -2, -3, -4, cercando di coprire il più ampio spettro di configurazioni impiantistiche sia per quanto riguarda le tecnologie utilizzate, sia per quanto riguarda le tecniche di regolazione.

7.5 Impianti solari termici e fotovoltaici

Il comportamento degli impianti solari termici o fotovoltaici è simulato attraverso una procedura derivata in gran parte dalla norma tecnica UNI TS 11300-4.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state impiegate consulenze

9 Pubblicazioni scientifiche

Pennacchia, E.; Romeo, C.; Zylka, C. Towards High-Efficiency Buildings for Sustainable Energy Transition: Standardized Prefabricated Solutions for Roof Retrofitting. *Sustainability* **2024**, *16*, 3850. <https://doi.org/10.3390/su16093850>

Cumo, F.; Cecconi, M.; Pennacchia, E.; Romeo, C.; Zylka, C. BEST – Building Energy Saving Tool for Sustainable Residential Buildings, *Applied sciences* **2025** (abstract accettato)

10 Eventi di disseminazione

Non sono stati svolti eventi di disseminazione