



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Indagine bibliografica riguardante le diverse metodologie per la valutazione del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento degli edifici

G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, G.F. Giuzio, A. Palombo

Report RdS/PTR2019/036

INDAGINE BIBLIOGRAFICA RIGUARDANTE LE DIVERSE METODOLOGIE PER LA VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO DEGLI EDIFICI

G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, G.F. Giuzio, A. Palombo (Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Ingegneria Industriale)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *1 - Edifici ad alta efficienza energetica*

Linea di attività: *LA1.12 - Indagine bibliografica riguardante le diverse metodologie per la valutazione del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento degli edifici*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Confronto delle nuove metodologie di calcolo rispetto a quelle previste dalle normative attuali (UNI TS 11300)"*

Responsabile scientifico ENEA: Domenico Palladino

Responsabile scientifico Università degli Studi di Napoli Federico II – Dipartimento di Ingegneria Industriale: Annamaria Buonomano

Indice

SOMMARIO.....	7
1 STRUMENTI PER LA SIMULAZIONE DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI (BEPS).....	9
1.1 LE METODOLOGIE PER IL CALCOLO DEI FABBISOGNI DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO DEGLI EDIFICI	10
1.2 CLASSIFICAZIONE DEI MODELLI	10
1.3 PRINCIPALI TECNICHE DI MODELLAZIONE	12
1.4 DATI DI INGRESSO E RISULTATI OTTENIBILI.....	14
2 LA UNI/TS 11300-1 PER IL CALCOLO MENSILE DEL FABBISOGNO ENERGETICO DEGLI EDIFICI	17
2.1 METODOLOGIA DI CALCOLO.....	17
2.2 APPORTI TERMICI SOLARI	18
2.3 APPORTI TERMICI INTERNI	19
2.4 ZONIZZAZIONE ED ACCOPPIAMENTO TRA ZONE	19
2.5 ZONE ADIACENTI NON CLIMATIZZATE	20
2.6 VENTILAZIONE	20
2.7 UMIDIFICAZIONE E DEUMIDIFICAZIONE	21
2.8 PARAMETRI DINAMICI	21
3 LA UNI EN ISO 52016-1 PER IL CALCOLO ORARIO DEL FABBISOGNO ENERGETICO DEGLI EDIFICI	23
3.1 METODOLOGIA DI CALCOLO.....	23
3.2 APPORTI TERMICI SOLARI	25
3.3 APPORTI TERMICI INTERNI	26
3.4 ZONIZZAZIONE ED ACCOPPIAMENTO TRA ZONE	27
3.5 ZONE ADIACENTI NON CLIMATIZZATE	28
3.6 VENTILAZIONE	28
3.7 UMIDIFICAZIONE E DEUMIDIFICAZIONE	29
4 STRUMENTI PER IL CALCOLO DINAMICO DEL FABBISOGNO ENERGETICO DEGLI EDIFICI	30
4.1 SOFTWARE DISPONIBILI IN COMMERCIO	30
4.2 CODICI DI SIMULAZIONE SVILUPPATI IN-HOUSE	32
4.2.1 <i>Modelli a parametri concentrati</i>	33
4.2.2 <i>Modelli a parametri distribuiti</i>	36
5 SOFTWARE DI CALCOLO PER LA PRESTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI CERTIFICATI DAL COMITATO TERMOTECNICO ITALIANO (CTI)	40
5.1 CONFRONTO TRA LA UNI/TS 11300-1 E LA UNI EN ISO 52016-1	40
5.1.1 <i>Metodologia di calcolo</i>	40
5.1.2 <i>Apporti termici solari</i>	41
5.1.3 <i>Apporti termici interni</i>	41
5.1.4 <i>Zonizzazione ed accoppiamento tra zone</i>	41
5.1.5 <i>Zone adiacenti non climatizzate</i>	41
5.1.6 <i>Ventilazione</i>	42
5.1.7 <i>Umidificazione e deumidificazione</i>	42
5.1.8 <i>Parametri dinamici</i>	42
5.1.9 <i>Dati in ingresso e risultati prodotti</i>	43
5.2 CARATTERISTICHE DEI SOFTWARE CERTIFICATI CTI	44
<i>Docet</i>	44
<i>EdilClima</i>	44
<i>EC700</i>	44
<i>Euclide</i>	44
<i>Certificazione</i>	44

<i>Energetica</i>	44
<i>MC 11300</i>	44
<i>MC4 Suite</i>	45
<i>Termolog</i>	45
<i>Termus</i>	45
6 CONFRONTO TRA LE METODOLOGIE DI CALCOLO DEI FABBISOGNI ENERGETICI DEGLI EDIFICI PER IL RISCALDAMENTO ED IL RAFFRESCAMENTO	47
6.1 UNI-TS 11300, UNI EN ISO 52016 E CODICI DI SIMULAZIONE DINAMICA	47
6.1.1 Confronti tra la UNI/TS 11300-1 ed i software di simulazione dinamica	49
6.1.2 Confronti tra la UNI EN ISO 52016-1 ed i software di simulazione dinamica	56
7 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI TRA I VALORI DEL FABBISOGNO DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO OTTENUTI CON LA UNI/TS 11300, LA EN ISO 52016, E SOFTWARE DI SIMULAZIONE DINAMICA	61
7.1 CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI ATTRAVERSO LE NORME UNI/TS 11300 E UNI EN ISO 52016 E QUELLI OTTENUTI CON ENERGYPLUS E TRNSYS	61
7.2 CONFRONTO TRA I RISULTATI OTTENUTI ATTRAVERSO LE NORME UNI/TS 11300 E EN ISO 52016 E QUELLI OTTENUTI CON IL SOFTWARE TRNSYS E IL CODICE IN-HOUSE DETECT	66
8 CONCLUSIONI	71
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	72

Elenco Figure

- Figura 1. Logica di funzionamento di modelli *law-driven* e *data-driven*
- Figura 2. Principali fenomeni fisici nella trasmissione del calore negli edifici
- Figura 3. Dati e parametri che influenzano la simulazione energetica
- Figura 4. esempio di rete termica per il generico elemento dell'involucro edilizio (ISO/TR 52016-2)
- Figura 5. Zona termica non climatizzata esterna (a); zona termica non climatizzata interna (b)
- Figura 6. Schema di una rete termica equivalente relativa ad una parete discretizzata in N nodi [40]
- Figura 7. Rete termica basata su due capacità termiche [61]
- Figura 8. Rete termica dello studio [62]
- Figura 9. Rete termica che caratterizza il modello proposto in [63]
- Figura 10. Rete termica modificata 8R2C [64]
- Figura 11. Nodi utilizzati per analizzare le pareti della zona termica dei lavori [58, 69]
- Figura 12. Schema della rete termica relativa ai lavori [40, 70, 71]
- Figura 13. Modelli 3D degli edifici analizzati in [72]
- Figura 14. Rappresentazione 3D dell'edificio esaminato in [73]
- Figura 15. Vista in pianta e rappresentazione 3D dell'edificio storico esaminato in [76]
- Figura 16. Modello 3D dell'edificio oggetto dell'analisi effettuata in [74]
- Figura 17. Settimana tipo in raffrescamento per la singola unità abitativa esaminata in [80]
- Figura 18. Edifici analizzati in [78]
- Figura 19. Edifici analizzati in [79]
- Figura 20. Confronto tra UNI/TS 11300-1 (mensile) e i software EnergyPlus ed Esp-r
- Figura 21. Confronto tra la EN ISO 52016-1 e TRNSYS
- Figura 22. Mappa delle zone climatiche italiane secondo Köppen-Geiger e distribuzione percentuale dei centri abitati italiani
- Figura 23. Caso studio residenziale (BESTEST)
- Figura 24. DETECT vs. UNI/TS 1300 & UNI EN ISO 52016 – risultati invernali
- Figura 25. DETECT vs. UNI/TS 1300 & UNI EN ISO 52016 – risultati estivi
- Figura 26. TRNSYS vs. UNI/TS 1300 & UNI EN ISO 52016 – risultati invernali
- Figura 27. TRNSYS vs. UNI/TS 1300 & UNI EN ISO 52016 – risultati estivi

Elenco Tabelle

- Tabella 1. Finalità, vantaggi e svantaggi dei metodi per la simulazione energetica degli edifici
- Tabella 2. Risultati richiesti dalle a valle della simulazione dinamica
- Tabella 3. Codici di simulazione dinamica (BEPS)
- Tabella 4. Principali software di calcolo
- Tabella 5. UNI/TS 11300-1 vs. UNI EN ISO 52016-1: dati climatici
- Tabella 6. UNI/TS 11300-1 vs. UNI EN ISO 52016-1: output del calcolo
- Tabella 7. Caratteristiche dei software certificati CTI per la certificazione energetica degli edifici
- Tabella 8. Casi studio e principali dati termo-fisici dei lavori analizzati
- Tabella 9. Parametri geometrici degli edifici esaminati in [72]
- Tabella 10. Parametri termofisici degli edifici esaminati in [72]
- Tabella 11. Fabbisogni termici in riscaldamento e raffrescamento per i diversi casi in esame [72]
- Tabella 12. Fabbisogni termici in riscaldamento esaminati in [73]
- Tabella 13. Fabbisogni termici in raffrescamento esaminati in [73]
- Tabella 14. Materiali costituenti l'edificio storico esaminato in [76]
- Tabella 15. Materiali costituenti il condominio esaminato in [76]
- Tabella 16. Materiali costituenti l'appartamento esaminato in [76]
- Tabella 17. Fabbisogni termici in riscaldamento e raffrescamento per i diversi casi esaminati in [76]
- Tabella 18. Proprietà fisiche e termofisiche delle tre pareti oggetto dell'analisi effettuata in [80]
- Tabella 19. Caratteristiche principali degli edifici analizzati in [78]
- Tabella 20. Dati di input degli edifici analizzati in [78]
- Tabella 21. Fabbisogni termici in riscaldamento e raffrescamento per clima continentale (Zagabria) [78]
- Tabella 22. Fabbisogni termici in raffrescamento per la zona climatica di Roma [79]
- Tabella 23. Scostamenti percentuali tra il metodo mensile e quello dinamico
- Tabella 24. Scostamenti percentuali inerenti alla valutazione del fabbisogno di energia termica in riscaldamento dei lavori trovati in letteratura, suddivisi per zona climatica e destinazione d'uso
- Tabella 25. Scostamenti percentuali inerenti alla valutazione del fabbisogno di energia termica in raffrescamento dei lavori trovati in letteratura, suddivisi per zona climatica e destinazione d'uso
- Tabella 26. Parametri termo-fisici dell'edificio del BESTEST
- Tabella 27. Parametri di utilizzo dell'edificio del BESTEST
- Tabella 28. Risultati delle simulazioni (Termolog, TRNSYS, DETECT)

Sommario

Il calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e raffrescamento degli edifici può oggi essere effettuato attraverso differenti approcci. A seconda del dettaglio che si desidera conferire all'analisi è possibile considerare: i) il metodo stazionario con calcolo su base mensile; ii) il metodo con valutazione dinamica oraria; iii) il metodo basato sul calcolo dinamico.

Il calcolo su base mensile delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto è attualmente basato sulle norme nazionali UNI TS 11300, che impongono un metodo di calcolo in regime stazionario su base mensile, di seguito denominato *metodo stazionario*. Tali norme sono attualmente il riferimento normativo per la redazione dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE), necessario al fine di orientare il settore edilizio e il relativo mercato verso l'efficienza energetica e la sostenibilità ambientale. Nello specifico, la UNI TS 11300-1 (Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale) definisce le modalità di applicazione in Italia della norma internazionale EN ISO 13790:2008 con riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento. Tale norma riguarda il calcolo in condizioni di progetto, la valutazione del fabbisogno energetico di edifici in condizioni standard (24/7) e in particolari condizioni d'esercizio (Tailored rating).

I metodi di calcolo basati sulle attuali norme UNI TS 11300 risultano utili per la redazione dell'APE, così come per la determinazione di alcuni indici utili per la progettazione del sistema. Si noti che tale approccio presenta alcuni limiti per quel che riguarda la progettazione e la diagnosi energetica degli edifici. Da questo punto di vista, recenti attività di ricerca nel campo della modellazione e simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici hanno supportato i successivi sviluppi normativi. Infatti, dall'approccio tradizionale semplificato (contenuto nelle UNI TS 11300) si passa oggi al metodo di calcolo dinamico orario, riportato nella nuova norma UNI EN ISO 52016-1:2018, e a cui di seguito ci si riferirà con la dicitura *metodo orario*. Dal 2018 è quindi possibile eseguire i calcoli secondo la procedura della EN ISO 52016, che sostituisce la EN ISO 13790.

La simulazione dinamica oraria delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto permette di: i) valutare l'effettivo impatto su quest'ultimo delle differenti sollecitazioni ed effetti fisici caratterizzati da dinamicità (carichi endogeni, radiazione solare, inerzia termica, etc.); ii) stimare i fabbisogni energetici per il riscaldamento e raffrescamento dell'edificio; iii) valutare il comfort termico degli occupanti. Tuttavia, nonostante il metodo di calcolo su base oraria della UNI EN ISO 52016 permetta di valutare in maniera più fedele le prestazioni energetiche degli edifici, nell'ambito della comunità scientifica internazionale, è possibile riscontrare l'utilizzo, oramai consolidato, di codici basati su modelli dinamici dettagliati per l'analisi delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto. Attraverso tali codici, basati su differenti approcci per la risoluzione del problema della conduzione del calore (funzioni di trasferimento, differenze finite), è possibile in generale ottenere risultati maggiormente affidabili e realistici rispetto a quelli dei precedenti metodi. Si ricorda che il vantaggio di adottare la simulazione dinamica rispetto a metodi più semplici risiede nella possibilità di simulare in modo più affidabile il contributo degli effetti fisici dipendenti dal tempo, come la massa termica dell'involucro edilizio (che influenza notevolmente la dinamica dei parametri e delle variabili termiche dello stesso), il comportamento degli impianti termici, etc..

L'adozione del metodo dinamico (orario e non) introduce alcuni interrogativi sull'effettiva utilità ed efficacia di tali approcci rispetto a quello tradizionale (stazionario mensile della UNI TS 11300-1) per la stima del fabbisogno di energia termica per riscaldamento e raffrescamento degli edifici. In particolare, è di primario interesse poter valutare i vantaggi e gli svantaggi dei modelli maggiormente complessi rispetto al metodo di calcolo stazionario semplificato al variare: i) della

modalità di funzionamento dell'impianto (riscaldamento o raffrescamento); ii) del relativo regime di funzionamento (intermittente o continuativo); ii) della zona climatica in cui sono ubicati gli edifici; della destinazione d'uso degli edifici (residenziale, commerciale, ospedaliera, etc.).

Da questo punto di vista, l'attività riportata in questo documento include lo sviluppo di un'indagine bibliografica necessaria al fine di caratterizzare i suddetti modelli fisico-matematici sui quali sono basate le metodologie di calcolo descritte. Nello specifico, partendo dalla descrizione della UNI TS 11300 si passa a quella della UNI EN ISO 52016, terminando con l'analisi dei metodi dinamici implementati nei codici di calcolo (per la simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici) sia di tipo commerciale che sviluppati per scopi di ricerca. Successivamente, attraverso l'analisi di alcuni casi studio riportati in letteratura, sono commentati e confrontati i risultati ottenuti attraverso le suddette metodologie evidenziandone i punti di forza e le criticità.

1 Strumenti per la simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici (BEPS)

Sebbene i risultati degli sforzi che in questi anni sono stati intrapresi per ridurre il riscaldamento globale siano ancora attualmente incerti, non vi è dubbio che prossimamente la progettazione degli edifici sarà fortemente condizionata dalle strategie messe a punto per ridurre le emissioni climalteranti. Entro il 2050 un'opportuna combinazione di tecnologie ed azioni politiche può o potrà ridurre le emissioni di gas serra ad un quarto dell'attuale livello [1], mentre a causa della prevista crescita della popolazione, senza azioni efficaci per migliorare l'efficienza energetica degli edifici, si prevede entro il 2050, un incremento della domanda globale d'energia di circa il 50%.

Per ridurre i consumi energetici degli edifici, la comunità scientifica e i governi di tutto il mondo compiono oggi un notevole sforzo nel definire politiche energetiche atte a promuovere: una migliore progettazione degli edifici; l'integrazione in questi ultimi delle fonti energetiche rinnovabili; e l'adozione di tecnologie atte a raggiungere l'obiettivo degli edifici ad energia quasi zero (NZEB [2], come richiamato dalla Direttiva Europea sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD) [3]). In tale documento è anche sottolineata la necessità di sviluppare all'interno di tutti gli Stati membri una procedura certificata ed una metodologia conforme, indirizzate a tutti i portatori d'interesse (professionisti, conduttori, etc.), per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici. Da questo punto di vista, l'uso di strumenti informatici per l'analisi dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici (BEPS) è oggi diventato cruciale per la relativa valutazione dei consumi energetici e dell'impatto ambientale. Negli ultimi anni, sono stati sviluppati e utilizzati molteplici strumenti di simulazione soprattutto con l'obiettivo di:

- effettuare in modo adeguato la diagnosi energetica degli edifici [2, 4];
- supportare efficacemente la progettazione di edifici nuovi o da riqualificare;
- realizzare edifici massimamente efficienti dal punto di vista energetico [5-7];
- valutare in modo affidabile i fenomeni termo-fisici che si verificano nell'edificio [8-10];
- valutare e comparare l'efficacia delle differenti tecnologie disponibili per l'efficienza energetica nonché delle possibili fonti energetiche rinnovabili applicabili all'edificio [11, 12].

La scelta tra i metodi (o strumenti) di simulazione fruibili dipende dal compromesso desiderato tra precisione dei modelli considerati e i relativi tempi di calcolo. La fedeltà e l'accuratezza dei risultati delle simulazioni ottenuti attraverso uno strumento BEPS dipendono dai modelli matematici e dalle relative semplificazioni implementati per la descrizione dei fenomeni fisici che avvengono nell'edificio [13]. I modelli di simulazione basati sui metodi stazionari non forniscono informazioni accurate sulle possibili opzioni di progettazione poiché trascurano l'effetto dell'inerzia termica ed altri fenomeni dipendenti dal tempo. Al contrario, i modelli dinamici sono in grado di considerare i profili tempo-varianti del carico termico/frigorifero e sono adatti per analizzarne gli effetti, fornendo informazioni dettagliate e affidabili su come ridurre il fabbisogno energetico e migliorare il comfort termico dell'edificio. Per quanto riguarda i tempi di calcolo, questi ultimi dipendono in gran parte dalle semplificazioni operate sul modello e da come sono descritti, nell'ambito dello strumento simulativo scelto, i componenti strutturali dell'edificio.

Sin dai primi anni '70, i tool di simulazione energetica svolgono un ruolo cruciale per la valutazione dei consumi energetici e dell'impatto ambientale degli edifici [14]. Sin dalla relativa nascita, i modelli di simulazione sono stati oggetto di un intenso sforzo perseguito da parte di svariati ricercatori che agiscono sia in modo indipendente che nell'ambito di azioni concertate. Nonostante tale sforzo, possono oggi essere fatte diverse osservazioni riguardanti lo stato dell'arte. Da questo punto di vista va innanzitutto detto che con l'aumento della potenza di calcolo ottenuta negli ultimi 20 anni, è ora possibile utilizzare complessi e potenti codici per l'analisi delle prestazioni energetiche degli edifici anche su semplici computer desktop o laptop. Oggigiorno, tale facile accessibilità ha portato ad un ampio e diversificato numero di utenti [15]: ricercatori, professionisti (architetti, ingegneri), ma anche responsabili di uffici tecnici di comuni o servizi pubblici. D'altro canto, un così accresciuto utilizzo richiede una maggiore accuratezza e affidabilità dei modelli di calcolo, da cui dipendono, per esempio, le tariffe energetiche o gli incentivi statali, la scelta e implementazione di strategie e soluzioni tecniche per il risparmio energetico degli edifici e dei relativi impianti.

Un importante problema nel campo dei modelli simulativi per l'analisi delle prestazioni energetiche dell'edificio è spesso la mancanza di dettagliati e completi studi per la validazione e verifica di tali modelli. Spesso la validazione dei codici è effettuata solo per casi ideali o per specifiche condizioni d'esercizio (anche non considerando condizioni reali come, ad esempio, gli effetti sull'utilizzo di energia dovuti agli occupanti dell'edificio). La mancanza di una completa validazione di tali codici di simulazione e il relativo uso da parte di utenti non esperti può portare a risultati al di fuori degli intervalli per i quali è stata eseguita la validazione. Si tenga, inoltre, presente che il comportamento degli occupanti di un edificio può avere in molti casi un impatto significativo sul relativo consumo di energia [16]. Gli occupanti, infatti, condizionano il consumo energetico di un edificio attraverso la scelta dei set point di temperatura, degli orari di riscaldamento / raffreddamento e delle apparecchiature installate (attraverso i relativi carichi).

Per migliorare i modelli di analisi delle prestazioni energetiche degli edifici e garantire che questi ultimi vengano utilizzati nella maniera corretta, è necessario effettuare dunque procedure di validazione e verifica più avanzate, che considerino non solo particolari condizioni d'esercizio, ma in modo completo anche il funzionamento reale del sistema edificio-impianto, includendo gli effetti dovuti ai reali profili di carico relativi agli occupanti dell'edificio.

1.1 *Le metodologie per il calcolo dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento degli edifici*

Il calcolo del comportamento termo-fisico degli edifici e dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento degli stessi, può essere effettuato attraverso l'implementazione e uso di modelli di simulazione, che possono essere stazionari o dinamici. Nei modelli stazionari (o semi-stazionari), le ipotesi di base sono: i) mancanza dei termini di accumulo energetico che comporta l'impossibilità di trascurare gli effetti inerziali dell'involucro [17]; ii) l'intervallo di tempo coincide con le stagioni di riscaldamento e/o raffrescamento. Pertanto, i dati climatici, le condizioni interne, e i consumi sono resi con valori medi, con una notevole semplificazione del calcolo. Nei modelli di simulazione dinamica, la presenza del termine di accumulo permette di considerare gli effetti inerziali dell'involucro e degli impianti, mentre la variazione temporale delle condizioni al contorno (es: parametri climatici e carichi interni) determina sostanzialmente l'intervallo di tempo (o *time step*) della simulazione, che può essere orario o sub-orario. A tal riguardo, va sottolineato che la dinamica dei parametri termo-fisici dell'edificio (o del sistema edificio-impianto) è esplicitata dal collegamento temporale che realizza la cosiddetta *memoria* del sistema. Infatti, a differenza dei modelli stazionari (o semi-stazionari) in cui il calcolo dei parametri termo-fisici relativo ad un singolo intervallo temporale è indipendente dagli altri, nei modelli dinamici esiste sempre una dipendenza temporale di uno o più parametri dall'intervallo o dagli intervalli di tempo precedenti. Questi modelli, pur se più complessi (per la necessità di risolvere un sistema di equazioni dinamiche), nonostante più lunghi tempi computazionali, sono in grado di valutare il transitorio termico della risposta dell'edificio. In linea generale, i modelli statici implementano una procedura semplificata che non è sensibile alle reali condizioni dinamiche di variazione dei carichi termici. Come si vedrà in seguito, la UNI TS 11300 – Parte 1 (calcolo dei fabbisogni energetici di riscaldamento e di raffrescamento e delle prestazioni energetiche degli edifici), finalizzata alla redazione dell'attestato di prestazione energetica (APE) è basata sul un metodo stazionario (capitolo 2). I risultati ottenuti, seppur utili ai fini della certificazione energetica, non sono attendibili per la valutazione dei consumi energetici reali degli edifici, né possono essere utilizzati per ottenere informazioni dettagliate finalizzate alla scelta delle soluzioni più adeguate ai fini della progettazione e/o riqualificazione energetica degli edifici. Infatti, almeno per particolari e complessi edifici (sia per geometria che per utilizzo discontinuo), è sempre auspicabile che anche la valutazione dei consumi energetici ai fini della certificazione energetica sia effettuata attraverso modelli dinamici.

1.2 *Classificazione dei modelli*

Nell'ambito delle classificazioni dei modelli di simulazione del comportamento termo-fisico degli edifici, vi è la distinzione tra modelli basati interamente su leggi fisiche e modelli ottenuti da relazioni matematiche non strettamente collegate alla termofisica dell'edificio [18]. Nello specifico, i cosiddetti modelli *law-driven*

oppure *forward models* sono ottenuti attraverso l'implementazione e la risoluzione di equazioni matematiche basate sulle leggi della termo-fisica degli edifici. Differentemente, i modelli *data driven*, anche detti *inverse models*, sono ottenuti attraverso la calibrazione dei parametri di equazioni semplificate, ottenuta a partire da dati o misure del comportamento dell'edificio. Le differenze tra questi approcci riguardano sia il livello di conoscenza delle leggi della termofisica degli edifici che la quantità di input e parametri, nettamente superiori nel caso dei modelli *law-driven*. Tuttavia, questi ultimi permettono il calcolo o la predizione del comportamento termo-fisico dell'edificio note le condizioni al contorno, mentre i modelli calibrati richiedono la conoscenza pregressa della prestazione del sistema, necessaria al processo iterativo di calibrazione e, quindi, all'utilizzo futuro del modello stesso. Una schematizzazione generale dei due approcci è riportata in [Figura 1](#).

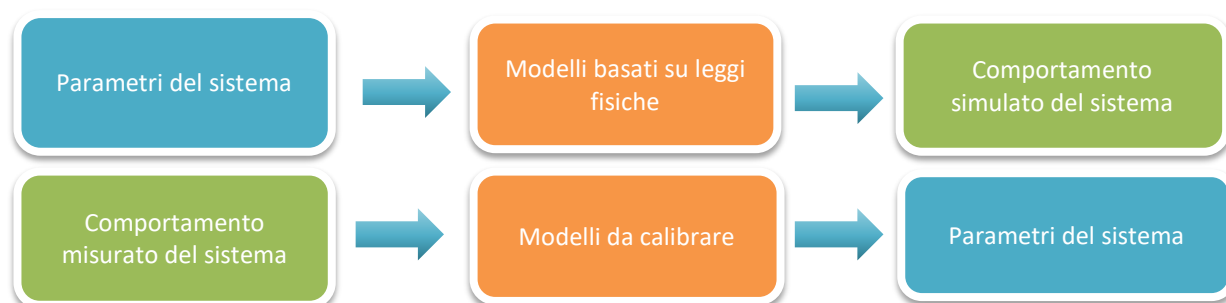


Figura 1. Logica di funzionamento di modelli *law-driven* e *data-driven*

In base all'effettiva conoscenza del modello fisico del sistema, è anche possibile classificare i modelli di simulazione delle prestazioni degli edifici secondo tre approcci [19]:

- **Black-box.** Semplici equazioni matematiche o statistiche (es: reti neurali, machine learning) sono utilizzate per correlare i parametri di input (es: dati climatici) ai dati misurati relativi al sistema da analizzare (es: zona termica). I coefficienti di tali equazioni, non direttamente collegati alle caratteristiche termofisiche del sistema (non conosciuto, i.e. scatola nera), sono ricavati in modo da ottenere degli algoritmi calibrati in grado di predire il comportamento termo-fisico dell'edificio. Tale approccio permette di correlare le variabili di uscita con quelle di ingresso attraverso una serie temporale funzione di tutti gli ingressi. Un metodo basato su tale approccio, ad esempio, è il Transfer Function Method (TFM) che correla i vari fattori alle grandezze dei passi temporali precedenti;
- **Grey-box.** Tale approccio utilizza delle equazioni matematiche semplificate (come quelle utilizzate nel caso precedente) in cui sono, tuttavia, presenti parametri ottenuti da leggi fisiche e o equazioni descrittive di alcuni aspetti del sistema da analizzare (parzialmente noto, i.e. scatola grigia); tutti gli altri parametri incogniti sono ricavati così come nell'approccio *black-box*. Un esempio di metodo basato su tale approccio è il Radiative Time Series (RTS), che oltre a correlare i vari fattori alle grandezze dei passi temporali precedenti utilizza l'approccio *grey-box* per le serie radiative;
- **White-box.** Il sistema da analizzare è rappresentato attraverso equazioni descrittive di leggi fisiche (es: equazioni differenziali ottenute da bilanci di energia sui componenti dell'edificio), che correlano gli output agli input. Anche in questo approccio è spesso utilizzata la calibrazione dei parametri del modello, ottenuta sfruttando le stesse relazioni funzionali e la conoscenza pregressa degli output e degli input (dati misurati). Tale approccio permette di migliorare l'accuratezza di calcolo del modello stesso, ed è generalmente utilizzato nel caso di analisi dettagliate sulla prestazione energetica degli edifici e sul comfort degli occupanti. Su tale approccio, ad esempio, è basato il metodo Heat Balance (HB), che utilizza equazioni di bilancio di energia sulle superfici delle pareti della zona termica da analizzare o sull'aria interna alla stessa zona.

1.3 Principali tecniche di modellazione

Il calcolo del fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento degli edifici, nel caso di metodologie basate su leggi fisiche e principi ingegneristici, indipendentemente dal grado di complessità, è effettuato rispettando il principio di conservazione dell'energia:

$$\Phi_{in} + \Phi_{gain} = \Phi_{out} + \Phi_{stored} \quad (1)$$

in cui, relativamente al sistema di controllo considerato (es: zona termica, involucro), Φ_{in} e Φ_{out} sono i flussi termici in ingresso ed in uscita (es: ventilazione, infiltrazione, conduzione e convezione), mentre Φ_{gain} è il flusso termico delle sorgenti interne (es: persone, apparecchiature, carichi solari), e Φ_{stored} è il flusso termico accumulato. I principali meccanismi che governano lo scambio termico tra l'ambiente esterno e quello interno, determinando così il fabbisogno di energia per riscaldamento e raffreddamento, sono: la conduzione di calore attraverso l'involucro, la convezione, la ventilazione e la radiazione a bassa e ad alta lunghezza d'onda, Figura 2. Gli algoritmi disponibili in letteratura sono molteplici e differiscono per le tecniche di risoluzione del sistema di equazioni che descrive la connessione di tali fenomeni. Tali algoritmi sono implementati nei codici o software per la simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici, anche noti come Building Energy Performance Simulation (BEPS). Confronti tra tali codici e software sono stati prodotti negli ultimi anni da diversi autori [20, 21], che osservano come l'utilizzo di software diversi, pur basati sulle stesse tecniche, può portare a diversi risultati in termini di prestazioni energetiche degli edifici.

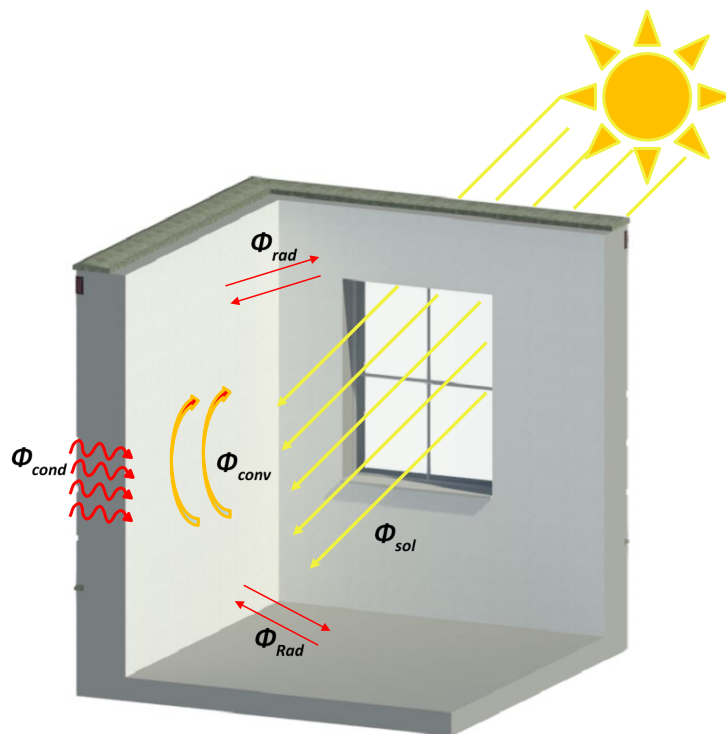


Figura 2. Principali fenomeni fisici nella trasmissione del calore negli edifici

I metodi o gli approcci per la modellazione delle prestazioni termiche ed energetiche degli edifici sono, in linea generale, tre: il metodo nodale, il metodo zonale, nonché la fluidodinamica computazionale (CFD) [18]. I tre approcci presentano caratteristiche diverse che li rendono adeguati o meno ad una specifica applicazione, così come riportato in Tabella 1.

Tabella 1. Finalità, vantaggi e svantaggi dei metodi per la simulazione energetica degli edifici

	Finalità	Vantaggi	Svantaggi
Nodale	Calcolo dei profili del fabbisogno energetico (per il riscaldamento e il raffrescamento) degli edifici e della temperatura dei nodi considerati.	Possibilità di effettuare simulazioni fluidodinamiche e termodinamiche.	Scarsa possibilità di studiare gli effetti locali del calore e della qualità dell'aria negli ambienti confinati.
Zonale	Simulazione dettagliata della distribuzione della temperatura in particolari ambienti, per gli impianti HVAC, e per valutazioni relative alla qualità dell'aria.	Possibilità di valutare la distribuzione spaziale e temporale delle variabili considerate.	Tempi di calcolo elevati; necessità della conoscenza pregressa del profilo di moto del fluido.
CFD	Stima del contenuto di contaminanti negli ambienti confinati, della qualità dell'aria e della ventilazione tra zone termiche.	Tempi di calcolo contenuti. Implementazione non complessa.	Tempi di calcolo elevatissimi; complessità di implementazione del modello della zona termica.

Nello specifico, attraverso l'approccio zonale, il volume interno di un edificio è diviso in zone termiche [22], e le equazioni del modello sono relative ai bilanci di massa e di energia necessarie al calcolo della distribuzione di energia all'interno della zona termica considerata. Tale tecnica è considerata bidimensionale ed è implementata in diversi codici di simulazione energetica (es: SPARK, POMA, FLOVENT) perlopiù utilizzati per la stima del contenuto di contaminanti negli ambienti confinati, della qualità dell'aria e della ventilazione tra zone termiche. La risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes è alla base della fluidodinamica computazionale, considerata una tecnica tridimensionale che, essendo caratterizzata da elevati tempi di calcolo, non è adatta all'esecuzione di simulazioni energetiche degli edifici effettuate su archi temporali annuali o stagionali [23]. Il metodo CFD, applicato ad un volume di controllo tridimensionale, è principalmente adoperato per la simulazione dettagliata della distribuzione della temperatura in particolari ambienti, per gli impianti HVAC, e per valutazioni relative alla qualità dell'aria. Attraverso il metodo nodale, ogni elemento della zona dell'edificio (es: parete) è considerato come un volume omogeneo caratterizzato da variabili di stato uniformi; su ogni nodo in cui è suddiviso il sistema sono ricavate equazioni differenziali alla derivate parziali ottenute dai bilanci di energia applicati al nodo stesso [24]. Nel metodo nodale, la risoluzione del problema della trasmissione del calore è effettuata attraverso l'analogia con la rete termica equivalente e sfruttando l'ipotesi di flusso monodimensionale. Il metodo è utilizzato per il calcolo dei profili del fabbisogno energetico degli edifici (per il riscaldamento e per il raffrescamento) e della temperatura dei nodi considerati (es: aria, superfici interne), stimati su orizzonti di calcolo generalmente annuali.

Nonostante la possibilità di utilizzare approcci diversi per il calcolo dei singoli fenomeni relativi alla valutazione della convezione, della ventilazione e dello scambio radiativo, il calcolo della conduzione del calore attraverso l'involucro opaco gioca un ruolo significativo in termini di affidabilità del calcolo e di tempi di computazione. Le tecniche di modellazione di un edificio differiscono per la modalità di risoluzione dello scambio termico per conduzione del calore attraverso l'involucro. L'equazione della trasmissione del calore in regime transitorio, scritta nella forma generale relativa alla conduzione in tre dimensioni e senza generazione interna, è matematicamente espressa da un'equazione differenziale alle derivate parziali:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T \quad (2)$$

dove T è la temperatura del corpo in un punto generico dell'elemento considerato ed in un determinato istante temporale t , $\nabla^2 T$ è l'operatore di Laplace applicato al vettore temperatura, a è la diffusività termica del materiale (considerata costante nel dominio). L'equazione, nella sua forma originale, è alquanto difficile da risolvere in termini matematici, pertanto, per la sua risoluzione sono utilizzate diverse tecniche numeriche derivate dall'analisi matematiche.

I codici e i software BEPS per la simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici implementano, principalmente, il metodo nodale, attraverso il quale è possibile utilizzare diverse tecniche numeriche per la risoluzione dell'equazione della conduzione del calore. Quelle maggiormente riscontrate in letteratura per l'approccio nodale sono due: le funzioni di trasferimento (TFM) e il metodo delle differenze finite (FDM). Il metodo TFM permette di analizzare tale problema attraverso la Z-Trasformata, un operatore matematico di facile impiego nel caso di modelli simulativi che trattano dati discreti nel tempo (come, ad esempio, i dati climatici). Il metodo permette di ridurre l'equazione differenziale alle derivate parziali monodimensionale (soddisfatte determinate condizioni) in un'equazione ordinaria della trasformata di Laplace, che trasforma un sistema dinamico nel dominio del tempo in un sistema tempo-invariante nel dominio della frequenza; le variabili reali sono trasformate in variabili complesse e la relazione tra ingresso e uscita è di tipo algebrico [25]. Equivalentemente, con il metodo FDM, l'equazione della conduzione del calore in regime monodimensionale è approssimata con un'equazione alle differenze finite (da derivate a differenze finite), ottenendo sistemi di equazioni algebriche di più facile risoluzione. Per applicare tale tecnica ai problemi alle derivate parziali, come la conduzione del calore, è necessario utilizzare schemi di avanzamento nel tempo, i.e. differenze finite in avanti (*forward*), differenze finite all'indietro (*backward*), differenze finite centrali [26].

1.4 Dati di ingresso e risultati ottenibili

I principali parametri e input che influenzano direttamente il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento degli edifici sono illustrati in [Figura 3](#). I dati climatici, che rappresentano le condizioni al contorno una volta determinata la localizzazione e la forma dell'edificio, sono ottenibili da database di file meteorologici (disponibili on-line o implementati nei software di simulazione), forniti per numerose località nel mondo. Maggiore è l'accuratezza con cui i dati climatici sono misurati ed elaborati, maggiore è l'affidabilità dei risultati di simulazione. Le proprietà termofisiche ed ottiche dell'involucro, sia opaco che trasparente, sono necessarie per poter caratterizzare il comportamento termo-fisico dello stesso. Infine, la conoscenza dei dati relativi all'utilizzo dell'edificio, come gli orari di accensione e spegnimento delle luci e dei macchinari, di occupazione delle persone, nonché i rispettivi carichi endogeni, sono necessari ai fini della prestazione energetica dello stesso. Va sottolineato che tutti questi fattori, ed in particolare comportamento e le abitudini variabili degli occupanti, sono fattori chiave nella simulazione termica dell'edificio e, di conseguenza, nell'affidabilità dei risultati di calcolo.

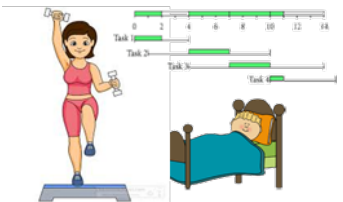
Dati climatici	Proprietà termofisiche dell'edificio	Utilizzo dell'edificio e carichi endogeni
		
Temperatura e umidità relativa dell'aria esterna Radiazione solare Velocità e variazione del vento Temperatura del terreno Temperatura della volta celeste	Forma e orientamento dell'edificio Grado di isolamento Proprietà termofisiche dell'involucro opaco e trasparente Proprietà ottiche delle superfici Ombreggiamenti	Orari presenza persone negli edifici Orari accensione luci e macchinari Carichi termici per persone, luci, macchinari Livello di attività degli occupanti Livelli di comfort degli occupanti

Figura 3. Dati e parametri che influenzano la simulazione energetica

Nella simulazione in regime stazionario, utilizzando intervalli temporali su base stagionale o annuale, i dati di input alla simulazione (i.e. dati climatici) e quelli relativi all'utilizzo dell'edificio (i.e. carichi endogeni) sono inseriti come valori medi (es: temperatura dell'aria media giornaliera, carichi endogeni delle persone) o come dati rappresentativi di condizioni standard di utilizzo degli edifici. Differentemente, l'utilizzo del metodo dinamico rende possibile la simulazione del comportamento termo-fisico dell'edificio valutato su diversi intervalli temporali orari o sub-orari (scelti opportunamente dall'utente per ragioni di semplificazione o necessari per la convergenza dell'algoritmo di risoluzione). La simulazione dinamica degli edifici richiede, quindi, dati di ingresso (input) che siano quanto più rappresentativi del funzionamento dell'edificio. Relativamente all'edificio, per poter effettuare la simulazione dinamica dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento degli edifici devono essere inseriti i profili dinamici dei dati climatici della località di interesse (es: temperatura e umidità dell'aria esterna, radiazione solare, velocità e direzione del vento, etc.), mediamente disponibili su banche dati on-line. Inoltre, è necessario inserire i profili di utilizzo dell'edificio da parte degli occupanti, i profili di utilizzo dei carichi endogeni dovuti ad illuminazione e macchinari, gli orari di accensione e spegnimento degli impianti, e le condizioni termo-igrometriche da assicurare negli ambienti. Indipendentemente dalla metodologia considerata, è necessario modellare l'edificio facendo particolare attenzione sia alle caratteristiche termo-fisiche dei componenti edilizi che alle caratteristiche geometriche (es: modellazione di aggetti verticali e orizzontali, da cui dipende la stima delle ombre riportate, etc.). La modellazione dell'edificio nel caso di regime dinamico richiede impegno nella costruzione del modello che, molto spesso nei software disponibili è tridimensionale. Migliore è l'attenzione nella costruzione del modello dinamico dell'edificio e delle condizioni operative interne, insieme al corretto inserimento delle condizioni al contorno, più i risultati del calcolo sono affidabili e realistici. Richiedendo un maggiore sforzo nella modellazione rispetto ai metodi stazionari, l'utilizzo della simulazione dinamica per il calcolo dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento va certamente preferita: i) quando si vogliono ottenere risultati termici, energetici e di comfort quanto più veritieri possibile (es: valutazione dei consumi energetici nelle nuove costruzioni, valutazioni di fattibilità economica nella stima dei consumi in caso di interventi di riqualificazione energetica), ii) nel caso di edifici ad elevate prestazioni energetiche o di edifici con condizioni operative intermittenti e particolari geometrie, soprattutto in presenza di ampie superfici vetrate.

I risultati ottenibili a valle della simulazione sono in generale connessi alla zona o alle zone termiche simulate, e sono fruibili in quantità istantanee (relative al *time step*, valori orari o sub-orari) o cumulate (integrati su intervalli giornalieri, settimanali, mensili, stagionali). Dai profili dinamici dei valori dei parametri monitorati (es: temperature, fabbisogni, etc.) o dalle condizioni nominali (i.e. condizione più sfavorevoli invernali o estive) è possibile ricavare i valori dei carichi di riscaldamento e raffreddamento dell'edificio utili per il dimensionamento degli impianti. Chiaramente, la metodologia basata sul regime stazionario permette all'utente di ottenere solo risultati cumulati (i.e. intervallo di simulazione stagionale) e, a differenza dell'approccio dinamico, non è utilizzabile per analisi dettagliate del comportamento termico ed energetico dell'edificio e di comfort degli occupanti. Tuttavia, la simulazione stazionaria richiede tempi di calcolo nettamente inferiori; questi, nel caso di simulazione dinamica, si allungano sensibilmente in funzione della tecnica di risoluzione dell'equazione della conduzione del calore e alla necessità, ove richiesto (e auspicabile), di implementare modelli geometrici tridimensionali dell'edificio.

I risultati richiesti ai fini dell'indagine simulativa necessaria alla diagnosi, alla progettazione o alla certificazione energetica, riportati in [Tabella 2](#), sono:

- temperatura e umidità relativa dell'aria interna;
- temperatura delle superfici dell'involucro;
- fabbisogni di raffreddamento e riscaldamento;
- energia termica trasmessa attraverso i componenti dell'involucro;
- infiltrazioni e carichi di ventilazione;
- fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento;
- guadagni o dispersioni di energia termica dagli elementi dell'involucro edilizio.

Tabella 2. Risultati richiesti dalle a valle della simulazione dinamica

Finalità	Risultati necessari	Metodologie utilizzabili
Diagnosi energetica dell'edificio (es: audit, riqualificazione, etc.)	Dati variabili dei parametri di interesse (es: profili di: temperatura dell'aria interna, temperatura media radiante, fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento, guadagni solari, etc.) e dati cumulati stagionali o annuali	Simulazione dinamica (intervalli di calcolo orari o sub-orari)
Progettazione energetica e sostenibile dell'edificio (es: NZEB, smart buildings, etc.)	Valori dinamici delle variabili di interesse (come per la diagnosi), dati di picco (carico termico, carico frigorifero, picco di captazione del guadagno solare su superfici esterne) necessari per il dimensionamento degli impianti	Simulazione dinamica (intervalli di calcolo orari o sub-orari)
Prestazione energetica dell'edificio (es: APE)	Calcolo stagionale e annuale del fabbisogno energetico (per il riscaldamento e il raffrescamento) degli edifici	Simulazione dinamica (intervalli di calcolo orari o sub-orari) o stazionaria (intervalli di calcolo stagionali o annuali)

La simulazione stazionaria può, quindi, essere utilizzata solo per la certificazione energetica dell'edificio, mentre quella dinamica (oraria o sub-oraria) può, invece, essere applicata anche alle indagini di diagnosi e alla progettazione energetica, nonché allo studio del benessere degli occupanti.

2 La UNI/TS 11300-1 per il calcolo mensile del fabbisogno energetico degli edifici

Con la direttiva europea 2002/91/CE sulla prestazione energetica degli edifici, gli stati membri dell'Unione Europea sono stati chiamati a mettere in atto azioni finalizzate al raggiungimento degli obiettivi di riduzione del consumo energetico del settore edilizio e delle relative emissioni di CO₂. Con il recepimento della direttiva e l'emissione dei decreti legislativi 192/2005 e 311/2006 prima e 63/2013 poi, è stata introdotta la certificazione energetica degli edifici, e l'Attestato di Prestazione Energetica (APE). Quest'ultimo, obbligatorio per le nuove costruzioni, locazioni e azioni di compravendita, ha lo scopo di orientare il mercato edilizio verso il risparmio energetico e l'efficienza (in accordo con la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia), assicurando trasparenza e informazioni relative ai fabbisogni energetici degli edifici per l'utente finale. La normativa in materia è stata oggetto di numerose modifiche ed integrazioni, fino ai decreti del 26 giugno 2015 del Ministero dello Sviluppo Economico, con l'introduzione delle nuove linee guida per la redazione dell'APE, emanate al fine di stabilire in valore assoluto il livello di consumo di un immobile (e della relativa classe di appartenenza), consentendo un più facile confronto della qualità energetica di unità immobiliari differenti sul territorio nazionale.

Le metodologie di calcolo per la stima della prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici, per la climatizzazione invernale e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, si riferiscono alle norme UNI TS 11300. In particolare, la Parte 1 della norma contiene i dati climatici aggiornati e la metodologia per la determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione (estiva ed invernale). La norma tecnica UNI/TS 11300 - Parte 1 ha lo scopo di fornire, insieme alle altre parti della stessa normativa (UNI/TS 11300-2/6) un metodo di calcolo univoco al fine di determinare le prestazioni energetiche degli edifici. Tale normativa vede la sua prima edizione nel 2008 con la pubblicazione della UNI/TS 11300-1:2008 "Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale" in cui vengono definite le procedure di applicazione nazionale del metodo mensile della UNI EN ISO 13790:2008 per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e per raffrescamento. Il metodo alla base della specifica tecnica si basa sul regime stazionario, in cui i dati di input (temperature, apporti interni, consumi previsti, etc.) sono valori medi e i parametri termo-fisici sono temporalmente indipendenti. Nello specifico, tale normativa provvede a descrivere le metodiche per la valutazione dell'energia termica da fornire all'edificio in tre differenti condizioni: i) calcolo di progetto (design rating); ii) calcolo in condizioni standard (asset rating); iii) condizioni climatiche e di esercizio adattate all'utenza (tailored rating).

Le principali metodologie di calcolo adottate dalla normativa UNI/TS 11300 – Parte 1 (edizione 2014) per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per il riscaldamento e raffrescamento saranno descritte e analizzate in questo capitolo. Nello specifico verrà posta l'attenzione sui seguenti punti: i) metodologia di calcolo; ii) valutazione apporti termici solari; iii) valutazione apporti termici interni; vi) zonizzazione ed accoppiamento tra le zone; v) zone adiacenti non climatizzate; vi) ventilazione; vii) umidificazione e deumidificazione.

2.1 Metodologia di calcolo

Come precedentemente riportato, la UNI/TS 11300-1 nasce con lo scopo di definire le procedure di applicazione a livello nazionale del metodo mensile riportato nella UNI EN ISO 13790:2008. Quest'ultima propone tre differenti metodologie di calcolo: metodo mensile e metodo orario. Nel caso del metodo orario, la UNI EN ISO 13790:2008 presenta un modello che consta di cinque resistenze ed una capacità (5R1C). Al contrario, nel caso del metodo mensile non è proposta alcuna rete termica equivalente bensì solo un bilancio di energia, su base mensile, a livello della zona termica in esame. Nel caso specifico della UNI/TS 11300-1 (metodo mensile), il fabbisogno ideale di energia termica per riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e raffrescamento ($Q_{C,nd}$) è valutato, per ogni mese e per ogni zona termica dell'edificio, attraverso le due seguenti equazioni:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol,w}) \quad (3)$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol,w}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (4)$$

dove: $Q_{H,ht}$ rappresenta lo scambio di energia termica totale nel caso di riscaldamento, espresso in MJ; $Q_{C,ht}$ rappresenta lo scambio di energia termica totale nel caso di raffrescamento, espresso in MJ; $Q_{H,tr}$ rappresenta lo scambio di energia termica per trasmissione nel caso di riscaldamento, espresso in MJ; $Q_{C,tr}$ rappresenta lo scambio di energia termica per trasmissione nel caso di raffrescamento, espresso in MJ; $Q_{H,ve}$ rappresenta lo scambio di energia termica per ventilazione nel caso di riscaldamento, espresso in MJ; $Q_{C,ve}$ rappresenta lo scambio di energia termica per ventilazione nel caso di raffrescamento, espresso in MJ; Q_{gn} rappresenta gli apporti totali di energia termica, espressi in MJ; Q_{int} sono gli apporti di energia termica dovuti a sorgenti interne, espressi in MJ; $Q_{sol,w}$ rappresenta gli apporti di energia termica dovuti alla radiazione solare incidente sui componenti vetrati, espressi in MJ; $\eta_{H,gn}$ rappresenta il fattore di utilizzazione degli apporti di energia termica; $\eta_{C,ls}$ rappresenta il fattore di utilizzazione delle dispersioni di energia termica. Tali equazioni, risolte mese per mese (avendo preventivamente definito i mesi della stagione di riscaldamento e di raffrescamento) restituiscono il fabbisogno di energia termica per riscaldamento e/o raffrescamento dell'edificio per ogni mese considerato.

2.2 Apporti termici solari

Con riferimento agli apporti solari, questi ultimi vengono suddivisi nella UNI/TS 11300-1 in apporti solari sui componenti trasparenti ed apporti solari sui componenti opachi. Come è possibile notare osservando le equazioni (1) e (2), solo l'aliquota solare relativa ai componenti finestrati ($Q_{sol,w}$) è direttamente tenuta in considerazione all'interno del calcolo. L'aliquota incidente sui componenti opachi (così come l'extraflusso) è computata congiuntamente alle dispersioni/rientranze dell'involucro. Fatta tale distinzione, nel seguito sono rispettivamente riportate le equazioni per il calcolo dei fattori solari sia per quanto concerne i componenti vetrati ($Q_{sol,w}$) che quelli opachi ($Q_{sol,op}$):

$$Q_{sol,w} = \left\{ \sum_K \Phi_{sol,w,mn,k} \right\} \cdot t + \sum_J Q_{sd,w,j} \quad (5)$$

$$Q_{sol,op} = \left\{ \sum_K \Phi_{sol,op,mn,k} \right\} \cdot t + \left\{ \sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{sol,mn,u,k} \right\} \cdot t + \sum_J (Q_{sd,op} + Q_{si,op})_J \quad (6)$$

dove: $b_{tr,l}$ è il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente la sorgente di calore interna l -esima oppure il flusso termico l -esimo di origine solare; $\Phi_{sol,mn,l}$ è il flusso termico l -esimo di origine solare, nell'ambiente non climatizzato adiacente u , mediato sul tempo, espresso in W; $Q_{sd,w,j}$ sono gli apporti di energia termica diretti attraverso le partizioni trasparenti, dovuti alla radiazione solare, entranti nella zona climatizzata della serra j -esima, espressi in MJ; $Q_{sd,op,j}$ sono gli apporti di energia termica diretti attraverso le partizioni opache, dovuti alla radiazione solare, entranti nella zona climatizzata dalla serra j -esima espressi in MJ; $Q_{si,j}$ sono gli apporti di energia termica indiretti dovuti alla radiazione solare, entranti nella zona climatizzata dalla serra j -esima, espressi in MJ.

Per la valutazione del flusso termico k -esimo di origine solare $\Phi_{sol,w/op,k}$, espresso in W, si fa riferimento alla seguente equazione:

$$\Phi_{sol,w/op,k} = F_{sh,ob,k} \cdot A_{sol,w/op,k} \cdot I_{sol,k} \quad (7)$$

dove: $F_{sh,ob,k}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie k -esima; $A_{sol,w,k}$ è l'area di captazione solare effettiva della superficie vetrata k -esima con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, nella zona o ambiente considerato, espressa in m², $A_{sol,op,k}$ è l'area di captazione solare effettiva della superficie opaca k -esima con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, nella zona o ambiente considerato, espressa

in m^2 ; $I_{sol,k}$ è l'irradianza solare media del mese considerato o della frazione di mese, sulla superficie k -esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, espressa in W/m^2 .

Per quanto concerne infine lo scambio per radiazione infrarossa verso la volta celeste (extraflusso), questo, come detto in precedenza, deve essere considerato come una variazione dello scambio di energia termica per trasmissione dell'involucro edilizio (e non come una variazione dell'apporto di energia solare). Il calcolo dell'extraflusso secondo la UNI/TS 11300-1 è effettuato mediante la stessa procedura riportata nella UNI EN ISO 13790. Nello specifico, vengono presentate tre formule per il calcolo rispettivamente di: a) temperatura apparente della volta celeste; b) coefficiente di scambio termico per irraggiamento; e c) fattore di vista tra la superficie oggetto del calcolo e la volta celeste. Tali valori, una volta calcolati, sono da utilizzarsi per valutare la potenza termica dispersa per extraflusso da ogni elemento dell'involucro.

2.3 Apporti termici interni

Con riferimento agli apporti termici interni (Q_{int}) presentati nelle equazioni (1) e (2), la UNI/TS 11300-1 propone la seguente formulazione:

$$Q_{int} = \left\{ \sum_K \Phi_{int,mn,k} \right\} \cdot t + \left\{ \sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{int,mn,u,l} \right\} \cdot t \quad (8)$$

dove: $\Phi_{int,mn,k}$ è il flusso termico immesso in ambiente dalla k -esima sorgente di calore interna, mediato sul tempo, espresso in W; e $\Phi_{int,mn,u,l}$ è il flusso termico prodotto dalla l -esima sorgente di calore interna nell'ambiente non climatizzato adiacente u , mediato sul tempo, espresso in W. Il valore di Φ_{int} , che rappresenta un valore medio del carico interno, può essere valutato in due modi differenti a seconda che venga selezionata la condizione di calcolo di progetto o adattata all'utenza. Nel caso dell'adozione delle condizioni di progetto, gli apporti termici sensibili interni sono funzione della destinazione d'uso della zona termica e dell'area calpestabile, secondo quanto riportato nel prospetto E.3 della stessa normativa. Nel caso in cui venga invece adottata la valutazione adattata all'utenza, questa prevede l'utilizzo degli effettivi contributi al carico termico sensibile di occupanti, illuminazione ed apparecchiature opportunamente mediati su base mensile.

2.4 Zonizzazione ed accoppiamento tra zone

Fondamentale ai fini di un corretto calcolo è la suddivisione dei locali in adeguate zone termiche. Per effettuare tale operazione la UNI/TS 11300-1 propone una procedura che consta di cinque punti. Nello specifico, per appartenere alla stessa zona termica, i locali oggetto dello studio devono contemporaneamente soddisfare le seguenti condizioni: a) le temperature di set-point dei locali nella stagione di riscaldamento non devono differire per più di 4 K; b) laddove presente il servizio di raffrescamento, le temperature di set-point dei locali nella stagione di raffrescamento non devono differire per più di 4 K; c) gli ambienti, per fare parte della stessa zona termica, devono essere serviti dallo stesso impianto di climatizzazione; d) nel caso in cui sia presente un impianto di ventilazione meccanica, almeno l'80% dell'area climatizzata è servita dallo stesso impianto di ventilazione. In aggiunta, i tassi di ventilazione nei diversi ambienti che non devono differire di un fattore maggiore di 4; e) nel caso in cui vi sia il controllo dell'umidità, le umidità relative interne di set-point devono differire di non oltre 20 punti percentuali (quest'ultima condizione non è presente nella UNI EN ISO 13790 poiché quest'ultima non permette, a differenza della UNI/TS 11300-1, il calcolo del fabbisogno di energia termica per umidificazione e deumidificazione).

In deroga alle condizioni appena presentate, la UNI/TS 11300-1 sottolinea che, nel caso di opportuna prescrizione legislativa, la suddivisione in zone può essere effettuata considerando la destinazione d'uso comune o per unità immobiliare. È da notare che la zonizzazione relativa al riscaldamento può differire da quella relativa al raffrescamento.

2.5 Zone adiacenti non climatizzate

L'influenza delle zone adiacenti non climatizzate su quelle climatizzate, benché minore rispetto a quella dell'ambiente esterno, risulta comunque non trascurabile. Al fine di tenere in considerazione tale fenomeno, la UNI/TS 11300-1 propone un fattore correttivo (b_{tr}) definito come segue:

$$b_{tr} = \frac{H_{ue}}{H_{iu} + H_{ue}} \quad (9)$$

dove: H_{ue} è il coefficiente di scambio termico tra l'ambiente non climatizzato e l'ambiente esterno, determinato secondo la UNI EN ISO 13789, espresso in W/K; e H_{iu} rappresenta il coefficiente di scambio termico tra l'ambiente climatizzato e l'ambiente non climatizzato, determinato secondo la UNI EN ISO 13789, espresso in W/K.

Il fattore correttivo così definito viene quindi adoperato per ottenere il coefficiente di scambio termico per trasmissione, H_u , tra l'ambiente climatizzato e quello non climatizzato, correggendolo come segue:

$$H_u = H_{tr,iu} \cdot b_{tr} \quad (10)$$

dove $H_{tr,iu}$ è il coefficiente di scambio termico per trasmissione tra l'ambiente climatizzato e l'ambiente non climatizzato, determinato secondo la UNI EN ISO 13789, espresso in W/K. Nel caso di edifici esistenti ed in assenza di informazioni precise si può fare riferimento a valori di b_{tr} tabellati a seconda del tipo di ambiente non climatizzato e riportati in appendice alla stessa norma.

2.6 Ventilazione

Con riferimento allo scambio termico per ventilazione, questo è valutato dalla UNI/TS 11300-1 distinguendo tra calcolo della prestazione termica del fabbricato e calcolo della prestazione energetica dell'edificio. Nel primo caso, a prescindere dalla presenza di un impianto di ventilazione forzata, la norma considera una ventilazione definita "standard in condizioni di riferimento". Nel secondo caso invece la norma considera, in presenza di un impianto di ventilazione forzata, la "ventilazione effettiva" dell'ambiente climatizzato. Chiaramente, qualora non vi fosse, nel caso di calcolo della prestazione energetica dell'edificio, alcun impianto di ventilazione forzata, la ventilazione effettiva coincide con quella di riferimento.

Cruciale per il calcolo del contributo di ventilazione ($Q_{H,ve}$ e $Q_{C,ve}$ rispettivamente nelle equazioni (1) e (2)) è il calcolo della portata di ventilazione media mensile. Tale portata è valutata nella UNI/TS 11300-1 come segue:

$$q_{ve,0} = \left(\sum_K n_{per,k} \cdot q_{ve,o,p,k} + \sum_K A_{f,k} \cdot q_{ve,o,s,k} \right) \cdot \frac{0.8}{\varepsilon_{ve,c}} \cdot (C_1 \cdot C_2) \quad (11)$$

dove: $q_{ve,o,p,k}$ è la portata specifica di aria esterna per persona nella sub-zona k -esima, come definita e riportata nella UNI 10339, espressa in m^3/s ; $q_{ve,o,s,k}$ è la portata specifica di aria esterna per unità di superficie utile servita dalla ventilazione nella sub-zona k -esima, come definita e riportata nella UNI 10339, espresso in $m^3/(s \cdot m^2)$; $n_{per,k}$ è il numero di persone nella sub-zona k -esima servita dalla ventilazione, espressa in m^2 ; $n_{s,k}$ è l'indice di affollamento convenzionale per unità di superficie nella sub-zona k -esima riferito alle condizioni di progetto, come definito e riportato nella UNI 10339, espresso in m^2 ; $A_{f,k}$ è l'area della superficie utile della sub-zona k -esima servita dalla ventilazione, espressa in m^2 ; $\varepsilon_{ve,c}$ è l'efficienza convenzionale di ventilazione, che dipende dalla tipologia dei terminali del sistema di ventilazione (in assenza di dati provenienti da norme specifiche si assume convenzionalmente pari a 0.8); C_1 è il coefficiente correttivo per impianti misti, che è determinato in relazione con il tipo di terminale ad acqua (in assenza di dati provenienti da norme specifiche si assume convenzionalmente pari a 1); C_2 è il coefficiente correttivo in funzione dell'altitudine riportato in specifica tabella della UNI 10339.

In via alternativa alla metodologia appena esposta, la UNI/TS 11300-1 propone, unicamente per edifici ad uso residenziale (categoria E.1) e per edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali (categoria E.8), l'utilizzo della "portata minima di progetto" definita come segue:

$$q_{ve,0} = n \cdot V / 3600 \quad (12)$$

dove: n rappresenta il tasso di ventilazione, espresso in V/h; e V è il volume netto della zona termica considerata, espresso in m³.

2.7 Umidificazione e deumidificazione

Come noto, al fine di garantire il richiesto benessere igrometrico risulta fondamentale il controllo dell'umidità relativa dell'ambiente interno. Per tale ragione i processi di umidificazione e deumidificazione giocano un ruolo cruciale. Nonostante tali processi non siano tenuti in considerazione nella UNI EN ISO 13790, la specifica tecnica italiana UNI/TS 11300-1 implementa al suo interno una procedura per il calcolo del fabbisogno di energia termica latente per umidificazione ($Q_{H,hum,nd}$) e deumidificazione, ($Q_{C,dhum,nd}$). Nello specifico, tali termini sono calcolati come segue:

$$Q_{H,hum,nd} = -\min[0; Q_{wv,int} - Q_{H,wv,ve}] \quad (13)$$

$$Q_{C,hum,nd} = \max[0; Q_{wv,int} - Q_{C,wv,ve}] \quad (14)$$

dove: $Q_{H,wv,ve}$ è l'entalpia della quantità netta di vapore di acqua introdotta nella zona dagli scambi d'aria con l'ambiente circostante per infiltrazione, aerazione e/o ventilazione nel periodo di riscaldamento, espressa in MJ; $Q_{C,wv,ve}$ è l'entalpia della quantità netta di vapore di acqua introdotta nella zona dagli scambi d'aria con l'ambiente circostante per infiltrazione, aerazione e/o ventilazione nel periodo di raffrescamento, espressa in MJ; e $Q_{wv,int}$ è l'entalpia del vapore di acqua prodotto all'interno della zona da persone e processi e sorgenti varie (cottura, lavaggi, etc.), espressa in MJ. I tre parametri sopra descritti sono valutati su base mensile, mediante equazioni presentate nella medesima normativa, utilizzando valori dei contributi di vapore d'acqua mediati sul tempo.

2.8 Parametri dinamici

Essendo quello proposto dalla UNI/TS 11300-1 un metodo stazionario mensile, al fine di poter contemplare la dinamicità dei fenomeni, è applicata un'opportuna correzione al calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento. Nella normativa sono proposti due metodi di correzione differenti a seconda della stagione alla quale si fa riferimento.

Per quanto concerne la stagione di riscaldamento la normativa procede al calcolo di un fattore denominato "rapporto di bilancio termico" γ_H , e di un parametro numerico adimensionale dipendente dalla costante di tempo τ , a_H , definiti come segue:

$$\gamma_H = \frac{Q_{gn}}{Q_{H,ht}} \quad (15)$$

$$a_H = a_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} \quad (16)$$

dove: τ rappresenta la costante di tempo della zona termica, espressa in ore, valutata come rapporto tra la capacità termica della zona oggetto del calcolo ed il suo coefficiente globale di scambio termico, corretto secondo la UNI EN ISO 13798:2008; e a_H è un coefficiente adimensionale che può assumere valori compresi tra 0 ed 1. Mediante tali due valori è possibile valutare il fattore di utilizzazione degli apporti termici, utilizzato all'interno dell'equazione 1, come segue:

$$\begin{aligned}
 \text{se } \gamma_H > 0 \text{ e } \gamma_H \neq 1 &\rightarrow \eta_{H,gn} = \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{a_H+1}} \\
 \text{se } \gamma_H = 1 &\rightarrow \eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H + 1} \\
 \text{se } \gamma_H < 0 &\rightarrow \eta_{H,gn} = \frac{1}{\gamma_H}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Con riferimento alla stagione di raffrescamento, si adotta un approccio simile. Nello specifico, i parametri γ_c e a_c sono definiti come:

$$\gamma_c = \frac{Q_{gn}}{Q_{c,ht}} \tag{18}$$

$$a_{c,H} = a_{c,0} + \frac{\tau}{\tau_{c,0}} - k \frac{A_w}{A_f} \tag{19}$$

dove: A_w è l'area finestrata complessiva della zona termica; e A_f è l'area calpestabile, espresse entrambi in m^2 . In questo caso, tali valori sono utilizzati per il calcolo del fattore di utilizzazione degli apporti solari, utilizzato nell'equazione 2, valutato come segue:

$$\begin{aligned}
 \text{se } \gamma_c > 0 \text{ e } \gamma_c \neq 1 &\rightarrow \eta_{c,ls} = \frac{1 - \gamma_c^{-a_c}}{1 - \gamma_c^{-(a_c+1)}} \\
 \text{se } \gamma_c = 1 &\rightarrow \eta_{c,ls} = \frac{a_c}{a_c + 1} \\
 \text{se } \gamma_c < 0 &\rightarrow \eta_{c,gn} = 1
 \end{aligned} \tag{20}$$

3 La UNI EN ISO 52016-1 per il calcolo orario del fabbisogno energetico degli edifici

Al fine di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici, l'Unione Europea ha provveduto ad emanare, nel corso degli anni, ulteriori direttive, come la 2010/31/EU (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD), e la 2012/27/EU (Energy Efficiency Directive). Più recentemente, la nuova EPBD (2018/844/EU) ha introdotto nuovi elementi per il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici. Come conseguenza, il Comitato Europeo per le Standardizzazioni (CEN) è stato chiamato ad emanare nuove normative di riferimento del settore in accordo con le nuove indicazioni. Tali variazioni normative a livello europeo hanno portato, a livello italiano, all'emissione più recente della UNI EN ISO 52016-1:2018 (Prestazione energetica degli edifici - Parte 1: Procedure di calcolo – Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti), pubblicata nel marzo del 2018, e che recepisce la EN ISO 52016-1:2017. La UNI EN ISO 52016-1:2018 propone due differenti metodologie di calcolo rispettivamente su base oraria e mensile, sostituendo la EN ISO 13790 e divenendo il riferimento per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici.

La nuova normativa abolisce completamente il metodo di calcolo stagionale, modifica il metodo di calcolo mensile ed opera una importante ridefinizione del metodo di calcolo orario. Nello specifico la nuova ISO definisce un metodo di calcolo dinamico orario semplificato (*metodo orario*) per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti. Il nuovo metodo garantisce risultati più attendibili rispetto a quello stazionario, grazie alla possibilità di considerare in maniera più precisa le condizioni d'uso reali dell'edificio al fine di raggiungere un adeguato comfort degli occupanti e soddisfare standard energetici sempre più elevati. Nel metodo orario diventano rilevanti gli effetti dell'inerzia termica dell'involucro, delle condizioni di utilizzo degli ambienti e degli impianti, degli apporti solari e delle condizioni climatiche esterne, per una valutazione più precisa e realistica del comportamento termo-fisico di un edificio. Sarà, pertanto, possibile ottenere risultati orari delle temperature simulate nell'edificio o delle prestazioni del sistema edificio-impianto, eventualmente cumulabili su diversi intervalli temporali al fine di ricavare gli indici progetto, di prestazione, e di diagnosi degli edifici.

Le principali metodologie di calcolo adottate dalla normativa UNI EN ISO 52016-1:2018 sono descritte di seguito, sottolineando gli aspetti chiave riportati nella norma con riferimento al solo metodo di calcolo orario. Nello specifico verrà posta l'attenzione sugli stessi aspetti della normativa analizzata nel capitolo 2, cioè: i) metodologia di calcolo; ii) valutazione apporti termici solari; iii) valutazione apporti termici interni; iv) zonizzazione ed accoppiamento tra le zone; v) zone adiacenti non climatizzate; vi) ventilazione; vii) umidificazione e deumidificazione.

3.1 Metodologia di calcolo

La procedura di calcolo proposta nella UNI EN ISO 52016-1 è basata sulla metodologia presentata nella EN ISO 52017-1. La principale differenza tra le due normative è il loro fine. La EN ISO 52017-1 fornisce una generica procedura di calcolo orario senza tuttavia specificare dati di input, applicazioni, tecniche risolutive, etc.. La UNI EN ISO 52016-1 riceve dalla EN ISO 52017-1 la procedura di calcolo colmandone le lacune.

Tramite il modello proposto è possibile considerare, nel calcolo dei fabbisogni di energia termica dell'edificio, l'influenza delle variazioni giornaliere e/o orarie dei principali parametri climatici ed operativi (occupazione, accensione luci, etc.).

Al fine di ottenere una procedura quanto più accurata possibile, la UNI EN ISO 52016-1 propone una modellazione dettagliata dell'edificio in ogni suo componente. Nello specifico, ogni elemento può essere descritto mediante una rete termica costituita da una resistenza ed una capacità per ogni nodo termico considerato. Un esempio di schematizzazione mediante rete termica di un generico componente dell'involucro edilizio (desunta dalla ISO/TR 52016-2) è presentato in [Figura 4](#).

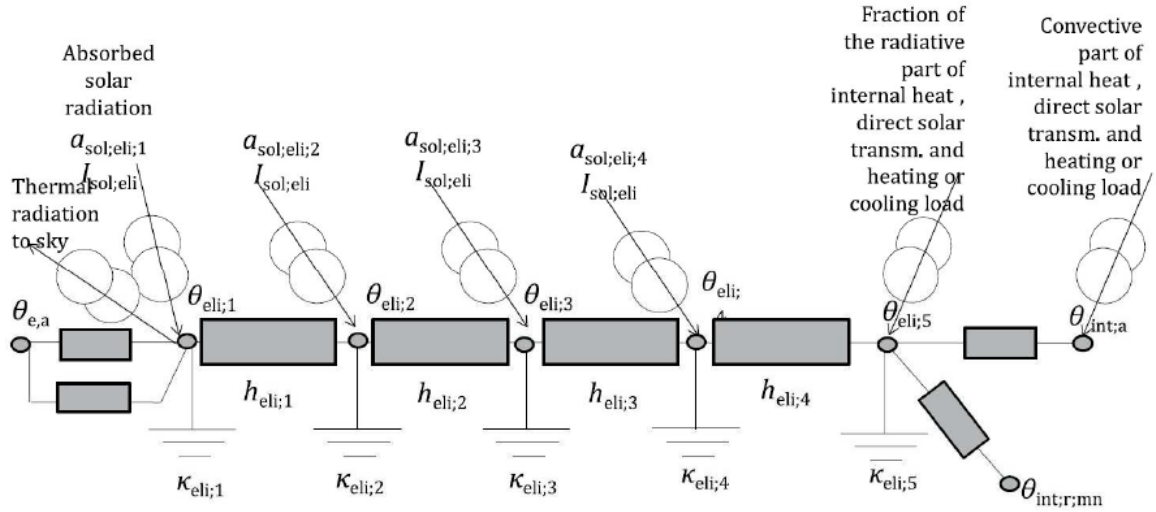


Figura 4. esempio di rete termica per il generico elemento dell'involucro edilizio (ISO/TR 52016-2)

Gli elementi opachi, così come quelli in contatto con il terreno, possono essere discretizzati con un massimo di cinque nodi termici (due superficiali e tre interni). Per porte e finestre si considerano invece unicamente i due nodi superficiali. Le temperature dei singoli nodi sono ottenute per ogni passo temporale risolvendo i bilanci di energia su ogni nodo di ogni componente. Nel seguito si riportano a titolo esemplificativo le equazioni di bilancio relative rispettivamente al generico nodo superficiale interno ($pli = pln = n$), al generico nodo centrale ($pli = 2, \dots, pln-1$) ed al generico nodo superficiale esterno ($pli = 1$).

Per $pli = pln$ (nodo superficiale interno):

$$\begin{aligned}
 & -\left(h_{pli-1;eli} \cdot \theta_{pli-1;eli;t} + \left[\frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ci;eli} + h_{ri;eli} \cdot \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}}\right) + h_{pli-1;eli}\right] \cdot \theta_{pli;eli;t}\right. \\
 & \left. - h_{ci;eli} \cdot \theta_{int,a;zt;t} - \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;eli} \cdot \theta_{pli;elk;t}\right)\right) \\
 & = \frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[\left(1-f_{int,c}\right) \cdot \Phi_{int;zt;t} + \left(1-f_{sol,c}\right) \cdot \Phi_{sol;zt;t} + \left(1-f_{H/C}\right) \cdot \Phi_{HC;zt;t}\right]
 \end{aligned} \quad (21)$$

dove: A_{elk} è l'area del generico componente edilizio elk considerato, espresso in m^2 ; A_{tot} è la somma delle aree A_{elk} di tutti gli elementi, espressa in m^2 ; $\theta_{pli;eli;t}$ è la temperatura del nodo pli , espressa in $^{\circ}C$; $\theta_{pli-1;eli;t}$ è la temperatura del nodo $pli-1$, espressa in $^{\circ}C$; $\theta_{int,a;zt;t}$ rappresenta la temperatura dell'aria interna, espressa in $^{\circ}C$; $h_{pli-1;eli}$ rappresenta la conduttanza tra il nodo pli ed il nodo $pli-1$, espressa in $W/(m^2 K)$; $k_{pli;eli}$ è la capacità termica del nodo pli , espressa in $J/(m^2 K)$; $h_{ci;eli}$ è il coefficiente di scambio termico convettivo interno, espresso in $W/(m^2 K)$; $h_{ri;eli}$ è il coefficiente di scambio termico radiativo interno, espresso in $W/(m^2 K)$; $\theta_{pli;eli;t-1}$ è la temperatura del nodo pli valutata all'intervallo di tempo precedente, espressa in $^{\circ}C$.

Per $pli = 2, \dots, pln-1$ (nodo interno):

$$-h_{pli-1;eli} \cdot \theta_{pli-1;eli;t} + \left[\frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{pli;eli} + h_{pli-1;eli}\right] \cdot \theta_{pli;eli;t} \cdot h_{pli;eli} \cdot \theta_{pli+1;eli;t} = \frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} \quad (22)$$

dove: $\theta_{pli+1;eli;t}$ è la temperatura del nodo $pli+1$, espressa in $^{\circ}C$; e $h_{pli;eli}$ è la conduttanza tra il nodo $pli+1$ ed il nodo pli , espressa in $W/(m^2 K)$.

Per $pli = 1$, (nodo superficiale esterno):

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ce;eli} + h_{re;eli} + h_{pli;eli} \right] \cdot \theta_{pli;eli;t} + h_{pli;eli} \cdot \theta_{pli+1;eli;t} \\
 &= \frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} + (h_{ce;eli} + h_{re;eli}) \cdot \theta_{e;t} \\
 &+ a_{sol;pli;eli} \cdot (I_{sol;dif;eli;t} + I_{sol;dir;eli;t} \cdot F_{sh;obst;eli;t}) - \Phi_{sky;eli;t}
 \end{aligned} \quad (23)$$

dove: $\theta_{e;t}$ è la temperatura dell'aria esterna, espressa in °C; $h_{ce;eli}$ è il coefficiente di scambio termico convettivo esterno, espresso in W/(m² K); $h_{re;eli}$ è il coefficiente di scambio termico radiativo esterno, espresso in W/(m² K); $a_{sol;eli}$ è il coefficiente di assorbimento solare della superficie esterna; $I_{sol;dir;tot;eli;t}$ e $I_{sol;dif;tot;eli;t}$ rappresentano rispettivamente la radiazione solare diretta e diffusa incidente sul generico componente, espresse in W/m²; $F_{sh;obst;eli;t}$ è il fattore di ombreggiamento dovuto ad ostacoli esterni; e $\Phi_{sky;eli;t}$ rappresenta l'extraflusso verso la volta celeste, espresso in W/m².

Le tre equazioni appena riportate vengono risolte, per ogni istante temporale e per ogni componente, insieme al bilancio di energia sulla generica zona termica presa in considerazione. Il bilancio sulla zona è espresso come:

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} + \sum_{eli=1}^{el} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli}) + \sum_{vei=1}^{ven} H_{ve;vei;t} + H_{tr;tb;ztc} \right] \cdot \theta_{int;a;ztc;t} - \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli} \cdot \theta_{pli;eli;t}) \\
 &= \frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} \cdot \theta_{int;a;ztc;t-1} + \sum_{vei=1}^{ven} (H_{ve;vei;t} \cdot \theta_{sup;vei;t}) + H_{tr;tb;ztc} \cdot \theta_{e;a;t} \\
 &+ f_{int,c} \cdot \Phi_{int;ztc;t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + f_{H/C,c} \cdot \Phi_{HC;ztc;t}
 \end{aligned} \quad (24)$$

dove: $C_{int;ztc}$ è la capacità termica interna alla zona, espressa in J/K; Δt è l'intervallo di tempo, espresso in secondi; $\theta_{int;a;ztc;t}$ è la temperatura dell'aria interna, espressa in °C; $\theta_{int;a;ztc;t-1}$ è la temperatura dell'aria interna valutata all'istante precedente, espressa in °C; A_{eli} è l'area del componente edilizio eli ; espressa in m²; $h_{ci;eli}$ è il coefficiente di scambio termico convettivo interno riferito all'elemento edilizio eli ; valutata in W/(m² K); $\theta_{pli;eli;t}$ è la temperatura superficiale interna del generico elemento edilizio eli , espressa in °C; $H_{ve;k;t}$ è il coefficiente di scambio termico per ventilazione, valutato nel caso del generico contributo k , espresso in W/K; $\theta_{sup;k;t}$ è la temperatura di ingresso nella zona del flusso d'aria k -esimo, espressa in °C; $\theta_{e;a;t}$ è la temperatura dell'aria esterna, espressa in °C; $H_{tr;tb;ztc}$ è il coefficiente di scambio termico dovuto ai ponti termici, espresso in W/K; $f_{int,c;ztc}$ è la frazione convettiva degli apporti interni; $f_{sol,c;ztc}$ è la frazione convettiva degli apporti solari; $f_{H/C,c;ztc}$ è la frazione convettiva dell'impianto di riscaldamento/raffrescamento; $\Phi_{int;ztc;t}$ rappresenta gli apporti termici interni totali, espressa in W; $\Phi_{sol;ztc;t}$ rappresenta il contributo degli apporti solari, espresso in W, ed infine $\Phi_{HC;ztc;t}$ è il carico termico per riscaldamento (se positivo) o per raffrescamento (se negativo), espresso in W.

3.2 Apporti termici solari

Con riferimento agli apporti solari, la UNI EN ISO 52016-1 tratta separatamente quelli relativi ai componenti opachi e quelli relativi ai componenti finestrati. Con riferimento ai componenti finestrati, per valutare l'apporto solare complessivo per la generica zona termica ($Q_{sol;ztc;t}$) viene adottata la seguente equazione:

$$\Phi_{sol,ztc,t} = \Phi_{sol,dir,ztc,t} + \sum_{ztu=1}^{ztun} \left[(1 - b_{ztu;m}) \cdot F_{ztc,ztu,m} \cdot \Phi_{sol,dir,ztu,t} \right] \quad (25)$$

dove: $\Phi_{sol;dir,ztc;ztu;t}$ rappresenta gli apporti solari della zona climatizzata o non climatizzata, espressi in W; $b_{ztu,m}$ è il coefficiente correttivo per le zone adiacenti non climatizzate (che verrà successivamente descritto); e $F_{ztc,ztu,m}$ è il fattore di distribuzione per gli apporti solari in zone non climatizzate per il mese m considerato. Con riferimento agli apporti solari diretti attraverso i componenti finestrati ($\Phi_{sol;dir,ztc;ztu;t}$), questi vengono valutati come segue:

$$\Phi_{sol,dir,ztc,t} = \sum_{wi=1}^{win} \left[g_{gl;wi,t} \cdot (I_{sol,dif;wi,t} + I_{sol,dir,wi,t} + F_{sh,obst,wi,t}) \cdot A_{wi} \cdot (1 - F_{fr,wi}) \right] \quad (26)$$

dove: $\Phi_{sol;dir,ztc;t}$ rappresenta la somma degli apporti solari nella zona ztc dovuti a tutti i componenti finestrati, all'istante t , espresso in W; $g_{gl,wi,t}$ è la trasmittanza solare del generico componente finestrato wi ; A_{wi} è l'area del generico componente finestrato wi ; $I_{sol;dir,tot;wi,t}$ è l'aliquota di radiazione solare diretta incidente sul generico componente finestrato wi ; $I_{sol;dif,tot;wi,t}$ è l'aliquota di radiazione solare diffusa incidente sul generico componente finestrato wi ; $F_{sh,obst;wi,t}$ rappresenta il fattore di riduzione dovuto agli aggetti esterni per il generico componente finestrato wi ; $F_{fr,wi}$ è il rapporto tra l'area della cornice del componente finestrato e quella dell'intero elemento.

Andando a considerare invece la radiazione incidente sui componenti opachi, questa viene inglobata, al pari dell'extraflusso, nell'equazione di bilancio del nodo superficiale esterno del generico elemento (si veda equazione 15). Nello specifico, con riferimento all'extraflusso verso la volta celeste ($\Phi_{sky;eli;t}$), questo è valutato, per ogni istante temporale t e per ogni componente dell'involucro edilizio come:

$$\Phi_{sky;eli;t} = F_{sky,eli} \cdot h_{re,eli} \cdot \Delta\theta_{sky,t} \quad (27)$$

dove: $\Phi_{sky;eli;t}$ rappresenta l'extraflusso verso la volta celeste, espresso in W/m²; $F_{sky,eli}$ è il fattore di vista tra il componente in esame e la volta celeste; $h_{re,eli}$ è il coefficiente di scambio termico radiativo tra il componente in esame e la volta celeste, espresso in W/(m² K); e $\Delta\theta_{sky,t}$ è la differenza tra la temperatura dell'aria esterna e quella della volta celeste, espressa in K.

3.3 Apporti termici interni

Per quanto concerne gli apporti termici interni ($\Phi_{int;ztc;t}$), questi sono calcolati per ogni istante temporale t ed ogni zona termica ztc come:

$$\Phi_{int,ztc,t} = \Phi_{int,dir,ztc,t} + \sum_{ztu=1}^{ztun} \left[(1 - b_{ztu,m}) \cdot F_{ztc;ztu,m} \cdot \Phi_{int,dir,ztu,t} \right] \quad (28)$$

dove: $\Phi_{int;dir,ztc;ztu;t}$ sono gli apporti termici per la zona climatizzata e per le zone adiacenti non climatizzate, espressi in W; e $F_{ztc,ztu,m}$ è il fattore di distribuzione degli apporti termici tra la zona adiacente non climatizzata e quella climatizzata per il mese m . Nello specifico, gli apporti termici interni sono valutati per ogni zona termica e per ogni intervallo temporale con la seguente formula:

$$\Phi_{int,dir,ztc,t} = (q_{int;oc;ztc,t} + q_{int;A,zt,t} + q_{int;L,zt,t} + q_{int;WA,zt,t} + q_{int,HVAC;ztc,t} + q_{int,proc,ztc,t}) \cdot A_{use,ztc} \quad (29)$$

dove: $q_{int;oc;ztc,t}$ è il flusso termico dovuto all'attività metabolica degli occupanti, espresso in W/m²; $q_{int;A,ztc,t}$ è il flusso termico dovuto ai macchinari, espresso in W/m²; $q_{int;L,ztc,t}$ è il flusso termico dovuto agli apparecchi illuminanti, espresso in W/m²; $q_{int;WA,ztc,t}$ rappresenta il flusso termico recuperabile da sistemi di acqua calda, corrente e sistemi fognari, espresso in W/m²; $q_{int,HVAC;ztc,t}$ è il flusso termico dovuto al calore recuperabile da

sistemi HVAC, espresso in W/m^2 ; $q_{int;proc;zt;c;t}$ è il calore recuperabile da processi, espresso in W/m^2 e $A_{use,zt;c}$ è l'area utile calpestabile della zona termica, espressa in m^2 .

3.4 Zonizzazione ed accoppiamento tra zone

Al fine di raggruppare i locali dell'edificio oggetto dell'analisi in opportune zone termiche, la UNI EN ISO 52016-1 propone una procedura in dieci passaggi, di seguito riportati.

- 1) Il primo passo da fare è quello di specificare la categoria di ogni ambiente costituente l'edificio oggetto dell'analisi (tale procedura viene svolta in ottemperanza a quanto riportato nella ISO 52000-1). Per semplicità alcuni locali non climatizzati possono essere accorpati ad altri climatizzati, a patto che questi ne assumano le medesime condizioni di calcolo. È fatto tuttavia obbligo di considerare come non climatizzati locali altamente ventilati o caratterizzati da una grande apertura verso l'ambiente esterno.
- 2) Come secondo step si provvede ad effettuare un primo raggruppamento considerando i locali con medesima categoria di utilizzo come appartenenti alla stessa zona termica. Per quanto concerne i locali non climatizzati, questi vengono trattati come mostrato nella procedura semplificata riportata nel prossimo paragrafo. Tuttavia, nel caso in cui la zona non climatizzata abbia una forte influenza sul calcolo è preferibile considerare quest'ultima come climatizzata allo stesso modo della zona climatizzata ad essa adiacente.
- 3) Nel caso in cui tra due locali adiacenti vi sia una grande apertura, questi vengono considerati come appartenenti alla medesima zona termica. La UNI EN ISO 52016-1 ammette tale procedura solo se la superficie dell'apertura è di almeno $0.003 m^2$ per ogni m^2 di superficie calpestabile.
- 4) Un'ulteriore divisione viene effettuata considerando le tipologie di servizi di ogni locale. Se due locali appartenenti fino al punto 3 alla medesima zona termica sono serviti da differenti tipologie di impianto, questi verranno divisi conseguentemente in due o più zone termiche.
- 5) È possibile raggruppare due locali climatizzati limitrofi, con diversa categoria d'uso, a patto che i set-point di temperatura e umidità, così come i periodi d'uso stagionale, settimanale e giornaliero siano simili. Nello specifico la UNI EN ISO 52016-1 assume come aventi condizioni termiche simili locali che: a) differiscono di massimo 4 K in termini di temperature di set-point estivo ed invernale e di massimo $0.2 kg_{H_2O}/kg_{aria}$ in termini di umidità specifica di set-point; b) Il periodo di funzionamento dell'impianto su base giornaliera non differisca per più di tre ore.
- 6) Un'ulteriore divisione delle zone termiche è possibile se è adottato un metodo di calcolo "system specific". In tal caso la divisione viene effettuata per garantire una certa omogeneità dei sistemi e dei sottosistemi in una data zona termica.
- 7) Altro criterio per effettuare la suddivisione in zone termiche è quella del bilancio termico tra gli ambienti. Nello specifico una zona termica deve essere divisa se tra due sue parti: a) vi è una differenza in termini di apporti termici interni medi su base mensile maggiore di un fattore pari a tre. Tale criterio non è applicabile se il carico interno medio è minore di $15 W/m^2$; b) vi è una differenza in termini di apporti termici interni e solari medi su base mensile (nel caso di un mese estivo rappresentativo) maggiore di un fattore pari a tre. Tale criterio non è applicabile se il carico interno medio è minore di $30 W/m^2$; c) la capacità termica della sua struttura differisce per più di due classi (che vengono tabellate nella medesima normativa in funzione della capacità termica areica).
- 8) Zone termiche non climatizzate tra di loro adiacenti possono essere raggruppate in un'unica zona termica non climatizzata.

A questo punto la normativa propone, a valle della procedura fin qui riportata, altri due punti semplificativi per raggruppare (o ri-raggruppare) diversi locali o zone termiche.

- 1) Una zona termica può essere unita ad un'altra adiacente se, pur essendo caratterizzata da condizione d'uso differenti (punto 5) o differenti proprietà di bilancio termico (punto 7), risulta avere la medesima combinazione di servizi (punto 4). Tale unione può avvenire solo se il locale considerato ha una superficie minore del 5% dell'area utile totale dell'edificio oggetto di studio.

- 2) Nel caso in cui vi siano differenti servizi, un locale può essere unito ad un altro adiacente solo se la sua superficie calpestabile è minore dell'1% di quella totale dell'edificio.

3.5 Zone adiacenti non climatizzate

Nella UNI EN ISO 52016-1 sono definite due tipi di zone adiacenti non climatizzate: zona adiacente non climatizzata esterna (*ztue*) e zona adiacente non climatizzata interna (*ztui*). Nel caso della zona adiacente non climatizzata esterna (Figura 5, a), quest'ultima viene considerata esterna alla zona climatizzata. Ciò implica che la superficie di scambio termico adoperata per la valutazione delle dispersioni/rientranze sarà la partizione interposta tra il locale climatizzato e quello non climatizzato. Al contrario, nel caso di zona termica non climatizzata interna (Figura 5, b), questa viene considerata come inclusa nella zona termica climatizzata oggetto del calcolo. Come conseguenza, la superficie di scambio termico da adottare nel calcolo sarà quella di separazione tra la zona termica non climatizzata e l'ambiente esterno.

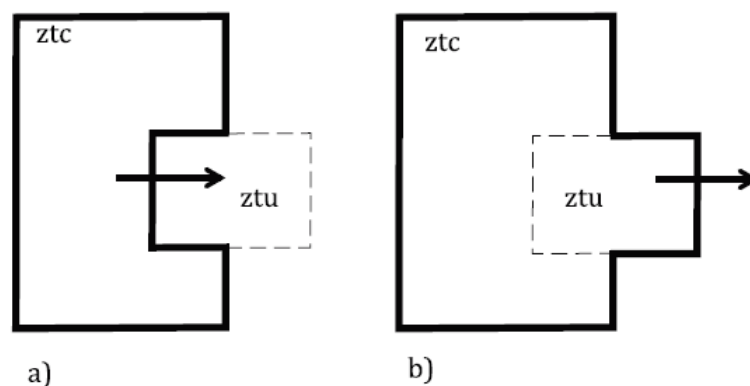


Figura 5. Zona termica non climatizzata esterna (a); zona termica non climatizzata interna (b)

La normativa suggerisce, come approccio standard, di considerare il locale adiacente non climatizzato come esterno al locale oggetto del calcolo (Figura 5, a). La possibilità di considerare il locale adiacente non climatizzato come interno (Figura 5, b) è suggerita solo nel caso in cui sussistano le seguenti condizioni: a) le proprietà termiche e la geometria dell'involucro esterno possono essere determinate con maggiore accuratezza rispetto a quelle delle partizioni interne; b) gli apporti termici interni e solari della zona non climatizzata risultano trascurabili.

Al fine di valutare le dispersioni/rientrate di calore dovute all'interazione della zona climatizzata oggetto di esame con quella adiacente non climatizzata, la norma prevede due procedure di calcolo differenti a seconda che questa venga considerata esterna o interna. In questo paragrafo si farà riferimento unicamente al caso in cui la zona adiacente non climatizzata sia considerata come esterna essendo questo caso l'unico recepito dal normatore italiano. Nello specifico, la metodologia presentata nella UNI EN ISO 52016-1 prevede l'utilizzo di un fattore correttivo così valutato:

$$b_{ztu;m} = \frac{H_{ztu;e;m}}{H_{ztu;tot;m}} \quad (30)$$

dove: $H_{ztu;e;m}$ rappresenta il coefficiente di trasmissione termica tra la zona termica non climatizzata *ztu* e l'ambiente esterno, nel caso del mese *m*, espresso in W/K; e $H_{ztu;tot;m}$ rappresenta la somma del coefficiente di trasmissione termica $H_{ztu;e;m}$ e di quello tra la zona termica climatizzata e quella non climatizzata, espresso in W/K. Il fattore di correzione così ottenuto viene adottato per ottenere la temperatura dell'aria interna della zona termica non climatizzata da utilizzare per il calcolo delle interazioni con quella climatizzata.

3.6 Ventilazione

Per quanto concerne la ventilazione, la UNI EN ISO 52016-1 definisce un coefficiente di scambio termico ($H_{VE,k;t}$) ad essa associato. Nello specifico, per ogni contributo k -esimo e per ogni intervallo di tempo t , questo può essere ottenuto (in W/K) mediante la seguente formula:

$$H_{VE,k;t} = \rho_a \cdot c_a \cdot q_{V,k;t} \quad (31)$$

dove: $\rho_a \cdot c_a$ è la capacità termica per volume di aria, espressa in J/(m³ K); e $q_{V,k;t}$ rappresenta la portata d'aria in ingresso all'ambiente con riferimento al contributo k -esimo, espressa in m³/s. Nell'eventualità di infiltrazione d'aria da uno spazio adiacente non climatizzato, l'equazione è così modificata:

$$H_{VE,k;t} = b_{ztu;m} \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot q_{V,k;t} \quad (32)$$

dove: $b_{ztu;m}$ è il fattore correttivo precedentemente descritto.

3.7 Umidificazione e deumidificazione

La UNI EN ISO 52016-1 implementa il calcolo del carico termico latente per umidificazione e deumidificazione come di seguito descritto. Nello specifico, in relazione alla zona termica ztc in esame e al determinato istante di tempo t , la portata di vapore acqueo da fornire per soddisfare il minimo valore di set-point dell'umidità ($G_{HU;ld;ztc;t}$, espressa in kg/s) e la portata di vapore acqueo da sottrarre per soddisfare il massimo valore di set-point dell'umidità ($G_{DHU;ld;ztc;t}$, espressa in kg/s) sono valutate attraverso le due seguenti equazioni:

$$G_{HU;ld;ztc;t} = \sum_K \left[\rho_a \cdot q_{V,k;t} \cdot (x_{set;min;ztc;t} - x_{a;sup;k;t}) \right] - G_{int;ztc;t} + G_{abs;ztc;t} + \frac{\rho_a \cdot V_{int;a;ztc}}{\Delta t} \cdot (x_{set;min;ztc;t} - x_{int;a;ztc,t-1}) \quad (33)$$

$$G_{DHU;ld;ztc;t} = \sum_K \left[\rho_a \cdot q_{V,k;t} \cdot (x_{a;sup;k;t} - x_{set;max;ztc;t}) \right] + G_{int;ztc;t} - G_{abs;ztc;t} + \frac{\rho_a \cdot V_{int;a;ztc}}{\Delta t} \cdot (x_{set;max;ztc;t} - x_{int;a;ztc,t-1}) \quad (34)$$

Dove: ρ_a rappresenta la densità dell'aria, espressa in kg/m³; $q_{V,k;t}$ rappresenta la portata di aria in ingresso alla zona termica da qualsiasi fonte; espressa in m³/s; $x_{set;min;ztc;t}$ e $x_{set;max;ztc;t}$ rappresentano il minimo ed il massimo valore ammissibile di umidità specifica interna, espressi in kg_{H2O}/kg_{aria}; $x_{a;sup;k;t}$ è il contenuto di umidità specifica delle portate d'aria in ingresso alla zona termica, espresso in kg_{H2O}/kg_{aria}; $G_{int;ztc;t}$ rappresenta la produzione di vapore acqueo che avviene nella zona termica, espresso in kg/s; $G_{abs;ztc;t}$ rappresenta la quantità di vapore acqueo assorbito o rilasciato dai materiali presenti nella zona termica, espresso in kg/s; $V_{int;a;ztc}$ è il volume dell'aria contenuta all'interno della zona termica, espressa in m³; $x_{int;a;ztc,t-1}$ è il contenuto di vapore acqueo della zona termica all'istante precedente, espresso in kg_{H2O}/kg_{aria} ed infine Δt rappresenta la lunghezza dell'intervallo temporale, espressa in secondi.

Una volta nota la quantità di vapore acqueo da immettere o estrarre dalla zona termica, è possibile ricavare nell'intervallo di tempo t il carico termico latente per umidificazione ($\Phi_{HU;ld;ztc;t}$ espresso in W) e quello per deumidificazione ($\Phi_{DHU;ld;ztc;t}$ espresso in W), mediante le due seguenti formule:

$$\Phi_{HU;ld;ztc;t} = h_{we} \cdot G_{HU;ld;ztc;t} \quad (35)$$

$$\Phi_{DHU;ld;ztc;t} = h_{we} \cdot G_{DHU;ld;ztc;t} \quad (36)$$

dove h_{we} è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua (espresso in J/kg).

4 Strumenti per il calcolo dinamico del fabbisogno energetico degli edifici

L'utilizzo di codici di simulazione basati su metodi dinamici è necessaria alla progettazione e alla diagnosi energetica degli edifici di nuova generazione (NZEB), anche caratterizzati da livelli elevati di benessere degli occupanti. L'obiettivo finale dei moderni codici per l'analisi delle prestazioni energetiche degli edifici è quello di supportare tale transizione attraverso una valutazione affidabile dei fenomeni dinamici e non lineari da cui dipende la prestazione energetica [11].

Per la progettazione di edifici di nuova generazione è spesso richiesto e raccomandato lo sviluppo ed impiego di opportuni codici di simulazione energetica dinamici [11, 27-29], anche utilizzati per l'implementazione di strategie innovative per il controllo dei parametri termo-fisici e non da cui dipende il benessere degli occupanti [20, 30]. Nonostante l'ampio numero di nuovi codici disponibili e l'adozione sempre più ampia di tali strumenti, la simulazione energetica del sistema edificio-impianto è ancora oggi un processo complicato che richiede buone capacità di modellazione e analisi rispettivamente per le fasi di sviluppo ed utilizzo.

In commercio sono disponibili numerosi software, soprattutto utilizzati nell'ambito della ricerca scientifica, grazie alla quale si è assistito, negli ultimi anni, ad un notevole incremento di codici sviluppati *in-house*. Questi sono opportunamente realizzati per la modellazione e simulazione dinamica delle prestazioni energetiche di nuove o specifiche tecnologie integrate negli edifici. Dettagli sui software disponibili sul mercato ed indicazioni sui codici *in-house* sono riportati di seguito.

4.1 Software disponibili in commercio

Negli ultimi 50 anni, sono stati sviluppati, potenziati ed utilizzati centinaia di modelli matematici per l'analisi dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici. Tali modelli sono spesso implementati in appositi programmi informatici di simulazione, che forniscono agli utenti gli indicatori chiave in termini di prestazione energetica dell'edificio, tali parametri sono ad esempio il fabbisogno di riscaldamento/raffrescamento ed il relativo consumo di energia primaria, le temperature del sistema ed i relativi costi d'esercizio [31].

In Tabella 3 sono riportati i principali tool commerciali (in ordine alfabetico) per la simulazione energetica del sistema edificio impianto e le relative caratteristiche principali. In generale, oltre che per la metodologia di calcolo, questi software differiscono per l'interfaccia grafica di input/output nonché per i database relativi ai possibili diversi materiali da costruzione e impianti termici a servizio dell'edificio.

Tabella 3. Codici di simulazione dinamica (BEPS)

Software	Caratteristiche
BLAST www.bso.uiuc.edu/BLAST	Strumento completo per la simulazione dei consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento degli edifici. BLAST include 3 principali sottoprogrammi: <i>space loads prediction</i> , <i>air system simulation</i> , e <i>central plant</i> . Il primo tool calcola i carichi spaziali orari attraverso i dati meteorologici orari ed i dettagli di costruzione e di funzionamento dell'edificio, utilizzando il bilancio energetico. Le funzioni BLAST sono disponibili in EnergyPlus™.
BSim http://sbi.dk/en/bsim	Tool informatico per l'analisi del sistema edificio-impianto. Le simulazioni, impostate attraverso un'interfaccia user-friendly, sono dettagliate e combinano il calcolo del comportamento termo-igrometrico dell'edificio, del consumo di energia, delle condizioni di daylighting, etc.. Il software è sviluppato dal Danish Building Research Institute.
Design Builder https://www.designbuilder.co.uk	Il tool utilizza il motore basato su EnergyPlus™ per valutare l'efficienza energetica dell'edificio e del sistema HVAC, il benessere degli occupanti e l'impatto ambientale. Possono essere modellati e simulati, quindi, l'involucro edilizio, l'impianto HVAC, il daylighting, e i flussi d'aria.
DeST http://www.dest.com.cn	Il codice, sviluppato dall'Università Tsinghua (Cina) comprende 5 principali strumenti di simulazione: <i>building thermal process</i> , <i>system scheme analysis</i> , <i>AHU system analysis</i> , <i>duct/pipe networks</i> , e <i>plant analysis</i> . Il software permette la valutazione dettagliata delle prestazioni energetiche dell'edificio e del sistema HVAC. Il tool include una serie di moduli per la gestione di: dati

	meteorologici (<i>Medpha</i>), ventilazione naturale (<i>VentPlus</i>), ombreggiatura esterna (<i>Bshadow</i>), illuminazione (<i>Lighting</i>) e interfaccia CAD (<i>CABD</i>). L'intervallo di simulazione è orario.
DOE-2 http://doe2.com/	Programma per l'analisi energetica ed economica dell'edificio e degli impianti. Tramite un'opportuna descrizione della configurazione del sistema, è possibile effettuare una simulazione delle prestazioni dell'edificio utilizzando un intervallo di simulazione orario. Il tool è stato ampiamente utilizzato per oltre venticinque anni negli Stati Uniti e nel mondo per lo sviluppo di analisi di fattibilità, per la progettazione degli edifici, e la definizione e il test di standard energetici nell'edilizia.
Ecotect® http://ecotect.com/	Il software è uno strumento di progettazione e analisi architettonica che collega un modellatore 3D avanzato con una vasta gamma di funzioni per l'analisi delle prestazioni termiche, energetiche, economiche, nonché di illuminamento e ombreggiamento, etc.. Possono essere eseguite analisi CFD ed effettuate animazioni in tempo reale della radiazione solare sull'edificio.
EnergyPlus™ https://energyplus.net/	È un codice modulare e strutturato basato sulle funzionalità di BLAST e DOE-2.1E. Il motore di simulazione richiede input e output con file di testo. Sono simulati, con time step variabile, il fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento, la risposta dell'impianto e il consumo elettrico. Possono essere modellati differenti sistemi di controllo, il rilascio e l'assorbimento dell'umidità da parte degli elementi dell'edificio, differenti sistemi di riscaldamento e raffreddamento e flussi d'aria interzona.
ENER-WIN http://pages.suddenlink.net/enerwin/	Tool di simulazione orario basato su Windows per la valutazione delle prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto. Lo strumento di calcolo produce dati su: consumo energetico annuale e mensile, fabbisogni energetici, carichi di riscaldamento e raffreddamento, guadagno solare attraverso i vetri, livello di illuminamento naturale. Inoltre, il tool effettua l'analisi dei costi e del ciclo di vita.
eQUEST http://doe2.com/equest/	Tool con implementazione interattiva Windows di DOE-2 con procedure guidate e schermate grafiche aggiuntive (per facilitarne l'uso), concepito per consentire analisi comparative dettagliate, effettuate su differenti soluzioni per l'involucro e per le tecnologie per l'efficienza energetica. Il tool permette analisi energetiche, di comfort visivo ed economiche, nonché la scelta di opportune misure per l'efficienza energetica (selezionate tra quelle implementate in un apposito database).
ESP-r http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm	Lo strumento di modellazione è gratuito e open source, e permette lo sviluppo di simulazioni dinamiche termiche ed energetiche per le zone termiche considerate. L'approccio implementato (<i>simulation follows description</i>) usa più solutori attivati man mano che l'analisi del sistema evolve. I bilanci di energia, relativi a ciascuna zona e superficie del sistema, sono espliciti.
HEED http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/heed/	Strumento per l'analisi energetica sviluppato dall'University of California Los Angeles per valutare del risparmio energetico, economico e ambientale di diverse opzioni progettuali dell'edificio. Il tool è concepito per la progettazione preliminare dell'edificio. Gli output (grafici 3D) possono essere utili per il confronto delle prestazioni del sistema considerato con l'edificio di riferimento.
IDA ICE http://www.equa.se/en/ida-ice	Tool di simulazione dinamica multi-zona per l'analisi energetica del sistema edificio-impianto, anche utile per il calcolo del comfort ottimale degli occupanti. Si interfaccia bene file di importazione BIM, fornisce una GUI 3D, utilizza una modellazione basata su equazioni modificabili anche per consentire la ricerca e lo sviluppo di tecnologie e sistemi innovativi.
IES Virtual Environment http://www.iesve.com/	Strumento per analisi dinamiche delle prestazioni energetiche dell'edificio con motore Apache, finalizzato allo studio di soluzioni passive, tecnologie a basso impatto ambientale, applicazioni con fonti rinnovabili, e misure per il comfort degli occupanti. Il tool presenta una buona interoperabilità con il BIM.
SUNREL® http://www.nrel.gov/buildings/s	Programma per la simulazione oraria finalizzata alla progettazione di piccoli edifici ad alta efficienza energetica. È concepito attraverso un algoritmo nodale

unrel.html	multi-zona semplificato che può essere utilizzato per valutare le infiltrazioni d'aria e la ventilazione naturale. Possono essere simulate portate fisse programmabili di aria tra le zone o tra l'ambiente esterno e la zona termica considerata. Il tool implementa modelli ideali per i sistemi HVAC.
TAS http://www.edsl.net/main/	È un tool per simulazioni dinamiche anche di edifici grandi e complessi, finalizzato al calcolo dei consumi di energia, delle emissioni di CO ₂ , dei costi d'esercizio e del comfort degli occupanti. All'analisi termica della struttura è associata quella della ventilazione naturale, includendo funzioni di controllo avanzate sull'apertura delle finestre.
TRNSYS® http://www.trnsys.com/	Strumento per la simulazione dinamica di sistemi energetici. L'interfaccia grafica della piattaforma (TRNSYS Simulation Studio) permette di accedere all'interfaccia dedicata al motore di calcolo relativo all'edificio (TRNBuild, Type 56), basato sul metodo delle funzioni di trasferimento. Il motore di calcolo risolve un sistema di equazioni algebriche e differenziali che caratterizzano il comportamento dell'intero sistema edificio-impianto. Dalla versione 17, è possibile implementare il modello 3D dell'edificio attraverso il plug-in SketchUp, e trattare la radiazione entrante in modo dettagliato.

4.2 Codici di simulazione sviluppati in-house

Sebbene i software BEPS siano utilizzati da decenni, solo di recente, grazie all'incremento delle capacità di calcolo dei moderni calcolatori ed alla conseguente riduzione dei tempi computazionali, sono stati potenziati diventando sempre più sofisticati [32]. Oggigiorno, essi si pongono come strumento imprescindibile per simulare i benefici offerti, in termini di efficienza energetica, da tecnologie innovative nel campo dell'edilizia [33]. Infatti, nonostante la disponibilità di strumenti BEPS commerciali (caratterizzati da un elevato grado di flessibilità ed interfacce grafiche di facile utilizzo), lo sviluppo di codici aggiornati e di nuovi modelli di simulazione è diventato sempre più comune, anche al fine di supportare l'implementazione di nuove misure di efficienza energetica (ad esempio [11, 27, 28]). L'uso dei codici di simulazione dinamica nel processo di progettazione degli edifici è altamente raccomandato, come già sottolineato, soprattutto per la progettazione di edifici di nuova generazione che richiedono l'integrazione adeguata di diverse caratteristiche e/o materiali innovativi e misure di efficienza energetica (es: materiali a cambiamento di fase, attivati termicamente sistemi, strategie passive, tecnologie integrate, ecc.). A tal fine, in letteratura sono disponibili opportuni algoritmi numerici e analitici in modelli di calcolo appositamente realizzati per lo sviluppo di analisi dedicate allo studio sia di specifici fenomeni relativi alla termofisica dell'edificio, che di particolari tecnologie integrate nell'involucro edilizio e negli edifici [34-36].

Tra le tecniche di calcolo più usate per lo sviluppo di codici, cosiddetti *in-house*, vi è l'approccio della rete termica, basata sull'ipotesi di flusso monodimensionale (trascurando lo scambio termico bidimensionale caratteristico, ad esempio, dei ponti termici [37, 38]).

L'analogia elettrica (Rete Termica o Thermal Network), alla base del metodo FDM, è stata introdotta negli anni '80 al fine di semplificare drasticamente la trattazione matematica del problema della trasmissione del calore attraverso la linearizzazione dell'equazione della conduzione termica, riducendo significativamente i tempi computazionali. I modelli di rete termica (anche noti come modelli a parametri concentrati) sono largamente utilizzati poiché permettono di trattare la dipendenza spaziale attraverso la distribuzione di resistenze e capacità (rete RC) in diversi punti del dominio termico di interesse (es: parete, edificio) [26], al fine di riuscire a stimare il profilo termico del sistema modellato e sviluppare strategie innovative di controllo della temperatura ignorando le non linearità.

In tale contesto si inserisce la norma UNI EN 13790:2008, "Prestazione energetica degli edifici: Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento ed i raffrescamento", che suggeriva una metodologia di calcolo semplificata basata sull'utilizzo di una rete termica con 5 resistenze ed 1 capacità (i.e. R5C1) in cui è concentrata tutta la massa della zona termica (calcolata sommando le capacità termiche di tutti gli elementi edilizi a contatto diretto con l'aria interna della zona in esame). I modelli cosiddetti *lumped* permettono di

ridurre il numero di equazioni da risolvere, con la conseguente semplificazione del modello e la diminuzione dei tempi di calcolo [39]. Tuttavia, più fedele è la distribuzione delle resistenze e delle capacità (parametri distribuiti) migliore è, in linea generale, l'accuratezza del calcolo. Un esempio di rete termica equivalente per una parete discretizzata con un numero di nodi elevato è riportato in [Figura 6](#).

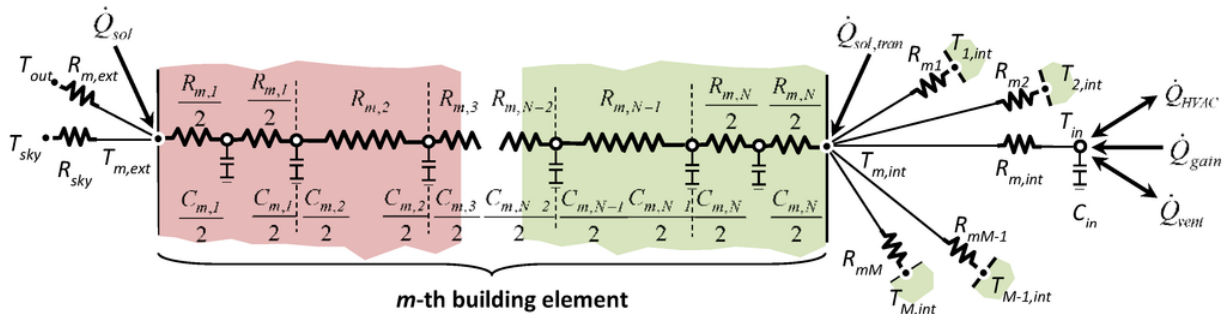


Figura 6. Schema di una rete termica equivalente relativa ad una parete discretizzata in N nodi [40]

Reti termiche RC a parametri distribuiti consentono di ricavare i profili temporali delle temperature delle superfici della zona termica di interesse, necessari ad esempio per le analisi di comfort e per simulare correttamente la variazione delle condizioni termiche negli edifici [41]. Per questo motivo, lo sviluppo di algoritmi / modelli matematici dettagliati basati sull'approccio della rete termica sono diventati sempre più diffusi ed utilizzati dalla comunità scientifica per predire il comportamento termodinamico della zona termica e dell'edificio, al fine di stimare le prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto [42-45]. Tipicamente, per sviluppare strumenti semplici attraverso tale approccio, sono modellati solo determinati fenomeni termo-fisici, tenendo in considerazione solo alcuni aspetti, tra i più significativi, che si verificano nel comportamento termico dinamico dell'edificio [46, 47]. Come già riportato precedentemente, al fine di simulare le interazioni dinamiche dell'edificio entro un ragionevole tempo di calcolo, sono spesso impiegati approcci di modellazione mono-dimensionale [48, 49]. Un interessante studio sui vantaggi e gli svantaggi di tali modelli è riportato nei riferimenti bibliografici [20, 50, 51]. Inoltre, va notato che in letteratura sono spesso utilizzati metodi ibridi basati sull'accoppiamento di più approcci [32, 52].

4.2.1 Modelli a parametri concentrati

I modelli a parametri concentrati utilizzano l'analogia elettrica per schematizzare i fenomeni di trasmissione ed accumulo del calore, raggruppando più masse termiche in un singolo nodo [53-57]. Come precedentemente descritto, attraverso la rete termica, su ogni nodo è effettuato il bilancio di energia [58], che può essere applicato a diversi volumi di controllo, scelti in base all'accuratezza richiesta o alla finalità dell'indagine [59]. Le ipotesi più comuni alla base dei modelli a parametri concentrati sono:

- ciascun nodo rappresenta un volume finito sufficientemente piccolo (cioè una porzione di un corpo solido o un volume liquido / gas) da considerare a temperatura uniforme;
- l'aria è considerata perfettamente trasparente alle radiazioni elettromagnetiche, non risultando coinvolta nello scambio termico radiativo;
- le capacità termiche e le conduttività termiche sono invarianti nel tempo e indipendenti dalla temperatura e dall'umidità;
- i coefficienti di scambio termico convettivo e radiativo sono costanti.

Ulteriori ipotesi semplificative sono specifiche di ogni modello e la loro validità deve essere valutata per ogni specifico caso. Alcuni modelli disponibili in letteratura semplificano la conduzione attraverso i vari elementi dell'edificio, aggregando tutte le masse termiche in un singolo nodo della rete termica. In tal modo, rinunciando ad un elevato grado di dettaglio e, conseguentemente, riducendo il grado di precisione del calcolo, sono ridotti gli oneri computazionali dovuti alla risoluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali [60]. Inoltre, i modelli a parametri concentrati permettono di ottenere risultati abbastanza affidabili

rispetto agli strumenti più dettagliati, necessitando solo di pochi dati di input per eseguire una simulazione. Tali strumenti sono utili per effettuare stime nelle fasi preliminari di progettazione, in quanto in questa fase vengono fornite stime approssimative dei consumi di energia in riscaldamento e raffrescamento.

Nel lavoro riportato nella citazione [61] è presentato un modello a parametri concentrati basato su una rete termica semplificata in cui sono presenti solo 2 capacità: una per la massa delle strutture che compongono l'involucro edilizio, l'altra per il volume d'aria in esso contenuto, i.e. modello 3R2C. Il modello è sviluppato in ambiente MatLab ed è implementato nel software BuildingCalc. Il nodo aria ambiente scambia calore per convezione con le superfici interne, mentre riceve calore dalla radiazione solare trasmessa dalle superfici vetrate e dai carichi interni. Le capacità termiche di tutti gli elementi, come detto precedentemente, sono raggruppate in un'unica capacità termica. In aggiunta, sul nodo della temperatura superficiale incide anche il calore assorbito dalla radiazione solare (trasmessa attraverso le superfici vetrate ed incidente sulle superfici interne). La rete termica equivalente che schematizza tale modello è rappresentata in [Figura 7](#).

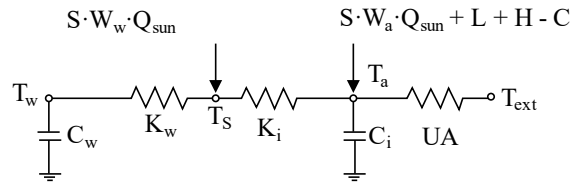


Figura 7. Rete termica basata su due capacità termiche [61]

Il modello sviluppato si basa su un sistema composto da due equazioni differenziali (sui nodi aria e pareti) ed un'equazione algebrica per le superfici interne. Il sistema di equazioni implementato nel modello è riportato di seguito [61]:

$$\begin{aligned} C_i \frac{dT_a}{dt} &= UA \cdot (T_{ext} - T_a) + K_i \cdot (T_s - T_a) + S \cdot v_a \cdot \dot{Q}_{sun} + L + H - C \\ C_w \frac{dT_w}{dt} &= K_w \cdot (T_s - T_w) \\ 0 &= K_w \cdot (T_w - T_s) + K_i \cdot (T_a - T_s) + S \cdot v_a \cdot \dot{Q}_{sun} \end{aligned} \quad (1)$$

dove T_{ext} è la temperatura dell'aria esterna, T_a è la temperatura dell'aria interna, T_s è la temperatura delle superfici interne, T_w è la temperatura della massa termica, C_i è la capacità termica interna, C_{ext} è la capacità termica effettiva delle strutture che compongono l'involucro, K_w è la conduttanza tra capacità termica dell'involucro e le superfici interne, K_i è la conduttanza tra superfici interne e aria interna, UA è la conduttanza verso l'ambiente esterno, $\dot{Q}_{sun}$ è l'energia solare trasmessa, S è il fattore di ombreggiatura dal dispositivo di ombreggiatura variabile, L sono i carichi interni, H è il carico di riscaldamento, C è il carico di raffrescamento e t è il tempo.

Altro esempio di modello a parametri concentrati è introdotto nella citazione [62]. Tale modello è stato realizzato con l'obiettivo di valutare i flussi energetici e di materia per un distretto urbano al fine di valutarne le prestazioni energetiche e di impatto ambientale. In questo caso, l'intero edificio è schematizzato da 2 nodi capacitivi per (uno relativo alla massa dell'involucro edilizio e uno relativo alla massa di aria da riscaldare/raffrescare opportunamente maggiorata per contemplare gli effetti inerziali degli arredi) e da 3 resistenze termiche, i.e. modello 3R2C di [Figura 7](#). Oltre a questi due nodi, l'aggiunta di un terzo nodo (T_{os}), tra il nodo temperatura esterna e quello della temperatura interna, permette di considerare lo scambio termico radiativo tra l'ambiente esterno e la superficie esterna dell'edificio. Il legame tra T_{os} ed il nodo della temperatura dell'aria esterna è espresso mediante la conduttanza globale (conduttiva e convettiva) K_e . Infine, sono state considerate le pareti esterne multistrato con una capacità totale C_w , distinguendo tre le capacità leggere (C_i) e pesanti (C_w). In [Figura 8](#), è rappresentata la rete termica finale.

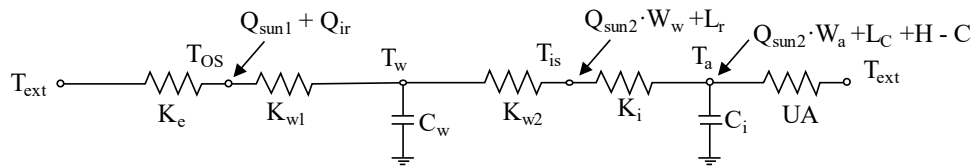


Figura 8. Rete termica dello studio [62]

Allo stesso modo, nella citazione [63] viene presentato un ulteriore modello semplificato, basato su una rete termica composta da 5 resistenze in serie (1 per la zona interna, 3 per la zona centrale ed 1 per la zona esterna) e 2 capacità termiche (zona interna e zona esterna), i.e. 6R1C. La schematizzazione proposta in [63] è rappresentata in Figura 9.

Infine, nella citazione [64] è presentato un modello a parametri concentrati basato su una rete termica composta da 6 resistenze ed 1 capacità (6R1C). Il modello è utilizzato per calcolare il consumo di energia per il riscaldamento degli edifici ad uso residenziali e non residenziali. Tale modello, rispetto a quelli presentati precedentemente [61-63], include i termini dovute all'infiltrazione e limita le potenze termiche fornite dall'impianto (relative alle taglie dei sistemi di riscaldamento). Con l'obiettivo di affinare i modelli presentati precedentemente e valutare, con un certo grado di accuratezza, le temperature ed i valori di potenza termica richiesta in riscaldamento e raffreddamento, gli autori hanno proposto un modello basato su 8 resistenze termiche e 2 capacità (8R2C), aggiungendo due resistenze ($R_{tr,apk}$ ed $R_{tr,sm}$) ed una capacità (C_{apk}) tra la temperatura dell'aria interna ed il nodo a cui viene fornita energia termica (Figura 10). Il parametro C_{apk} rappresenta la capacità termica del sistema di riscaldamento dell'edificio. La resistenza $R_{tr,apk}$ rappresenta la velocità di trasferimento del calore tra i radiatori ed il nodo aria, mentre la resistenza $R_{tr,sm}$ rappresenta il trasferimento di energia termica nello scambiatore di calore situato nella sottostazione di riscaldamento dell'edificio. Questi componenti simulano il comportamento del sistema di riscaldamento (di tipo idronico) al fine di migliorare il modello 6R1C.

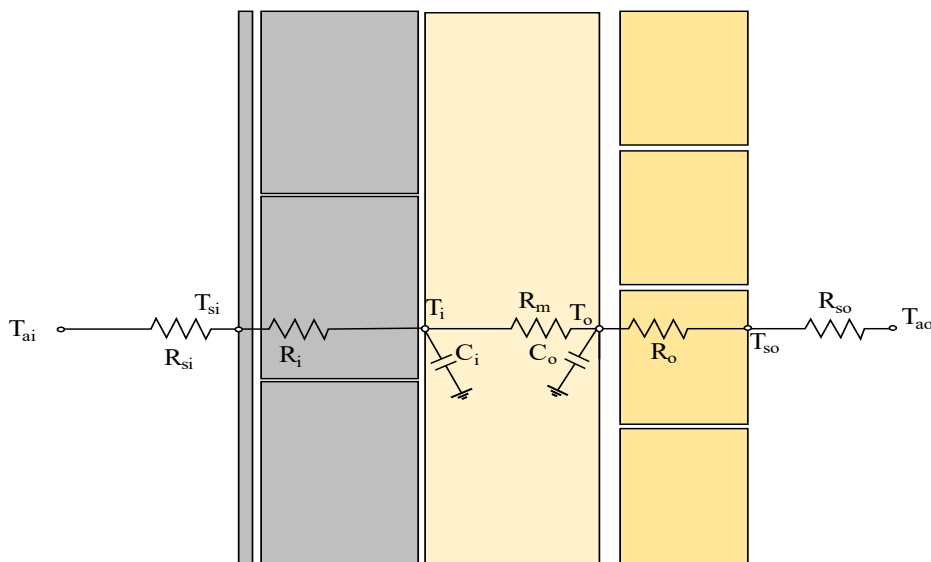


Figura 9. Rete termica che caratterizza il modello proposto in [63]

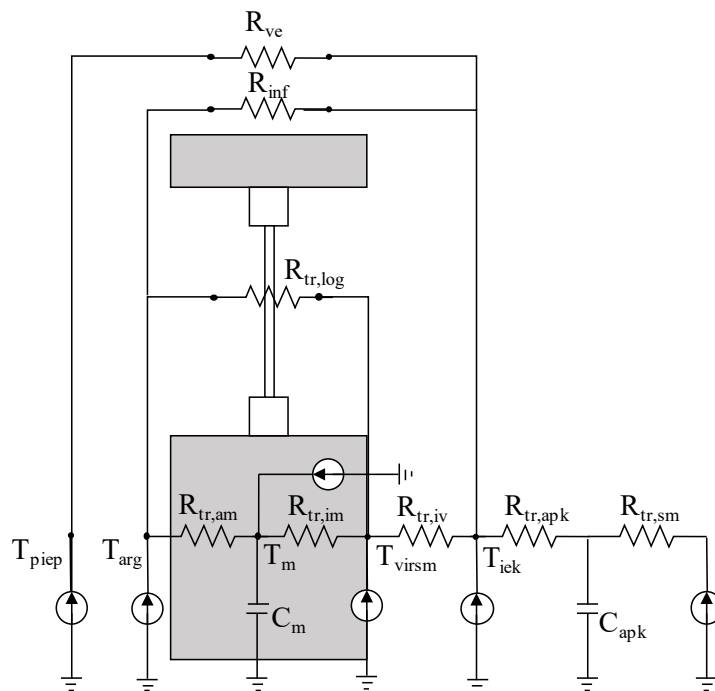


Figura 10. Rete termica modificata 8R2C [64]

Va sottolineato che tali approcci di simulazione, per quanto affidabili nello stimare le prestazioni energetiche degli edifici, non consentono di ottenere dettagli sulle temperature delle superfici interne. Tali valori sono necessari per stimare il comfort e per simulare le frequenti variazioni delle condizioni termiche che si verificano negli edifici [36]. Tuttavia, nello sviluppo di modelli dinamici, è necessario un compromesso tra l'adozione di modelli semplificati e modelli caratterizzati da un numero troppo elevato di nodi. Per questo motivo, sempre più spesso negli ultimi anni si è assistito allo sviluppo di codici in-house realizzati con elevati numeri di nodi, di seguito introdotti.

4.2.2 Modelli a parametri distribuiti

Al fine di migliorare l'affidabilità del calcolo della trasmissione del calore attraverso l'involucro edilizio, e allo stesso tempo di considerare opportunamente gli effetti delle caratteristiche termofisiche dei componenti dello stesso (costituiti da diversi materiali in mutuo contatto sia strutturali che isolanti), sono sempre più spesso utilizzate reti RC a parametri distribuiti. Tali modelli possono essere facilmente adattati anche allo studio di nuovi materiali e tecnologie (relative all'involucro e agli impianti), e per l'efficientamento degli edifici [65]. Pertanto, al fine di analizzare ed ottimizzare le prestazioni energetiche di tali sistemi, con le relative interazioni edificio-impianto e prevederne il comportamento termico, sono stati sviluppati ed utilizzati algoritmi e modelli matematici caratterizzati da un elevato grado di dettaglio [42, 66-68]. Infatti, essendo la disposizione delle capacità e delle resistenze termiche funzione dello spazio, al fine di valutare l'impatto energetico dovuto all'integrazione nell'involucro di tecnologie innovative, è preferibile l'adozione di modelli a parametri distribuiti. Attraverso questo approccio, è possibile ottenere un maggiore grado di dettaglio, rispetto a quello ottenuto con i modelli a parametri concentrati, in merito al comportamento termico in regime transitorio. Inoltre, utilizzando più nodi per ogni componente edilizio (es: pareti, solai) è possibile valutare dinamicamente l'andamento della temperatura interna dell'aria e delle superfici dell'edificio.

Esempi di codici in-house basati su tali modelli sono resi nei lavori descritti di seguito. Nei riferimenti bibliografici [58, 69], sono presentati dei miglioramenti a modelli a parametri concentrati, effettuati aumentando l'ordine dei nodi capacitivi. In entrambi gli studi, data la complessa stratigrafia delle pareti, sono

state eseguite diverse simulazioni aumentando di volta in volta il numero di nodi capacitivi. Inizialmente, ogni strato di materiale che compone la stratigrafia è stato analizzato con un singolo nodo capacitivo; il numero di nodi capacitivi è stato successivamente aumentato fino al raggiungimento di differenze trascurabili nelle temperature superficiali ($\pm 0.05^\circ\text{C}$), a parità di condizioni al contorno. In ogni caso, in entrambi gli studi, l'aria interna è rappresentata come un singolo nodo termico capacitivo, ipotesi spesso utilizzata quando non sono prevedibili elevati gradienti spaziali della temperatura. La schematizzazione delle pareti che compongono la zona termica utilizzata in tali lavori è riportata in [Figura 11](#). Nello specifico, è adottata una rete termica equivalente composta da 11 resistenze e 9 nodi capacitivi, i.e. 11R9C.

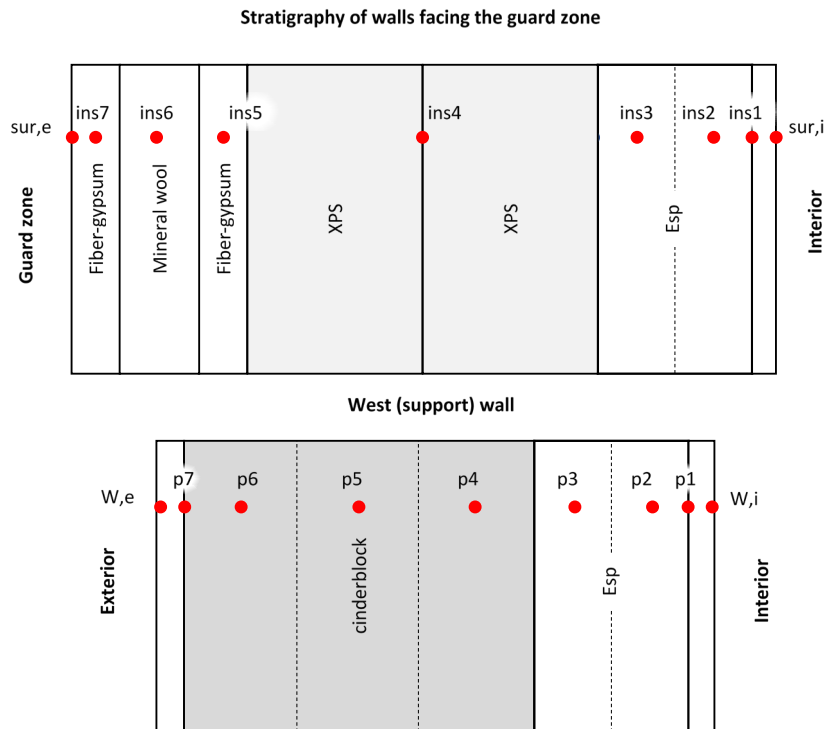


Figura 11. Nodi utilizzati per analizzare le pareti della zona termica dei lavori [58, 69]

Un modello a parametri distribuiti dettagliato è stato recentemente sviluppato e validato, come riportato nelle citazioni [40, 70, 71]. Nello specifico, il codice di calcolo dinamico (chiamato DETECT) simula il comportamento dinamico di ciascun elemento dell'involucro edilizio (parete, tetto, pavimento, finestra, etc.) attraverso il metodo della rete termica. In particolare, per ciascun elemento m dell'involucro, il numero di nodi n dipende dal numero di strati isotermini considerati (per ogni parete sono considerate almeno 10 capacità per ogni elemento opaco). L'utilizzo di una rete termica così dettagliata, [Figura 12](#), rende possibile la simulazione di innovative tecnologie per il risparmio energetico, come materiali a cambiamento di fase, sistemi solari integrati nell'involucro edilizio, facciate ventilate, etc..

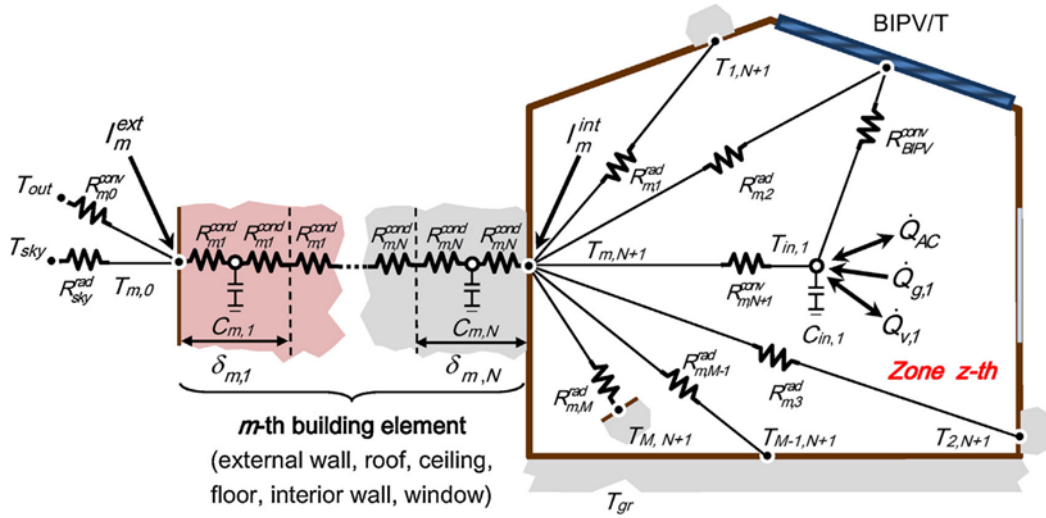


Figura 12. Schema della rete termica relativa ai lavori [40, 70, 71]

Al fine di calcolare i fabbisogni energetici sensibili per il riscaldamento e il raffreddamento ($\dot{Q}_{HVAC, sen}$) dell'edificio, nonché di edifici multizona, per ciascuna zona termica è implementato il seguente sistema di equazioni differenziali [70]:

$$\begin{cases} C_{m,n} \frac{dT_{m,n}}{dt} = \frac{T_{1,n-1} - T_{1,n}}{R_{m,n-1}} + \frac{T_{1,n+1} - T_{1,n}}{R_{m,n}} + \Gamma_m + \Psi_m + \Phi_m \\ C_{in} \frac{dT_{in}}{dt} = \sum_{m=1}^M \frac{T_{m,N} - T_{in}}{R_{m,N}} + \dot{Q}_{GAIN} + \dot{m}_v c (T_{out} - T_{in}) \pm \dot{Q}_{HVAC, sen} \end{cases} \quad (37)$$

$$\Gamma_m = S_m \varepsilon_{m,int} \sigma \sum_{j=1}^M G_{m,j} (T_{j,N}^4 - T_{m,N}^4)$$

$$\Gamma_m \neq 0 \text{ solo per le superfici interne } (n = N)$$

$$\Psi_m = S_m \alpha_{m,int} I_m$$

$$\Psi_m \neq 0 \text{ solo per le superfici interne } (n = N)$$

$$\Phi_m = S_m \left[\varepsilon_{m,ext} \sigma (T_{sky}^4 - T_{m,1}^4) + \alpha_{m,ext} K_m \right]$$

$$\Phi_m \neq 0 \text{ solo per le superfici esterne } (n = 1)$$

dove T , R e C sono rispettivamente le temperature ai nodi (i pedici *in* e *out* sono riferiti al nodo aria interno ed esterno), le resistenze e le capacità della rete termica; $\dot{Q}_{GAIN}$ è il carico termico sensibile endogeno; $\dot{m}_v$ è la portata di ventilazione e c è il calore specifico dell'aria secca. $\dot{Q}_{HVAC}$ è la sollecitazione prodotta dall'impianto di riscaldamento e raffreddamento, Γ è la radiazione ad alta lunghezza della radiazione captata dalle singole superfici interne, S è la superficie di scambio termico, ε è l'emittenza, G è la matrice di Gebhart, Ψ è la radiazione solare captata dalle superfici interne, α è l'assorbanza, I è il flusso radiativo solare ricevuto da ciascuna superficie interna, Φ è la radiazione captata dalle superfici esterne, T_{sky} è la temperatura della volta celeste, e K è la radiazione solare esterna.

Il modello permette anche il controllo dell'umidità dell'aria e, quindi, il calcolo dell'energia latente in transito nell'edificio, effettuato attraverso un bilancio di massa sul vapore:

$$\Omega_{in} (\omega_{in}(t) - \omega_{in}(t-1)) = [\dot{m}_{w,gain}(t) + \dot{m}_v (\omega_{out}(t) - \omega_{in}(t-1))] \quad (38)$$

dove Ω_{in} è la massa d'aria secca interna, $\dot{m}_{w,gain}$ è la portata di vapore in ingresso allo spazio in esame dovuta alle persone e alla ventilazione, ω è l'umidità specifica. In ciascun time-step, l'umidità specifica da raggiungere, ω_{sp} , è valutata in funzione dell'umidità relativa di set-point, ϕ_{sp} , e della T_{in} calcolata attraverso

le (37). L'energia termica latente, $Q_{HVAC,lat}$, somministrata o rimossa dall'ambiente è quindi calcolata con l'equazione:

$$Q_{HVAC,lat}(\tau) = \Delta h_{vs} \cdot \left[\Omega_{in} \cdot (\omega_{in}(\tau) - \omega_{sp}(\tau)) \right] \quad (39)$$

dove Δh_{vs} è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua a 0°C.

Il codice di calcolo DETECT è stato validato attraverso la procedura BESTEST (Building Energy Simulation Test) [40] e, recentemente, attraverso indagine sperimentale effettuata tramite una *test cell* reale [71].

5 Software di calcolo per la prestazione energetica degli edifici certificati dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI)

In questo capitolo sono presentate le principali caratteristiche delle metodologie per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici finalizzati alla redazione dell'APE. La metodologia descritta nella UNI/TS 11300-1 è stata implementata in alcuni software riportati in [Tabella 4](#). Da tale tabella si può notare che alcuni di questi software implementano anche la UNI EN ISO 52016. Si noti che la EN ISO 52016, sostituendo la EN ISO 13790, è dal 2018 la norma internazionale di riferimento per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici.

Tabella 4. Principali software di calcolo

Software	Sviluppatore	UNI EN ISO 52016-1
<i>Docet</i>	ENEA-CNR	-
<i>EC700</i>	Edilclima	✓
<i>Euclide Certificazione Energetica</i>	Geo Network	-
<i>MC 11300</i>	Aermec	-
<i>Mc4 Suite</i>	Mc4software	✓
<i>Termolog</i>	Logical Soft	✓
<i>TerMus</i>	Acca	-

Di seguito sono analizzate le differenze tra la metodologia relativa alla UNI/TS 11300-1 (metodo stagionale) e quella della UNI EN ISO 52016-1 (metodo orario semplificato).

5.1 Confronto tra la UNI/TS 11300-1 e la UNI EN ISO 52016-1

Di seguito sarà effettuato un confronto tra il metodo mensile riportato nella UNI/TS 11300 e quello orario descritto nella UNI EN ISO 52016-1, mettendone in risalto le principali similitudini e differenze. Nello specifico, verrà posta l'attenzione sui seguenti punti: i) metodologia di calcolo; ii) valutazione apporti termici solari; iii) valutazione apporti termici interni; iv) zonizzazione ed accoppiamento tra le zone; v) zone adiacenti non climatizzate; vi) ventilazione; vii) umidificazione e deumidificazione; viii) parametri dinamici; ix) dati in ingresso e risultati prodotti.

5.1.1 Metodologia di calcolo

Come evidenziato nei precedenti capitoli, le procedure di calcolo per la valutazione dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento degli edifici nel caso del metodo mensile della UNI/TS 11300-1 (attualmente adottata per la stesura dell'Attestato di Prestazione Energetica, APE) e del metodo orario della UNI EN ISO 52016-1, differiscono in modo sostanziale. La prima differenza che è possibile riscontrare è ovviamente quella relativa al passo temporale preso in considerazione nei due metodi (rispettivamente mensile e orario). Un'altra differenza effettiva tra i due metodi riguarda il grado di dettaglio con il quale possono essere modellati i vari componenti edilizi. Per questi ultimi, l'approccio presentato dalla UNI/TS 11300-1 prevede l'utilizzo, nelle equazioni di bilancio, di parametri termo-fisici mediati. Tali parametri vengono quindi utilizzati per la valutazione su base mensile dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento. Del tutto differente è la procedura oraria riportata nella EN ISO 52016-1 che prevede una modellazione dettagliata di ogni componente edilizio in luogo di quella mediata. Ogni elemento può essere infatti descritto da un numero finito di nodi termici (per un massimo di cinque) con relative resistenze e capacità termiche. La valutazione del fabbisogno di energia termica per riscaldamento e raffrescamento è dunque effettuata,

su base oraria, risolvendo il sistema di equazioni derivante dal bilancio d'energia relativo ad ogni nodo del sistema.

5.1.2 Apporti termici solari

Le modalità con le quali il metodo mensile della UNI/TS 11300-1 e quello orario della UNI EN ISO 52016-1 trattano gli apporti termici solari e lo scambio radiativo verso la volta celeste risultano essere simili. Con riferimento agli apporti termici solari, entrambe le metodologie propongono un calcolo che tiene conto in modo separato della radiazione solare incidente sui componenti finestrati e di quella sui componenti opachi. Nello specifico, la radiazione solare entrante in ambiente attraverso il componente finestrato viene direttamente computata nel bilancio termico della zona (si vedano le equazioni 1 e 2 per la UNI/TS 11300-1 e l'equazione 22 per la UNI EN ISO 52016-1).

Prendendo invece in considerazione la radiazione incidente sui componenti opachi e l'extra-flusso verso la volta celeste, si nota che tali aliquote sono computate, in entrambe le metodologie, congiuntamente alle dispersioni/rientrate dell'involucro edilizio.

5.1.3 Apporti termici interni

Per quanto concerne gli apporti termici interni, il metodo mensile proposto dalla UNI/TS 11300-1 e quello orario della UNI EN ISO 52016-1 differiscono parzialmente. Con riferimento alla UNI/TS 11300-1, questa prevede due approcci differenti a seconda che l'analisi venga svolta considerando le condizioni standard oppure quelle adattate all'utenza (tailored). Nel primo caso, gli apporti termici sensibili interni sono espressi in funzione della destinazione d'uso, secondo quanto riportato nel prospetto E.3 della stessa normativa. Nel caso in cui venga invece considerata l'analisi adattata all'utenza, questa prevede l'utilizzo degli effettivi contributi al carico termico sensibile di occupanti ed apparecchiature. A prescindere dalla procedura scelta, il valore del carico termico endogeno secondo la UNI/TS 11300-1 risulta essere un valore mediato su base mensile (come visibile nelle equazioni 1 e 2). Ovviamente, l'approccio proposto dalla UNI EN ISO 52016-1 risulta essere invece più accurato. Tale normativa richiede infatti la descrizione dei valori orari del carico termico (si veda equazione 27), per ogni singolo contributo (es. persone, macchinari, etc.).

5.1.4 Zonizzazione ed accoppiamento tra zone

Confrontando il metodo mensile della UNI/TS 11300-1 e quello orario della UNI EN ISO 52016-1, e ponendo l'attenzione sui criteri di zonizzazione (criteri che devono essere rispettati per poter considerare più locali come appartenenti alla medesima zona termica), è possibile individuare alcune differenze. Nello specifico la UNI/TS 11300-1 propone una procedura per l'individuazione delle zone termiche che consta di cinque punti (riguardanti principalmente temperature di controllo e tipologie di impianti). Al fine di poter considerare locali differenti come facenti parte della stessa zona termica, tali cinque punti devono essere contemporaneamente rispettati. Non è tuttavia necessario rispettare tali punti nel caso di locali appartenenti alla medesima unità immobiliare.

Al contrario, il metodo orario della UNI EN ISO 52016-1, in ottemperanza alla UNI 52000-1, presenta una procedura più lunga che consta di dieci punti. Nonostante ciò, la procedura di zonizzazione proposta dalla UNI EN ISO 52016-1 risulta essere non troppo stringente, dando la possibilità di unire nella stessa zona termica locali con diversi set-point di temperatura e/o umidità, tipologie di impianti, etc. Tale procedura quindi, sebbene apparentemente più complessa, risulta essere abbastanza flessibile.

5.1.5 Zone adiacenti non climatizzate

Con riferimento alle zone adiacenti non climatizzate, è possibile notare una similitudine tra gli approcci proposti dal metodo mensile della UNI/TS 11300-1 e quello orario della UNI EN ISO 52016-1. Entrambe le metodologie si basano infatti sull'utilizzo di un opportuno fattore correttivo. Tale parametro, chiamato diversamente nelle due norme (b_{tr} nella UNI/TS 11300-1 e $b_{z,tu}$ nella UNI EN ISO 52016-1), è tuttavia definito nel medesimo modo (per sincerarsene è sufficiente confrontare l'equazione 7 della UNI/TS 11300-1 e l'equazione 28 per la UNI EN ISO 52016-1).

Comunque, la differenza sostanziale tra le due metodologie risiede nel modo mediante il quale tale fattore di correzione è applicato. Nel caso della UNI/TS 11300-1, questo è infatti adoperato come fattore di correzione del coefficiente di scambio termico relativo alle pareti dell'ambiente climatizzato. Le relative dispersioni/rientrate sono infatti valutate come se quest'ultimo comunicasse direttamente con l'esterno (e non con il locale limitrofo non climatizzato) correggendo (riducendo) opportunamente il coefficiente di scambio termico mediante il fattore correttivo precedentemente descritto.

Diversa è la procedura adottata nel metodo orario della UNI EN ISO 52016, dove il fattore di correzione viene applicato alla temperatura dell'aria esterna per ottenere il valore della temperatura dell'aria interna dell'ambiente non climatizzato. In questo caso quindi, le dispersioni/rientrate per l'ambiente climatizzato sono valutate tenendo in considerazione la presenza del locale non climatizzato, la cui temperatura è però valutata correggendo quella dell'aria esterna mediante l'adozione del suddetto fattore correttivo.

È bene ricordare che nel caso del metodo orario della UNI EN ISO 52016-1 vengono proposti due differenti tipologie di locali adiacenti non climatizzati: locale adiacente non climatizzato interno e locale adiacente non climatizzato esterno. La procedura descritta in precedenza vede la sua applicabilità unicamente nel caso in cui il locale adiacente non climatizzato venga considerato come interno.

5.1.6 Ventilazione

Gli approcci adottati nelle due metodologie relativamente alla valutazione del carico termico dovuto alla ventilazione risultano differire in alcuni aspetti. Per quanto concerne il metodo mensile della UNI/TS 11300-1, questo considera la ventilazione attraverso un opportuno valor medio mensile. La procedura di calcolo per ottenere tale valore differisce a seconda del tipo di ventilazione considerata (naturale o meccanica), delle caratteristiche dell'impianto di ventilazione (es. estrazione centralizzata a singolo condotto, immissione centralizzata a singolo condotto, etc.) o dell'utenza. Il valore medio mensile ottenuto è quindi applicato nei bilanci termici riportati nelle equazioni 1 e 2 della UNI/TS 11300-1. Un approccio maggiormente accurato è invece adottato nel caso del metodo orario della UNI EN ISO 52016-1. In tal caso il contributo della ventilazione è calcolato, per ogni ora, valutando il coefficiente di scambio termico per ventilazione (che sarà poi adottato nel bilancio termico relativo alla zona in esame). In aggiunta alla maggiore accuratezza del calcolo orario rispetto a quello mensile, c'è anche da sottolineare come il primo permetta di considerare l'infiltrazione d'aria da spazi adiacenti non climatizzati mediante l'utilizzo di un opportuno fattore correttivo, eventualità non prevista nel caso della UNI/TS 11300-1.

5.1.7 Umidificazione e deumidificazione

Per quanto concerne il calcolo dell'energia relativa ai processi di umidificazione e deumidificazione, le differenze che intercorrono tra il metodo mensile della UNI/TS 11300-1 e quello orario della UNI EN ISO 52016-1 risultano riguardare principalmente il grado di accuratezza del calcolo. È interessante tuttavia sottolineare come la EN ISO 13790, da cui la UNI/TS 11300-1 deriva, non consideri tali processi.

Il calcolo dei fabbisogni di energia termica per umidificazione e deumidificazione è valutato, nella UNI/TS 11300-1, considerando i contributi medi mensili di vapore acqueo in ingresso o uscita dall'ambiente in esame. Ad esempio, per quelli immessi in ambiente si considerano i contributi da ogni sorgente (occupanti, macchinari, etc.) e quelli dovuti ai processi di ventilazione e/o infiltrazione. Un approccio simile, ma su base oraria, è proposto nella UNI EN ISO 52016-1. Una differenza tra le due metodologie risiede nel fatto che quella oraria della UNI EN ISO 52016-1, a differenza di quella della UNI/TS 11300-1, include i contributi latenti dovuti ai locali adiacenti non climatizzati e delle interazioni dell'ambiente con gli oggetti al suo interno. Nelle equazioni di bilancio sono infatti presenti due termini (si vedano le equazioni 31 e 32) relativi ai contributi dovuti alle capacità di assorbimento/emissione dei materiali.

5.1.8 Parametri dinamici

Come si è potuto vedere nel capitolo relativo alla UNI/TS 11300-1, tale normativa considera in modo semplificato gli effetti della dinamicità dei fenomeni mediante l'utilizzo di due fattori, uno per la stagione invernale ed uno per la stagione estiva, detti rispettivamente "fattore di utilizzazione degli apporti termici" e "fattore di utilizzazione degli apporti solari". Viceversa, il metodo orario della UNI EN ISO 52016-1, essendo

caratterizzato da un approccio dinamico, è automaticamente in grado di valutare gli effetti della dipendenza dei fenomeni dal tempo.

5.1.9 Dati in ingresso e risultati prodotti

In questo paragrafo si riporta il confronto tra le due metodologie fin qui analizzate per ciò che concerne sia i dati in ingresso necessari al calcolo che i risultati prodotti. Confrontando i dati in ingresso necessari, è possibile osservare come, in linea generale, le due metodologie siano sostanzialmente simili. Sia il metodo mensile della UNI/TS 11300-1 sia quello orario della UNI EN ISO 52016-1 richiedono per il calcolo:

- 1) dati relativi alle caratteristiche tipologiche e termofisiche dell'edificio;
- 2) dati relativi agli impianti presenti;
- 3) dati climatici;
- 4) dati sul comportamento dell'utenza.

La differenza sostanziale tra le due metodologie è tuttavia insita nel livello di dettaglio richiesto. Il maggior numero di dati richiesti dal metodo orario della UNI EN ISO 52016-1 è giustificato dalla maggiore complessità dell'approccio proposto rispetto a quello descritto nella UNI/TS 11300-1. A titolo esemplificativo si riporta in Tabella 5, un confronto tra i dati climatici richiesti dalle due metodologie.

Tabella 5. UNI/TS 11300-1 vs. UNI EN ISO 52016-1: dati climatici

Dati climatici	
UNI/TS 11300-1	UNI EN ISO 52016-1
Temperatura esterna media mensile	Temperatura esterna oraria
Umidità specifica esterna media mensile	Umidità specifica esterna oraria
Irradianza solare media mensile, su superficie orizzontale	Radiazione solare diretta oraria per ogni elemento dell'involucro
Irradianza solare media mensile, per ogni elemento dell'involucro	Radiazione solare diffusa oraria per ogni elemento dell'involucro
-	Altezza solare oraria
-	Azimut orario

Differenze più marcate sono, invece, individuabili confrontando gli output attesi dalle due metodologie. L'adozione del metodo di calcolo orario della UNI EN ISO 52016-1, oltre alla possibilità di poter calcolare le temperature dei singoli nodi caratteristici degli elementi della zona termica, permette di avere una maggiore quantità (e qualità) di risultati. Con riferimento a tale aspetto, le differenze tra i risultati ottenibili con le due metodologie sono riportate in Tabella 6.

Tabella 6. UNI/TS 11300-1 vs. UNI EN ISO 52016-1: output del calcolo

Tipologia di risultato	UNI/TS 11300	UNI EN ISO 52016
Fabbisogno mensile di energia termica per riscaldamento	✓	✓
Fabbisogno mensile di energia termica per raffrescamento	✓	✓
Fabbisogno annuale di energia termica per riscaldamento	✓	✓
Fabbisogno annuale di energia termica per raffrescamento	✓	✓
Potenza termica per riscaldamento	-	✓
Potenza termica per raffrescamento	-	✓
Fabbisogno mensile di energia termica per deumidificazione	✓	✓
Fabbisogno annuale di energia termica per umidificazione	✓	✓
Fabbisogno annuale di energia termica per deumidificazione	✓	✓
Portata di vapore da sottrarre alla zona termica	-	✓
Portata di vapore da somministrare alla zona termica	-	✓
Potenza termica per umidificazione	-	✓
Potenza termica per deumidificazione	-	✓

Temperatura media radiante (media mensile ed oraria)	-	✓
Temperatura aria interna (media mensile ed oraria)	-	✓
Temperatura operativa (media mensile ed oraria)	-	✓

5.2 Caratteristiche dei software certificati CTI

Dopo aver precedentemente descritto e confrontato il metodo mensile proposto dalla UNI/TS 11300-1 e quello orario presentato nella UNI EN ISO 52016-1, è interessante analizzare le caratteristiche dei software attualmente disponibili per la certificazione energetica degli edifici: Docet, EdilClima, Euclide Certificazione Energetica, MC 11300, MC4 Suite, Termolog, Termus. In [Tabella 7](#) è riportata una breve descrizione di tali software.

Tabella 7. Caratteristiche dei software certificati CTI per la certificazione energetica degli edifici

Software	Caratteristiche
Docet	Il software Docet, sviluppato in collaborazione tra CNR ed ENEA, consente di effettuare la certificazione energetica degli edifici residenziali. Tale programma, aggiornato alle normative UNI TS 11300-1:2014, UNI TS 11300-2:2019, UNI TS 11300-3:2010 e UNI TS 11300-4 e 5:2016 oltre alla UNI 10349:2016, è adoperabile unicamente per effettuare l'analisi di edifici o unità immobiliari residenziali esistenti caratterizzati da una superficie complessiva inferiore ai 200 m ² . Tale limitazione (così come altre non riportate per brevità) è dovuta alla struttura semplificata del software il cui scopo principale è fornire uno strumento veloce, di facile utilizzo e con pochi parametri di input, adoperabile anche da portatori di interesse.
EdilClima EC700	Il software Edilclima presenta una suddivisione in moduli effettuata in base ai diversi obiettivi del calcolo: a) il modulo EC 700, per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici; b) il modulo EC 701, per effettuare il progetto e le verifiche d'impianto; c) il modulo EC 705, adottato per redigere l'attestato di certificazione energetica; ed altri. Il software prevede la realizzazione di un modello geometrico 3D dell'edificio oggetto dello studio e successivamente la definizione di tutti i parametri termofisici e delle condizioni di utilizzo dello stesso. La modellazione 3D può avvenire sia mediante un tool implementato nello stesso software, sia tramite importazione di un modello già sviluppato secondo lo standard IFC. Con riferimento al modulo EC 700, come detto in precedenza, questo ha lo scopo di valutare le prestazioni energetiche degli edifici. Tale calcolo è effettuato in conformità alla serie di norme UNI/TS 11300. Si noti che nell'ultima versione, il software è in grado di eseguire anche il calcolo orario in ottemperanza a quanto riportato nella UNI EN ISO 52016-1.
Euclide Certificazione Energetica	È un software per la certificazione energetica di edifici sia residenziali che non residenziali aggiornato alle normative UNI/TS 11300-1:2014, UNI/TS 11300-2:2019, UNI/TS 11300-3:2010, UNI/TS 11300-4:2016, UNI/TS 11300-5:2016, UNI/TS 11300-6:2016 e alla UNI EN 15193:2008.
MC 11300	Il tool permette il calcolo della prestazione e della certificazione energetica degli edifici basato sulla serie di normative UNI/TS 11300. Tale software rispetta, tra le altre, le seguenti normative: Decreto interministeriale 26 giugno 2015, Decreto interministeriale 26 giugno 2015, D.L. 192/05 modificato dal D.L.311/06 modificato dal D.P.R. 02 aprile 2009 n.59, UNI/TS 11300-1:2014, UNI/TS 11300-2:2014, UNI/TS 11300-3:2010, UNI/TS 11300-4:2016, UNI/TS 11300-5:2016, UNI/TS 11300-6:2016.

MC4 Suite	È un programma sviluppato dalla software house “Mc4software” in collaborazione con Autodesk (si noti che MC4 Suite è un plug-in dei tool sviluppati da Autodesk). L’analisi dei fabbisogni energetici svolta con MC4 Suite prevede la creazione di un modello 3D nel software BIM “Revit” dove vengono specificate tutte le proprietà geometriche e termofisiche dei materiali costituenti l’edificio oggetto del calcolo. Sebbene il calcolo energetico dell’edificio sia basato sul modello 3D implementato in “Revit”, MC4 Suite non sfrutta il modello energetico creato da quest’ultimo ma ne realizza uno proprietario. La ragione di ciò risiede nel fatto che il modello energetico dell’edificio creato mediante “Revit” non rispetta i parametri delle normative italiane. Tutte le analisi che è possibile condurre mediante MC4 Suite sono in accordo con le più aggiornate normative italiane. Nello specifico, il software, certificato CTI, è conforme alla serie UNI/TS 11300-1. Nell’ultima versione del software, aggiornato al 2020, è anche possibile effettuare l’analisi delle prestazioni energetiche dell’edificio in ottemperanza alla metodologia oraria proposta dalla UNI EN ISO 52016-1.
Termolog	Termolog è un software OPENBIM, sviluppato dalla software house italiana “Logical Soft”, il cui scopo è quello di valutare le prestazioni energetiche degli edifici. Essendo Termolog un software basato sulla metodologia BIM, questo prevede la costruzione di un modello geometrico 3D dell’edificio oggetto dell’analisi in cui verranno poi aggiunte tutte le informazioni riguardanti le proprietà termofisiche e di utilizzo dello stesso. Il software ammette sia la costruzione del modello BIM, direttamente mediante i tool messi a disposizione dallo stesso, sia l’importazione di modelli IFC già elaborati in altri software BIM. Con riferimento alle normative adottate, Termolog, conforme sia alla serie UNI/TS 11300 sia alla serie UNI EN ISO 52016, risulta anche rispettare i criteri di validità proposti dal CTI. In aggiunta, il software è anche conforme allo standard ASHRAE 140-2017. Termolog consta di differenti moduli a seconda del tipo di calcolo che si desidera effettuare. Si citano tra gli altri: a) il modulo per la certificazione energetica, utilizzato per valutare la classe energetica di un edificio, per redigere l’attestato di prestazione energetica e per la proposta di interventi migliorativi; b) il modulo “progettista”, basato sulla Legge 10 (art. 28 della legge 9 gennaio 1991, n. 10), adoperabile per il progetto di nuovi edifici, e la ristrutturazione di quelli già esistenti, mediante i criteri Nzeb e CasaClima; c) il modulo per la diagnosi energetica degli edifici e per effettuare l’analisi dei consumi e degli interventi di efficientamento energetico, basato sulle linee guida ENEA.
Termus	Altro software di calcolo basato su metodologia BIM per l’analisi energetica degli edifici è Termus. Tale software, al pari dei precedenti, consente la modellazione geometrica 3D dell’edificio oggetto dello studio sia mediante tools proprietari, sia importando modelli IFC precedentemente sviluppati con altri software. Permette il calcolo dei fabbisogni di energia termica per il riscaldamento ed il raffrescamento degli edifici e di stilare l’attestato di prestazione energetica e l’attestato di qualificazione energetica degli stessi in ottemperanza alla metodologia di calcolo proposta nella serie normativa UNI/TS 11300. Il software è anche in grado di fornire la relazione tecnica basata sulla Legge 10 (art. 28 della legge 9 gennaio 1991, n. 10).

In linea generale, tali software permettono di ottenere i seguenti risultati (utili al fine della redazione dell’APE):

- calcolo dell’energia primaria richiesta (in relazione alle fonti rinnovabili e a quelle non rinnovabili);
- calcolo e verifica degli indici di prestazione energetica;
- calcolo del fabbisogno di energia (termica e primaria) per acqua calda sanitaria;
- calcolo e verifica della massa superficiale e della trasmittanza termica periodica;
- verifica della condensa superficiale ed interstiziale;
- calcolo dei rendimenti degli impianti (in riscaldamento e raffrescamento);

- calcolo dei rendimenti degli impianti di ventilazione meccanica;
- calcolo della prestazione energetica degli edifici;
- calcolo dei consumi di energia dovuti all'illuminazione artificiale;
- calcolo dei contributi energetici da diverse fonti rinnovabili.

I software che implementano anche il metodo orario della UNI EN ISO 52016 permettono all'utente di ottenere i valori orari della temperatura dell'aria interna, della temperatura media radiante, e della temperatura operativa.

6 Confronto tra le metodologie di calcolo dei fabbisogni energetici degli edifici per il riscaldamento ed il raffrescamento

La simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici può essere effettuata utilizzando metodologie basate sul calcolo stazionario (metodo stagionale della UNI/TS 11300) e su quello dinamico, sia semplificato (metodo orario della UNI EN ISO 52016) che dettagliato (metodi implementati in software commerciali o codici in-house). Nonostante tali le metodologie permettano di ottenere una stima dei consumi energetici dell'edificio, la scelta del modello di calcolo dipende dalle esigenze e dagli obiettivi richiesti (diagnosi, progetto, prestazione energetica). Infatti, sebbene il regime dinamico richieda maggiori tempi computazionali a fronte di risultati più completi ed affidabili, il metodo stazionario restituisce valori standardizzati e permette una notevole semplificazione del calcolo, con un'incertezza accettabile o meno a seconda della specifica applicazione.

Indipendentemente dall'aggiornamento normativo, l'utilizzo di software e codici per il calcolo dei fabbisogni energetici degli edifici, da utilizzare sia per la stima della prestazione che per la diagnosi energetica, dipenderà dalla possibilità di disporre di strumenti di calcolo altamente affidabili e semplici da utilizzare. In merito alla facilità di utilizzo dello strumento di calcolo, va sottolineato che questa più che alla metodologia di calcolo (e quindi al numero di parametri in input e di valori da impostare), è molto spesso legata all'architettura dello strumento di calcolo e all'interfaccia utente.

Gli attuali strumenti per l'analisi della prestazione energetica degli edifici utili per la redazione dell'APE (si veda il paragrafo 5) sono di quasi immediato utilizzo, una volta note le caratteristiche geometriche e termofisiche dell'edificio e degli impianti ad esso asserviti. Il metodo di calcolo dinamico, alla base dei codici generalmente utilizzati dalla comunità scientifica (paragrafo 4.1), necessitano invece di un più lungo periodo di apprendimento da parte dell'utente. Tuttavia, anche grazie all'aumento delle potenzialità di calcolo dei computer e al sempre più diffuso utilizzo di strumenti di calcolo digitali da parte dei progettisti, va aumentando l'inclinazione di questi ultimi verso l'utilizzo di codici più complessi, come quelli per la simulazione dinamica. Ad ogni modo, ipotizzando la disponibilità di strumenti di calcolo adeguati ed affidabili, che permettano un'intuitiva implementazione dei dati, una facile costruzione del modello energetico dell'edificio e l'esportazione dei risultati di calcolo (grafici, tabelle, etc.), ci si aspetta un sempre più diffuso ricorso alla simulazione dinamica. Questa permette lo studio del comportamento termo-fisico degli edifici per la diagnosi energetica, per la progettazione, e per il calcolo degli indici di prestazione energetica (anche ai fini dell'APE).

Di seguito, al fine di effettuare valutazioni quantitative e qualitative tra le diverse metodologie disponibili in letteratura, sono presentati diversi confronti tra le norme illustrate nei paragrafi precedenti ed i software che adottano un approccio dinamico. A tal fine sono ricavati i valori degli indici per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici (fabbisogno di energia termica in riscaldamento e raffrescamento, carico di picco, etc.).

6.1 UNI-TS 11300, UNI EN ISO 52016 e codici di simulazione dinamica

Al fine di analizzare sia a livello qualitativo che quantitativo le due metodologie di calcolo proposte dalle normative in esame, di seguito sono analizzati diversi lavori scientifici presenti in letteratura che effettuano confronti tra tali metodologie e tra software per l'analisi dinamica delle prestazioni energetiche del sistema. La maggior parte dei lavori esaminati effettuano il confronto sulla base dei fabbisogni di energia termica per il riscaldamento ed il raffrescamento.

In [Tabella 8](#), sono riportati, per ogni pubblicazione esaminata, le caratteristiche del caso studio analizzato nonché i dati termo-fisici dell'involucro edilizio esaminato.

Tabella 8. Casi studio e principali dati termo-fisici dei lavori analizzati

Riferimento	Tipo di edificio/destinazione d'uso	Dati disponibile sulle proprietà termofisiche dell'involucro
Ballarini et al. [72]	Abitazione monofamiliare Condominio residenziale	2 livelli di isolamento termico: - $U_{wl,1} = 0.30 \div 0.45 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{fl,up,1} = 0.25 \div 0.38 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{fl,lw,1} = 0.30 \div 0.46 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{w,1} = 1.80 \div 3.20 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{wl,2} = 0.26 \div 0.43 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{fl,up,2} = 0.22 \div 0.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{fl,lw,2} = 0.26 \div 0.44 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{w,2} = 1.40 \div 3.00 \text{ W/m}^2\text{K}$ $MS \approx 200 \text{ kg/m}^2$
Kokogiannakis et al. [73]	Uffici	3 superfici finestrate di area: - $29 \text{ m}^2, 58 \text{ m}^2, 116 \text{ m}^2$ 4 tipologie costruttive di muro esterno: - Ultraleggero con isolamento standard - Leggero con isolamento standard - Massivo con isolamento standard - Massivo con basso isolamento
Michalak et al. [74]	Abitazione di 2 piani	1 tipologia costruttiva: - $H_{tr,op} = 123.73 \text{ W/K}$ - $H_{tr,w} = 40.05 \text{ W/K}$ - $H_{tr,is} = 2366.86 \text{ W/K}$ - $H_{ve} = 75.00 \text{ W/K}$ - $H_{tr,ms} = 4244.85 \text{ W/K}$ - $H_{tr,em} = 127.45 \text{ W/K}$ - $C_m = 43.44 \text{ MJ/K}$
Jokisalo et al. [75]	Condominio residenziale Abitazione indipendente Uffici	4 categorie costruttive: - Leggero - Mediamente pesante - Massivo 2 tipologie di isolamento: - Isolamento standard - Isolamento migliorato
Evangelisti et al. [76]	Edificio storico Condominio residenziale Appartamento in palazzo residenziale	2 categorie costruttive: - Muri spessi e massivi (edificio storico) - Muri leggeri con più bassa trasmittanza (edifici di nuova costruzione)
Bruno et al. [77]	Edificio residenziale Edificio adibito ad ospitare uffici	Coefficiente di scambio termico complessivo per trasmissione e ventilazione: - $H_{res} = 111 \text{ W/K}$ - $H_{uff} = 3850 \text{ W/K}$ Capacità termica: - $C_{res} = 7512 \text{ Wh/K}$ - $C_{uff} = 151391 \text{ Wh/K}$
Zakula et al. [78]	Abitazione monofamiliare Edificio residenziale Scuola Uffici Ospedale	2 tipologie di involucro: Edifici esistenti - $U_{wall,1} = 0.40 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{window,1} = 2.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{wall,2} = 0.80 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{window,2} = 2.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{wall,3} = 1.30 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{window,3} = 2.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{wall,4} = 0.56 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{window,4} = 2.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{wall,5} = 0.99 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{window,4} = 2.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ Edifici NZEB - $U_{wall,1} = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{window,1} = 0.86 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{wall,2} = 0.17 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{window,2} = 0.86 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{wall,3} = 0.17 \text{ W/m}^2\text{K}, U_{window,3} = 0.86/0.68 \text{ W/m}^2\text{K}$

		- $U_{\text{wall},4} = 0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{\text{window},4} = 0.68 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $U_{\text{wall},4} = 0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{\text{window},4} = 1.27 \text{ W/m}^2\text{K}$
Bruno et al. [79]	Edificio residenziale Edificio adibito ad uso uffici	Edificio residenziale: - $U_{\text{wall}, \text{res}} = 0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ Rapporto tra superficie finestrata ed opaca (WWR): - 12% - 30% - 50% Edificio adibito ad uso uffici: - $U_{\text{wall}, \text{uff}} = 0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ Tre WWR (rapporto tra area finestre e area muro): - 50% - 40% - 60%

Di seguito sono riportati preliminarmente i lavori riguardanti la UNI/TS 11300-1 e successivamente quelli relativi al metodo orario della UNI EN IS 52016-1.

6.1.1 Confronti tra la UNI/TS 11300-1 ed i software di simulazione dinamica

Come precedentemente descritto, la metodologia di calcolo in esame della UNI/TS 11300-1 effettua la valutazione dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e raffrescamento su base mensile. Se da un lato tale approccio ha il pregio di consentire il calcolo senza un'eccessiva complessità (anche dei dati in input), rispetto ad un metodo dinamico, dall'altro esso restituirà risultati dell'analisi sicuramente differenti (in linea di principio meno accurati) rispetto a quelli ottenibili mediante l'utilizzo di metodi di calcolo più complessi. Il presente capitolo ha lo scopo, attraverso un'opportuna analisi della letteratura scientifica disponibile, di analizzare le differenze che intercorrono tra i risultati ottenibili adottando la metodologia mensile proposta dalla UNI/TS 11300-1 e quelli conseguibili mediante alcuni software per l'analisi dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici.

Il primo lavoro analizzato è quello condotto da Ballarini et al. [72]. In questo articolo gli autori effettuano un confronto tra i risultati ottenuti col metodo mensile della UNI/TS 11300-1 e quelli ottenuti col software EnergyPlus. L'analisi è condotta dagli autori considerando due differenti tipologie di edifici (una singola unità abitativa ed un condominio), entrambe rappresentative della tipologia edilizia comunemente riscontrabile sul territorio italiano. I modelli 3D dei due edifici analizzati sono riportati in [Figura 13](#).

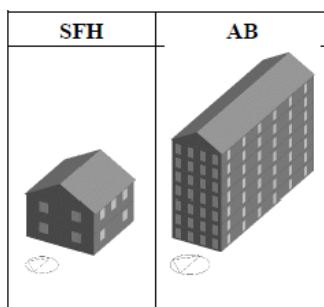


Figura 13: Modelli 3D degli edifici analizzati in [72]

L'unità abitativa monofamiliare, SFH (riportata sulla sinistra della [Figura 13](#)) è costituita da un edificio su due livelli il cui attico risulta non essere climatizzato. L'edificio condominiale, AB (riportata sulla destra della [Figura 13](#)) consta invece di trentuno appartamenti suddivisi su un totale di sette piani. Si noti che per l'edificio condominiale sono state considerate anche quattro zone termiche non climatizzate: la cantina, l'attico ed i due vani scala. I principali dati geometrici e termo-fisici dei due edifici appena descritti sono riportati in [Tabella 9](#) e [Tabella 10](#).

Tabella 9. Parametri geometrici degli edifici esaminati in [72]

Parametro	Unità monofamiliare	Condominio
V_g [m ³]	605	8199
V_{net} [m ³]	470	5738
$A_{f,net}$ [m ²]	174	2125
A_{env}/V_g [m ⁻¹]	0.73	0.40
A_w/A_{env} [-]	0.05	0.08
Numero di piani	2	7
Numero di unità abitative	1	31

Tabella 10. Parametri termofisici degli edifici esaminati in [72]

Parametro	Catania (CT)		Roma (RM)		Milano (MI)	
	TIL1	TIL2	TIL1	TIL2	TIL1	TIL2
U_{wl} [W/m ² K]	0.45	0.43	0.34	0.29	0.30	0.26
$U_{fi,up}$ [W/m ² K]	0.38	0.35	0.30	0.26	0.25	0.22
$U_{fi,lw}$ [W/m ² K]	0.46	0.44	0.32	0.29	0.30	0.26
U_w [W/m ² K]	3.20	3.00	2.00	1.80	1.80	1.40
G_{gl+sh} [-]	0.35		0.33		0.33	0.31

Per il calcolo, gli autori hanno assunto i set-point di temperatura invernale ed estiva, pari rispettivamente a 20 e 26°C, costanti durante tutto l'arco della giornata. In aggiunta, al fine di effettuare l'analisi al variare delle condizioni al contorno, questa è stata condotta considerando gli edifici collocati in tre differenti zone climatiche (Milano, Roma e Catania) e caratterizzati da due livelli di isolamento termico (TL1 – edificio molto trasmissivo, TL2 – edificio poco trasmissivo), per un totale di 12 casi studio. I risultati ottenuti dalle simulazioni sono riassunti in [Tabella 11](#). Gli autori sottolineano che l'analisi condotta su base mensile sottostima, rispetto a quella dinamica condotta con Energy Plus, i fabbisogni di energia termica per la stagione di raffrescamento. Tale scarto tra i risultati si accentua all'aumentare del rapporto di forma (maggiore nel caso dell'unità monofamiliare, minore nel caso del condominio). Al contrario di quanto riscontrato per la stagione estiva, durante quella invernale il metodo mensile proposto nella UNI/TS 11300 tende a sovrastimare il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento. Tale variazione risulta essere più accentuata nelle zone caratterizzate da una bassa richiesta di riscaldamento (Catania), dove lo scarto assume valori decisamente elevati (+825%).

Tabella 11. Fabbisogni termici in riscaldamento e raffrescamento per i diversi casi in esame [72]

Zona climatica	Destinazione d'uso	Qualità involucro	Indice di prestazione energetica [kWh/m ² anno]					
			Riscaldamento			Raffrescamento		
			EnergyPlus	UNI TS 11300	Δ [%]	EnergyPlus	UNI TS 11300	Δ [%]
MIL	Monofamiliare	TL1	35	40	14.3	17	12.2	-28.2
MIL	Monofamiliare	TL2	30	33	10.0	17	13.1	-22.9
ROM	Monofamiliare	TL1	20	24	20.0	25	16.4	-34.4
ROM	Monofamiliare	TL2	17	20	17.6	24	17.3	-27.9
CAT	Monofamiliare	TL1	13	20	53.8	24	18.2	-24.2
CAT	Monofamiliare	TL2	12	18	50.0	23	18.5	-19.6
MIL	Condominio	TL1	11	14	27.3	29	26.7	-7.9
MIL	Condominio	TL2	8.6	12	39.5	30	27.5	-8.3
ROM	Condominio	TL1	2.8	7.4	164.3	36	30.7	-14.7
ROM	Condominio	TL2	1.2	5.2	333.3	37	31.3	-15.4
CAT	Condominio	TL1	0.8	7.4	825.0	36	33.7	-6.4
CAT	Condominio	TL2	0.8	6.4	700.0	37	35.6	-3.8

Si noti che, al ridursi della conducibilità termica delle pareti, lo scarto risulta essere meno elevato. Dall'analisi condotta, gli autori del lavoro presentato in [72] concludono quindi che, con riferimento all'edificio

considerato, il metodo semplificato presentato nella UNI/TS 11300-1 ha un sufficiente grado di accuratezza nel valutare i fabbisogni termici di riscaldamento nel caso di edifici altamente isolati in località climatiche fredde. Al contrario, in località climatiche temperate o calde la UNI/TS 11300-1 tende a sovrastimarli. I fabbisogni energetici valutati con la UNI/TS 11300-1 risultano sottostimati anche per la stagione di raffrescamento.

Altro lavoro incentrato sul confronto tra la UNI/TS 11300-1 ed i software di simulazione dinamica è quello condotto da Kokogiannakis et. [73]. A rigore, tale studio compara il metodo orario e quello mensile della ISO 13790 con due software di calcolo dinamico: EnergyPlus ed Esp-r. Questo lavoro è stato tuttavia valutato considerando che il metodo mensile presentato nella ISO 13790 è pressoché equivalente a quello della UNI/TS 11300-1. Il confronto tra le quattro metodologie riportate (mensile ISO 13790, orario ISO 13790, dinamico EnergyPlus, dinamico Esp-r) è condotto in termini di fabbisogni termici annuali per il riscaldamento ed il raffrescamento. Il caso studio sviluppato riguarda un edificio adibito ad uso uffici la cui rappresentazione 3D è riportata in [Figura 14](#).

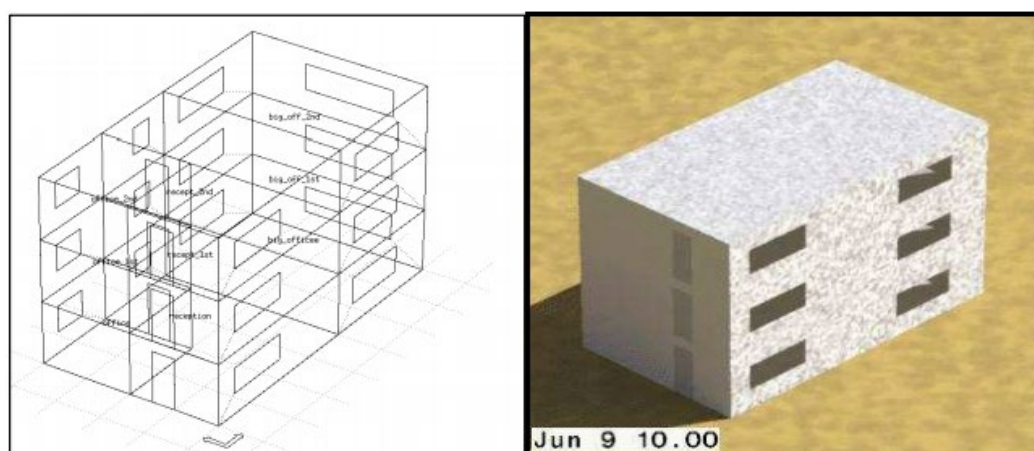


Figura 14. Rappresentazione 3D dell'edificio esaminato in [73]

Al fine di effettuare l'analisi con differenti condizioni al contorno, gli autori di questo studio hanno condotto l'analisi parametrizzando i principali dati geometrici e termo-fisici dell'edificio. Nello specifico sono state considerate:

- tre differenti zone termiche rappresentative dei climi del sud (Atene), del centro (Amsterdam) e del nord (Aberdeen) Europa;
- cinque differenti valori e scheduling degli apporti interni;
- tre differenti estensioni delle superfici vetrate;
- quattro differenti tipologie di murature, corrispondenti a quattro valori della capacità termica (edificio ultraleggero, edificio leggero, edificio pesante, ed edificio pesante poco isolato);
- quattro valori e scheduling della ventilazione;
- tre differenti esposizioni dell'edificio;
- tre differenti valori di set-point estivi e invernali.

I risultati di tutti i casi studio analizzati dagli autori sono presentati in [Tabella 12](#). Confrontando i risultati ottenuti applicando la metodologia proposta dalla UNI/TS 11300 con quelli conseguiti mediante i due software dinamici proposti, è possibile constatare come i risultati ottenuti mediante la UNI/TS 11300 generalmente tendono a sovrastimare i fabbisogni energetici sia per la stagione di riscaldamento che per quella di raffrescamento.

Tabella 12. Fabbisogni termici in riscaldamento esaminati in [73]

Fabbisogno termico in riscaldamento [kWh/m ² -anno]						
N°	Descrizione	EnergyPlus	ESP-r	UNI TS 11300	Δ UNI TS 11300 EnergyPlus [%]	Δ UNI TS 11300 ESP-r [%]
1	Caso Base (Amsterdam – set-point di 19°C)	50.3	46.3	61.1	21.5	32.0
2	Aberdeen	58.2	53.8	73.7	26.6	37.0
3	Atene	5.2	4.6	14.0	169.2	204.3
4	Guadagni interni mediati (7 giorni/settimana)	47.0	44.9	61.1	30.0	36.1
5	Guadagni interni mediati ogni ora (giorni feriali/fine settimana)	47.9	45.8	61.1	27.6	33.4
6	Guadagni interni elevati	35.1	31.5	50.7	44.4	61.0
7	Guadagni interni ridotti	71.7	67.0	76.6	6.8	14.3
8	Superficie finestrata doppia	63.9	65.5	77.9	21.9	18.9
9	Superficie finestrata dimezzata	44.9	42.8	53.2	18.5	24.3
10	Costruzione ultraleggera (C _m =56.9 kJ/m ² K)	57.1	55.4	68.3	19.6	23.3
11	Costruzione pesante (C _m =231.6 kJ/m ² K)	47.4	45.4	47.2	-0.4	4.0
12	Costruzione pesante poco isolata	141.8	142.0	138.0	-2.7	-2.8
13	Scheduling di ventilazione giornaliero	48.5	46.8	61.1	26.0	30.6
14	Programma di ventilazione differenziato giorni feriali/fine settimana	48.7	47.0	61.1	25.5	30.0
15	Elevati ricambi d'aria orari (1.5 1/h)	106.5	99.7	113.4	6.5	13.7
16	Ridotti ricambi d'aria orari (0.3 1/h)	23.8	23.9	35.3	48.3	47.7
17	Edificio ruotato di 90° in senso antiorario	55.1	53.0	63.9	16.0	20.6
18	Edificio ruotato di 180° in senso antiorario	50.6	48.8	60.8	20.2	24.6
19	Set-point a 21°C	67.1	64.6	79.5	18.5	23.1
20	Set-point a 17°C	35.8	34.5	45.3	26.5	31.3
21	Riscaldamento intermittente (7-17 h)	28.1	24.3	18.2	-35.2	-25.1
22	Riscaldamento intermittente (0-10 h)	38.0	35.6	18.2	-52.1	-48.9
23	Riscaldamento intermittente Periodi diversi a 19°C	27.5	22.6	9.1	-66.9	-59.7

Tabella 13. Fabbisogni termici in raffrescamento esaminati in [73]

Fabbisogno termico in raffrescamento [kWh/m ² -anno]						
N°	Descrizione	EnergyPlus	ESP-r	UNI TS 11300	Δ UNI TS 11300 EnergyPlus [%]	Δ UNI TS 11300 ESP-r [%]
1	Caso Base (Amsterdam – set-point di 19°C)	22.3	24.1	43.8	96.4	81.7
2	Aberdeen	9.3	10.6	34.3	268.8	223.6
3	Atene	98.2	100.2	116.3	18.4	16.1
4	Guadagni interni mediati (7 giorni/settimana)	18.6	20.0	43.8	135.5	119.0
5	Guadagni interni mediati ogni ora (giorni feriali/fine settimana)	19.2	20.6	43.8	128.1	112.6
6	Guadagni interni elevati	39.0	41.4	66.4	70.3	60.4
7	Guadagni interni ridotti	9.7	10.9	23.5	142.3	115.6
8	Superficie finestrata doppia	42.0	40.7	75.3	79.3	85.0
9	Superficie finestrata dimezzata	13.0	140.0	29.0	123.1	-79.3
10	Costruzione ultraleggera (C _m = 56.9 kJ/m ² K)	22.1	24.0	43.9	98.6	82.9
11	Costruzione pesante (C _m = 231.6 kJ/m ² K)	20.5	22.1	27.0	31.7	22.2
12	Costruzione pesante poco isolata	12.9	13.9	27.3	111.6	96.4
13	Scheduling di ventilazione giornaliero	22.4	24.1	43.8	95.5	81.7
14	Programma di ventilazione differenziato giorni feriali/fine settimana	26.2	23.8	43.8	67.2	84.0
15	Elevati ricambi d'aria orari (1.5 1/h)	13.3	14.8	35.5	166.9	139.9
16	Ridotti ricambi d'aria orari (0.3 1/h)	32.0	33.7	51.2	60.0	51.9
17	Edificio ruotato di 90° in senso antiorario	22.0	23.6	42.5	93.2	80.1
18	Edificio ruotato di 180° in senso antiorario	22.5	24.3	45.4	101.8	86.8
19	Set-point a 21°C	14.3	15.9	37.8	164.3	137.7
20	Set-point a 17°C	32.2	34.2	51.4	59.6	50.3
21	Raffrescamento intermittente (7-17 h)	20.7	21.7	31.3	51.2	44.2
22	Raffrescamento intermittente (0-10 h)	9.1	9.4	31.3	244.0	233.0
23	Raffrescamento intermittente Periodi diversi a 19°C	19.7	18.4	31.3	58.9	70.1

Un ulteriore lavoro che confronta il metodo mensile proposto dalla UNI/TS 11300-1 ed un software di simulazione dinamica è quello pubblicato da Evangelisti et. al. [76]. In questo lavoro gli autori conducono un confronto tra la metodologia mensile presentata nella UNI/TS 11300-1, adottando il software di calcolo MC 11300, e quella dinamica attraverso il software TRNSYS. L'analisi è svolta per tre differenti tipologie edilizie: un edificio storico di cinque piani (Figura 15), un condominio di tre piani ed un appartamento monofamiliare

posto all'ultimo piano di un condominio. I materiali costituenti tali edifici sono riportati in [Tabella 14](#), [Tabella 15](#) e [Tabella 16](#) rispettivamente per l'edificio storico, il condominio e l'appartamento in esame. Lo studio è condotto andando ad analizzare gli edifici proposti con i due software precedentemente citati (MC 11300 e TRNSYS). I risultati dell'analisi sono presentati in [Tabella 17](#). Dai dati riportati in tale tabella è possibile notare come la procedura di calcolo proposta dalla norma sovrastimi le richieste di energia termica per il riscaldamento ed il raffrescamento rispetto al metodo dinamico implementato in TRNSYS.



Figura 15. Vista in pianta e rappresentazione 3D dell'edificio storico esaminato in [76]

Tabella 14. Materiali costituenti l'edificio storico esaminato in [76]

Materiali	Conduttività termica [W/m K]	Capacità termica specifica [kJ/kg K]	Densità [kg/m ³]
Tufo	0.630	1.300	1500
Calcestruzzo	1.263	1.000	2000
Mattone	0.500	0.840	840
Travi di abete tetto	0.120	1.600	450
Cartongesso	0.900	0.910	1800
Mattone	0.325	0.840	1070
Travi del tetto	0.170	0.920	1200
Mattone forato	1.000	0.840	2000
Materiale isolante	0.500	0.840	840
Ciottoli	0.120	1.600	450
Mattone forato	0.900	0.910	1800
Materiale isolante	0.325	0.840	1070
Piastrella	0.840	0.840	1700
Finestre	Caratteristiche	Trasmittanza termica [W/m ² K]	Fattore G [-]
Telaio	Alluminio	2.27	-
Vetro a doppio isolamento	Doppio vetro 4/16/4 con aria	2.83	0.755

Tabella 15. Materiali costituenti il condominio esaminato in [76]

Materiali	Conduttività termica [W/m K]	Capacità termica specifica [kJ/kg K]	Densità [kg/m ³]
Cartongesso	0.160	0.840	950
Calcestruzzo leggero	0.170	0.840	500
Legno	0.120	1.600	450
Piastrella	1	0.840	2000
Basamento in calcestruzzo	2	1.000	2400
Finestre	Caratteristiche	Trasmittanza termica [W/m ² K]	Fattore G [-]
Telaio	Alluminio	2.27	-
Vetro a doppio	Doppio vetro 4/16/4 con aria	2.83	0.755

Tabella 16. Materiali costituenti l'appartamento esaminato in [76]

Materiali	Conduttività termica [W/m K]	Capacità termica specifica [kJ/kg K]	Densità [kg/m ³]
Cartongesso	0.160	0.840	950
Calcestruzzo leggero	0.320	0.840	1000
Materiale isolante	0.170	0.920	1200
Finestre	Caratteristiche	Trasmittanza termica [W/m ² K]	Fattore G [-]
Telaio	Alluminio	2.27	-
Vetro a doppio	Doppio vetro 4/16/4 con aria	2.83	0.755

Tabella 17. Fabbisogni termici in riscaldamento e raffrescamento per i diversi casi esaminati in [76]

Destinazione d'uso	Fabbisogno di energia termica [MWh/anno]					
	Riscaldamento			Raffrescamento		
	TRNSYS	UNI/TS 11300-1	Δ [%]	TRNSYS	UNI/TS 11300-1	Δ [%]
Edificio storico	33	42	28	7.8	10	38
Condominio	4.2	5.4	30	1.0	1.1	11
Appartamento	3.4	4.2	27	1.6	3.4	114

La crescente attenzione riguardante la corretta predizione dei fabbisogni energetici degli edifici ha portato ad una larga diffusione di software di calcolo non commerciali (definiti “in-house”). Al fine di completare la trattazione finora condotta, nel seguito è riportato un confronto effettuato da Michalak et al. [74] tra differenti metodologie di calcolo. Nello specifico, l'autore confronta i risultati ottenuti mediante un software di simulazione dinamica sviluppato in-house in ambiente MatLab/Simulink basato sul metodo orario della ISO 13790 e quelli risultanti dall'applicazione del metodo mensile presentato nella ISO 13790 con quelli ottenuti mediante il software di simulazione dinamica EnergyPlus. Sebbene tale lavoro non tratti in modo diretto la UNI/TS 11300-1, è stato preso comunque in considerazione visto che tale normativa deriva dal metodo mensile della ISO 13790. In particolare, lo studio è condotto analizzando un edificio, il cui modello 3D è riportato in [Figura 16](#), collocandolo in diverse zone climatiche caratteristiche del territorio polacco. I risultati ottenuti col metodo mensile risultano lontani da quelli forniti dal software di simulazione dinamica EnergyPlus. Nello specifico, per la stagione di riscaldamento, che risulta quella preponderante per le zone

climatiche analizzate, gli scostamenti percentuali risultano variare dal 4.1 al 13.4%. Per quanto concerne la stagione di raffrescamento gli errori sono invece compresi tra lo 0.65 ed il 3.8%.

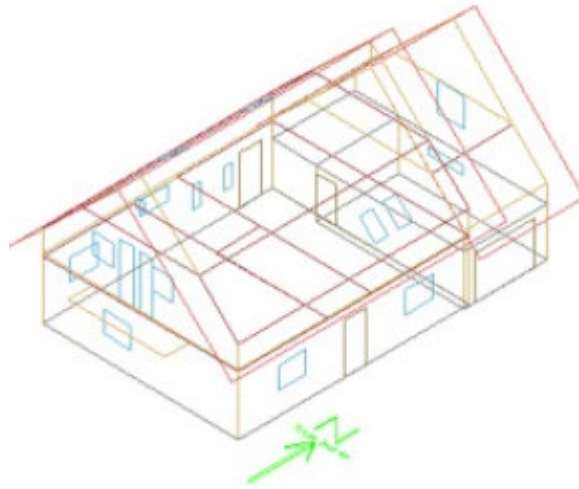


Figura 16. Modello 3D dell'edificio oggetto dell'analisi effettuata in [74]

Scostamenti percentuali analoghi, in merito ai risultati ottenuti attraverso il metodo di calcolo mensile della EN ISO 13790 e quelli del software dinamico IDA-CE sono stati riscontrati da Jokisalo et. al [75]. In questo lavoro, le differenze tra il fabbisogno di energia termica in riscaldamento per una singola unità familiare si attestano intorno al 19%.

6.1.2 Confronti tra la UNI EN ISO 52016-1 ed i software di simulazione dinamica

Quanto di seguito riportato ha lo scopo, attraverso un'accurata analisi della letteratura scientifica disponibile, di analizzare le differenze che intercorrono tra i risultati ottenuti adottando il metodo orario proposto dalla UNI EN ISO 52016-1 e quelli conseguiti mediante alcuni software di simulazione dinamica.

Il primo lavoro analizzato è quello condotto da Mazzarella et. al. [80]. Prima di descrivere nel dettaglio tale lavoro si consideri che nella norma UNI EN ISO 52016 sono proposti due differenti metodologie per la modellazione dei componenti opachi, entrambe basate su una rete termica equivalente (RC). La prima metodologia è quella direttamente proposta dalla versione internazionale EN ISO 52016, l'altra, basata su un approccio dettagliato degli elementi edilizi che compongono la muratura opaca, è quella implementata nell'Allegato A della versione italiana UNI EN ISO 52016. Si noti che il metodo proposto in quest'ultima stabilisce, differenziandosi da quanto riportato nel relativo standard internazionale, l'esatto numero e posizione dei nodi della rete termica equivalente RC in base all'effettiva composizione dell'elemento opaco considerato.

Gli autori del lavoro riportato in [80] confrontano dunque il comportamento di una parete analizzata mediante i due metodi appena descritti con quello ottenuto mediante una soluzione di tipo analitico. Nello specifico l'analisi è condotta ipotizzando una variazione di temperatura di tipo sinusoidale su tre diverse categorie di muro piano (le cui caratteristiche sono riportate in [Tabella 18](#)). L'intento di tale lavoro è quello di testare la validità delle metodologie di calcolo proposte nella UNI EN ISO 52016-1. La perturbazione termica applicata sulla parte esterna della muratura presa in considerazione, riportata in [Figura 17](#), ha le seguenti caratteristiche: i) ampiezza pari a 10°C; ii) valore medio di 0°C; iii) periodo di 24 h; iv) temperatura di set point interno pari a 0°C. Dall'analisi svolta, gli autori hanno dedotto che la metodologia presentata nell'allegato A della versione italiana della normativa restituisce risultati migliori (scarti minori rispetto alla soluzione analitica) rispetto a quella presente nella versione internazionale. Il modello presenta in ogni caso

dei margini di errori dovuti alla discretizzazione spaziale e temporale che, tuttavia, possono essere ridotti scegliendo intervalli temporali inferiori.

Tabella 18. Proprietà fisiche e termofisiche delle tre pareti oggetto dell'analisi effettuata in [80]

Caso	Materiali	λ [W/m K]	P [kg/m ³]	C [J/kg K]	D [m]	R [m ² K/W]
Muratura 1	Superficie interna					0.130
	Muro di calcestruzzo	1.800	2400	1000	0.200	0.111
	Isolamento termico	0.040	30	1400	0.100	2.500
	Rivestimento esterno	1.000	1200	1500	0.005	0.005
	Superficie esterna					0.040
Muratura 2	Superficie interna					0.130
	Intonaco interno	0.530	1500	1000	0.015	0.028
	Muratura in mattoni	0.230	750	1000	0.350	1.522
	Isolamento termico	0.036	20	1450	0.060	1.667
	Intonaco esterno	0.530	1500	1000	0.010	0.019
	Superficie esterna					0.040
Muratura 3	Superficie interna					0.100
	Intonaco interno	0.530	1500	1000	0.015	0.028
	Lastra di cemento armato	0.740	1150	1000	0.240	0.324
	Isolamento acustico	0.040	40	1000	0.008	0.200
	Sottostrato di cemento	0.150	600	1000	0.060	0.400
	Isolamento termico	0.036	20	1450	0.110	3.056
	Barriera impermeabile	0.200	1050	1000	0.004	0.020
	Superficie esterna					0.040

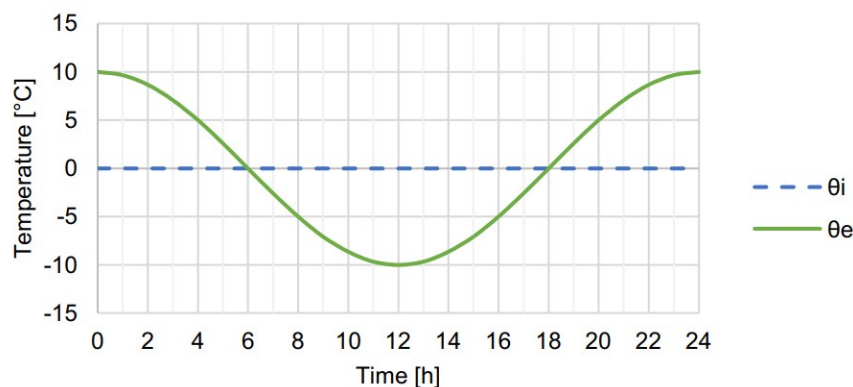


Figura 17. Settimana tipo in raffrescamento per la singola unità abitativa esaminata in [80]

Altra ricerca incentrata sulla EN ISO 52016:2017 è quella condotta da Zakula et. al. [78]. In questo lavoro si è valutata l'accuratezza della metodologia di calcolo dinamica oraria proposta dalla suddetta normativa confrontandone i risultati ottenuti con quelli conseguiti mediante l'utilizzo del software di simulazione dinamica TRNSYS. L'analisi è stata condotta prendendo in esame dieci differenti edifici, i cui modelli 3D sono riportati in [Figura 18](#), caratterizzati da cinque diverse destinazioni d'uso e due differenti qualità dell'involucro, definite rispettivamente "Old" e "NZEB". Le principali caratteristiche ed i parametri termofisici in input al calcolo per ogni edificio sono riportati rispettivamente in [Tabella 19](#) e [Tabella 20](#). L'analisi è stata svolta considerando due climi differenti, uno rappresentativo di un clima continentale (Zagabria) ed un altro tipico di una zona dal clima più temperato (Spalato).

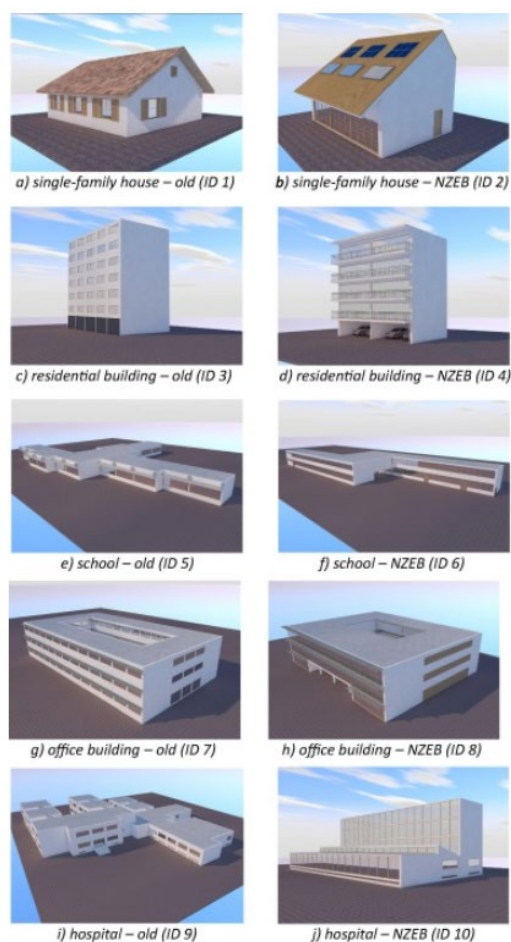


Figura 18. Edifici analizzati in [78]

Tabella 19. Caratteristiche principali degli edifici analizzati in [78]

N°	Destinazione d'uso	Ore di riscaldamento/raffrescamento	A _{floor} [m ²]	V [m ³]	Numero di zone	Tipologia costruttiva
1	Abitazione monofamiliare Tradizionale	6:00 – 23:00 7 giorni/settimana	198	380	7	Molto pesante
2	Abitazione monofamiliare NZEB		232	438	5	
3	Edificio residenziale Tradizionale	6:00 – 23:00 7 giorni/settimana	1248	2220	19	Molto pesante
4	Edificio residenziale NZEB		607	1638	9	
5	Scuola Tradizionale	6:00 – 20:00 5 giorni/settimana	2086	8552	6	Molto pesante
6	Scuola NZEB		2068	8278	13	
7	Edificio adibito ad uffici Tradizionale	5:00 – 18:00 5 giorni/settimana	2694	8086	11	Molto pesante
8	Edificio adibito ad uffici NZEB		2745	8231	18	
9	Ospedale Tradizionale	24 h 7 giorni/settimana	2579	8770	13	Molto pesante
10	Ospedale NZEB		2032	7232	13	

Tabella 20. Dati di input degli edifici analizzati in [78]

N°	U _{wall} [W/m²K]	U _{window} [W/m²K]	g _{window} [-]	Infiltrazioni [1/h]	Guadagni di calore interni [W/m²]	Set-point di riscaldamento/raffresc amento [°C]
1	0.40	2.80	0.76	0.6	5	20 (riscaldamento) 22 (raffrescamento)
2	0.20	0.86	0.60	0.5		
3	0.80	2.80	0.76	0.7	5	
4	0.17	0.86	0.60	0.5		
5	1.30	2.80	0.76	0.7	6	
6	0.17	0.86/0.68	0.60/0.40	0.7		
7	0.56	2.80	0.76	0.7	6	
8	0.17	0.68	0.40	0.7		
9	0.99	2.80	0.76	0.7	6	
10	0.17	1.27	0.59	0.7		

I risultati dell'analisi condotta sono riportati, in termini di fabbisogni termici per il riscaldamento ed il raffrescamento, nella [Tabella 21](#). Dalla questa tabella è possibile rilevare differenze percentuali che variano dallo 0.6 al 38% per le richieste termiche in riscaldamento, e dal -17 al 3.2% per il raffrescamento. Per quanto riguarda i risultati relativi al clima costiero, non riportati per brevità, le differenze percentuali variano tra lo 0.2 ed il 35% per le richieste termiche in riscaldamento, e dal -15 al 3.2% per il raffrescamento.

Tabella 21. Fabbisogni termici in riscaldamento e raffrescamento per clima continentale (Zagabria) [78]

N.	Destinazione d'uso	Qualità involucro	Indice di prestazione energetica [kWh/m ² ·anno]					
			Riscaldamento			Raffrescamento		
			TRNSYS	ISO 52016	Δ [%]	TRNSYS	ISO 52016	Δ [%]
1	Monofamiliare	Old	36	34	-5.6	24	23	-4.2
2		NZEB	18	15	-16.7	76	83	9.2
3	Residenziale	Old	73	70	-4.1	51	49	-3.9
4		NZEB	16	9.9	-38.1	85	99	16.5
5	Scuola	Old	91	88	-3.3	52	56	7.7
6		NZEB	36	30	-16.7	62	72	16.1
7	Ufficio	Old	64	59	-7.8	64	71	10.9
8		NZEB	26	24	-7.7	54	63	16.7
9	Ospedale	Old	214	213	-0.5	51	50	-2.0
10		NZEB	56	49	-12.5	125	137	9.6

L'ultimo studio trattato, condotto da Bruno et. al [79], riguarda un ulteriore confronto effettuato tra i risultati ottenuti con il metodo mensile della EN ISO 52016-1 e quelli ottenuti attraverso il software TRNSYS. Nello specifico, sono stati presi in considerazione due edifici differenti, uno residenziale ed uno adibito ad uso uffici, i cui modelli 3D sono riportati in [Figura 19](#). Tali edifici sono stati analizzati, per la sola stagione di raffrescamento, in tre differenti località climatiche: Roma, Atene e Tunisi. In aggiunta, gli autori considerano anche differenti valori dell'area della superficie vetrata (Windows to Wall ratio – WWR) e differenti tipologie di vetro (singolo, doppio o triplo). I risultati dell'analisi condotta sono riportati in [Tabella 22](#) per tutti i casi studio analizzati.

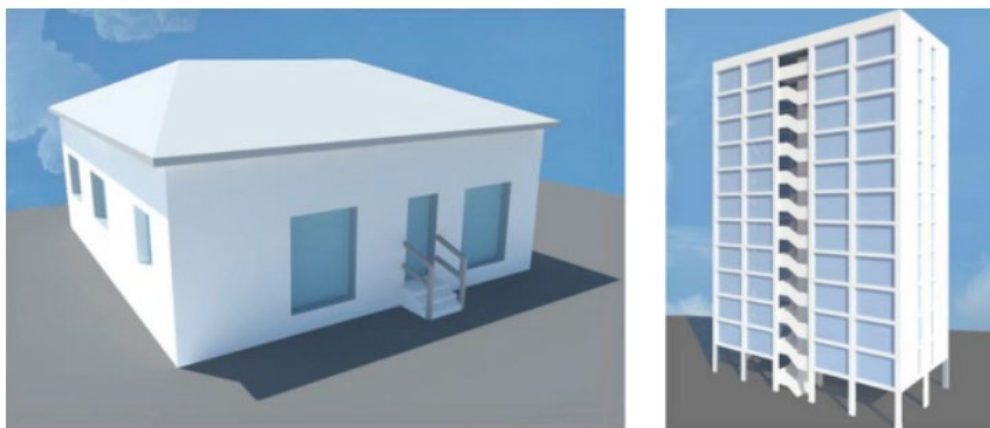


Figura 19. Edifici analizzati in [79]

Tabella 22. Fabbisogni termici in raffrescamento per la zona climatica di Roma [79]

Caratteristiche edificio			Domanda di energia di raffrescamento [kWh/anno]		
Tipologia	WWR [%]	Tipo di vetro	TRNSYS	EN ISO 52016-1	Δ [%]
Residenziale	12	Singolo	5487.8	6122.9	11.6
	30		12252.9	14790.9	20.7
	50		17518.3	28081.5	60.3
	12	Doppio	4895.8	5422	10.7
	30		11067.3	13803.3	24.7
	50		16392.1	24984.6	52.4
	12	Triplo	4337	4735.7	9.2
	30		9955.4	12857.1	29.1
	50		15277.1	22042	44.3
Uffici	40	Singolo	196759	252858.6	28.5
	50		224914.2	316330.2	40.6
	60		246345.2	386881.6	57.0
	40	Doppio	180245	223068.1	23.8
	50		208351.5	280375.3	34.6
	60		231707.7	338306.4	46.0
	40	Triplo	164642.9	195669.3	18.8
	50		193271.6	245849.2	27.2
	60		218262.6	293532.7	34.5

Come è possibile verificare dai risultati riportati in tabella, anche per questo studio, la procedura EN ISO 52016-1 mostra sensibili scostamenti rispetto al software TRNSYS (dal 8.4 al 38%). Tali differenze sono principalmente legate ad una valutazione differente dei guadagni solari ottenuti attraverso le superfici vetrate.

7 Analisi degli scostamenti tra i valori del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento ottenuti con la UNI/TS 11300, la EN ISO 52016, e software di simulazione dinamica

In questo capitolo sono analizzate in modo omogeneo le differenze riscontrate in letteratura tra i risultati ottenuti attraverso le norme UNI/TS 11300 (metodo mensile) e EN ISO 52016 (metodo orario) e quelli conseguiti mediante software commerciali per la simulazione dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici. Come nel capitolo 6, i confronti sono effettuati considerando i valori degli indici di prestazione energetica degli edifici (fabbisogno di energia termica in riscaldamento e raffrescamento). Scopo dell'indagine comparativa è comprendere se l'attuale letteratura scientifica sulle metodologie proposte è esaustiva, o deve essere integrata ed ampliata, al fine di definire linee guida sull'utilizzo delle stesse in funzione delle finalità simulate (es.: redazione APE), delle particolari applicazioni (es.: edifici residenziali, commerciali), delle tipologie di edificio, e della zona climatica.

7.1 Confronto tra i risultati ottenuti attraverso le norme UNI/TS 11300 e UNI EN ISO 52016 e quelli ottenuti con EnergyPlus e TRNSYS

In **Tabella 23** si riportano, per i più significativi lavori scientifici analizzati nel capitolo 6, i dati relativi:

- al software adottato;
- alla metodologia di calcolo utilizzata;
- agli edifici considerati come caso studio;
- alla tipologia d'involucro;
- alla località climatica analizzata.

Infine, per ogni lavoro analizzato la tabella riporta gli scarti percentuali tra i risultati ottenuti mediante l'applicazione delle metodologie proposte dalle norme UNI/TS 11300 (metodo mensile) e EN ISO 52016 (metodo orario) e quelli ricavati mediante l'utilizzo di software di simulazione dinamica. Va sottolineato che, in questa analisi, i risultati forniti dai codici commerciali per la simulazione dinamica sono considerati come riferimento. Tuttavia, si sottolinea che per la valutazione dell'accuratezza dei metodi proposti, i confronti dovrebbero sempre essere effettuati con i risultati ottenuti attraverso misure, se disponibili. Tuttavia, quasi la totalità delle analisi riscontrate in letteratura manca di una comparazione sperimentale, che è ovviamente onerosa e laboriosa, e che può comunque essere anch'essa affetta da errori.

Tabella 23. Scostamenti percentuali tra il metodo mensile e quello dinamico

Autori	Software dinamico	Norma oggetto del confronto (metodo)	Edificio		Località climatica	Δ [%]	
						Riscaldamento	Raffrescamento
Ballarini et al. [72]	Energy plus	UNI/TS 11300-1 (mensile)	Singola unità abitativa, condominio	2 livelli di isolamento termico	Milano Roma Catania	10 ÷ 825	-34.4 ÷ -3.8
Kokogiannakis et. al [73]	Energy plus	EN 13790 (mensile)	1 ufficio	3 tipologie di vetro 4 stratigrafie	Aberdeen Amsterdam Atene	-66.9 ÷ 169.2	18.4 ÷ 268.8
	ESP-r					-59.7 ÷ 204.3	-79.3 ÷ 233
Michalak et. al [74]	Energy plus	EN 13790 (mensile)	1 edificio composto da 2 piani ad uso abitativo	1 tipologia di involucro	10 località fredde (Polonia)	4.1 ÷ 13.4	0.65 ÷ 3.8
		EN 13790 (orario)				3.9 ÷ 12.2	0.14 ÷ 2.1

Jokisalo et. al [75]	IDA-CE	EN 13790 (mensile)	Condominio di 7 piani, singolo appartamento	3 tipologie di involucro: leggero, medio e massivo	Helsinki	17.3 ÷ 18.6	-
			Edificio di 5 piani uso uffici			43.9 ÷ 45.6	-
Evangelisti et. al [76]	TRNSYS	UNI TS 11300 (mensile)	1 edificio storico (5 piani), 1 condominio (3 piani) ed 1 appartamento monofamiliare	2 tipologie di involucro: leggero (nuovi edifici) e massivo (esistente)	Roma	23.5 ÷ 28.6	10.0 ÷ 112.5
Zakula et. al [78]	TRNSYS	ISO 52016	1 edificio monofamiliare, 1 edificio residenziale, 1 scuola, 1 edificio ad uso uffici, 1 ospedale	2 tipologie di involucro: vecchio edificio, nuovo NZEB	Zagabria	-38.1 ÷ -0.5;	-4.2 ÷ 16.7
Bruno et. al [79]	TRNSYS	ISO 52016	1 edificio residenziale; edificio ad uso uffici	3 tipologie di vetro	Atene Roma Tunisi	-	9.2 ÷ 60.3

In [Figura 20](#) e [Figura 21](#) sono riportati gli scarti individuati tra le metodologie proposte rispettivamente dalla UNI/TS 11300-1 e dalla EN ISO 52016-1 con alcuni software di simulazione dinamica.

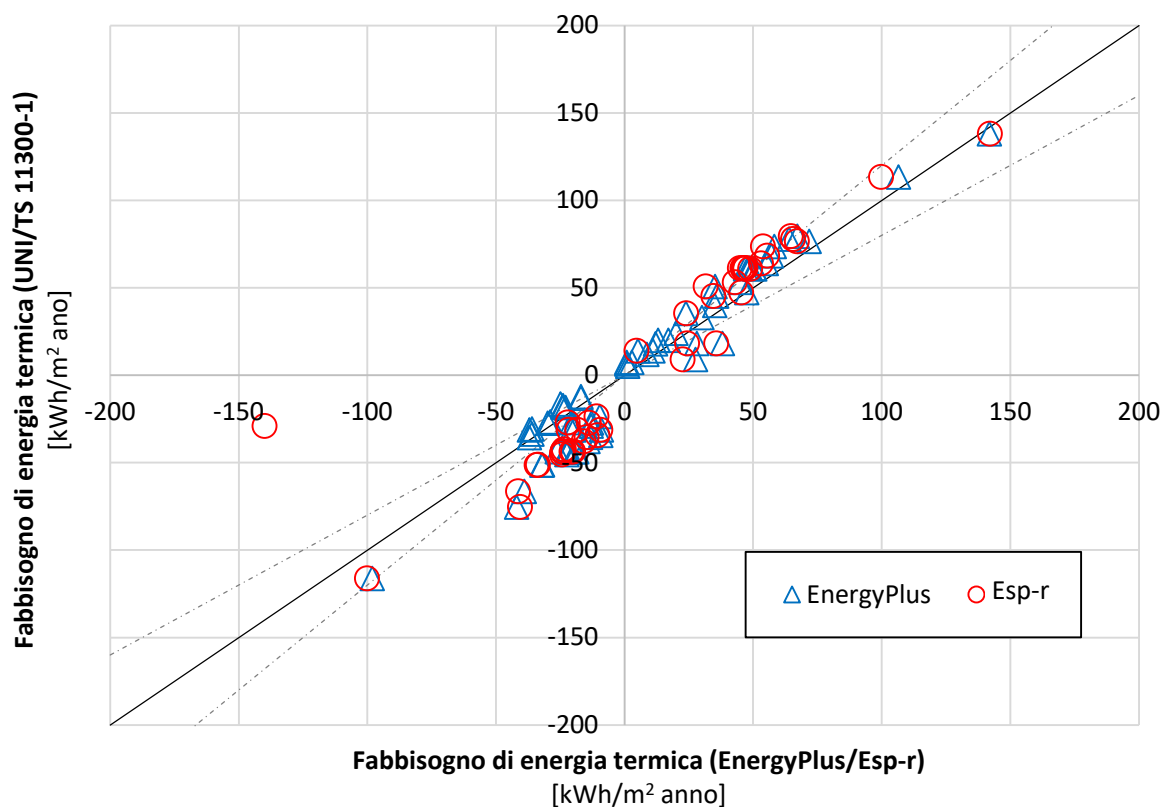


Figura 20. Confronto tra UNI/TS 11300-1 (mensile) e i software EnergyPlus ed Esp-r

La [Figura 20](#) mostra che, in linea generale, la UNI/TS 11300-1 rispetto ad EnergyPlus ed ESP-r (software basati sul metodo dinamico) sovrastimi il calcolo del fabbisogno energetico per riscaldamento, specialmente all'aumentare della richiesta di energia termica. Nel caso del fabbisogno di raffreddamento, invece, i codici di simulazione dinamica tendono a sottostimare i valori forniti rispetto alla UNI/TS 11300-1, grazie probabilmente alla migliore gestione della radiazione solare e dell'inerzia termica. La [Figura 21](#), simile alla precedente, è relativa al confronto tra la UNI EN ISO 52016 e il software TRNSYS (software basato sul metodo dinamico); i risultati riportati in figura, sebbene pochi e non sufficienti per fornire indicazioni esaustive, mostrano una buona corrispondenza.

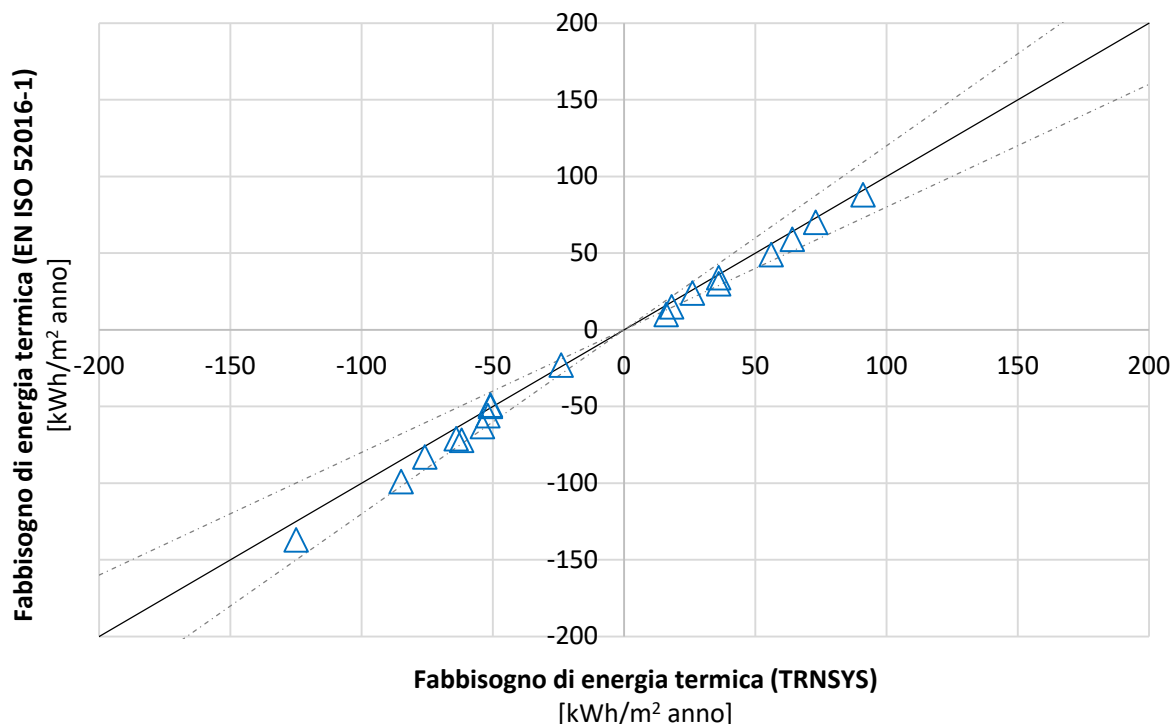


Figura 21. Confronto tra la EN ISO 52016-1 e TRNSYS

I risultati accorpati in [Figura 20](#) e [Figura 21](#) sono stati ulteriormente analizzati e quindi raggruppati in funzione del clima, al fine di valutare l'esistenza di una correlazione tra le discrepanze tra i risultati forniti dalla tre metodologie e le condizioni climatiche. A tal fine, è stata utilizzata la classificazione Köppen-Geiger e sono stata individuate le cinque differenti fasce climatiche ([Figura 22](#)) caratteristiche della penisola italiana, così definite:

- Cfa: clima temperato senza stagione secca e con estate molto calda, temperatura media del mese più caldo superiore a 22°C;
- Cfb: clima temperato senza stagione secca e con estate calda, temperatura media del mese più caldo inferiore a 22°C ed almeno per 4 mesi sopra 10°C;
- Csa: clima temperato con estate secca e calda, temperatura media del mese più caldo superiore a 22°C;
- Csb: clima temperato con estate secca e calda, temperatura media del mese più caldo inferiore a 22°C ed almeno per 4 mesi sopra 10°C;
- Dfb: climi freddi con inverno umido, temperatura media del mese più caldo inferiore a 22°C; almeno per 4 mesi sopra 10°C.

Va sottolineato che in Italia possono essere individuate ulteriori zone climatiche oltre quelle precedentemente descritte, nelle quali, però, non ricadono grandi centri abitati (zone di media o alta montagna o ancora piccole isole), e pertanto non sono state riportate.

I risultati dei fabbisogni energetici ottenuti attraverso le norme UNI/TS 11300-1 (metodo mensile) e EN ISO 52016-1 (metodo orario), e quelli conseguiti attraverso i software di simulazione dinamica EnergyPlus e TRNSYS (relativi alle pubblicazioni presenti in letteratura precedentemente analizzate, [Tabella 23](#)) sono stati rielaborati per gli edifici esaminati in base alla:

- destinazione d'uso;
- tipologia dell'involucro edilizio;
- zona climatica di ubicazione.

In particolare, l'analisi effettuata riguarda gli scostamenti percentuali tra i risultati ottenuti attraverso:

- la UNI/TS 11300-1 (metodo mensile) e quelli conseguiti con Energy Plus e TRNSYS;
- la UNI EN ISO 52016-1 (metodo orario) e quelli conseguiti con Energy Plus e TRNSYS.

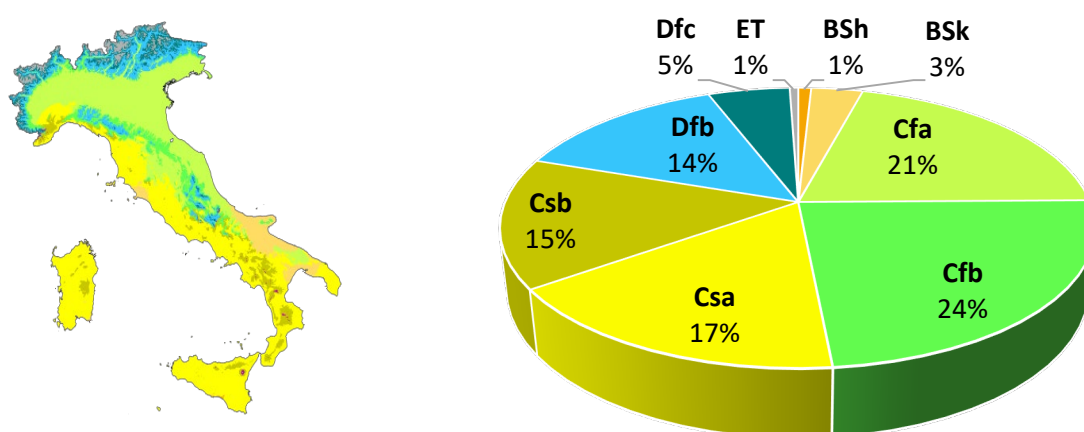


Figura 22. Mappa delle zone climatiche italiane secondo Köppen-Geiger e distribuzione percentuale dei centri abitati italiani

I risultati di tale analisi sono riportati per la stagione di riscaldamento in [Tabella 24](#) mentre per quella di raffrescamento in [Tabella 25](#). Da tali tabelle si osserva un'estrema frammentazione e, in alcuni casi l'assenza di dati. Nello specifico, le zone climatiche Csb e Dfb, che rappresentano rispettivamente il 15% ed il 14% delle zone climatiche nelle quali sono collocati i centri abitati italiani, sono totalmente prive di dati riportati in letteratura (circa un terzo di tali zone climatiche). Inoltre, facendo riferimento ad edifici con destinazione d'uso non residenziale (adibiti ad uso uffici), per la zona climatica Cfa, che rappresenta il 21% delle zone climatiche in cui sono collocate le città italiane, non vi sono confronti riportati in letteratura. Infine, per la zona climatica Csa si riscontrano risultati abbastanza scoraggianti: nonostante rappresenti circa il 17% delle zone climatiche nelle quali sono collocati centri abitati, i risultati di letteratura sono presenti con scarti superiori al 100% oppure sono mancanti (es.: residenziale adibito ad appartamenti e non residenziale adibito ad uffici).

Soprattutto a causa della suddetta assenza di dati, si sottolinea la necessità di condurre ulteriori analisi riguardanti le diverse metodologie esaminate in modo da poter, successivamente, effettuare un confronto omogeneo per tutte le zone climatiche italiane, le destinazioni d'uso ed i diversi tipi di involucro edilizio. Ancor di più, al fine di valutare l'efficacia di una metodologia rispetto ad un'altra (tra le tre oggetto di studio della presente analisi: metodo stazionario, metodo mensile, e metodo dinamico), è auspicabile l'utilizzo di dati sperimentali da considerare come benchmark.

Tabella 24. Scostamenti percentuali inerenti alla valutazione del fabbisogno di energia termica in riscaldamento dei lavori trovati in letteratura, suddivisi per zona climatica e destinazione d'uso

Destinazione d'uso	Tipologia involucro	Zona Climatica	UNI/TS 11300-1		UNI EN ISO 52016-1	
			EnergyPlus	TRNSYS	EnergyPlus	TRNSYS
			Δ [%]	Δ [%]	Δ [%]	Δ [%]
Residenziale (Monofamiliare)	Light	Cfa	10.0	-	-	-
		Cfb	-	-	-5.6	-
		Csa	17.6 ÷ 50.0	-	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-
	Heavy	Cfa	14.3	-	-	-
		Cfb	-	-	-16.7	-
		Csa	20.0 ÷ 53.8	27.0 ÷ 30.0	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-
Residenziale (Appartamenti)	Light	Cfa	39.5	-	-	-
		Cfb	-	-	-4.1	-
		Csa	-	-	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-
	Heavy	Cfa	27.3	-	-	-
		Cfb	-	-	-38.1	-
		Csa	> 100	-	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-
Non-residenziale (Uffici)	Light	Cfa	-	-	-	-
		Cfb	21.5	-	-7.8 ÷ -3.3	-
		Csa	> 100	-	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-
	Heavy	Cfa	-	-	-	-
		Cfb	-1.5	-	-16.7 ÷ -7.7	-
		Csa	-	-	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-

Tabella 25. Scostamenti percentuali inerenti alla valutazione del fabbisogno di energia termica in raffrescamento dei lavori trovati in letteratura, suddivisi per zona climatica e destinazione d'uso

Destinazione d'uso	Tipologia involucro	Zona Climatica	UNI/TS 11300		UNI EN ISO 52016	
			EnergyPlus	TRNSYS	EnergyPlus	TRNSYS
			Δ [%]	Δ [%]	Δ [%]	Δ [%]
Residenziale (Monofamiliare)	Light	Cfa	-22.9	-	-	-
		Cfb	-	-	-4.2	-
		Csa	-27.9 ÷ -19.6	-	-	9.2 ÷ -60.3
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-

	Heavy	Cfa	-28.2	-	-	-
		Cfb	-	-	9.2	-
		Csa	-34.4 ÷ -24.2	11.0 ÷ 114	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-
Residenziale (Appartamenti)	Light	Cfa	-8.30	-	-	-
		Cfb	-	-	-3.9	-
		Csa	-15.4 ÷ -3.80	-	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-
	Heavy	Cfa	-7.90	-	-	18.8 ÷ -57.0
		Cfb	-	-	16.5	-
		Csa	-14.7 ÷ -6.40	-	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-
Non-residenziale (Uffici)	Light	Cfa	-	-	-	-
		Cfb	96.4	-	7.7 ÷ 10.9	-
		Csa	18.4	-	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-
	Heavy	Cfa	-	-	-	-
		Cfb	31.7	-	16.1 ÷ 16.7	-
		Csa	5.3	-	-	-
		Csb	-	-	-	-
		Dfb	-	-	-	-

7.2 Confronto tra i risultati ottenuti attraverso le norme UNI/TS 11300 e EN ISO 52016 e quelli ottenuti con il software TRNSYS e il codice in-house DETECT

L'esigenza di comprendere se una metodologia è accurata o meno e se il grado di accuratezza è sufficiente per lo scopo dell'indagine simulativa, con particolare attenzione alla redazione dell'attestato di prestazione energetica), è stata sviluppata un'analisi comparativa tra i risultati ottenuti attraverso il metodo mensile della UNI/TS 11300-1, il metodo orario della UNI EN ISO 52016-1, e la simulazione dinamica dettagliata, effettuata attraverso due software, uno commerciale (TRNSYS) e uno sviluppato *in-house* (DETECT [70]), entrambi validati. L'analisi ha lo scopo di fornire informazioni preliminari sull'adeguatezza nell'uso del metodo orario dalla EN ISO 52016-1, piuttosto che del più semplice metodo mensile della UNI/TS 11300-1, piuttosto che di un metodo dinamico dettagliato, anche al fine di confrontare e valutare l'attendibilità delle metodologie.

A tale scopo, è stata sviluppata un'indagine organica (cioè a parità di caso studio, dati climatici, dati di ingresso, etc.) su un caso studio proposto per la procedura di validazione dei codici di calcolo per la simulazione delle prestazioni energetiche degli edifici, ampiamente nota in letteratura e denominata BESTEST [81]. L'analisi è stata condotta considerando l'edificio della procedura BESTEST (riportata in [Figura 23](#)) caratterizzato da due differenti pesi della struttura: caso 600 (struttura leggera) e caso 900 (struttura pesante). I dati termo-fisici e di utilizzo relativi all'edificio, considerato ad uso residenziale, sono riportati rispettivamente in [Tabella 26](#) e [Tabella 27](#). Lo studio è stato effettuato considerando inoltre tre località distinte: Napoli, Roma e Milano [81]. L'utilizzo del modello BESTEST permette di ridurre al minimo le sorgenti di errore, dovute per esempio a geometrie complesse, fenomeni termo-fisici non controllabili, errori nell'immissione dei dati, etc. [82]. Ciò permette di poter isolare i fenomeni della termofisica dell'edificio e,

possibilmente, individuare le sorgenti di discrepanza tra i risultati forniti dalle simulazioni effettuate con le tre metodologie e i risultati di riferimento del BESTEST.

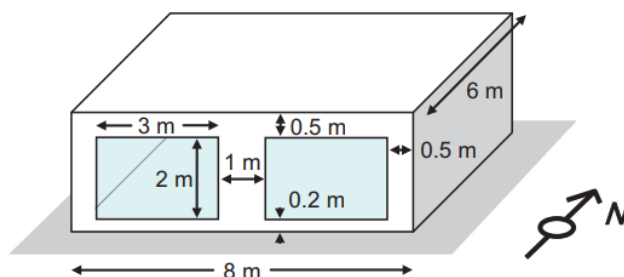


Figura 23. Caso studio residenziale (BESTEST)

Tabella 26. Parametri termo-fisici dell'edificio del BESTEST

Elemento	Caso 600 (edificio leggero)		Caso 900 (edificio pesante)	
	Materiale	[mm]	Materiale	[mm]
Muro	Cartongesso	12	Cemento	100
	Fibra di vetro	66	Schiuma isolante	61.5
	Rivestimento in legno	9	Rivestimento in legno	9
Tetto	Cartongesso	10	Identico al Caso 600	
	Fibra di vetro	111.8		
	Rivestimento	19		
Pavimento	Pavimento in legno	25	Pavimento in cemento	80
	Isolante	1.003	Isolante	1.007
Finestra	Vetro	4	Identico al Caso 600	
	Aria	6		
	Vetro	4		

Tabella 27. Parametri di utilizzo dell'edificio del BESTEST

Parametro	Valore
Rapporto superficie su volume [-]	1.3
Superfici vetrate su superfici opache [%]	55
Ricambi orari [vol/ora]	0.5
Apporti termici interni sensibili [W/m²]	4.2
Vapore d'acqua immesso in ambiente per persona [g/(ora·persona)]	40

Al fine di ridurre gli errori di immissione dei dati e di implementazione del modello geometrico, le simulazioni relative alle norme UNI/TS 11300-1 e UNI EN ISO 52016 sono state svolte attraverso un solo software, Termolog, che implementa entrambe le metodologie ed è riconosciuto dal CTI (si veda il paragrafo 5.2). In [Tabella 28](#) sono riportati tutti i dati delle simulazioni, per entrambi gli edifici (leggero e pesante) e per tutte e tre le località climatiche. Si noti che, con riferimento ai ricambi d'aria orari riportati in [Tabella 27](#), questi sono ridotti a 0.05 vol/ora dalle 18:00 alle 8:00.

Dall'analisi dei risultati, si evince una buona corrispondenza tra i dati ottenuti con i codici di simulazione dinamica e la UNI/TS 11300 per quasi tutti i casi analizzati, nonostante le sostanziali differenze tra le metodologie. Ciò suggerisce, in prima approssimazione, che la metodologia stagionale (UNI/TS 11300-1), almeno relativamente al calcolo del fabbisogno energetico ai fini dell'APE per un edificio residenziale, possa essere ragionevolmente utilizzata visto il non eccessivo scarto con i risultati forniti dai metodi dinamici. La

metodologia oraria implementata nella UNI EN ISO 52016 sembrerebbe sovrastimare notevolmente i risultati dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento (rispetto a tutte le altre metodologie), soprattutto per le località più calde (Napoli e Roma). Tuttavia, ciò che chiaramente si evince è che nonostante l'importanza della dinamicità di fenomeni (come lo scambio termico attraverso i componenti trasparenti ed opachi, la capacità termica e l'inerzia delle strutture dell'involucro edilizio, le resistenze alle sollecitazioni termiche esterne, etc.) ai fini della redazione dell'APE, la metodologia stagionale della UNI/TS 11300-1 può ancora essere considerata valida.

Tabella 28. Risultati delle simulazioni (Termolog, TRNSYS, DETECT)

Località	Stagione	Edificio Caso	Fabbisogno energetico [kWh/m ² anno]			
			UNI/TS 11300	UNI EN ISO 52016	TRNSYS	DETECT
Napoli	Riscaldamento	600	16.7	44.9	22.2	23.2
		900	16.9	52.0	19.3	18.1
	Raffrescamento	600	63.1	63.2	65.0	67.0
		900	56.4	50.3	25.1	28.2
Roma	Riscaldamento	600	16.2	48.0	22.5	22.5
		900	18.3	53.7	16.3	14.3
	Raffrescamento	600	65.3	58.7	73.1	74.3
		900	65.3	47.2	27.0	31.1
Milano	Riscaldamento	600	78.8	83.1	56.9	52.2
		900	80.5	94.4	61.8	59.2
	Raffrescamento	600	46.0	47.6	42.3	45.8
		900	45.8	35.0	16.9	15.0

I risultati dell'analisi svolta sono anche riportati nelle figure successive, al fine di meglio visualizzare gli scostamenti percentuali ottenuti tra i vari software (valutati considerando come riferimento i dati ottenuti attraverso il metodo dinamico). Nello specifico, in [Figura 24](#) e [Figura 25](#) sono riportati, rispettivamente per la stagione invernale e quella estiva, gli scarti che intercorrono tra i risultati ottenuti mediante il software DETECT e le metodologie proposte dalle due norme (UNI/TS 11300-1 – mensile; EN ISO 52016-1 – oraria). I risultati del confronto condotto tra le norme ed il software TRNSYS sono invece riportati in [Figura 26](#) e [Figura 27](#). L'analisi svolta, non esaustiva, mostra come anche utilizzando un semplice caso studio (BESTEST) non è facile individuare delle linee guida sull'utilizzo delle metodologie analizzate. È, quindi, auspicabile, sviluppare indagini simulative comparative organiche e complete, considerando diversi edifici, destinazioni d'uso, e località climatiche, al fine di individuare il metodo più corretto ed affidabile, nonché standardizzabile, da utilizzare di volta in volta sia per il fine della prestazione che per la diagnosi energetica degli edifici.

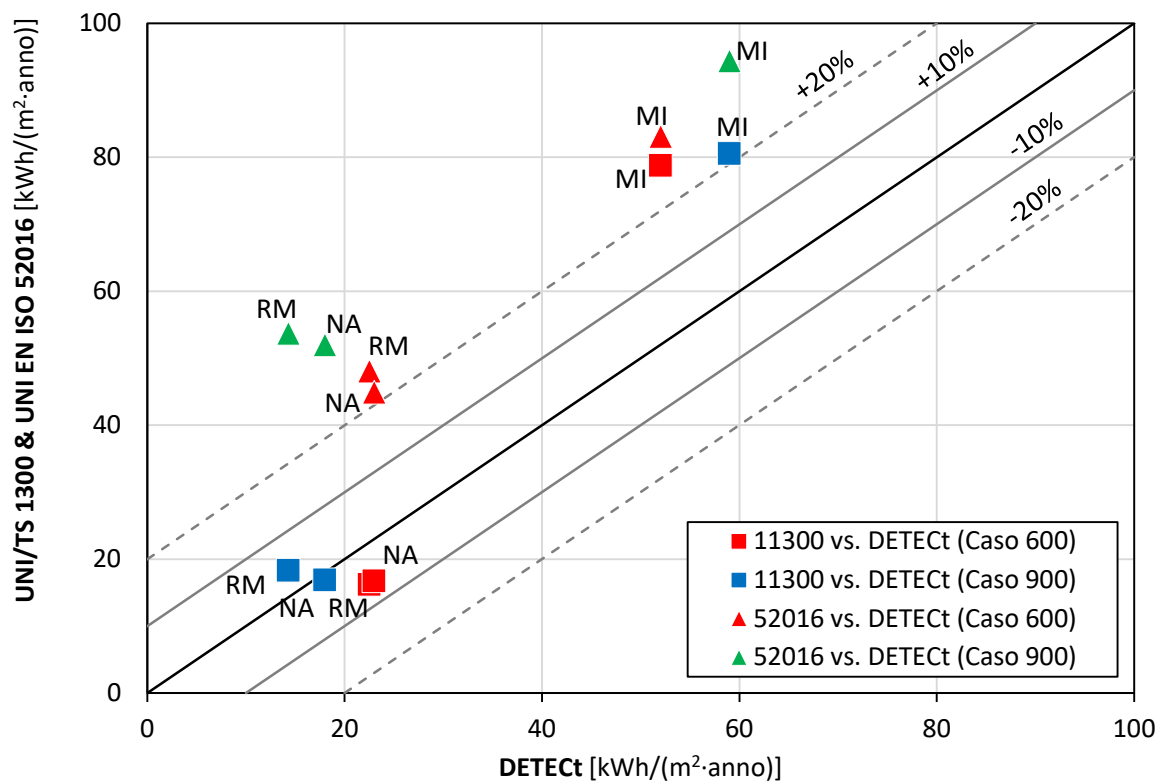


Figura 24. DETECT vs. UNI/TS 1300 & UNI EN ISO 52016 – risultati invernali

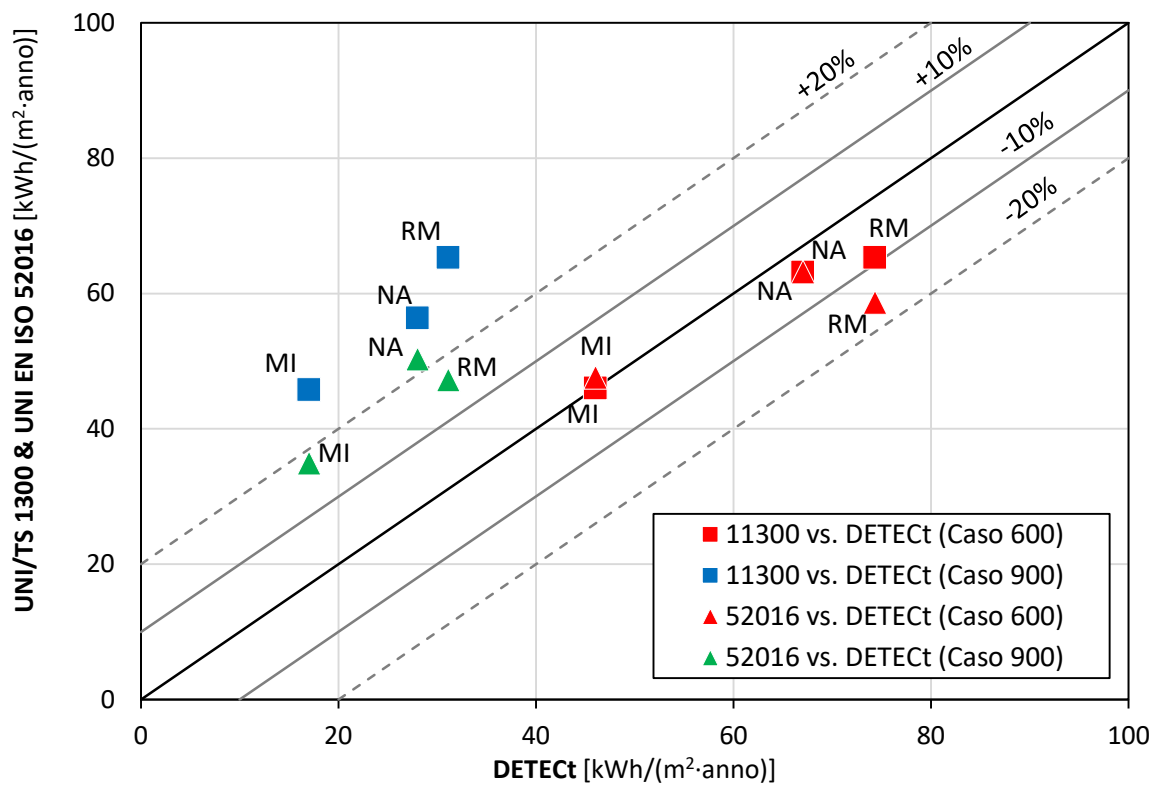


Figura 25. DETECT vs. UNI/TS 1300 & UNI EN ISO 52016 – risultati estivi

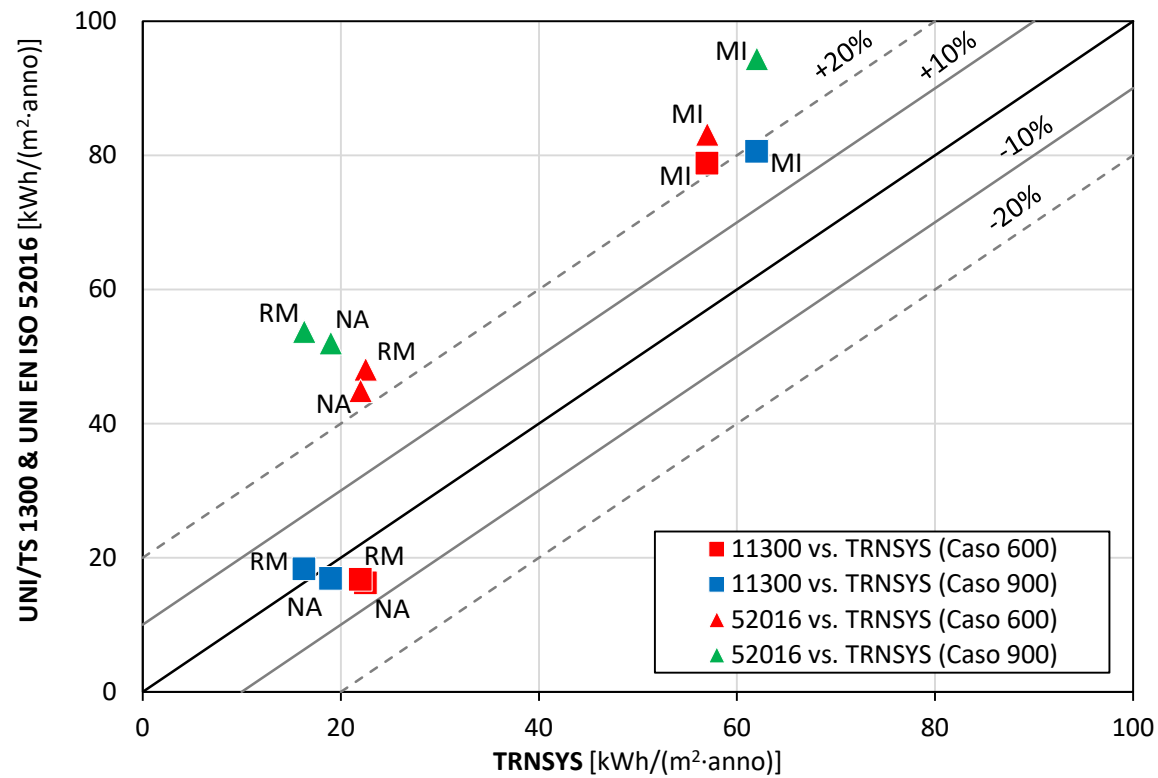


Figura 26. TRNSYS vs. UNI/TS 1300 & UNI EN ISO 52016 – risultati invernali

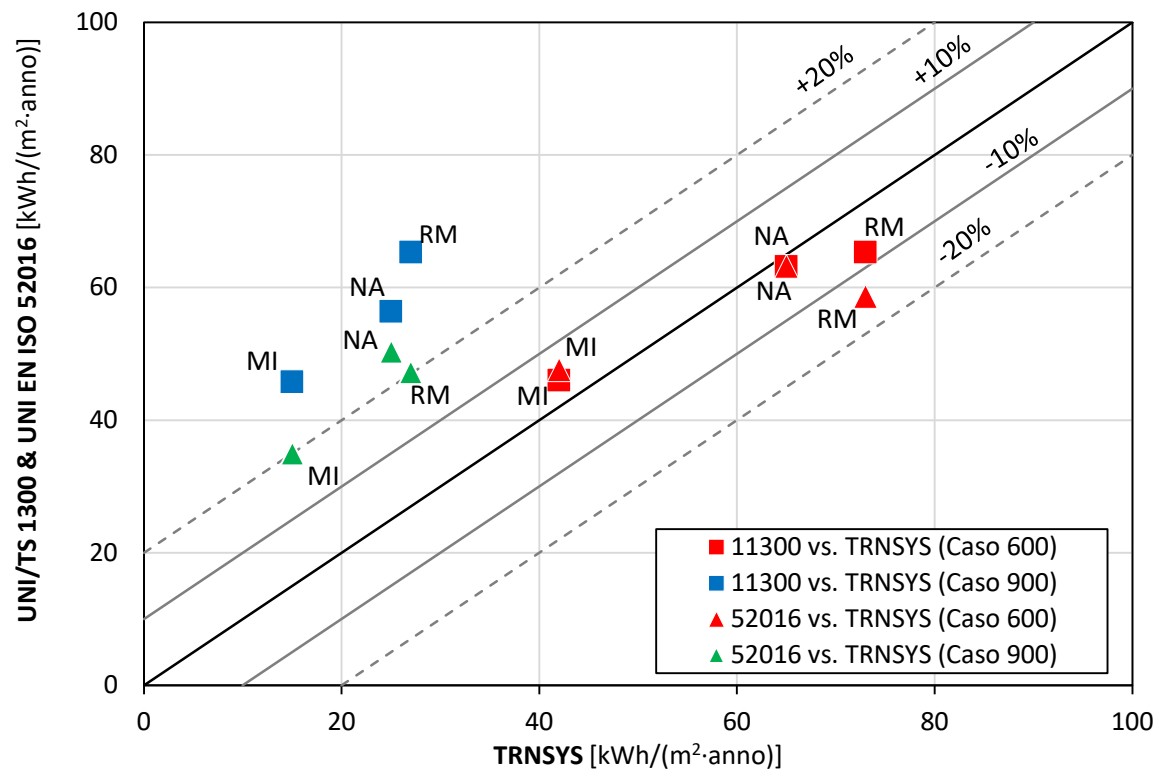


Figura 27. TRNSYS vs. UNI/TS 1300 & UNI EN ISO 52016 – risultati estivi

8 Conclusioni

Al fine di valutare le prestazioni energetiche degli edifici e promuovere l'efficienza energetica del sistema edificio-impianto, è possibile oggi utilizzare diverse metodologie di analisi del sistema basate sul calcolo stazionario mensile (metodo mensile - UNI/TS 11300-1), sulla simulazione dinamica oraria semplificata (metodo orario - UNI EN ISO 52016-1), e su dettagliati modelli di calcolo per la simulazione dinamica (metodo dinamico).

L'analisi attraverso il metodo mensile della UNI/TS 11300-1 permette, tra l'altro, il calcolo in modo semplificato degli indici necessari per la redazione dell'attestato di prestazione energetica (APE). Viceversa, attraverso l'utilizzo dei metodi dinamici, come quello orario della UNI EN ISO 52016-1 e quelli dettagliati implementati in diversi codici di calcolo (EnergyPlus, TRNSYS, etc.) disponibili sul mercato, è possibile valutare oltre ai suddetti indici anche il comportamento termo-fisico dell'edificio tenendo conto degli effetti fisici dipendenti dal tempo, ottenendo indicazioni e risultati in linea di principio più accurati e caratterizzati da un maggiore grado di dettaglio e, plausibilmente, di accuratezza. A fronte di un maggior sforzo dal punto di vista computazionale, la simulazione dinamica restituisce, infatti, risultati più utili anche per la progettazione dell'edificio (da costruire ex novo o da riqualificare), o per la diagnosi energetica di edifici caratterizzati da particolari geometrie, ampie superfici vetrate e condizioni operative intermittenti.

Dall'analisi dello stato dell'arte, si evince che nonostante sia possibile classificare ed analizzare i vantaggi e gli svantaggi dei tre succitati metodi, siano attualmente ancora indisponibili precise informazioni sulla convenienza dell'adozione di un metodo rispetto agli altri. Infatti, ai fini della preparazione dell'attestato di prestazione energetica, e quindi del calcolo del fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici, non è chiaro quale sia il metodo più adeguato in relazione agli sforzi di implementazione dei dati, di calcolo, e di accuratezza, nonché dei costi di licenza software. L'analisi della letteratura effettuata nell'ambito di questo studio attraverso il confronto tra le pubblicazioni riguardanti la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, eseguita applicando di volta in volta una metodologia piuttosto che un'altra, non fornisce informazioni sufficientemente dettagliate sui campi di applicazione delle stesse. Nello specifico, malgrado gli sforzi della ricerca scientifica verso il confronto tra le tre metodologie, nessun lavoro disponibile in letteratura include un'analisi completa tale da produrre risultati utili alla definizione di linee guida o indicazioni su quale sia la procedura di calcolo univocamente preferibile al variare della destinazione d'uso dell'edificio, della modalità (riscaldamento o raffrescamento) e del relativo regime di funzionamento (intermittente o continuativo) dell'impianto, o della zona climatica. Peraltro, analizzando i risultati forniti nei diversi studi analizzati, è possibile riscontrare una certa aleatorietà nelle differenze percentuali tra i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento ottenuti con i diversi metodi. Tali percentuali sono significativamente variabili e sono apparentemente indipendenti dalla tipologia di edificio e dalle proprietà inerziali dell'involucro. Inoltre, in letteratura, gli studi sui confronti tra i metodi effettuati al variare delle località climatiche, del tipo di struttura e destinazione d'uso dell'edificio, sono ancora pressoché assenti. Inoltre, le analisi simulate svolte e disponibili in tali studi non sono quasi mai effettuate in accoppiamento con omologhe indagini sperimentali, indispensabili per fornire informazioni corrette sull'accuratezza dei metodi considerati.

Alla luce di quanto evidenziato nell'indagine bibliografica oggetto del presente report, si sottolinea, quindi, la necessità di effettuare un nuovo ed esaustivo studio finalizzato alla definizione di opportune indicazioni per la corretta applicazione delle metodologie di calcolo analizzate nell'ambito di questa linea di ricerca. Tale indagine, di interesse per tutti gli attori connessi al settore edilizio, è indispensabile per individuare i campi di applicazione delle metodologie analizzate in funzione della finalità dell'indagine (es: redazione APE), nonché dell'utenza in esame, della tipologia costruttiva dell'edificio, della modalità di funzionamento dell'impianto, e delle condizioni climatiche ove l'edificio è ubicato.

Riferimenti bibliografici

- [1] European Commission. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. 2018.
- [2] European Parliament. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast). In: Parliament E, editor. 19 May 2010.
- [3] Council, European Parliament. Directive 2012/27/EU on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. Official Journal of the European Union, Brussels, 25 October 2012. 2012.
- [4] Diakaki C, Grigoroudis E, Kolokotsa D. Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*. 2008;40:1747-54.
- [5] Becchio C, Corgnati SP, Delmastro C, Fabi V, Lombardi P. The role of nearly-zero energy buildings in the transition towards Post-Carbon Cities. *Sustainable Cities and Society*. 2016;27:324-37.
- [6] D'Agostino D, Cuniberti B, Bertoldi P. Energy consumption and efficiency technology measures in European non-residential buildings. *Energy and Buildings*. 2017;153:72-86.
- [7] Ferreira M, Almeida M, Rodrigues A. Cost-optimal energy efficiency levels are the first step in achieving cost effective renovation in residential buildings with a nearly-zero energy target. *Energy and Buildings*. 2016;133:724-37.
- [8] Negendahl K. Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. *Automation in Construction*. 2015;54:39-53.
- [9] Szalay Z, Zöld A. Definition of nearly zero-energy building requirements based on a large building sample. *Energy Policy*. 2014;74:510-21.
- [10] Nembrini J, Samberger S, Labelle G. Parametric scripting for early design performance simulation. *Energy and Buildings*. 2014;68, Part C:786-98.
- [11] Todorović MS. BPS, energy efficiency and renewable energy sources for buildings greening and zero energy cities planning: Harmony and ethics of sustainability. *Energy and Buildings*. 2012;48:180-9.
- [12] Soares N, Bastos J, Pereira LD, Soares A, Amaral AR, Asadi E, et al. A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;77:845-60.
- [13] Al-Homoud MS. Computer-aided building energy analysis techniques. *Building and Environment*. 2001;36:421-33.
- [14] IEA International Energy Agency. Transition to Sustainable Buildings. Strategies and Opportunities to 2050. In: <http://www.iea.org/etp/buildings/>, editor. Paris Cedex 15, France: International Energy Agency; 2013.
- [15] Ryan EM, Sanquist TF. Validation of building energy modeling tools under idealized and realistic conditions. *Energy and Buildings*. 2012;47:375-82.
- [16] Hoes P, Hensen JLM, Loomans MGLC, de Vries B, Bourgeois D. User behavior in whole building simulation. *Energy and Buildings*. 2009;41:295-302.
- [17] Figueiredo A, Kämpf J, Vicente R, Oliveira R, Silva T. Comparison between monitored and simulated data using evolutionary algorithms: Reducing the performance gap in dynamic building simulation. *Journal of Building Engineering*. 2018;17:96-106.
- [18] Foucquier A, Robert S, Suard F, Stéphan L, Jay A. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;23:272-88.
- [19] Cammarata G., Cammarata M., D'Amico G., Gorgone J., Messina F., Russo F. Progettare e riqualificare per l'efficienza energetica 20015.
- [20] Crawley DB, Hand JW, Kummert M, Griffith BT. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Part Special: Building Performance Simulation. 2008;43:661-73.
- [21] Woloszyn M, Rode C. Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings. *Building Simulation*. 2008;1:5-24.
- [22] Inard C, Bouia H, Dalicieux P. Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model. *Energy and Buildings*. 1996;24:125-32.

- [23] Fumo N. A review on the basics of building energy estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;31:53-60.
- [24] Boyer H, Chabriot JP, Grondin-Perez B, Tourrand C, Brau J. Thermal building simulation and computer generation of nodal models. *Building and Environment*. 1996;31:207-14.
- [25] Luo C, Moghtaderi B, Page A. Modelling of wall heat transfer using modified conduction transfer function, finite volume and complex Fourier analysis methods. *Energy and Buildings*. 2010;42:605-17.
- [26] Fraisse G, Viardot C, Lafabrie O, Achard G. Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy. *Energy and Buildings*. 2002;34:1017-31.
- [27] Attia S, Gratia E, De Herde A, Hensen JLM. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*. 2012;49:2-15.
- [28] Fonseca i Casas P, Fonseca i Casas A, Garrido-Soriano N, Casanovas J. Formal simulation model to optimize building sustainability. *Advances in Engineering Software*. 2014;69:62-74.
- [29] Ioannidis Z, Buonomano A, Athienitis AK, Stathopoulos T. Modeling of double skin façades integrating photovoltaic panels and automated roller shades: Analysis of the thermal and electrical performance. *Energy and Buildings*. 2017;154:618-32.
- [30] Clarke JA, Hensen JLM. Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements. *Building and Environment*. 2015;91:294-306.
- [31] Crawley DB, Hand JW, Kummert M, Griffith BT. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*. 2008;43:661-73.
- [32] Wang H, Zhai Z. Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014. *Energy and Buildings*. 2016;128:319-35.
- [33] Fumo N. A review on the basics of building energy estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;31:53-60.
- [34] Pedersen L. Use of different methodologies for thermal load and energy estimations in buildings including meteorological and sociological input parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007;11:998-1007.
- [35] Antonopoulos KA, Koronaki EP. On the dynamic thermal behaviour of indoor spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2001;21:929-40.
- [36] Lombard C, Mathews EH. A two-port envelope model for building heat transfer. *Building and Environment*. 1998;34:19-30.
- [37] Martin K, Erkoreka A, Flores I, Odriozola M, Sala JM. Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions. *Energy and Buildings*. 2011;43:529-35.
- [38] ISO 13786:1999: Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods. 1999.
- [39] Xu X, Wang S. A simplified dynamic model for existing buildings using CTF and thermal network models. *International Journal of Thermal Sciences*. 2008;47:1249-62.
- [40] Buonomano A. Code-to-Code Validation and Application of a Dynamic Simulation Tool for the Building Energy Performance Analysis. *Energies*. 2016;9.
- [41] Lombard C, Mathews EH. A two-port envelope model for building heat transfer. *Building and Environment*. 1998;34:19-30.
- [42] Kontoleon KJ. Dynamic thermal circuit modelling with distribution of internal solar radiation on varying façade orientations. *Energy and Buildings*. 2012;47:139-50.
- [43] Ramallo-González AP, Eames ME, Coley DA. Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions. *Energy and Buildings*. 2013;60 174-84.
- [44] Joudi A, Svedung H, Rönnelid M. Energy efficient surfaces on building sandwich panels - A dynamic simulation model. *Energy and Buildings*. 2011;43 2462-7.
- [45] Guichard S, Miranville F, Bigot D, Boyer H. A thermal model for phase change materials in a building roof for a tropical and humid climate: Model description and elements of validation. *Energy and Buildings*. 2014;70:71-80.

- [46] Baetens R, De Coninck R, Van Roy J, Verbruggen B, Driesen J, Helsen L, et al. Assessing electrical bottlenecks at feeder level for residential net zero-energy buildings by integrated system simulation. *Applied Energy*. 2012;96:74-83.
- [47] Kusuda T. Thermal response factors for multi-layered structures of various heat conduction systems. *ASHRAE Transactions*. 1969:246-67.
- [48] Nageler P, Schweiger G, Pichler M, Brandl D, Mach T, Heimrath R, et al. Validation of dynamic building energy simulation tools based on a real test-box with thermally activated building systems (TABS). *Energy and Buildings*. 2018;168:42-55.
- [49] Harish VSKV, Kumar A. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:1272-92.
- [50] VanderVeken J., saelens D., Verbeeck G., Hens H. Comparison of Steady -State and Dynamic Building Energy Simulation Programs. *Internation Building sIX ASHRAE Conference on the Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings*. 2004.
- [51] Maile T., Fischer M., Haymaker J., Bazjanac V. Formalizing Approximations, Assumptions, and Simplifications to Document Limitations in Building Energy Performance Simulation. *CIFE Working Paper - Stanford University*. 2010.
- [52] Yang S, Pilet TJ, Ordóñez JC. Volume element model for 3D dynamic building thermal modeling and simulation. *Energy*. 2018;148:642-61.
- [53] De Wit MH, Driessen HH. ELAN—A computer model for building energy design. *Building and Environment*. 1988;23:285-9.
- [54] Crabb JA, Murdoch N, Penman JM. A simplified thermal response model. *Building Services Engineering Research and Technology*. 1987;8:13-9.
- [55] Mathews EH, Richards PG, Lombard C. A first-order thermal model for building design. *Energy and Buildings*. 1994;21:133-45.
- [56] Tindale A. Third-order lumped-parameter simulation method. *Building Services Engineering Research & Technology - BUILD SERV ENG RES TECHNOL*. 1993;14:87-97.
- [57] Bacher P, Madsen H. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*. 2011;43:1511-22.
- [58] Cattarin G, Pagliano L, Causone F, Kindinis A, Goia F, Carlucci S, et al. Empirical validation and local sensitivity analysis of a lumped-parameter thermal model of an outdoor test cell. *Building and Environment*. 2018;130:151-61.
- [59] Corrado V, Fabrizio E. Chapter 5 - Steady-State and Dynamic Codes, Critical Review, Advantages and Disadvantages, Accuracy, and Reliability. In: Asdrubali F, Desideri U, editors. *Handbook of Energy Efficiency in Buildings: Butterworth-Heinemann*; 2019. p. 263-94.
- [60] Xu X, Wang S. A simplified dynamic model for existing buildings using CTF and thermal network models. *International Journal of Thermal Sciences*. 2008;47:1249-62.
- [61] Nielsen TR. Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design. *Solar Energy*. 2005;78:73-83.
- [62] Kämpf JH, Robinson D. A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows. *Energy and Buildings*. 2007;39:445-53.
- [63] Underwood CP. An improved lumped parameter method for building thermal modelling. *Energy and Buildings*. 2014;79:191-201.
- [64] Zadeiks K, Senfelds A, Avotins A, Dzenis M. Development of dynamic simulation model for building energy management systems 2018.
- [65] Pisello AL, Goretti M, Cotana F. A method for assessing buildings' energy efficiency by dynamic simulation and experimental activity. *Applied Energy*. 2012;97:419-29.
- [66] Joudi A, Svedung H, Rönnelid M. Energy efficient surfaces on building sandwich panels—A dynamic simulation model. *Energy and Buildings*. 2011;43:2462-7.
- [67] Ramallo-González AP, Eames ME, Coley DA. Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions. *Energy and Buildings*. 2013;60:174-84.

- [68] Guichard S, Miranville F, Bigot D, Boyer H. A thermal model for phase change materials in a building roof for a tropical and humid climate: Model description and elements of validation. *Energy and Buildings*. 2014;70:71-80.
- [69] Cattarin G, Pagliano L, Causone F, Kindinis A. Empirical and comparative validation of an original model to simulate the thermal behaviour of outdoor test cells. *Energy and Buildings*. 2018;158:1711-23.
- [70] Buonomano A, Palombo A. Building energy performance analysis by an in-house developed dynamic simulation code: An investigation for different case studies. *Applied Energy*. 2014;113:788-807.
- [71] Barone G, Buonomano A, Forzano C, Palombo A. Building Energy Performance Analysis: An Experimental Validation of an In-House Dynamic Simulation Tool through a Real Test Room. *Energies*. 2019;12.
- [72] Ballarini I, Primo E, Corrado V. On the limits of the quasi-steady-state method to predict the energy performance of low-energy buildings. *Thermal science*. 2018;22:1117-27.
- [73] Kokogiannakis G, Strachan P, Clarke J. Comparison of the simplified methods of the ISO 13790 standard and detailed modelling programs in a regulatory context. *Journal of Building Performance Simulation*. 2008;1:209-19.
- [74] Michalak P. The simple hourly method of EN ISO 13790 standard in Matlab/Simulink: A comparative study for the climatic conditions of Poland. *Energy*. 2014;75:568-78.
- [75] Jokisalo J, Kurnitski J. Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate. *Energy and Buildings*. 2007;39:236-47.
- [76] Evangelisti L, Battista G, Guattari C, Basilicata C, De Lieto Vollaro R. Analysis of Two Models for Evaluating the Energy Performance of Different Buildings. *Sustainability*. 2014;6.
- [77] Bruno R, Oliveti G, Arcuri N. An analytical model for the evaluation of the correction factor FW of solar gains through glazed surfaces defined in EN ISO 13790. *Energy and Buildings*. 2015;96:1-19.
- [78] Zakula T, Bagaric M, Ferdelji N, Milovanovic B, Mudrinic S, Ritosa K. Comparison of dynamic simulations and the ISO 52016 standard for the assessment of building energy performance. *Applied Energy*. 2019;254:113553.
- [79] Bruno R, Bevilacqua P, Arcuri N. Assessing cooling energy demands with the EN ISO 52016-1 quasi-steady approach in the Mediterranean area. *Journal of Building Engineering*. 2019;24:100740.
- [80] Mazzarella L, Scoccia R, Colombo P, Motta M. Improvement to EN ISO 52016-1:2017 hourly heat transfer through a wall assessment: the Italian National Annex. *Energy and Buildings*. 2020;210:109758.
- [81] Neymark J, Judkoff R, Knabe G, Le HT, Dürig M, Glass A, et al. Applying the building energy simulation test (BESTEST) diagnostic method to verification of space conditioning equipment models used in whole-building energy simulation programs. *Energy and Buildings*. 2002;34:917-31.
- [82] Soubdhan T, Mara TA, Boyer H, Younes A. Chapter 376 - Use of Bestest Procedure to Improve A Building Thermal Simulation Program. In: Sayigh AAM, editor. *World Renewable Energy Congress VI*. Oxford: Pergamon; 2000. p. 1800-3.