

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

Progettazione e Gestione di Impianti Energetici



**Politecnico
di Torino**

**Modellazione energetica degli edifici: analisi comparativa
tra modello semi-stazionario, dinamico dettagliato e
dinamico semplificato in conformità alla nuova
UNI EN ISO 52016**

Relatore

Prof. Marco SIMONETTI

Ing. Francesco MANTUA

Candidato

Federica NANNI

Matricola

s303653

A.A. 2023/2024

Abstract

Nell'ambito dell'approvazione della Direttiva Europea "*Case Green*", ha acquisito particolare interesse lo studio della nuova Norma UNI EN ISO 52016-1, che propone una nuova metodologia di calcolo dinamico orario semplificato per la valutazione del fabbisogno energetico degli edifici. Essa si sostituirà alla vecchia UNI EN 13790 sul calcolo semi-stazionario utilizzata ad oggi per le verifiche di legge nazionali tramite la UNI TS 11300-1 (Norma italiana che recepisce la UNI EN 13790).

Nel seguente elaborato verranno presentati e chiariti i tre modelli per la simulazione energetica: semi-stazionario, dinamico semplificato e dinamico dettagliato, già utilizzato negli anni per analisi di elevata precisione ma non riconosciuto a livello normativo e non in linea con l'interesse rivolto al miglioramento dell'attività di standardizzazione dei calcoli.

Nella prima parte della tesi verranno descritte nel dettaglio le tre metodologie di calcolo e verrà riportata la scelta dei *software* effettuata per la loro implementazione. Nella seconda parte dell'elaborato si prenderà in esempio un caso studio scelto in ambito ospedaliero, per valutare i fabbisogni energetici di un edificio particolarmente energivoro e mettere in luce le differenze tra le tre metodologie.

Nel corso della trattazione verrà evidenziato il processo di modellazione effettuato per l'utilizzo della nuova metodologia di calcolo dinamico orario attraverso l'ausilio del *software* Edilclima che dà la possibilità di implementare sia il metodo semi-stazionario mensile, secondo la UNI/TS 11300, sia il metodo dinamico orario, descritto dalla nuova UNI EN ISO 52016-1; allo stesso modo, verrà riportato il modello sul *software DesignBuilder* che, tramite il motore di calcolo *EnergyPlus*, è ampiamente utilizzato ai fini dell'implementazione della modellazione dinamica dettagliata per il calcolo dei fabbisogni energetici degli edifici. Si prenderanno in esame diversi algoritmi di calcolo, al fine di valutare quale dovrebbe essere la scelta ottimale nelle impostazioni della simulazione dinamica.

Nell'ultima parte della tesi verranno riportati i risultati di tre analisi: un'analisi comparativa tra i tre modelli di calcolo; un'analisi comparativa implementando più opzioni di calcolo (in termini di tipologie di algoritmi per gli scambi termici) nel caso di metodo dinamico dettagliato; un'analisi di sensibilità sulle variabili di influenza su ogni singolo modello.

I risultati ottenuti mostreranno come, nel caso di modello dinamico dettagliato, la scelta di implementare diversi algoritmi di calcolo non porti a differenze consistenti negli *output*, sia per quanto riguarda i fabbisogni di energia per il riscaldamento, sia per quanto riguarda i consumi in raffrescamento.

Al contrario, verranno messe in luce le differenze tra i risultati ottenuti da una simulazione dinamica dettagliata e quella semplificata della Norma. Si mostrerà come alcune forti semplificazioni introdotte da quest'ultima portino a discrepanze tra le due metodologie.

Indice

Abstract	III
Elenco delle tabelle	VIII
Elenco delle figure	X
1 Introduzione	2
2 Modelli di calcolo per il fabbisogno termo-frigorifero dell'edificio	4
3 Metodo mensile semi-stazionario: UNI TS 11300	8
4 Metodo dinamico dettagliato: procedura ASHRAE	12
4.1 Bilancio termico sulla superficie di scambio esterna	16
4.2 Conduzione attraverso la parete	18
4.2.1 <i>Conduction Time Series</i> - CTS	18
4.2.2 Differenze finite	22
4.3 Trasferimento di calore attraverso le superfici trasparenti	25
4.4 Bilancio termico sulla superficie di scambio interna	27
4.5 Bilancio termico sull'aria - <i>Air Heat Balance</i>	29
4.6 Carichi endogeni	31
4.6.1 Occupazione	31
4.6.2 Sistemi di illuminazione	32
4.6.3 Apparecchiature elettriche ed elettroniche	34
4.6.4 Apparatati di cottura e cibo	36
4.7 Trasferimento di calore per ventilazione	37
4.8 Trasferimento di calore per convezione	38
4.8.1 Convezione interna	38
4.8.2 Convezione esterna	39

5	Metodo dinamico orario semplificato: UNI EN ISO 52016	42
5.1	Bilancio di energia a livello di zona	44
5.2	Modello di conduzione termica mediante analogia elettrica	47
5.2.1	Componenti di involucro opachi - <i>Standard</i> Europeo	47
5.2.2	Componenti di involucro opachi - Allegato Nazionale italiano	52
5.2.3	Componenti di involucro trasparenti	53
5.3	Trasferimento di calore tra le zone termiche	56
5.4	Temperatura di <i>set-point</i>	57
5.5	Frazione convettiva degli apporti	58
6	Caso studio: ospedale San Luigi di Torino	60
6.1	<i>DesignBuilder - EnergyPlus</i>	61
6.1.1	Dati climatici	62
6.1.2	Costruzione	64
6.1.3	Aperture	66
6.1.4	Zonizzazione	68
6.1.5	Attività	71
6.2	Edilclima - Calcolo dinamico orario secondo UNI EN ISO 52016 . .	78
6.2.1	Dati climatici	78
6.2.2	Costruzione	79
6.2.3	Aperture	82
6.2.4	Zonizzazione	82
6.2.5	Attività	84
6.3	Edilclima - Calcolo semi stazionario secondo UNI TS 11300	85
7	Risultati delle simulazioni	88
7.1	Analisi comparativa delle tre metodologie di calcolo	88
7.2	Analisi di sensibilità sulle variabili di influenza	94
7.2.1	Variazione infiltrazioni	94
7.2.2	Variazione carichi endogeni	99
7.2.3	Variazione della frazione convettiva degli apporti interni . .	103
7.3	Analisi di implementazione di algoritmi e opzioni di calcolo per il metodo dinamico dettagliato	108
7.3.1	Algoritmi di calcolo per la conduzione e la convezione	108
7.3.2	Calcolo della frazione latente per gli apporti dovuti all'occu- pazione	110
8	Conclusioni	112
	Bibliografia	114

Elenco delle tabelle

7.1	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con <i>DesignBuilder</i> per i piani tipologici del Padiglione 1.	88
7.2	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima per i piani tipologici del Padiglione 1.	89
7.3	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo semi-stazionario con Edilclima per i piani tipologici del Padiglione 1.	90
7.4	Fabbisogno energetico dell'intero Padiglione 1 [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento per le tre metodologie di calcolo.	91
7.5	Fabbisogno energetico dell'intero Padiglione 1 [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento - Confronto percentuale tra le tre metodologie di calcolo.	91
7.6	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento da calcolo dinamico dettagliato con <i>DesignBuilder</i> per diversi valori di infiltrazioni.	95
7.7	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con <i>DesignBuilder</i> per diversi valori di infiltrazioni.	95
7.8	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima per diversi valori di infiltrazioni.	96
7.9	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il raffrescamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima per diversi valori di infiltrazioni.	96
7.10	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento da calcolo semi-stazionario con Edilclima per diversi valori di infiltrazioni.	97
7.11	Fabbisogno energetico di riscaldamento del piano intermedio al variare delle infiltrazioni nelle zone termiche "Ambulatorio3" e "Studio6" per le tre metodologie di calcolo.	97
7.12	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento da calcolo dinamico dettagliato con <i>DesignBuilder</i> per diverse percentuali di carichi endogeni.	100

7.13	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con <i>DesignBuilder</i> per diverse percentuali di carichi endogeni.	100
7.14	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima per diverse percentuali di carichi endogeni.	101
7.15	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il raffrescamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima per diverse percentuali di carichi endogeni.	101
7.16	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con <i>DesignBuilder</i> - Confronto dei fabbisogni rispetto alla variazione di frazione convettiva degli apporti interni (apparecchiature elettriche e apparecchi luminosi).	104
7.17	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima - Confronto dei fabbisogni rispetto alla variazione di frazione convettiva degli apporti interni (apparecchiature elettriche e apparecchi luminosi).	105
7.18	Confronto del fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico semplificato rispetto al calcolo dinamico dettagliato al variare della frazione convettiva.	106
7.19	Fabbisogno energetico Padiglione 1 [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con <i>DesignBuilder</i> per diversi algoritmi di calcolo - 1) Algoritmo per la conduzione; 2) Algoritmo per la convezione interna; 3) Algoritmo per la convezione esterna.	109
7.20	Fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con <i>DesignBuilder</i> - Confronto in base al calcolo della frazione latente degli apporti per occupazione.	110
7.21	Confronto del fabbisogno energetico [<i>kWh</i>] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con frazione costante/da calcolo dinamico con quello da calcolo dinamico semplificato.	111

Elenco delle figure

2.1	Mappa concettuale per la trattazione dei modelli di calcolo ai fini della simulazione energetica di un edificio.	7
4.1	Schema dell' <i>Heat Balance Method</i> per una zona	14
4.2	Rappresentazione schematica del bilancio termico sulla superficie di scambio esterna.	16
4.3	Caso lastra monostrato per lo studio della conduzione tramite CTF.	21
4.4	Schema dei nodi per la soluzione alle differenze finite	23
4.5	Rappresentazione schematica del bilancio termico sulla superficie di scambio interna.	27
4.6	Valori tabellati suggeriti da ASHRAE <i>Handbook of Fundamentals, 2009</i> per l'occupazione	32
4.7	Valori tabellati suggeriti da ASHRAE <i>Handbook of Fundamentals, 2009</i> per l'illuminazione.	33
4.8	Valori tabellati suggeriti da ASHRAE <i>Handbook of Fundamentals, 2009</i> per l'illuminazione. Valori tipici in W/m^2 per tipologieambiente.	34
4.9	Valori tabellati suggeriti da ASHRAE <i>Handbook of Fundamentals, 2009</i> per le apparecchiature. Fonte: <i>Hosni et al. (1999)</i>	36
4.10	Coefficienti di rugosità D,E ed F - Fonte: <i>EnergyPlus Engineering Reference</i>	40
5.1	Modello $R - C$ equivalente di un elemento opaco secondo il calcolo dinamico orario della norma UNI EN ISO 52016-1.	48
5.2	Modello RC equivalente di un elemento opaco secondo il calcolo dinamico orario della norma UNI EN ISO 52016-1, Allegato Italiano.	52
5.3	Estratto della Tabella B.11 della Norma UNI EN ISO 52016.	58
6.1	Piano terra Padiglione 1.	62
6.2	Estratto del <i>file</i> climatico .IGDG di Torino-Caselle inserito nel <i>software DesignBuilder</i>	64

6.3	Esempio scheda "Costruzione" per l'inserimento su <i>DesignBuilder</i> dei dati di <i>input</i> per gli elementi di involucro opachi.	65
6.4	Risultato del <i>rendering</i> del piano terra Padiglione 1 dell'ospedale San Luigi (TO).	66
6.5	Esempio della sezione "Aperture" per gli elementi di involucro trasparenti all'interno del <i>software DesignBuilder</i>	67
6.6	Esempio scheda "Aperture" per la definizione dei dati di <i>input</i> per la tipologia di vetro W13.	67
6.7	Zone termiche risultanti dalla zonizzazione del piano terra del Padiglione 1.	69
6.8	Zonizzazione con <i>DesignBuilder</i> del piano terra Padiglione 1 dell'ospedale San Luigi (TO).	70
6.9	Esempio della sezione "Attività" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del <i>software DesignBuilder</i>	72
6.10	Esempio della sezione "Occupazione" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del <i>software DesignBuilder</i>	73
6.11	Estratto del <i>database</i> NCM - Fonte per i valori di attività ASHRAE inseriti nel <i>software DesignBuilder</i>	74
6.12	Esempio della sezione "Altri apporti- Dispositivi di ufficio" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del <i>software DesignBuilder</i>	75
6.13	Esempio della sezione "Altri apporti- Illuminazione Generale" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del <i>software DesignBuilder</i>	76
6.14	Esempio della sezione "Illuminazione" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del <i>software DesignBuilder</i>	76
6.15	Esempio della sezione "Altri apporti- Dispositivi di ufficio" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del <i>software DesignBuilder</i>	77
6.16	Sezione Dati di progetto all'interno del <i>software</i> Edilclima.	78
6.17	Estratto del <i>file</i> climatico del CTI di Torino modificato e inserito nel <i>software</i> Edilclima.	79
6.18	Esempio di stratigrafia muro "M16 - Muro esterno facciavista isolato" inserito all'interno del <i>software</i> Edilclima.	80
6.19	Vista 3D piano terra ospedale San Luigi (TO) da Edilclima.	81
6.20	Esempio di componente finestrato "W13 - Pad 1_Allum DV 82x120 (3-9-3) PT est" inserito all'interno del <i>software</i> Edilclima.	82
6.21	Zonizzazione con Edilclima del piano terra Padiglione 1 dell'ospedale San Luigi.	83
6.22	Esempio di scheda "Profilo orario" di una zona di esempio inserita all'interno del <i>software</i> Edilclima.	84
6.23	Esempio di scheda "Dati zona" di una zona di esempio inserita all'interno del <i>software</i> Edilclima per il calcolo in regime semi-stazionario.	85

6.24	Esempio di scheda "Dati locale" di una zona di esempio inserita all'interno del <i>software</i> Edilclima per il calcolo in regime semi-stazionario.	86
7.1	Fabbisogno energetico annuo di riscaldamento valutato per alcune zone significative del piano intermedio sia con metodo dinamico dettagliato che semplificato.	93
7.2	Fabbisogno energetico annuo di raffrescamento valutato per alcune zone significative del piano intermedio sia con metodo dinamico dettagliato che semplificato.	93
7.3	Confronto fabbisogno energetico di riscaldamento del piano intermedio al variare delle infiltrazioni nelle zone termiche "Ambulatorio3" e "Studio6" per le tre metodologie di calcolo.	98
7.4	Confronto fabbisogno energetico di raffrescamento del piano intermedio al variare delle infiltrazioni nelle zone termiche "Ambulatorio3" e "Studio6" per le tre metodologie di calcolo.	99
7.5	Confronto fabbisogno energetico di riscaldamento del piano intermedio al variare dei carichi endogeni nelle zone termiche "Ambulatorio3" e "Studio6" per le due metodologie di calcolo dinamico.	102
7.6	Confronto fabbisogno energetico di raffrescamento del piano intermedio al variare dei carichi endogeni nelle zone termiche "Ambulatorio3" e "Studio6" per le due metodologie di calcolo dinamico.	103
7.7	Confronto fabbisogno energetico di riscaldamento del piano intermedio al variare della frazione convettiva per le due metodologie di calcolo dinamico.	107

Capitolo 1

Introduzione

Da diversi anni la normativa di riferimento per il calcolo della potenza termica e del fabbisogno energetico annuale degli edifici è in continua evoluzione[1].

Nell'ambito della modellazione energetica degli edifici, stanno assumendo sempre più importanza tecniche di calcolo in grado di prevedere e contabilizzare i consumi energetici con una precisione maggiore rispetto alle metodologie fin ora implementate.

Con l'introduzione della nuova Direttiva europea "Case Green" EPBD IV ("*Energy performance of building directive*" [2]) sulla prestazione energetica nell'edilizia, vengono modificate le modalità di calcolo dei fabbisogni energetici degli edifici; in particolare, è stata introdotta la modellazione energetica con calcolo dinamico orario ai sensi della Norma UNI EN ISO 52016-1. Tale Norma, già pubblicata in Italia il 1° marzo 2018, sostituisce la procedura di calcolo dei fabbisogni energetici introdotta con la UNI EN ISO 13790:2008, su cui si basa la Norma UNI TS 11300-1 ad oggi in vigore.

Tramite la nuova UNI EN ISO 52016-1 viene abolito il metodo di calcolo stagionale per spostarsi verso una metodologia di calcolo dinamico orario in grado di garantire risultati più attendibili. Questo è possibile grazie al fatto che, disponendo di dati con passo orario, si può tenere conto delle reali condizioni di utilizzo e di occupazione dell'edificio. Questo punto diventa fondamentale in quanto l'edificio non è un oggetto statico ma, anzi, è descritto da numerosi effetti dinamici che rendono i calcoli estremamente complessi [3], a partire dal comportamento reale del sistema edificio-impianto, fino ad arrivare alla grande variabilità in termini di clima esterno.

I calcoli dinamici sono già ampiamente utilizzati per svolgere analisi dettagliate attraverso l'utilizzo di motori di calcolo validati nel corso degli anni. A livello normativo fino ad oggi si è fatto però riferimento al modello di calcolo semi-stazionario proposto dalla UNI TS 11300-1, sia in regime invernale che in quello estivo. Soprattutto per quanto riguarda la stagione estiva, un calcolo in regime

semi-stazionario che non tiene conto dei fenomeni dinamici può portare a risultati che si discostano notevolmente dalla realtà. Ciò è dovuto in grande misura al fatto che, in regime invernale, considerare la differenza di temperatura tra il valore di *set-point* impostato e quella esterna come costante non rappresenta una semplificazione preoccupante in relazione a quello che accade realmente. Lo stesso discorso non può essere fatto per la stagione estiva, in cui questa differenza di temperatura è estremamente variabile, tale da portare anche ad un'inversione dei flussi termici entranti e uscenti dall'edificio nell'arco della giornata. Altro aspetto da non sottovalutare è la forzante rappresentata dall'apporto solare e dagli apporti interni, di cui non si può non tenere conto in regime estivo, dal momento che si tratta di quote di calore che gravano sul carico che deve essere ceduto o estratto al fine di garantire le condizioni di *comfort* termo-igrometrico desiderate. Anche se teoricamente la stagione invernale si presta di più al calcolo semi-stazionario, è necessario tenere in considerazione il fatto che alcuni fenomeni quali l'intermittenza e l'attenuazione dell'impianto di climatizzazione (e quindi la presenza di una potenza di ripresa da fornire) portano a dover considerare la dinamica del sistema nel calcolo invernale, se non si vuole incorrere in risultati notevolmente differenti dalle condizioni reali.

Nel seguente elaborato si punterà alla determinazione dei fabbisogni energetici per la valutazione dei consumi e al calcolo dei valori di potenza massima e quindi valori di progetto utili al dimensionamento.

Per potenza termica si intende il carico di progetto espresso in $[kW]$. Si tratta di un valore calcolato non sulla base di un intervallo di tempo ma di un istante. Nell'ambito degli edifici, la potenza di progetto viene calcolata come valore di picco del carico termico, per il dimensionamento e il progetto dei sistemi impiantistici, al fine di garantire le giuste condizioni di *comfort* termo-igrometrico.

Con il calcolo del fabbisogno energetico annuale, invece, si vuole determinare un profilo nel tempo del carico termico, necessario per effettuare la stima dei consumi energetici in termini di condizionamento; si ottiene quindi un valore energetico misurato in $[kWh]$. Si somma dunque anche il concetto di "tempo" dal momento che, per come è definita, l'energia può essere calcolata solo se riferita ad un intervallo temporale. Per ciò che riguarda l'edificio, il calcolo del fabbisogno energetico può essere affrontato in diversi modi. In primo luogo, la scelta dell'intervallo di tempo come *step* temporale per i calcoli porta a risultati diversi in termini non solo di pesantezza computazionale, ma anche di qualità dei risultati stessi.

Il seguente elaborato ha come obiettivo quello di esplorare le diverse metodologie di calcolo che negli anni sono state adottate (come risultato del susseguirsi di norme sempre più aggiornate) ai fini di ottenere risultati energetici affidabili, mantenendo il *focus* sul lato edificio (involucro, apporti interni, etc.) mentre non verrà affrontato il lato impianto.

Capitolo 2

Modelli di calcolo per il fabbisogno termo-frigorifero dell'edificio

Nell'ambito della simulazione energetica dell'edificio, i modelli utilizzati e scelti sulla base della tipologia di analisi e sensibilità richiesta, si distinguono in due grandi classi:

- Modello semi-stazionario;
- Modello dinamico.

Il modello semi-stazionario fa riferimento alla norma UNI TS 11300 che costituisce le istruzioni per l'applicazione a livello nazionale della Direttiva 2002/91/CE e della Norma europea UNI EN ISO 13790:2008 [4].

Per il modello dinamico occorre fare un'ulteriore classificazione in:

- Modello dinamico secondo procedura dettagliata;
- Modello dinamico semplificato, ad oggi in riferimento alla nuova UNI EN ISO 52016-1.

Un modello semi-stazionario utilizzato per l'analisi energetica di un edificio si basa su assunzioni di partenza: per esempio si considera che, per intervalli di tempo specifici, le condizioni termiche come variazioni di temperatura e flusso di calore siano costanti.

I motivi per i quali spesso occorre scegliere una simulazione dinamica sono molteplici. Per quanto riguarda, ad esempio, il regime estivo è necessario considerare il fatto che, a differenza di quello invernale, esso risulta fortemente dinamico. Basti

pensare all'impatto che la radiazione solare sviluppa nel tempo. Risulterebbe molto complesso e inefficace scegliere un istante della giornata ai fini di sviluppare i calcoli di progetto e del fabbisogno energetico: questo perché, volendo riportare un esempio, l'impatto che la radiazione ha alle ore 12 : 00 si riscontra sull'edificio con un certo ritardo ("*Time Delay*" o sfasamento) che può essere anche di diverse ore.

Il concetto di sfasamento risiede nel fatto che l'energia assorbita dalle pareti, dal pavimento, dai mobili, etc., (più nello specifico i flussi termici radiativi) contribuisce al carico di raffreddamento dello spazio interno solo dopo un ritardo temporale. Parte di questa energia è ancora presente e viene riemessa sotto forma di flusso termico convettivo anche dopo che le fonti di calore abbiano cessato l'emissione o vengano spente. In sintesi, vi è sempre un significativo ritardo tra il momento in cui una fonte di calore viene attivata e il punto in cui l'energia riemessa eguaglia quella immagazzinata istantaneamente. Questo ritardo si traduce nello sfasamento tra la generazione del flusso termico (in cui si considerano tutti gli apporti di calore) e la sua cessione all'aria ambiente sotto forma di carico termico, ovvero il calore che deve essere ceduto/estratto ai fini di mantenere le condizioni di *comfort* desiderate. Quest'ultimo risulta normalmente molto diverso dal relativo apporto termico nell'istante di tempo considerato.

Insieme all'effetto di sfasamento appena descritto, è presente anche un effetto di smorzamento per cui il rilascio di energia accumulata nelle pareti, nelle strutture interne, negli elementi di arredo, etc. è distribuito nel tempo. Il risultato di tale fenomeno è che si assiste ad uno smorzamento dei picchi nei profili dei carichi termici rispetto a quello che sarebbe l'andamento degli apporti, dal momento che non tutto il calore assorbito viene rilasciato e ceduto all'ambiente interno.

Nell'ambito della simulazione dinamica, come anticipato, occorre distinguere tra modelli di calcolo semplificati e dettagliati. Negli anni ha acquisito grande interesse una metodologia di calcolo dettagliato in grado di ottenere risultati sempre più accurati. Prevedere il comportamento del sistema edificio-impianto al variare delle condizioni al contorno è oggi strumento indispensabile per la progettazione energetica. Per progettazione energetica, infatti, si intende tutto ciò che riguarda efficienza dei sistemi, implementazione di fonti energetiche rinnovabili, involucro edilizio e strategie passive, IEQ ("*Indoor Environment Quality*"), etc.

I parametri dinamici, oltre quelli già accennati, sono molteplici:

- condizioni climatiche esterne;
- produzione di energia da fonti rinnovabili;
- profili occupazionali e di utilizzo;
- modalità di conduzione dell'impianto;
- disponibilità e costo di fonti energetiche per le valutazioni energetico-ambientali.

La simulazione energetica effettuata tramite calcolatori dettagliati è quindi uno strumento efficiente per indagare e ottimizzare le relazioni tra le diverse variabili progettuali e le condizioni al contorno.

Al Capitolo 4 verrà esaminata la procedura di calcolo dinamico dettagliata proposta da ASHRAE nel "*Handbook of Fundamentals, 2009*" [5] ed implementata dal motore di calcolo *EnergyPlus*, utilizzato nel seguente elaborato ai fini di condurre un'analisi dettagliata tramite l'ausilio del *software DesignBuilder* come interfaccia grafica.

La seconda metodologia è invece definita "semplificata" e segue le linee guida proposte dalla nuova Norma UNI EN ISO 52016-1 [6], presentata nel pacchetto di norme della Direttiva UE sulla prestazione energetica degli edifici EPBD II ("*Energy Performance of Building Directive*") e facente parte della nuova EPBD IV . Questa metodologia è discussa nel dettaglio al Capitolo 5 e mira a definire delle linee guida volte a uniformare e standardizzare il metodo di calcolo per non incorrere in ambiguità per quanto concerne la scelta degli algoritmi e i dati di *input*.

Ai fini della trattazione che segue, si riporta una mappa concettuale che riassume le metodologie di calcolo per la simulazione energetica dell'edificio, ponendo l'attenzione su quelle che verranno prese in considerazione e descritte dettagliatamente nei capitoli successivi.

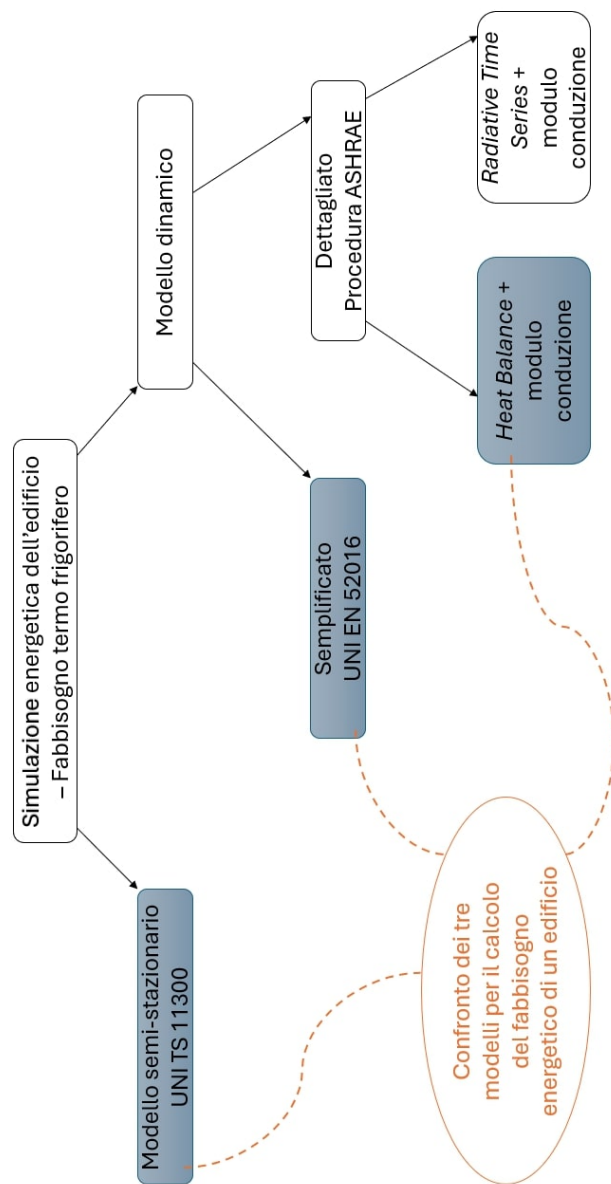


Figura 2.1: Mappa concettuale per la trattazione dei modelli di calcolo ai fini della simulazione energetica di un edificio.

Capitolo 3

Metodo mensile semi-stazionario: UNI TS 11300

L'analisi semi-stazionaria in ambito di calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio è ad oggi riconosciuta a livello legislativo. Nell'ambito della Direttiva 2002/91/EC è stata pubblicata la norma europea EN ISO 13790 che, tramite recepimento di norme CEN ("Comitato europeo di normazione"), ha posto le basi per la normativa tecnica nazionale UNI TS 11300 sulle prestazioni energetiche degli edifici. Tale normativa nasce dall'esigenza di adottare una metodologia di calcolo della prestazione energetica, della definizione dei requisiti energetici e della certificazione energetica [7].

Il calcolo dei fabbisogni di energia per il riscaldamento e il raffrescamento vengono effettuati su periodi di tempo mensili e sono definiti nella UNI TS 11300-1 ("Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione del fabbisogno di energia dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale" [8]), dove si riporta il bilancio di energia da effettuare per ogni zona dell'edificio e per ogni mese:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (3.1)$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{ht} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (3.2)$$

Nelle equazioni (3.1) e (3.2) i termini presenti sono:

- $Q_{H,nd}$ è il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento [kWh];
- $Q_{C,nd}$ è il fabbisogno di energia termica per il raffrescamento [kWh];
- $Q_{H,ht}$ è lo scambio termico totale in riscaldamento [kWh];

- $Q_{C,ls}$ è lo scambio termico totale per il raffrescamento [kWh];
- $Q_{H,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione in riscaldamento [kWh], calcolato come:

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + \sum_k Fr, k \cdot \phi_{r,mn,k} \cdot t - Q_{sol,op} \quad (3.3)$$

dove: $H_{tr,adj}$ è il coefficiente di scambio termico [W/K] che comprende i contributi di scambio termico per trasmissione verso l'esterno, verso ambienti non climatizzati, verso zone a temperatura diversa e attraverso il terreno; $\theta_{int,set,H}$ è la temperatura interna di *set-point* [$^{\circ}C$]; θ_e è la temperatura esterna [$^{\circ}C$]; Fr, k è il fattore di forma funzione delle ombreggiature e degli oggetti; $\phi_{r,mn,k}$ è l'*extra* flusso termico dovuto alla frazione infrarossa verso la volta celeste dal componente edilizio;

- $Q_{C,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione in raffrescamento [kWh], calcolato come:

$$Q_{C,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \cdot t + \sum_k Fr, k \cdot \phi_{r,mn,k} \cdot t - Q_{sol,op} \quad (3.4)$$

- $Q_{H,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione in riscaldamento [kWh], calcolato come:

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t \quad (3.5)$$

dove: $H_{tr,adj}$ è il coefficiente di scambio termico per ventilazione [W/K];

- $Q_{C,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione in raffrescamento [kWh];
- Q_{gn} è il termine che rappresenta gli apporti termici totali [kWh];
- Q_{int} è il termine che rappresenta gli apporti termici interni [kWh];
- Q_{sol} è il termine che rappresenta gli apporti termici solari [kWh];
- $\eta_{H,gn}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti termici;
- $\eta_{C,ls}$ è il fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche.

Il calcolo e la determinazione dei termini è esplicitata all'interno della UNI TS 11300 [8], in cui sono riportati i calcoli per quanto riguarda i coefficienti di scambio termico, i flussi termici, i fattori di forma, etc.

I dati di *input* richiesti per il calcolo semi-stazionario sono i dati relativi alle caratteristiche dell'edificio come la superficie dei locali e il loro orientamento, alle tipologie e caratteristiche termo-fisiche dei componenti di involucro, ai dati climatici

e alle modalità di occupazione ed utilizzo del sistema edificio-impianto. Questi due ultimi punti sono quelli che maggiormente si discostano da un'analisi dinamica. Per quanto riguarda i dati climatici, per esempio, essi si basano su valori medi mensili della temperatura esterna e dati di irraggiamento totale per ciascun orientamento. I parametri dinamici con questa metodologia vengono presi in considerazione tramite la capacità termica interna e i fattori di utilizzazione. Tali fattori dipendono in *primis* dal rapporto tra apporti termici e lo scambio termico totale; la capacità termica interna è calcolata come segue:

$$C_m = \sum k_j \cdot A_j \quad (3.6)$$

dove k_j e A_j sono rispettivamente la capacità termica areica [J/m^2K] (che dipende dalle caratteristiche del materiale) e l'area del j -esimo elemento [m^2]. Sia i fattori di occupazione che la capacità termica interna sono dipendenti dalla costante di tempo τ della zona termica [9]. Questa costante è legata al concetto di massa termica dell'edificio (in altre parole, all'inerzia termica) e dà indicazioni sul tempo di risposta che l'edificio ha nei confronti di una sollecitazione termica (più il suo valore è elevato, maggiore sarà il tempo necessario per variare le condizioni interne). La costante τ è calcolata come segue:

$$\tau = \frac{C_m/3600}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj}} \quad (3.7)$$

Capitolo 4

Metodo dinamico dettagliato: procedura ASHRAE

Al fine di ottenere una simulazione dinamica energetica di un edificio vengono utilizzati dei modelli matematici in grado di descrivere il comportamento di un sistema che, in questo caso, è rappresentato dall'edificio stesso. Un modello è costituito da variabili di *input*, struttura del sistema e parametri/proprietà che ne forniscono una descrizione fisica (ad esempio, massa termica o proprietà degli elementi) e variabili in *output*.

Le due grandi categorie di modelli utilizzati per stimare i consumi di energia sono:

- *Forward Model*, che è il modello classico completamente *white box*; si basa completamente sulla natura fisica del sistema modellando nel dettaglio i parametri che lo definiscono;
- *Data-Driven Model*, che è il modello definito *black-box*; in questo caso non si ha alcuna informazione sulle equazioni che regolano il modello stesso, dal momento che si tratta di modelli empirici.

L'obiettivo del metodo classico è predire le variabili di *output* di un sistema (con struttura e parametri noti) soggetto a variabili di *input* specificate. In sostanza, è necessaria una descrizione fisica accurata del sistema edilizio o del componente di interesse. Per garantire l'accuratezza, i modelli *forward* risultano complessi, pesanti dal punto di vista computazionale e presuppongono una conoscenza dettagliata non solo dei vari fenomeni naturali che influenzano il comportamento del sistema, ma anche delle varie interazioni (ad esempio, massa termica efficace, coefficienti di

trasferimento di calore e massa, ecc.). Il principale vantaggio di questo approccio è che il sistema non deve essere fisicamente esistente per predire il suo comportamento, dal momento che non si basano su dati misurati (a differenza dei processi *Data-Driven* per l'appunto "guidati dai dati").

Nella trattazione si prenderà in considerazione unicamente il modello classico, essendo quello su cui si basano noti motori di calcolo per la simulazione energetica come *EnergyPlus*.

Il principale *step* su cui si basa ciascuna procedura per la stima del comportamento energetico di un sistema edificio è il calcolo dei carichi ambiente, ovvero della quantità di energia che deve essere ceduta o estratta all'ambiente al fine di garantire le condizioni di *comfort* termo igrometrico. A differenza del calcolo dei carichi termici di progetto, i calcoli energetici si basano sulle condizioni di utilizzo medie e sulle condizioni meteorologiche tipiche, invece che sulle condizioni di utilizzo di punta e le condizioni meteorologiche più estreme (utilizzate per il dimensionamento degli impianti). Attualmente, le procedure più sofisticate si basano su profili orari delle condizioni climatiche e sulle caratteristiche operative per un certo numero di giorni tipici dell'anno o su 8760 ore di funzionamento all'anno.

Il calcolo del carico sensibile istantaneo dello spazio è, come detto, una fase necessaria ad ogni simulazione energetica degli edifici. I due metodi proposti da ASHRAE ("*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*") al fine di calcolare i carichi sono quello del bilancio termico ("*Heat Balance Method*" - HB) e dei fattori di pesatura ("*Radiant Time Series*" - RTS). Quando si parla di carico termico, è necessario fare una distinzione tra quelli che sono gli apporti termici, che comprendono di solito anche una quota radiativa, e i carichi termici, che sono invece di natura puramente convettiva. Infatti, i carichi generati da apparecchiature interne, illuminazione e dagli occupanti entrano nell'aria per convezione. Le superfici degli oggetti e le pareti della stanza che assorbono energia radiante riemettono tale energia in ambiente con un certo ritardo e come sola quota convettiva.

Sia il metodo dei fattori di pesatura che del bilancio termico impiegano delle funzioni di trasferimento per lo scambio termico per conduzione attraverso l'involucro (o algoritmi di calcolo equivalenti) al fine di calcolare il guadagno o la perdita di calore per trasmissione. La principale differenza tra i modelli sta nel calcolo dei trasferimenti di calore interni alla stanza.

Il metodo delle RTS è una procedura di calcolo semplificata che deriva dall'HB ed è basata sulle funzioni di trasferimento e sulla risposta all'impulso: in particolare, il concetto è quello di convertire la frazione radiativa degli apporti termici nel corrispondente carico termico sull'ambiente tramite coefficienti di peso che prendono il nome di "*Radiant Time Factors* - RTF".

Il metodo del bilancio termico consente di calcolare il carico netto istantaneo di riscaldamento e/o raffreddamento sensibile sull'aria dello spazio ed è più utilizzato

rispetto al metodo dei fattori di pesatura, pur avendo un peso computazionale maggiore, soprattutto quando l'obiettivo dell'analisi è la simulazione energetica. Il suo sviluppo si basa sulla prima legge della termodinamica e dunque sulla risoluzione delle equazioni di conservazione dell'energia.

L' *Heat Balance* è, come detto, il metodo di bilancio termico diretto che affronta il problema in maniera rigorosa, senza ricorrere all'introduzione di trasformazioni funzionali e di fattori di risposta; vengono pertanto risolte le equazioni fondamentali dello scambio termico e di conservazione dell'energia.

Di seguito è riportato lo schema rappresentativo dell'HB (Figura4.1).

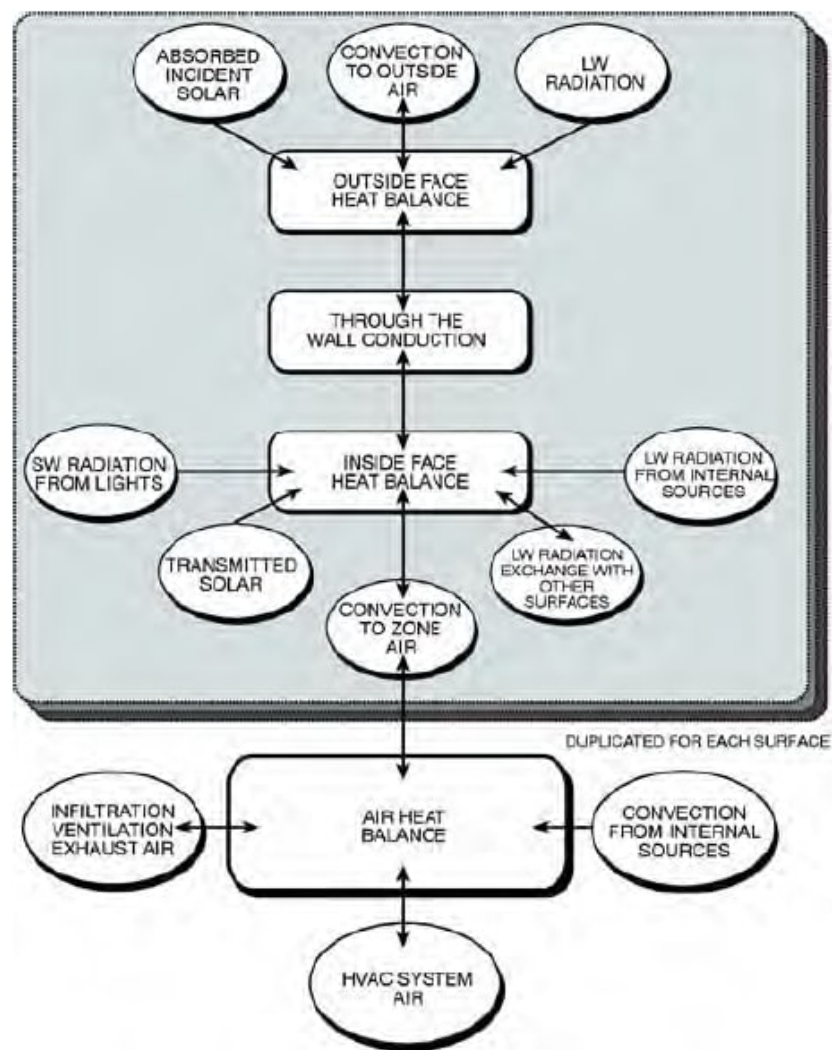


Figura 4.1: Schema dell' *Heat Balance Method* per una zona

Le ipotesi di calcolo sono:

- temperatura uniforme dell'aria interna (perfetta miscelazione);
- temperatura uniforme di ciascuna superficie;
- superfici uniformemente diffondenti;
- aria interna trasparente alla radiazione elettromagnetica.

Il metodo, come si evince da Figura 4.1, può essere diviso in quattro processi distinti:

- il bilancio termico sulla superficie di scambio esterna in cui prendono parte la radiazione solare assorbita, quella a irraggiamento lungo e lo scambio per convezione con l'aria esterna;
- la conduzione attraverso la parete ed il trasferimento di calore attraverso gli elementi trasparenti;
- il bilancio termico sulla superficie interna in cui prendono parte radiazione ad irraggiamento corto da luci, radiazione ad irraggiamento lungo dalle sorgenti interne e/o altre superfici, radiazione solare trasmessa e scambio per convezione con l'aria della zona termica di riferimento;
- il bilancio termico sull'aria ambiente che comprende infiltrazioni e ventilazione, eventuale impianto di climatizzazione ad aria e scambio per convezione dalle sorgenti interne all'ambiente.

Il bilancio termico sulla superficie esterna, quello sulla superficie interna e lo scambio per conduzione attraverso le pareti (zona evidenziata in grigio in Figura 4.1) sono replicati per ogni superficie di scambio termico, ottenendo un sistema di d -equazioni per le d -superfici più un'equazione di bilancio sull'aria.

I flussi termici convettivi (quelli dovuti allo scambio termico tra superficie ed aria e quelli dovuti ad infiltrazioni e ventilazione) sono gli unici che ad essere direttamente sommati come termini dell'equazione di bilancio, dal momento che è scritto per l'aria interna. Come si evince dalla Figura 4.1, infatti, l'unico collegamento tra l' *Air Heat Balance* e il bilancio termico su ciascuna superficie, è lo scambio per convezione con l'aria della zona.

4.1 Bilancio termico sulla superficie di scambio esterna

Il bilancio sulla superficie esterna viene fatto per ogni *i-esima* superficie e risulta dato dalla relazione:

$$\dot{q}''_{\alpha sol} + \dot{q}''_{LWR} + \dot{q}''_{conv} - \dot{q}''_{ko} = 0 \quad (4.1)$$

In Figura 4.2 sono schematizzati i flussi di calore che prendono parte al bilancio termico sulla superficie esterna.

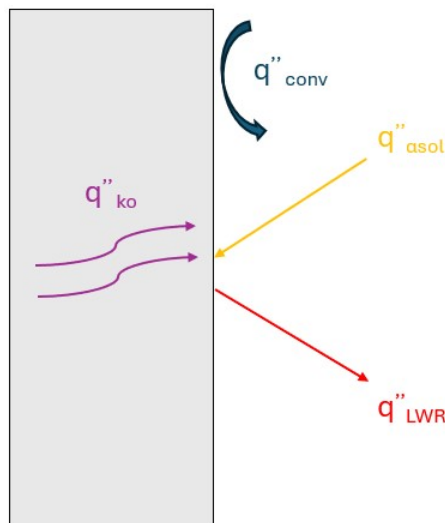


Figura 4.2: Rappresentazione schematica del bilancio termico sulla superficie di scambio esterna.

Nella (4.1) i termini rappresentano:

- \dot{q}''_{LWR} il flusso termico areico per radiazione ad elevata lunghezza d'onda scambiato dalla superficie con le superfici all'esterno [W/m^2];
- \dot{q}_{conv} il flusso termico areico per convezione con aria esterna [W/m^2];
- $\dot{q}''_{\alpha sol}$ il flusso termico areico dovuto alla radiazione solare a bassa lunghezza d'onda assorbita [W/m^2];
- \dot{q}''_{ko} [W/m^2] il flusso termico areico scambiato per conduzione sulla superficie ed è il termine che genera il ritardo [W/m^2].

Il flusso termico scambiato per convezione con l'aria esterna è calcolato come segue:

$$q''_{conv} = h_c(T_{s,o} - T_o) \quad (4.2)$$

con $T_{s,o}$ temperatura della superficie $[K]$, T_o temperatura dell'aria esterna e h_c coefficiente di convezione esterna $[W/m^2K]$. Questo coefficiente può essere calcolato utilizzando diversi algoritmi di calcolo, alcuni dei quali verranno trattati al Paragrafo 4.8.2.

4.2 Conduzione attraverso la parete

La quantificazione del guadagno termico attraverso le superfici opache in regime dinamico è di particolare importanza per via delle elevate inerzie termiche. Il fenomeno della conduzione attraverso gli involucri opachi è quello che regola la dipendenza temporale del carico termico; per questo motivo è la componente di bilancio più difficile da determinare.

Esistono diversi metodi di calcolo tra cui il metodo delle *Conduction Time Series* (CTS) ed il metodo delle differenze finite. Normalmente, il vantaggio computazionale offerto dalla risoluzione tramite CTS, rende il primo metodo la scelta preferita. Il *software Energy Plus* fornisce la possibilità di implementare diversi algoritmi di calcolo per la risoluzione del problema, anche se lo scambio termico per conduzione è risolto di *default* in regime variabile tramite il metodo delle CTS. Di seguito si prenderanno in esame entrambe le metodologie, definendo le procedure di calcolo e di determinazione dello scambio termico, per evidenziare le principali caratteristiche che possono influire sulla scelta sulla base delle esigenze di modellazione dell'utente.

4.2.1 Conduction Time Series - CTS

Il concetto che sta alla base dell'algoritmo di calcolo implementato dal motore di calcolo *Energy Plus* è l'utilizzo di funzioni di trasferimento: esse rappresentano la più semplice soluzione di serie temporali e legano i flussi di calore conduttivi sulla superficie di un elemento ad una serie storica di temperature su entrambi i lati dell'elemento. Il flusso termico per conduzione viene espresso come combinazione lineare di flussi e temperature in istanti differenti sulle facce della parete:

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j \cdot T_{o,t-j\sigma} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j \cdot T_{i,t-j\sigma} \quad (4.3)$$

Nella 4.3:

- q''_{ko} è il flusso di calore;
- T è la temperatura;
- il pedice i indica l'interno dell'elemento costruttivo;
- il pedice o indica l'esterno dell'elemento costruttivo;
- t è l'intervallo di tempo corrente;
- σ è il passo temporale di calcolo;

- X ed Y sono i fattori di risposta.

Per una soluzione esatta sarebbe necessario un numero infinito di termini. Per rendere pratica tale soluzione, vengono incorporati elementi noti dalla storia del flusso termico. Le forme base della soluzione della funzione di trasferimento per la conduzione per flusso di calore interno ed esterno sono rispettivamente

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j \cdot T_{i,t-j\sigma} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j \cdot T_{o,t-j\sigma} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j \cdot q_{ki,t-j\sigma} \quad (4.4)$$

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j \cdot T_{i,t-j\sigma} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j \cdot T_{o,t-j\sigma} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j \cdot q_{ko,t-j\sigma} \quad (4.5)$$

dove:

- X_j è il coefficiente CTF esterno, $j= 0,1,\dots,nz$;
- Y_j è il coefficiente *CrossCross* CTF, $j= 0,1,\dots,nz$;
- Z_j è il coefficiente CTF interno, $j= 0,1,\dots,nz$;
- Φ_j è il coefficiente CTF di flusso, $j = 1,2,\dots,nq$;
- T_i è la temperatura della faccia interna;
- T_o è la temperatura della faccia esterna;
- q''_{ko} è il flusso termico per conduzione sulla faccia esterna;
- q''_{ki} è il flusso termico di conduzione sulla faccia interna.

I pedici in cui compare t indicano il passo temporale.

Tali equazioni affermano che il flusso di calore su entrambe le facce della superficie di un generico elemento è linearmente correlato alle temperature attuale e passate sia sulla superficie interna che esterna, nonché ad alcuni dei valori di flusso precedenti sulla superficie interna.

Attraverso un'unica equazione lineare caratterizzata da coefficienti costanti, è dunque possibile calcolare lo scambio termico per conduzione attraverso un elemento. I coefficienti sono costanti che devono essere determinate solo una volta per ciascun tipo di costruzione e sono necessari un numero limitato di termini per quanto riguarda valori di temperatura e flusso. Questa formulazione è valida per qualsiasi tipo di superficie e non richiede il calcolo o la memorizzazione delle temperature interne degli elementi.

Nel caso del motore di calcolo *EnergyPlus* il metodo utilizzato è quello dello spazio degli stati, definito dalle seguenti equazioni di matrice lineare

$$\frac{dx}{dt} = AX + Bu \quad (4.6)$$

$$y = Cx + Du \quad (4.7)$$

dove:

- X è il vettore di variabili di stato;
- u è il vettore degli *input*;
- y è il vettore degli *output*;
- t è il tempo;
- A, B, C, D sono le matrici dei coefficienti.

Il vettore x può essere eliminato attraverso l'uso dell'algebra matriciale, potendo così correlare direttamente il vettore degli *output* y sia al vettore degli *input* u che quello delle variabili di stato x .

Nel seguente caso le temperature nodali rappresentano le variabili di stato, le temperature interna ed esterna rappresentano gli *input* e i flussi di calore su entrambe le superfici sono gli *output*.

$$\frac{d \begin{bmatrix} T_1 \\ M \\ T_n \end{bmatrix}}{dt} = A \begin{bmatrix} T_1 \\ M \\ T_n \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$\begin{bmatrix} q_i'' \\ q_o'' \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} T_1 \\ M \\ T_n \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Nelle precedenti espressioni le temperature T_1, T_2, \dots, T_n rappresentano le temperature dei nodi (con n numero dei nodi all'interno della parete), T_i e T_o sono le temperature ambiente interno ed esterno mentre q_i'' e q_o'' rappresentano i flussi termici.

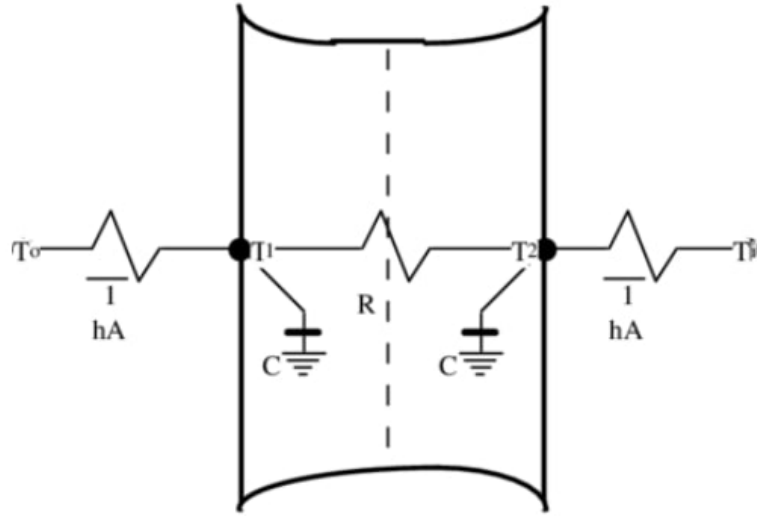


Figura 4.3: Caso lastra monostrato per lo studio della conduzione tramite CTF.

Si prenda in considerazione, al fine di ottenere una descrizione chiara, una lastra monostrato con due nodi interni (Figura 5.1). Le equazioni differenziali su entrambi i lati risultano:

$$C \frac{dT_1}{dt} = hA \cdot (T_o - T_1) + \frac{T_2 - T_1}{R} \quad (4.10)$$

$$C \frac{dT_2}{dt} = hA \cdot (T_i - T_2) + \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (4.11)$$

$$q_i'' = h \cdot (T_i - T_2) \quad (4.12)$$

$$q_o'' = h \cdot (T_1 - T_o) \quad (4.13)$$

dove:

- $R = \frac{1}{kA}$;
- $C = \frac{\rho c_p l A}{2}$;
- A è l'area delle superfici esposte alla temperatura ambiente.

Le stesse equazioni possono essere riscritte in forma matriciale come segue:

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_1}{dt} \\ \frac{dT_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{hA}{C} & 0 \\ 0 & \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_o \\ T_i \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\begin{bmatrix} q_o'' \\ q_i'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -h \\ h & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & h \\ -h & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_o \\ T_i \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

In conclusione, l'importanza del metodo dello spazio degli stati risiede nell'utilizzo dell'algebra delle matrici per eliminare le variabili dello spazio degli stati (rappresentate dalle temperature nodali), ottenendo una forma matriciale che fornisca gli *output* (i flussi di calore) in funzione esclusivamente degli *input* (come le temperature ambiente); in questo modo si elimina la necessità di risolvere le radici nel dominio di *Laplace*, ottenendo allo stesso tempo una struttura matriciale più intuitiva.

4.2.2 Differenze finite

L'algoritmo di calcolo delle CTS di cui sopra, ha le limitazioni di una soluzione basata sulla trasformazione: si tratta infatti di considerare proprietà costanti e valori fissi di alcuni parametri; inoltre, non c'è la possibilità di produrre risultati per l'interno dell'elemento costruttivo. Dal momento che negli ultimi anni c'è un maggiore interesse verso la simulazione di costruzioni più avanzate, come i materiali a cambiamento di fase (PCM), può essere necessario utilizzare un algoritmo di soluzione a differenze finite per il trasferimento di calore per conduzione. Tale algoritmo è stato incorporato in *EnergyPlus* per integrare quello delle CTF nel momento in cui l'utente abbia bisogno di simulare materiali a cambiamento di fase o con conducibilità termica variabile.

Nel *software* è possibile scegliere tra due diverse opzioni per il modello a differenze finite. Il modello utilizzato di *default* è quello di *Crank-Nicholson* che è di tipo semi-implicito (considerato di secondo ordine nel tempo) e utilizza uno schema a differenze finite implicito accoppiato ad una funzione entalpia-temperatura per tener conto dell'energia di cambiamento di fase in modo accurato.

Di seguito è riportata la formulazione implicita per un nodo interno.

$$c_p \rho \Delta X \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left(k_W \frac{T_{i+1}^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^{j+1}}{\Delta x} + k_W \frac{T_{i+1}^j}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^j}{\Delta x} \right) \quad (4.16)$$

Nella (4.16): T è un nodo di temperatura; Δt è il *time step* di calcolo; ΔX è lo spessore del *layer*; c_p è il calore specifico del materiale; k_W è la conducibilità termica dell'interfaccia tra il nodo i e il nodo $i + 1$; k_E è la conducibilità termica dell'interfaccia tra il nodo i e il nodo $i - 1$; ρ è la densità del materiale.

Per quanto riguarda i pedici i è il nodo modellato, $i + 1$ è il nodo adiacente all'interno della costruzione, $i - 1$ è il nodo adiacente all'esterno della costruzione, $j + 1$ è il nuovo intervallo temporale e j è l'intervallo temporale precedente.

La (4.16) è accompagnata dalla equazione seguente relazione:

$$h_i = HTF(T_i) \quad (4.17)$$

dove $HTF(T_i)$ è una funzione che mette in relazione entalpia e temperatura, utilizzando i dato di *input* inseriti.

Per lo schema presentato nella (4.16) è riportata in figura la schematizzazione nelle 4 tipologie di nodi considerati per la risoluzione del problema.

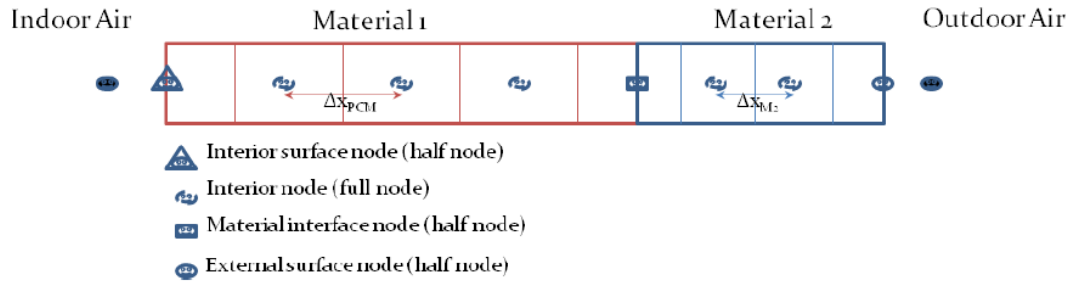


Figura 4.4: Schema dei nodi per la soluzione alle differenze finite

Qui si ritrovano:

- nodi sulla superficie interna;
- nodi interni;
- nodi sull'interfaccia del materiale;
- nodi sulla superficie esterna.

La discretizzazione della superficie dipende dalla diffusività termica del materiale e dall'intervallo di tempo scelto. E' possibile impostare il valore della costante di discretizzazione dello spazio tramite l'input "Space Discretization Constant".

Per calcolare il numero effettivo di nodi per ciascuno strato si considera la lunghezza dello strato diviso il risultato dell'equazione:

$$\Delta x = \sqrt{C\alpha\Delta T} \quad (4.18)$$

dove compare la diffusività del materiale α e la costante di discretizzazione C . Successivamente, il valore di Δx viene ricalcolato dividendo la lunghezza del materiale per il numero di nodi.

Per aggiornare alle nuove temperature viene utilizzato uno schema iterativo e si utilizza un fattore di rilassamento per aumentare la stabilità che può essere controllato dall'utente e ridotto dal programma stesso se rileva instabilità osservando il numero eccessivo di iterazioni.

La nuova temperatura risulta:

$$T_{i,new} = T_{i,old} + Relax(T_{i,new} - T_{i,old}) \quad (4.19)$$

Le entalpie dei nodi vengono aggiornate a ogni iterazione e successivamente utilizzate per sviluppare un Cp variabile del materiale, utilizzando l'equazione seguente:

$$C_p = \frac{h_{i,new} - h_{i,old}}{T_{i,new} - T_{i,old}} \quad (4.20)$$

Lo schema di iterazione assicura che l'entalpia corretta, e quindi il corretto Cp, sia utilizzato in ogni passo temporale. L'algoritmo prevede anche la possibilità di includere un coefficiente di temperatura per modificare la conducibilità termica. La conducibilità termica viene ottenuta da:

$$k = k_0 + k_1(T_i - 20) \quad (4.21)$$

dove k_0 è il valore della conduttività a 20°C mentre k_1 è quella variabile ottenuta considerando la variazione della conducibilità per grado di differenza di temperatura rispetto ai 20°C.

La conducibilità termica all'interfaccia tra i nodi, come mostrato di seguito viene risolta da *EnergyPlus* tramite un'interpolazione lineare tra i punti nodali:

$$c_p \rho \Delta X \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left(k_W \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_W \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \right) \quad (4.22)$$

con

$$k_W = \frac{k_{i+1}^{j+1} + k_i^{j+1}}{2} \quad (4.23)$$

$$k_E = \frac{k_{i-1}^{j+1} + k_i^{j+1}}{2} \quad (4.24)$$

4.3 Trasferimento di calore attraverso le superfici trasparenti

Il flusso di calore attraverso le superfici di involucro trasparente \dot{Q}_{sol} [W] comprende tre contributi:

$$\dot{Q}_{sol} = \dot{Q}_{sol,dir} + \dot{Q}_{sol,diff} + \dot{Q}_{sol,cond} \quad (4.25)$$

Di seguito sono esplicitati tutti i termini della (4.25) e se ne descrive la relazione per la loro quantificazione:

- $\dot{Q}_{sol,dir}$ è la trasmissione di quota parte della radiazione solare diretta:

$$\dot{Q}_{sol,dir} = A_{tr} \cdot I \cdot SHGC(\gamma) \cdot F_{is} \cdot f_s \quad (4.26)$$

dove:

- A_{tr} è l'area trasparente dell'elemento finestrato [m^2];
- I è la radiazione solare incidente diretta [W/m^2];
- $SHGC(\gamma)$ è il "*Solar Heat Gain Coefficient*" per la radiazione solare diretta incidente ed equivale al fattore g per la normativa italiana; esso tiene conto sia della radiazione trasmessa all'interno direttamente sia di quella assorbita e poi trasmessa all'interno¹;
- γ è l'angolo di incidenza: più il suo valore è alto più il vetro riflette, per questo motivo è indice delle prestazioni del vetro stesso;
- F_{is} è il coefficiente di attenuazione dovuto alla presenza eventuale di schermature solari (se le schermature non sono presenti assume valore pari a 1);
- f_s è la frazione soleggiata della porzione trasparente dell'elemento finestrato;

- $\dot{Q}_{sol,diff}$ è la trasmissione di quota parte della radiazione solare diffusa:

$$\dot{Q}_{sol,diff} = A_{tr} \cdot (I_D + I_R) \cdot SHGC_D \cdot F_{is} \quad (4.27)$$

dove:

¹La radiazione scambia per trasmissione verso l'interno, riflessione verso l'esterno e assorbimento nell'elemento vetrato; ad oggi c'è un forte interesse verso vetri a controllo solare in grado di abbassare la quota di trasmissione; vengono utilizzati anche vetri selettivi in grado di abbassare la quota solare pur favorendo quella visibile andando a modificare lo spettro della lunghezza d'onda agendo solo sulla lunghezza d'onda del solare "termico", allo stesso tempo rimanendo trasmissivi nel campo del visibile.

- I_D è la radiazione solare incidente diffusa [W/m^2];
- I_R è la radiazione solare incidente riflessa [W/m^2];
- $SHGC_D$ è il "*Solar Heat Gain Coefficient*" per la radiazione solare diffusa;
- $\dot{Q}_{sol,cond}$ è il flusso termico trasmesso per conduzione: dal momento che l'inerzia termica degli elementi vetrati è molto bassa, si può considerare che, soggetti allo scambio termico, non accumulino calore e che dunque si possa approssimare a regime stazionario. La sua quantificazione avviene come segue:

$$\dot{Q}_{sol,cond} = U_f \cdot A_f \cdot (T_e^* - T_z) \quad (4.28)$$

dove:

- U_f è la trasmittanza termica del serramento [W/m^2K];
- A_f è la superficie lorda dell'apertura (comprensiva di telaio) [m^2];
- T_e^* è la temperatura sole-aria equivalente che è la temperatura dell'aria esterna che, in assenza di tutte le variazioni di radiazione, dà la stessa velocità di ingresso del calore nella superficie così come farebbe la combinazione di radiazione solare incidente, scambio di energia radiante con il cielo (e altri ambienti esterni) e scambio di calore convettivo con l'aria esterna [5];
- T_z è la temperatura dell'ambiente interno [$^{\circ}C$].

4.4 Bilancio termico sulla superficie di scambio interna

Il bilancio sulla superficie interna per ciascuna *i-esima* superficie è:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (4.29)$$

I termini del bilancio sono riportati in Figura 4.5:

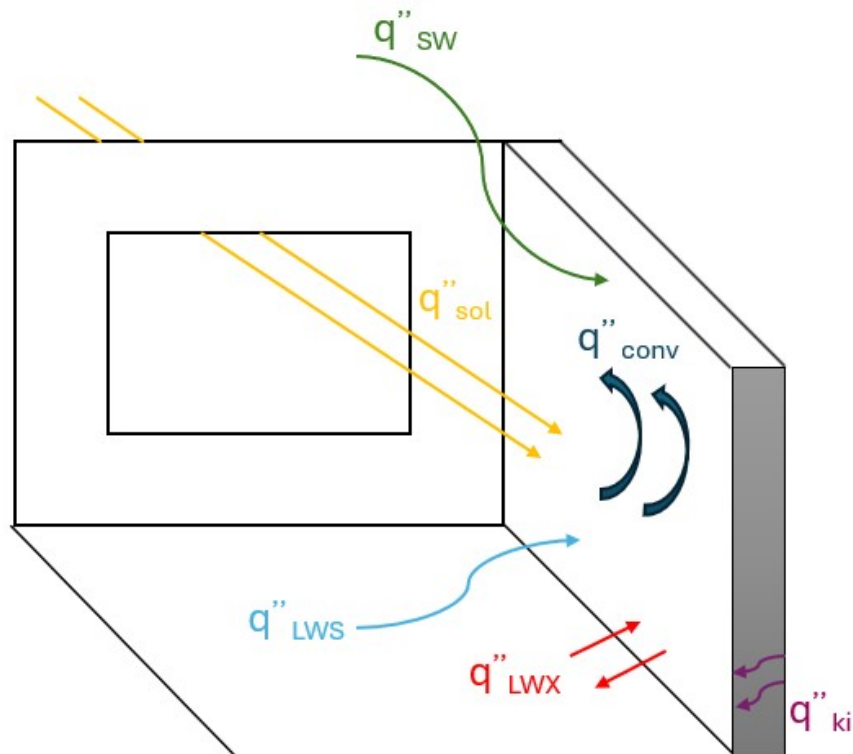


Figura 4.5: Rappresentazione schematica del bilancio termico sulla superficie di scambio interna.

Nella (4.29) sono espressi in $[W/m^2]$ e rappresentano:

- q''_{LWX} il flusso termico per radiazione ad elevata lunghezza d'onda con le altre superfici interne alla zona $[W/m^2]$;

- q''_{SW} il flusso dovuto alla radiazione a onde corte dalle luci [W/m^2];
- q''_{LWS} il flusso dovuto alla radiazione a onde lunghe dalle apparecchiature [W/m^2];
- q''_{conv} il flusso termico scambiato per convezione con l'aria interna [W/m^2];
- q''_{ki} il flusso termico areico scambiato per conduzione sulla superficie [W/m^2];
- q''_{sol} il flusso radiativo solare trasmesso assorbito sulla superficie [W/m^2].

Il flusso termico scambiato per convezione con l'aria interna è calcolato come segue:

$$q''_{conv} = h_c(T_{s,i} - T_z) \quad (4.30)$$

con $T_{s,i}$ temperatura della superficie [K], T_z temperatura dell'aria interna (assimilabile a quella della zona interna) e h_c coefficiente di convezione interna [W/m^2K]. Questo coefficiente può essere calcolato utilizzando diversi algoritmi di calcolo, alcuni dei quali verranno trattati al Paragrafo 4.8.1.

4.5 Bilancio termico sull'aria - *Air Heat Balance*

Le ipotesi di calcolo sono:

- temperatura uniforme dell'aria interna (perfetta miscelazione);
- temperatura uniforme di ciascuna superficie;
- superfici uniformemente diffondenti (sia per radiazione solare che termica);
- aria interna trasparente alla radiazione elettromagnetica.

Equazione di bilancio sull'aria:

$$C_z \frac{dt_z}{d\tau} = \sum_{i=1}^N \dot{Q}_{i,c} + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i \cdot A_i \cdot (T_{s,i} - T_z) + \dot{m}_v \cdot c_p \cdot (T_\infty - T_z) + \dot{Q}_N \quad (4.31)$$

dove i termini (misurati in [W]) sono:

- $C_z \frac{dT_z}{d\tau}$ il termine che considera la capacità termica dell'aria e delle masse termiche in equilibrio con l'aria ambiente;
- $\sum_{i=1}^N \dot{Q}_{i,c}$ è il termine che comprende le sorgenti interne convettive (N sorgenti interne);
- $\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_i \cdot A_i \cdot (T_{s,i} - T_z)$ è il termine che comprende i flussi termici dispersi dalle superfici della zona a temperatura T_z che si trovano a temperatura T_s ;
- $\dot{m}_v \cdot c_p \cdot (T_\infty - T_z)$ è il termine che comprende il flusso termico per ventilazione che successivamente verrà chiamato \dot{Q}_v ;
- \dot{Q}_N è il termine che rappresenta il carico dato dall'impianto.

Dal momento che il bilancio termico è scritto per l'aria interna, anche se la trasmissione del calore attraverso l'involucro edilizio avviene per convezione, radiazione e conduzione, i flussi termici convettivi sono gli unici flussi termici che possono direttamente essere sommati come termini del bilancio.

Il termine relativo alle sorgenti interne convettive $\dot{Q}_{i,c}$ compare quindi in maniera esplicita nell'equazione di bilancio termico sull'aria.

Dal momento che l'aria è considerata trasparente alla radiazione, la quota radiativa non agisce in maniera diretta sull'ambiente ma con un certo ritardo (le pareti si scaldano e, solo in un secondo momento, cedono parte del calore all'ambiente interno, parte a quello esterno). Per questo motivo, la parte radiativa dei carichi non compare esplicitamente nella (4.31) ma si tiene conto del suo riscontro in ambiente tramite il termine di temperatura superficiale $t_{s,i}$.

Per i motivi di cui sopra, nel calcolo dei carichi interni (o endogeni) è importante porre l'attenzione sulla determinazione della quota convettiva delle sorgenti interne che prende parte istantaneamente al bilancio.

L'aria che entra direttamente in uno spazio attraverso infiltrazione o ventilazione viene immediatamente mescolata con l'aria della zona. La quantità di aria di infiltrazione o ventilazione naturale è di difficile determinazione: alle volte è correlata alla differenza di temperatura tra interno ed esterno e alla velocità del vento; tuttavia, indipendentemente da come è determinata, viene aggiunta direttamente al bilancio termico dell'aria.

L'aria di condizionamento che entra nella zona dal sistema HVAC viene anch'essa mescolata direttamente con l'aria della zona; il flusso per ventilazione \dot{Q}_v rappresenta un carico della zona ove l'infiltrazione o la ventilazione naturale vengano utilizzate per fornire tutta o parte dell'aria di ventilazione.

4.6 Carichi endogeni

Il calore proveniente da persone, sistemi di illuminazione, apparecchiature elettriche, motori elettrici e apparati di cottura può contribuire alla maggior parte del carico termico nella stagione estiva.

Poiché gli involucri degli edifici sono migliorati in risposta a codici energetici sempre più restrittivi, i carichi dovuti alle sorgenti interne sono aumentati a causa di fattori come l'uso crescente di computer e l'avvento di spazi ad alta densità di occupazione [5].

La componente convettiva delle sorgenti interne (carichi endogeni) prende parte direttamente al bilancio termico sull'aria, come si evidenziava tramite la (4.31) al Paragrafo 4.5.

Il calcolo dei carichi endogeni effettuato tramite il metodo dell'*Heat Balance* è il medesimo di quello che si ritrova per il metodo *Radiant Time Series*.

Di seguito è riportata in forma matematica l'espressione di tutti i componenti che devono essere considerati nella quantificazione del termine $\sum_{i=1}^N \dot{Q}_{i,c}$, relativo alle sorgenti interne convettive della (4.31):

$$\sum_{i=1}^N \dot{Q}_{i,c} = \dot{Q}_{i,c,occ} + \dot{Q}_{i,c,ill} + \dot{Q}_{i,c,app\ el} + \dot{Q}_{i,c,m\ el} + \dot{Q}_{i,c,app\ cott} \quad (4.32)$$

Tutti i termini della (4.32) e i relativi metodi di calcolo e di determinazione sono descritti singolarmente nei paragrafi successivi.

4.6.1 Occupazione

Con il termine relativo all'occupazione $\dot{Q}_{i,c,occ}$ si considera la presenza di occupanti (persone) all'interno dell'ambiente o della zona termica di riferimento.

Dal momento che si parla di carico dovuto alla presenza di persone, occorre considerare una quota di carico sensibile dovuta allo scambio per convezione ed irraggiamento e una quota di carico latente dovuta allo scambio di vapore acqueo.

Il flusso termico globalmente $[W]$ è funzione dell'attività metabolica degli occupanti (Figura 4.6).

L'ASHRAE [5] fornisce, tra le linee guida proposte, i tassi rappresentativi a cui il calore sensibile e l'umidità sono emessi dagli esseri umani in diversi stati di attività. In spazi ad alta densità, come gli *auditorium*, questi guadagni costituiscono una grande frazione del carico totale.

Anche per l'occupazione a breve termine, il calore sensibile e l'umidità aggiuntivi introdotti dalle persone possono essere significativi.

La conversione del guadagno di calore sensibile dalle persone al carico termico dello spazio è influenzata dalle caratteristiche di accumulo termico di tale spazio, dal momento che una percentuale del carico sensibile è energia radiante.

I guadagni di calore latente sono generalmente considerati istantanei, ma esistono modelli per l'accumulo e il rilascio di calore latente da materiali edilizi comuni.

In particolare, ASHRAE suggerisce valori relativi a:

- Flusso termico totale [W];
- Quota sensibile [W];
- Quota latente [W];
- Quota sensibile scambiata per irraggiamento ad elevata e bassa lunghezza d'onda [%].

Di seguito è riportato un esempio di valori tabellati forniti per livello e tipo di attività:

Table 1 Representative Rates at Which Heat and Moisture Are Given Off by Human Beings in Different States of Activity

Degree of Activity	Location	Total Heat, Btu/h		Sensible Heat, Btu/h	Latent Heat, Btu/h	% Sensible Heat that is Radiant ^b	
		Adult Male	Adjusted, M/F ^a			Low V	High V
Seated at theater	Theater, matinee	390	330	225	105		
Seated at theater, night	Theater, night	390	350	245	105	60	27
Seated, very light work	Offices, hotels, apartments	450	400	245	155		
Moderately active office work	Offices, hotels, apartments	475	450	250	200		
Standing, light work; walking	Department store; retail store	550	450	250	200	58	38
Walking, standing	Drug store, bank	550	500	250	250		
Sedentary work	Restaurant ^c	490	550	275	275		
Light bench work	Factory	800	750	275	475		
Moderate dancing	Dance hall	900	850	305	545	49	35
Walking 3 mph; light machine work	Factory	1000	1000	375	625		
Bowling ^d	Bowling alley	1500	1450	580	870		
Heavy work	Factory	1500	1450	580	870	54	19
Heavy machine work; lifting	Factory	1600	1600	635	965		
Athletics	Gymnasium	2000	1800	710	1090		

Figura 4.6: Valori tabellati suggeriti da ASHRAE *Handbook of Fundamentals, 2009* per l'occupazione

4.6.2 Sistemi di illuminazione

Dato che l'illuminazione costituisce spesso una parte significativa del carico termico degli ambienti, è fondamentale stimare con precisione il calore aggiunto direttamente all'ambiente considerato. Il carico termico che deriva dai sistemi di illuminazione in un determinato momento potrebbe differire notevolmente dall'equivalente termico della potenza elettrica fornita istantaneamente al dispositivo; questo avviene a causa dell'accumulo di calore che spesso rende il calcolo di questo contributo difficile, avendo l'obiettivo di essere il più fedeli possibile alle condizioni reali di scambio termico.

Ciò che determina questa differenza è il tipo di installazione che si considera e le quote parti di emissione termica e visibile.

La principale fonte di calore generata dall'illuminazione è l'emissione di luce da lampade e altri elementi, ma ci può essere un significativo calore aggiuntivo prodotto dagli alimentatori e da altre componenti dei dispositivi di illuminazione.

Normalmente, il tasso istantaneo del guadagno di calore sensibile causato dall'illuminazione elettrica può essere calcolato come segue:

$$\dot{Q}_{i,c,ill} = F_u \cdot F_{sa} \cdot P_{el} \quad (4.33)$$

dove:

- F_u è il fattore di utilizzazione definito come rapporto tra la potenza in uso e quella installata (valore compreso tra 0 e 1);
- F_{sa} è un fattore correttivo definito come "fattore di correzione per l'illuminazione speciale" e dipende dalla tipologia di sistema di illuminazione installato (per lampade ad incandescenza ormai inutilizzate il suo valore è pari a 1); è definito come rapporto tra il consumo di potenza degli apparecchi di illuminazione, inclusi lampade e reattori, e il consumo di potenza nominale delle lampade stesse;
- P_{el} è la potenza totale di tutte le lampade installate misurata in [W].

Anche per i sistemi di illuminazione, ASHRAE fornisce nel manuale *Handbook of Fundamentals* valori di percentuale radiativa e convettiva dell'apporto termico.

Di seguito è riportato un esempio di valori tabellati per la suddivisione delle quote sulla base della tipologia di apparecchio luminoso.

Table 3 Lighting Heat Gain Parameters for Typical Operating Conditions

Luminaire Category	Space Fraction	Radiative Fraction	Notes
Recessed fluorescent luminaire without lens	0.64 to 0.74	0.48 to 0.68	<ul style="list-style-type: none"> • Use middle values in most situations • May use higher space fraction, and lower radiative fraction for luminaire with side-slot returns • May use lower values of both fractions for direct/indirect luminaire • May use higher values of both fractions for ducted returns
Recessed fluorescent luminaire with lens	0.40 to 0.50	0.61 to 0.73	<ul style="list-style-type: none"> • May adjust values in the same way as for recessed fluorescent luminaire without lens
Downlight compact fluorescent luminaire	0.12 to 0.24	0.95 to 1.0	<ul style="list-style-type: none"> • Use middle or high values if detailed features are unknown • Use low value for space fraction and high value for radiative fraction if there are large holes in luminaire's reflector
Downlight incandescent luminaire	0.70 to 0.80	0.95 to 1.0	<ul style="list-style-type: none"> • Use middle values if lamp type is unknown • Use low value for space fraction if standard lamp (i.e. A-lamp) is used • Use high value for space fraction if reflector lamp (i.e. BR-lamp) is used
Non-in-ceiling fluorescent luminaire	1.0	0.5 to 0.57	<ul style="list-style-type: none"> • Use lower value for radiative fraction for surface-mounted luminaire • Use higher value for radiative fraction for pendant luminaire

Figura 4.7: Valori tabellati suggeriti da ASHRAE *Handbook of Fundamentals, 2009* per l'illuminazione.

In alternativa, esistono altri metodi per la determinazione degli apporti di illuminazione, ad esempio nel caso si abbia a disposizione la metratura degli ambienti e la tipologia degli stessi, può essere stimato un valore di $[W/m^2]$.

Table 2 Lighting Power Densities Using Space-by-Space Method

Common Space Types*	LPD, W/R ²	Building-Specific Space Types	LPD, W/R ²
Office—enclosed	1.1	Gymnasium/exercise center	
Office—open plan	1.1	Playing Area	1.4
Conference/meeting/multipurpose	1.3	Exercise Area	0.9
Classroom/lecture/training	1.4	Courthouse/police station/penitentiary	
For penitentiary	1.3	Courtroom	1.9
Lobby	1.3	Confinement cells	0.9
For hotel	1.1	Judges' chambers	1.3
For performing arts theater	3.3	Fire Stations	
For motion picture theater	1.1	Engine room	0.8
Audience/seating Area	0.9	Sleeping quarters	0.3
For gymnasium	0.4	Post office—sorting area	1.2
For exercise center	0.3	Convention center—exhibit space	1.3
For convention center	0.7	Library	
For penitentiary	0.7	Card file and cataloging	1.1
For religious buildings	1.7	Stacks	1.7
For sports arena	0.4	Reading area	1.2
For performing arts theater	2.6	Hospital	
For motion picture theater	1.2	Emergency	2.7
For transportation	0.5	Recovery	0.8
Atrium—first three floors	0.6	Nurses' station	1.0
Atrium—each additional floor	0.2	Exam/treatment	1.5
Lounge/recreation	1.2	Pharmacy	1.2
For hospital	0.8	Patient room	0.7
Dining Area	0.9	Operating room	2.2
For penitentiary	1.3	Nursery	0.6
For hotel	1.3	Medical supply	1.4
For motel	1.2	Physical therapy	0.9
For bar lounge/leisure dining	1.4	Radiology	0.4
For family dining	2.1	Laundry—washing	0.6

Figura 4.8: Valori tabellati suggeriti da ASHRAE *Handbook of Fundamentals, 2009* per l'illuminazione. Valori tipici in W/m^2 per tipologia ambiente.

4.6.3 Apparecchiature elettriche ed elettroniche

Per apparecchiature elettriche ed elettroniche tutta la potenza elettrica assorbita è convertita in calore, ma è errato considerare che il carico sull'ambiente coincida con il valore di potenza nominale riportato sull'apparecchio, poiché si incorrerebbe in una sovrastima inaccettabile ai fini del corretto dimensionamento dei sistemi HVAC. Infatti, in condizioni di progetto, occorre valutare il carico massimo a cui far fronte, ma ciò non significa che si debbano considerare i valori massimi su tutte le apparecchiature.

Come riportato dagli studi dei dati svolti da ASHRAE, in caso di tipiche apparecchiature elettriche di ufficio con un consumo di targa inferiore ai 1000 W e in assenza di informazioni specifiche sui dati effettivi di guadagno di calore da parte del produttore, l'effettivo assorbimento di potenza elettrica può essere stimato per circa il 25-50% del dato di targa in condizioni di esercizio tipiche. In particolare, si considera che l'apporto di calore corrisponda al 25% per una stima meno cautelativa ma ragionevolmente più realistica; valori più elevati sono da preferire esclusivamente ove ci sia, ad esempio, una densità particolarmente alta di apparecchi. La scelta dipende quindi dalla sensibilità dell'analista nel valutare specifiche condizioni quali, ad esempio, la presenza di computer in un ambiente

generico piuttosto che in un laboratorio informatico, dove si terrà conto del fatto che tali apparecchi rimarranno accesi per una durata nettamente maggiore.

Per la determinazione dell'apporto termico dovuto alla presenza di apparecchiature elettriche è inoltre fondamentale considerare la contemporaneità dei carichi, procedendo al calcolo come di seguito:

$$\dot{Q}_{i,c,app\ el} = F_C \cdot \sum_i \dot{Q}_{i,c,app\ el} \quad (4.34)$$

Nella (4.34) il termine F_C rappresenta il coefficiente di contemporaneità calcolato come rapporto tra la somma dell'effettiva potenza assorbita in esercizio [W] e la somma delle potenze di picco di ciascuna utenza elettrica [W].

La quantificazione del coefficiente di contemporaneità risulta pertanto dato dalla relazione:

$$F_C = \frac{(\sum_i P_{el,i})_{effettive}}{\sum_i P_{el,max}} \quad (4.35)$$

Per una stima di massima in fase preliminare è possibile reperire valori tipici di apporti termici per unità di superficie: come riportato da ASHRAE, per uffici con uso di apparecchiature elettriche i valori vanno tipicamente dai 5 ai 12 W/m^2 e spesso si fa riferimento dunque ad un valor medio di 9 W/m^2 . Valori tipici in assenza di dati noti, per quanto concerne le potenze nominali, sono riportati all'interno del manuale ASHRAE "*Handbook of Fundamentals*" sulla base del tipo di apparecchio e di funzionamento. Altri valori raccomandati vengono riportati in unità di superficie non solo sulla base delle caratteristiche di massima dell'ambiente, ma anche secondo il tasso di occupazione dell'ambiente stesso.

Tramite consultazione del manuale ASHRAE è anche in questo caso possibile reperire informazioni circa le quote radiative e convettive, sulla base di tipologia e presenza di ventilatori per il raffreddamento dei componenti (es. computer), che aumentano il flusso convettivo dell'apporto termico.

Per destinazioni d'uso particolari come gli ospedali occorre valutare la presenza di apparecchi speciali e dedicati. Per quanto riguarda l'attrezzatura ospedaliera e da laboratorio, infatti, essa rappresenta la fonte principale di guadagni di calore sensibile e latente negli spazi. È necessaria una particolare attenzione nella valutazione della contemporaneità dei carichi, della durata di utilizzo e della variabilità nella potenza richiesta durante l'operazione. Per via della specificità di tali apparecchi, gli apporti prodotti devono essere considerati caso per caso, facendo affidamento sulle informazioni dei dati forniti direttamente dai produttori, specialmente in caso di attrezzature di grandi dimensioni e di particolare utilizzo. È dunque più difficile fornire raccomandazioni generalizzate sugli apporti di calore per le attrezzature mediche rispetto alle attrezzature da ufficio generiche: il progetto di ricerca ASHRAE RP-1343 ("*Koenigshofer et al. 2009*") ha sviluppato metodi per testare l'apporto di calore dai grandi sistemi di attrezzature mediche, sia in fase di inattività che

di picco durante i cicli operativi. Gli *output* di calore delle attrezzature mediche possono variare ampiamente tra diversi produttori, anche per attrezzature che svolgono una funzione simile.

Sulla base di tali ricerche, ASHRAE fornisce tabelle (di cui si riporta un esempio in Figura 4.9) utilizzabili nel caso in cui si voglia effettuare una valutazione di massima. Qui sono riportati alcuni valori medi di riferimento raccomandati per la determinazione degli effettivi guadagni ai fini del dimensionamento.

Table 6 Recommended Heat Gain from Typical Medical Equipment

Equipment	Nameplate, W	Peak, W	Average, W
Anesthesia system	250	177	166
Blanket warmer	500	504	221
Blood pressure meter	180	33	29
Blood warmer	360	204	114
ECG/RESP	1440	54	50
Electrosurgery	1000	147	109
Endoscope	1688	605	596
Harmonical scalpel	230	60	59
Hysteroscopic pump	180	35	34
Laser sonics	1200	256	229
Optical microscope	330	65	63
Pulse oximeter	72	21	20
Stress treadmill	N/A	198	173
Ultrasound system	1800	1063	1050
Vacuum suction	621	337	302
X-ray system	968		82
	1725	534	480
	2070		18

Figura 4.9: Valori tabellati suggeriti da ASHRAE *Handbook of Fundamentals, 2009* per le apparecchiature. Fonte: *Hosni et al. (1999)*.

Il termine "*Peak*" si riferisce al picco di potenza raggiunto dall'attrezzatura durante i periodi di massimo utilizzo mentre il valore proposto alla colonna "*Average*" si riferisce alla potenza media utilizzata dall'attrezzatura nel corso del tempo e tiene conto della variabilità nella potenza richiesta dall'attrezzatura durante l'intero ciclo operativo, includendo periodi di picco e periodi di inattività.

4.6.4 ApparatI di cottura e cibo

E' possibile determinare un tasso medio di consumo energetico degli elettrodomestici comuni (elettrici, a vapore e a gas) dal dato di targa di potenza nominale in ingresso, applicando un fattore di utilizzo F_U e un fattore F_R che tiene conto della frazione radiativa:

$$\dot{Q}_{i,c,app\ cott} = P_{input} \cdot F_U \cdot F_R \quad (4.36)$$

I valori dei fattori F_U e F_R sono tabulati in ASHRAE insieme ad alcuni valori tipici proposti in termini di potenza per alcuni apparecchi di cottura.

4.7 Trasferimento di calore per ventilazione

Per quanto riguarda il guadagno termico dovuto alla ventilazione \dot{Q}_v , esso è di natura puramente convettiva per cui non vi sono considerazioni in merito alla determinazione delle componenti da inserire nel bilancio termico sull'aria della (4.31): tutto il carico per ventilazione agisce istantaneamente e non vi è alcun contributo di natura radiativa da dover preventivamente "processare".

Tale contributo può risultare però a carico dell'ambiente o, ad esempio, della batteria dell'UTA nel caso di ventilazione meccanica.

Il contributo della ventilazione viene tenuto in considerazione nello svolgimento del bilancio termico solo se si tratta di un carico sull'ambiente.

La quantificazione della potenza di ventilazione \dot{Q}_v viene fatta attraverso la relazione

$$\dot{Q}_v = \sum_j q_j(t) \cdot \rho \cdot c_p \cdot [T_{entrante,j}(t) - T_z] \quad (4.37)$$

dove:

- $q_j(t)$ è la j -esima portata volumetrica di aria in ingresso, variabile nel tempo [m^3/s];
- ρ massa volumica dell'aria [kg/m^3];
- c_p capacità termica massica [J/kgK];
- $T_{entrante,j}$ è la temperatura entrante in ambiente (non coincide sempre con quella esterna ma, per esempio, con quella di un ambiente a temperatura diversa) [K];
- T_z è la temperatura della zona interna [K].

4.8 Trasferimento di calore per convezione

Nel seguente paragrafo verranno trattati alcuni degli algoritmi utilizzati ai fini del calcolo del trasferimento di calore per convezione. Tali algoritmi sono integrati nel motore di calcolo *EnergyPlus* che permette, sia durante la modellazione sia in fase di simulazione, di scegliere il metodo desiderato ai fini del calcolo del coefficiente di trasferimento di calore per convezione h , misurato in $[W/m^2K]$.

4.8.1 Convezione interna

Il coefficiente di trasferimento di calore per convezione interna h_i è utilizzato per il calcolo del flusso termico areico per convezione con l'aria interna q''_{conv} trattato nella (4.29) (Paragrafo 4.4).

Tra gli algoritmi di calcolo più utilizzati si riportano:

- *Detailed Natural Convection Algorithm*, TARP: il modello completo di convezione naturale correla il coefficiente di trasferimento di calore per convezione con l'orientamento della superficie e la differenza tra la temperatura superficiale e la temperatura dell'aria della zona ΔT .

– "ASHRAE Vertical Wall": per ΔT nullo \forall superfici verticali $\rightarrow h = 1.31 \cdot |\Delta T|^{1/3}$;

– "Walton Unstable Horizontal Or Tilt"

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T < 0 \\ \text{soffitto} \end{array} \right. \vee \left\{ \begin{array}{l} \Delta T > 0 \\ \text{pavimento} \end{array} \right.$$

$\rightarrow h = \frac{9.482 \cdot |\Delta T|^{1/3}}{7.283 - |\cos \Sigma|}$ dove Σ è l'angolo di inclinazione della superficie;

– "Walton Stable Horizontal Or Tilt"

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T < 0 \\ \text{pavimento} \end{array} \right. \vee \left\{ \begin{array}{l} \Delta T > 0 \\ \text{soffitto} \end{array} \right.$$

$\rightarrow h = \frac{1.810 \cdot |\Delta T|^{1/3}}{1.382 - |\cos \Sigma|}$

- *Simple Natural Convection Algorithm*, che utilizza coefficienti costanti per diverse configurazioni di trasferimento del calore:

– parete verticale $\rightarrow h = 3.076$;

– superficie orizzontale $\rightarrow h = 0.948$;

– superficie inclinata con convezione ridotta $\rightarrow h = 2.281$;

– superficie inclinata con convezione significativa $\rightarrow h = 3.870$;

- *Ceiling Diffuser Algorithm*, che è basato su correlazioni empiriche per correlare il coefficiente di trasferimento del calore con il tasso di ricambi d'aria ACH :
 - pavimento $\rightarrow h = 3.873 + 0.082 \cdot ACH^{0.98}$;
 - soffitto $\rightarrow h = 2.234 + 4.099 \cdot ACH^{0.503}$;
 - parete $\rightarrow h = 1.208 + 1.012 \cdot ACH^{0.604}$;

Le condizioni in cui sono state sviluppate le correlazioni includono valori di ACH fino a circa 3. Nel calcolatore *EnergyPlus*, per valori di ACH compresi tra 0.5 e 3 si assume che la convezione sia una combinazione tra convezione naturale e forzata. Pertanto, tra questi due valori, il *software* utilizza un'interpolazione lineare tra il valore dell'algoritmo di convezione naturale e il valore di convezione forzata a $ACH = 3$.

4.8.2 Convezione esterna

Il coefficiente di trasferimento di calore per convezione esterna h_e è utilizzato per il calcolo del flusso termico areico per convezione con l'aria interna q''_{conv} trattato nella (4.1) al Paragrafo 4.1.

Tra gli algoritmi di calcolo più utilizzati si trovano:

- *Simple Combined*, che calcola il coefficiente di trasferimento di calore dalla ruvidità dei materiali e la velocità superficiale locale del vento.

Risulta:

$$h = D + E \cdot V_z + F \cdot V_z^2 \quad (4.38)$$

con D, E, F coefficienti di rugosità, di cui si riportano i valori per alcuni materiali di esempio in Figura 4.10, e V_z velocità del vento locale all'altezza z , calcolata come:

$$V_z = V_{met} \left(\frac{\sigma_{met}}{z_{met}} \right)_{met}^\alpha \cdot \left(\frac{z}{\sigma} \right)^\alpha \quad (4.39)$$

dove:

- z è l'altitudine;
- α è l'esponente del profilo di velocità del vento locale;
- σ è lo spessore dello strato limite del profilo di velocità del vento locale;
- z_{met} altezza sopra il suolo del sensore di velocità del vento alla stazione meteorologica;
- V_{met} velocità del vento misurata alla stazione meteorologica;
- α_{met} esponente del profilo di velocità del vento alla stazione meteorologica;

- σ_{met} spessore dello strato limite del profilo di velocità del vento alla stazione meteorologica.

Per i valori dell'esponente α e di σ si faccia riferimento alla tabella 3.4 di "*EnergyPlus Engineering Reference*"[10].

Indice di rugosità	D	E	F	Materiale di esempio
1 (Molto approssimativo)	11.58	5.894	0,0	Stucco
2 (grezzo)	12.49	4.065	0,028	Mattone
3 (Medio Ruvido)	10.79	4.192	0,0	Calcestruzzo
4 (Medio liscio)	8.23	4.0	-0,057	Pino chiaro
5 (liscio)	10.22	3.1	0,0	Intonaco liscio
6 (molto fluido)	8.23	3.33	-0,036	Bicchiere

Figura 4.10: Coefficienti di rugosità D,E ed F - Fonte: *EnergyPlus Engineering Reference*

A differenza degli altri algoritmi di calcolo, in cui è considerato solo lo scambio per convezione mentre l'irraggiamento viene calcolato automaticamente dal *software*, in questo caso nel coefficiente di convezione esterna sono inclusi anche irraggiamento verso il cielo, il terreno e l'aria;

- *Detailed Algorithm*, che suddivide la convezione nelle componenti naturale e forzata ($h_c = h_f + h_n$). La componente h_n è calcolata con la stessa procedura con cui viene calcolata nel caso di "*Detailed Natural Convection Algorithm*" della convezione interna (Paragrafo 4.8.1); la componente forzata è calcolata come segue:

$$h_f = 2.537 \cdot W_f \cdot R_f \cdot \left(\frac{FV_z}{A} \right)^{1/2} \quad (4.40)$$

dove W_f è posto pari a 0.5 in sottovento e ad 1 in sopravvento e R_f è un valore di rugosità (anche in questo caso sono forniti valori tabulati);

- BLAST, che è l'equivalente del "*Detailed*", ma cambia la velocità meteorologica del vento;
- TARP, che è l'equivalente del "*Detailed*", ma cambia il calcolo del profilo di velocità del vento;

- MoWiTT, che è basato su misure effettuate e si applica a superfici verticali molto lisce (es. vetri).

Risulta:

$$h = \sqrt{[C_t(\Delta T)^{1/3}]^2 + [a \cdot V_z^b]^2} \quad (4.41)$$

dove C_t è la costante di convezione naturale turbolenta in $[W/m^2 K^{4/3}]$ a è una costante in $[W/m^2 K(m/s)^b]$ e b è una costante adimensionale; tali valori sono tabulati in funzione della direzione del vento.

- DOE-2, che è una combinazione tra il modello MoWiTT e BLAST; per le superfici come i vetri il coefficiente è calcolato come

$$h_{c, glass} = \sqrt{h_n^2 + [aV_z^b]^2} \quad (4.42)$$

Per superfici meno lisce è calcolato come:

$$h_c = h_n + R_f(h_{c, glass} - h_n) \quad (4.43)$$

I valori a , b e R_f sono tabellati in tabella 3.7 all'interno di "*EnergyPlus Engineering Reference*"[10].

Capitolo 5

Metodo dinamico orario semplificato: UNI EN ISO 52016

Il nuovo metodo dinamico orario semplificato è stato introdotto con la Norma UNI EN ISO 52016-1 ("*Energy Performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 1: Calculation procedures*"[6]) che a sua volta è una delle norme tecniche emanate e sviluppate con il Mandato M/480 nell'ambito dell'attuazione della Direttiva Europea 2010/31/UE. L'utilizzo di semplici modelli dinamici è volto al miglioramento dell'attività di standardizzazione [11], al fine di garantire la riproducibilità dei risultati senza incorrere in ambiguità per quanto concerne la scelta degli algoritmi e i dati di *input*, che vengono ridotti al minimo per facilitare la comparabilità dei dati e promuovere la condivisione delle migliori pratiche nel settore dell'efficienza energetica degli edifici. L'obiettivo è quindi definire una metodologia armonizzata per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, costituita da procedure non ambigue, flessibili ed adattabili alle specificità nazionali e regionali [12].

Il metodo presentato sostituisce il precedente metodo di calcolo orario proposto dalla Norma EN ISO 13790 e in termini di dettaglio dei risultati ottenuti mira a collocarsi tra il metodo presentato da quest'ultima e il calcolo effettuato mediante simulazione dinamica dettagliata.

Come nel caso del motore di calcolo dinamico dettagliato *EnergyPlus*, di cui si è discusso al Capitolo 4, la stima del flusso di calore necessario a mantenere una certa condizione di *comfort* interno in termini di temperatura è eseguita mediante l'algoritmo dell' *Air Heat Balance*.

La Norma, rispetto al modello di calcolo dettagliato, introduce però delle semplificazioni, tra cui:

- distribuzione semplificata della massa in ciascuna costruzione e quindi fenomeni di accumulo di calore trattati in maniera meno dettagliata per quanto concerne gli elementi di involucro opachi;
- coefficienti di trasmissione del calore convettivo a onde lunghe invariati nel tempo;
- trasmissione totale dell'energia solare attraverso gli elementi di involucro trasparente considerata entrante direttamente nella zona come radiazione a onde corte;
- coefficiente di convezione unico senza distinzione tra apporti interni di diversa natura.

Nei paragrafi successivi verrà preso in esame il bilancio di energia a livello di zona, le semplificazioni adottate per il trasferimento di calore attraverso gli elementi di involucro opaco e trasparente (sia secondo lo *Standard* europeo, sia considerando le modifiche migliorative introdotte nell'Allegato italiano) e alcune delle considerazioni fondamentali introdotte dalla Norma per il calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio [13].

5.1 Bilancio di energia a livello di zona

Come stabilito dalla Norma, la risoluzione del bilancio energetico di zona viene effettuato con intervallo di tempo orario e si traduce nel calcolo matriciale:

$$[\text{Matrice } A] \cdot [\text{Vettore dei nodi di temperatura } X] = [\text{Vettore degli stati } B] \quad (5.1)$$

dove A è la matrice rappresentata dai termini noti della parte sinistra dell'equazione (5.2), B è il vettore rappresentato dai termini noti della parte destra dell'equazione mentre il vettore X è costituito dai dati incogniti di temperatura dei nodi.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} + \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli}) + \sum_{vei=1}^{ven} H_{ve;vei;t} + H_{tr;tb;ztc} \right] \cdot \theta_{int;a;ztc;t} - \\ & + \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci;eli} \cdot \theta_{pln;eli;t}) = \frac{C_{int;ztc}}{\Delta t} \cdot \theta_{int;a;ztc;t-1} + \sum_{vei=1}^{ven} (H_{ve;vei;t} \cdot \theta_{sup;vei;t}) + \\ & + H_{tr;tb;ztc} \cdot \theta_{e;a;t} + f_{int,c} \cdot \Phi_{int;ztc;t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + f_{H/C,c} \cdot \Phi_{HC;ztc;t} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Nella (5.2):

- $C_{int;ztc}$ è la capacità termica interna della zona [J/K] calcolata come

$$C_{int;ztc} = \sum_j k_{int,j} \cdot A_j \quad (5.3)$$

dove $k_{int,j}$ è la capacità termica areica del j -esimo elemento calcolata in [J/m^2K] e A_j è l'area del j -esimo elemento [m^2];

- Δt è l'intervallo di tempo [s];
- $\theta_{int;a;ztc;t}$ è la temperatura dell'aria interna [$^{\circ}C$];
- $\theta_{int;a;ztc;t-1}$ è la temperatura dell'aria interna allo *step* di tempo precedente $t - 1$;
- $h_{ci;eli}$ è il coefficiente di trasferimento termico convettivo interno [W/m^2K] (termine discusso al Paragrafo 5.2.1);
- $\theta_{pln;eli;t}$ è la temperatura della superficie interna [$^{\circ}C$];
- $H_{ve;vei;t}$ è il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione [W/K] calcolato come:

$$H_{ve;vei;t} = \rho_a \cdot c_a \cdot q_{V;k;t} \quad (5.4)$$

dove $\rho_a \cdot c_a$ è la capacità termica volumica dell'aria [J/m^3K] e $q_{V;k;t}$ è la portata di aria in [m^3/s] (da EPB M5-5, "Energy Performance of Buildings" [14]);

- $\theta_{sup;vei;t}$ è la temperatura di *supply* [$^{\circ}\text{C}$];
- $\theta_{e;a;t}$ è la temperatura esterna [$^{\circ}\text{C}$];
- $H_{tr;tb;ztc}$ è il coefficiente globale di scambio termico che tiene conto dei ponti termici [W/K], calcolato come:

$$H_{tr;tb;ztc} = \sum_k (l_{tb,k} \cdot \Psi_{tb,k}) \quad (5.5)$$

dove $l_{tb,k}$ è la lunghezza del k -esimo ponte termico [m] e $\Psi_{tb,k}$ è la trasmittanza termica lineare [W/mK] (entrambi valutati tramite la Norma ISO 13789 [15]);

- $f_{int,c}$ è la frazione convettiva¹ degli apporti interni (valori in Tabella A.11 e B.11 - UNI EN ISO 52016);
- $f_{sol,c}$ è la frazione della componente convettiva della radiazione solare (valori in Tabella A.11 e B.11 - UNI EN ISO 52016);
- $f_{H/C,c}$ è la frazione della componente convettiva dell'impianto (valori in Tabella A.11 e B.11 - UNI EN ISO 52016);
- $\Phi_{int;ztc;t}$ sono gli apporti interni totali in [W] determinati a partire dall'EPB [14];
- $\Phi_{HC;ztc;t}$ è il carico di impianto;
- $\Phi_{sol;ztc;t}$ è il carico solare trasmesso direttamente nella zona calcolato come

$$\Phi_{sol;ztc;t} = \Phi_{sol;dir;ztc;t} = \sum_{wi=1}^{win} [g_{gl;wi;t} \cdot (I_{sol;dif;wi;t} + I_{sol;dir;wi;t} \cdot F_{sh;obst;wi;t}) \cdot A_{wi} \cdot (1 - F_{fr;wi})] \quad (5.6)$$

dove:

- $\Phi_{sol;dir;ztc;t}$ è l'apporto solare diretto nella zona [W];
- $g_{gl;wi;t}$ è la trasmittanza totale dell'energia solare della parte trasparente della finestra (si veda la (5.19));
- A_{wi} è l'area dell'elemento trasparente [m^2];
- $I_{sol;dir;wi;t}$ è l'irraggiamento solare diretto [W/m^2];

¹La frazione convettiva degli apporti (e come questa viene considerata secondo la UNI EN ISO 52016) verrà trattata al Paragrafo 5.5.

- $I_{sol;dif;wi;t}$ è l'irraggiamento solare diffuso [W/m^2];
- $F_{sh;obst;wi;t}$ è il fattore di riduzione dovuto alla presenza di ostacoli esterni (dalla Norma UNI EN ISO 52016-1, Allegato F "*Calculation of solar shading reduction factors*");
- $F_{fr;wi}$ è la frazione di area occupata dal telaio.

In conclusione, la temperatura interna di una zona è risolta, su base oraria, da un sistema di equazioni svolte come matrici che descrivono la variazione nel tempo del trasferimento di calore tra l'ambiente interno e quello esterno, attraverso gli elementi di involucro.

5.2 Modello di conduzione termica mediante analogia elettrica

La conduzione termica viene trattata secondo il modello $R - C$, il quale considera il trasferimento di calore attraverso le superfici come un processo di accumulo e rilascio di calore nei materiali: le resistenze rappresentano l'isolamento termico mentre le capacità rappresentano l'accumulo di calore.

Il modello $R - C$ è più semplice e veloce rispetto al metodo delle funzioni trasferimento implementate nel motore di calcolo *EnergyPlus* trattato al Capitolo 4. La semplicità di calcolo rende questo modello di calcolo dinamico più pratico per applicazioni normative e di certificazione. D'altra parte, il metodo delle CTS risulta preferibile per simulazioni dettagliate e progettazione avanzata.

Il metodo per il quale si fa uso di un modello a rete elettrica equivalente (modello resistenza-capacità) era già stato adottato dalla precedente EN ISO 13790 ma la nuova Norma UNI EN ISO 52016-1 introduce delle modifiche per quanto riguarda il grado di dettaglio dell'analogia termo-elettrica: la precedente Norma considerava una sola capacità termica per l'intero involucro e cinque resistenze termiche a rappresentanza dei coefficienti di scambio termico della zona. Le modifiche apportate dalla UNI EN ISO 52016-1, sia per quanto concerne gli elementi di involucro opaco che quelli trasparenti, sono esaminate di seguito, distinguendo tra le linee guida dettate dalla nuova Norma e quelle che sono state adottate come modifiche migliorative nell'Allegato italiano previste dal CTI ("Comitato Termotecnico Italiano").

Secondo l'analogia termico-elettrica, sia lo *Standard* europeo che i modelli di conduzione del calore migliorativi dell'Allegato italiano prevedono una discretizzazione dei componenti opachi dell'involucro edilizio in diversi nodi resistivo-capacitivi ($R - C$). Questo approccio sfrutta l'analogia tra la conduzione del calore e il flusso di corrente elettrica.

Nei paragrafi successivi si esaminano separatamente le differenze tra lo *Standard* e l'Allegato italiano.

5.2.1 Componenti di involucro opachi - *Standard* Europeo

Indipendentemente da quale sia la stratigrafia, secondo il modello di conduzione del calore della EN ISO 52016-1, i componenti sono discretizzati in cinque nodi $R - C$ e ciascun elemento disperdente è quindi ricondotto ad un modello a parametri concentrati, come mostrato in Figura 5.1.

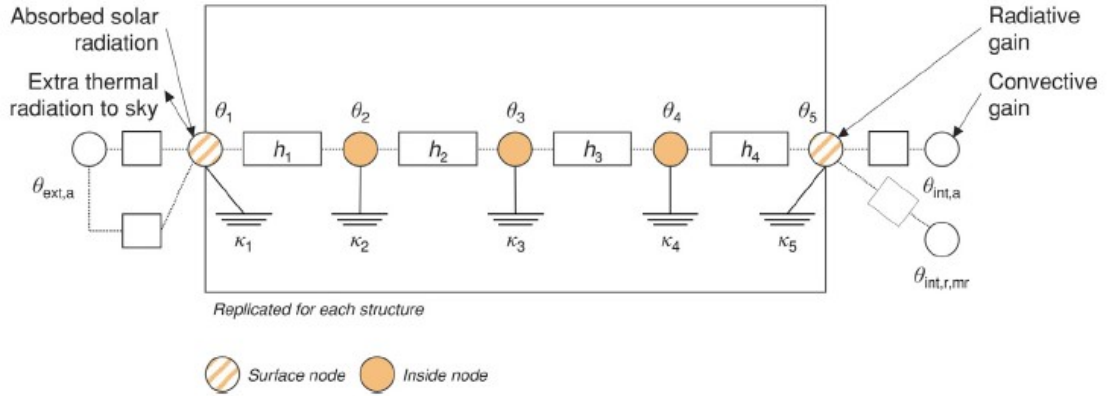


Figura 5.1: Modello $R - C$ equivalente di un elemento opaco secondo il calcolo dinamico orario della norma UNI EN ISO 52016-1.

Qui si identificano 2 nodi superficiali (1 per la superficie interna e 1 per quella esterna) mentre gli altri nodi sono collocati all'interno dell'elemento edilizio. Nei paragrafi seguenti è riportato il bilancio di energia a livello di ciascun nodo.

5.2.1.1 Nodo sulla superficie interna

Il bilancio di energia sul nodo della superficie interna è descritto mediante la (5.7):

$$\begin{aligned}
 & - (h_{pli-1;eli} \cdot \theta_{pli-q;eli;t}) + \left[\frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ci;eli} + h_{ri;eli} \cdot \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \right) + h_{pli-1;eli} \right] \cdot \theta_{pli-1;eli} \\
 & - h_{ci;eli} \cdot \theta_{int;a;zt;t} - \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \cdot h_{ri;eli} \cdot \theta_{pli;elk;t} \right) = \frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} \\
 & + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[(1 - f_{int,c}) \cdot \Phi_{int;ztc;t} + (1 - f_{sol,c}) \cdot \Phi_{sol;ztc;t} + (1 - f_{H/C,c}) \cdot \Phi_{HC;ztc;t} \right]
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

dove:

- A_{elk} è l'area dell'elemento di involucro elk della zona termica ztc [m^2];
- $\theta_{pli;eli;t}$ è la temperatura al nodo pli [$^{\circ}C$];
- $\theta_{pli-1;eli;t}$ è la temperatura al nodo $pli - 1$ [$^{\circ}C$];
- $\theta_{pli-1;eli;t-1}$ è la temperatura al nodo pli all'intervallo di tempo precedente [$^{\circ}C$];
- $\theta_{int;a;zt;t}$ è la temperatura dell'aria interna alla zona [$^{\circ}C$];

- $h_{pli-1;eli}$ è la conduttanza tra il nodo pli e $pli-1$ [W/m^2K] (si veda il Paragrafo 5.2.1.4);
- $k_{pli;eli}$ è la capacità termica areale del nodo pli [J/m^2K];
- $h_{ci;eli}$ è il coefficiente di trasferimento termico convettivo interno, determinato in base alla tipologia di costruzione [W/m^2K];
- $h_{ri;eli}$ è il coefficiente di trasferimento termico radiativo interno, determinato in base alla tipologia di costruzione [W/m^2K].

5.2.1.2 Nodi interni

Il bilancio su un nodo interno è dato da:

$$-h_{pli-1;eli} \cdot \theta_{pli-1;eli;t} + \left[\frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{pli;eli} + h_{pli-1;eli} \right] \cdot \theta_{pli;eli;t} - h_{pli;eli} \cdot \theta_{pli+1;eli;t} = \frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} \quad (5.8)$$

Nella (5.8):

- $\theta_{pli+1;eli;t}$ è la temperatura al nodo $pli+1$ [$^{\circ}C$];
- $h_{pli-1;eli}$ è la conduttanza tra il nodo $pli+1$ e pli [W/m^2K].

5.2.1.3 Nodo sulla superficie esterna

Il bilancio su un nodo esterno è dato dalla (5.9):

$$\left(\frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} + h_{ce;eli} + h_{re;eli} + h_{pli;eli} \right) \cdot \theta_{pli;eli;t} - h_{pli;eli} \cdot \theta_{pli+1;eli;t} = \frac{k_{pli;eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli;eli;t-1} + (h_{ce;eli} + h_{re;eli}) \cdot \theta_{e;t} + \alpha_{sol;pli;eli} \cdot (I_{sol;dif;eli;t} + I_{sol;dir;eli;t} \cdot F_{sh;obst;eli;t}) - \Phi_{sky;eli;t} \quad (5.9)$$

dove:

- $\theta_{e;t}$ è la temperatura dell'ambiente esterno pli [$^{\circ}C$];
- $h_{ce;eli}$ è il coefficiente di trasferimento termico convettivo esterno, determinato in base alla tipologia di costruzione [W/m^2K];
- $h_{re;eli}$ è il coefficiente di trasferimento termico radiativo esterno, determinato in base alla tipologia di costruzione [W/m^2K];

- $\alpha_{sol;eli}$ coefficiente di assorbimento della radiazione solare determinato per tipologia di costruzione;
- $I_{sol;dir;tot;eli;t}$ è l'irradianza solare diretta ottenuta a partire da EPB M1-13 [W/m^2];
- $I_{sol;dir;tot;eli;t}$ è l'irradianza solare diffusa ottenuta a partire da EPB M1-13 [W/m^2];
- $F_{sh;obst;eli;t}$ è il fattore di riduzione dovuto alla presenza di ostacoli esterni (dalla Norma UNI EN ISO 52016-1, Allegato F " *Calculation of solar shading reduction factors*");
- $\theta_{sky;eli;t}$ è la radiazione termica verso il cielo [w/m^2] (si veda Paragrafo 5.2.3).

5.2.1.4 Proprietà dei nodi

A differenza della precedente EN ISO 13790 (in cui tutta la capacità termica veniva racchiusa in un unico condensatore), con la nuova Norma è fondamentale conoscere il posizionamento della massa e dell'isolante nella stratigrafia. Proprio in funzione di questo, sono introdotte dal " *European Committee for Standardization (2017a)* " cinque classi a cui riferire il componente opaco dell'involucro edilizio e attraverso le quali vengono assegnati i valori di capacità termica areica k [J/m^2K] dei nodi:

- classe I (massa concentrata sul lato interno);
- classe E (massa concentrata sul lato esterno);
- classe IE (massa divisa tra lato interno ed esterno);
- classe D (massa distribuita equamente);
- classe M (massa concentrata all'interno).

La capacità termica totale areale del componente è distribuita sui nodi R-C secondo la classe di appartenenza (si veda Tabella A.13 UNI EN ISO 52016-1).

Le resistenze [m^2K/W] sono espresse in termini di conduttanze: la resistenza complessiva è associata a ciascuna conduttanza in modo da assegnare maggiore potere resistivo ai nodi interni alla struttura, come segue:

$$h_{1,4} = \frac{6}{R} \quad (5.10)$$

$$h_{2,3} = \frac{3}{R} \quad (5.11)$$

Nella (5.10) e nella (5.11) i pedici si riferiscono alla posizione dello strato nell'elemento di involucro.

La capacità termica è il termine che tiene conto di due fenomeni che determinano lo scambio di calore per conduzione all'interno della parete: l'attenuazione e lo sfasamento. Le capacità termiche k_j degli strati interno ed esterno del componente opaco riflettono la sua risposta dinamica ad una variazione armonica della temperatura che si verifica sul lato interno/esterno del componente, in conformità con la Norma EN ISO 13786:2007 - Allegato A ("*Thermal performance of buildings components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods*"), che descrive i metodi di calcolo per valutare il comportamento termico in regime dinamico dei componenti edilizi.

L'evoluzione nel tempo della temperatura viene valutata tramite una soluzione numerica approssimata suddividendo l'intervallo di tempo in piccoli intervalli, valutando iterativamente la soluzione ad ogni passaggio. I *software* di simulazione energetica come Edilclima utilizzano dei metodi di integrazione numerica *standard* (come il metodo di Eulero) per la risoluzione delle equazioni differenziali che rappresentano la modalità di trasferimento di calore secondo il modello resistivo-capacitivo.

5.2.2 Componenti di involucro opachi - Allegato Nazionale italiano

L'Allegato Nazionale italiano fornisce un approccio più dettagliato al fine di discretizzare i componenti opachi in nodi resistivo-capacitivi tenendo conto delle proprietà termiche degli strati delle strutture. In particolare, l'Allegato introduce una procedura specifica per la definizione del numero di nodi e della loro posizione all'interno della struttura. Ai fini della trattazione è riportato in Figura 5.2 il modello rappresentativo dei miglioramenti introdotti.

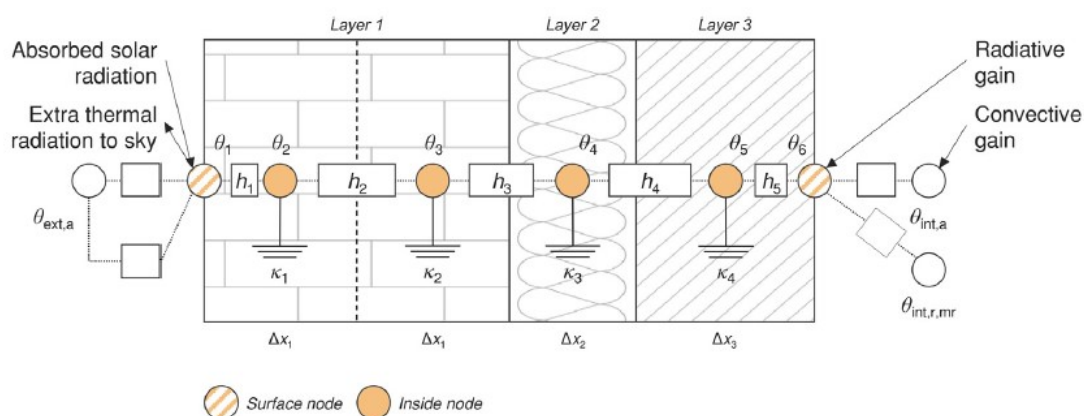


Figura 5.2: Modello RC equivalente di un elemento opaco secondo il calcolo dinamico orario della norma UNI EN ISO 52016-1, Allegato Italiano.

In questo caso ciascuno strato del componente viene discretizzato in almeno un nodo. Il numero di nodi N_j è calcolato come segue:

$$N_j = \max \left[1; \left(\frac{F_{ref}}{F_j} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.999999 \right] \quad (5.12)$$

dove:

- F_j è il numero di *Fourier* per lo strato, che dipende dallo spessore dello strato e dalla diffusività termica del materiale;
- F_{ref} è un valore di riferimento posto pari a 0.5.

Lo spessore della porzione di strato associata a ciascun nodo capacitivo interno all'elemento costruttivo Δx_j [m] è calcolato tramite la (5.13), dove d_j è lo spessore dello strato [m].

$$\Delta x_j = \frac{d_j}{N_j} \quad (5.13)$$

La capacità termica interna per unità di area del j -esimo elemento dello strato k_j [J/m^2K] e le resistenze termiche R_j sono associate a ciascun nodo rispettivamente tramite la (5.14) e la (5.15):

$$k_j = \rho_j \cdot c_j \cdot \Delta x_j \quad (5.14)$$

$$R_j = \frac{\Delta x_j}{\lambda_j} \quad (5.15)$$

dove:

- ρ_j è la densità del materiale [kg/m^3];
- c_j è il calore specifico [J/kgK];
- λ_j è la conducibilità termica del materiale [W/mk].

Ogni nodo è posto al centro dello strato a esso associato e la conduttanza internodale è calcolata come:

$$h_j = \frac{1}{\frac{R_{j-1}}{2} + \frac{R_j}{2}} \quad (5.16)$$

dove il calcolo è effettuato considerando la metà della resistenza termica dei nodi adiacenti.

La capacità termica dell'intero componente di edificio è calcolata come:

$$C = \sum_{j=1}^{N_j} \Delta x_j \cdot \rho_j \cdot k_j \quad (5.17)$$

5.2.3 Componenti di involucro trasparenti

Nel caso di elementi di involucro trasparenti, la semplificazione viene fatta discretizzando in due soli nodi. Ciascun nodo ha $h_{pl;eli} = 1/R_{c;eli}$ e $k_{pl} = 0$, dove k_{pl} è la capacità termica areica e $R_{c;eli}$ è la resistenza termica. La resistenza è calcolata come:

$$R_c = \frac{1}{U_c} - R_{si} - R_{se} \quad (5.18)$$

dove R_{si} e R_{se} sono rispettivamente le resistenze dello strato interno ed esterno e sono poste pari a 0.13 e 0.04 [m^2K/W].

La capacità termica è posta pari a zero perché gli elementi di involucro trasparente si considerano privi di accumulo.

Le caratteristiche degli elementi di involucro trasparente sono riconducibili a due variabili: la trasmittanza termica del serramento U [W/m^2K] e la trasmittanza di energia solare g .

Il metodo di calcolo dinamico orario proposto dalla UNI EN ISO 52016-1 prevede di valutare una quantità complessiva di apporti solari attraverso gli elementi di involucro trasparente applicando la trasmittanza di energia solare totale delle vetrate g_{gl} , a differenza di quanto avveniva nel caso di *EnergyPlus* (dove la radiazione solare incidente sull'elemento era divisa in quella direttamente trasmessa nella zona e in quella assorbita dal serramento e trasferita successivamente in ambiente).

Sia lo *Standard* europeo che l'Allegato italiano calcolano la trasmittanza di energia solare totale (che esprime in percentuale la radiazione solare che effettivamente riesce ad attraversare il vetro) come segue:

$$g_{gl} = F_W \cdot g_{gl,n} \quad (5.19)$$

Nella (5.19):

- $g_{gl,n}$ è la trasmittanza totale dell'energia solare per incidenza normale;
- F_W è il fattore di correzione che tiene conto della dipendenza angolare.

La Norma EN ISO 52016-1 considera un valore costante di F_W mentre l'Allegato italiano considera un valore di F_W dipendente dall'angolo solare, come definito nella (5.20).

$$F_W = \frac{F_{W,diff} \cdot I_{sol,diff,t} + F_{W,dir} \cdot I_{sol,dir,t} \cdot F_{sh,obst,t}}{I_{sol,diff,t} + I_{sol,dir,t} \cdot F_{sh,obst,t}} \quad (5.20)$$

Nella (5.20) i termini presenti sono:

- $F_{W,diff}$ è il fattore di correzione per la radiazione solare diffusa, considerato pari a 0,8 durante il periodo di calcolo;
- $F_{W,dir}$ è il fattore di correzione per la radiazione solare diretta incidente, calcolato su base temporale secondo un modello empirico ("*Karlsson e Roos (2000)*") per cui dipende dall'angolo di incidenza della radiazione solare diretta incidente e dal tipo di serramento [16];
- $I_{sol,diff,t}$ è la radiazione solare diffusa al tempo t misurata in $[W/m^2]$;
- $I_{sol,dir,t}$ è la radiazione solare diretta incidente al tempo t misurata in $[W/m^2]$;
- $F_{sh,obst,t}$ è il fattore di riduzione per la radiazione solare diretta incidente per la presenza di ostacoli esterni al tempo t .

Tra le differenze nei dati di *input* tra la Norma ed *EnergyPlus*, una delle più evidenti è come le proprietà solari dettagliate dei vetri siano richieste dal calcolatore ma non dalla Norma, mentre la trasmittanza energetica solare totale delle vetrate è un valore fisso per la EN ISO 52016-1 mentre non è un dato richiesto da *EnergyPlus*.

Il trasferimento di calore per radiazione a onda lunga tra una superficie e il cielo è considerato sia nello *Standard* europeo che nel modello italiano tramite la radiazione termica verso il cielo Φ_{sky} :

$$\Phi_{sky} = F_{sky} \cdot h_{re} \cdot \Delta\theta_{sky} \quad (5.21)$$

Nella (5.21) F_{sky} è il fattore di vista della superficie verso il cielo, h_{re} è il coefficiente di trasferimento di calore radiativo superficiale esterno [W/m^2K] e θ_{sky} è la differenza tra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura apparente del cielo, calcolata applicando il modello "*Evangelisti et al., 2019*" [17].

L'Allegato italiano propone una relazione del tipo:

$$\theta_{sky} = 18 - 51,6 \cdot e^{-P_{V,e}/1000} \quad (5.22)$$

dove $P_{V,e}$ è la pressione parziale del vapore acqueo misurata in [Pa], in accordo con [18].

5.3 Trasferimento di calore tra le zone termiche

Il metodo *Standard* orario della UNI EN ISO 52016-1 non tiene conto di nessun trasferimento di calore tra le zone termicamente condizionate, né tramite trasmissione termica né tramite ventilazione o infiltrazione.

Nell'Allegato italiano, invece, il flusso di calore attraverso le partizioni interne tra zone termiche adiacenti viene calcolato considerando una resistenza termica equivalente e una temperatura superficiale esterna per ogni partizione. Per quanto riguarda lo scambio di flusso d'aria tra due zone, se il flusso è mono direzionale il calcolo viene eseguito per una zona, quindi la temperatura dell'aria di quella zona viene utilizzata per risolvere il bilancio termico della seconda zona. Se invece il flusso d'aria viene considerato bidirezionale, le due zone vengono considerate come una singola zona termica.

5.4 Temperatura di *set-point*

La Norma UNI EN ISO 52016-1 precisa che la temperatura di *set-point* si riferisce alla temperatura operativa e non a quella dell'aria interna (a differenza del motore di calcolo *EnergyPlus*), in quanto essa influisce sul *comfort* termico in ambiente.

In generale, la temperatura operativa rappresenta la temperatura effettiva percepita dalle persone all'interno di un ambiente, mentre la temperatura ambiente è la temperatura reale dell'aria circostante.

La temperatura operativa [°C] in una generica zona *ztc* ad un intervallo di tempo t è data dall'equazione (5.23).

$$\theta_{int;op;ztc;t} = \frac{\theta_{int;a;ztc;t} + \theta_{int;r;mn;ztc;t}}{2} \quad (5.23)$$

dove, per ciascuna zona termica

- $\theta_{int;a;ztc;t}$ è la temperatura dell'aria interna [°C];
- $\theta_{int;r;ztc;t}$ è la temperatura media radiante [°C]

La temperatura media radiante è calcolata come:

$$\theta_{int;r;mn;ztc;t} = \frac{\sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot \theta_{pli=pln;eli;t})}{\sum_{eli=1}^{eln} A_{eli}} \quad (5.24)$$

dove:

- A_{eli} è l'area dell'elemento di involucro eli [m^2];
- $\theta_{pli=pln;eli;t}$ è la temperatura del nodo $pli = pln$ (dal nodo esterno a quello interno) dell'elemento eli .

5.5 Frazione convettiva degli apporti

Per quanto riguarda la modalità secondo cui viene considerata la frazione convettiva degli apporti secondi UNI EN ISO 52016-1, anche in questo caso si assiste ad una notevole differenza rispetto a quanto accadeva nel caso di calcolo dinamico dettagliato: la Norma, infatti, non distingue tra apporti interni dovuti ad occupanti, apparecchiature e illuminazione, applicando di fatto una semplificazione. Tale semplificazione risulta una considerazione molto forte dal momento che apparecchiature per uso diverso (come possono essere, ad esempio, apparecchiature elettriche e per l'illuminazione) hanno di natura componenti convettive e radiative molto differenti, talvolta opposte. Anche tenendo conto delle sole apparecchiature elettriche, il valore di tali frazioni cambierebbe molto nel momento in cui l'apparecchio fosse dotato di ventola.

Trattandosi di un calcolo semplificato, come si vedrà al Capitolo 6, la Norma considera una sola frazione convettiva applicata a tutti gli apporti interni, una per la radiazione solare e una per l'impianto. I valori suggeriti sono specificati nella Tabella B.11 della Norma, di cui si riporta un estratto in Figura 5.3, dove:

- $f_{int;c}$ è la frazione convettiva degli apporti interni;
- $f_{sol;c}$ è la frazione convettiva della radiazione solare;
- $f_{H;c}$ e $f_{C;c}$ sono le frazioni convettive dell'impianto di climatizzazione rispettivamente per il riscaldamento e per il raffrescamento.

Table B.11 — Convective fractions (see 6.5.6.2)

$f_{int;c}^a$	$f_{sol;c}$	$f_{H;c}$	$f_{C;c}$
0,40 for all source types	0,10	0,40	0,40
^a Can be differentiated per source type.			

Figura 5.3: Estratto della Tabella B.11 della Norma UNI EN ISO 52016.

Capitolo 6

Caso studio: ospedale San Luigi di Torino

Ai fini della seguente tesi, si è preso come caso studio su cui operare le analisi l'ospedale San Luigi di Torino, dal momento che si tratta di una delle tipologie di edificio più energivore e per questo motivo interessanti dal punto di vista dei consumi energetici. Ai fini della modellazione energetica, si è scelto di non occuparsi dell'intero complesso di edifici che ne fanno parte, ma di prendere in considerazione il Padiglione 1.

In particolare, per come verrà svolta la trattazione a livello di analisi e modellazione energetica, si farà riferimento in questo Capitolo a tre piani tipologici del Padiglione, al fine di mettere in luce tutti gli *input* inseriti nel corso della modellazione del caso studio. Per quanto riguarda i dati come quelli relativi alle condizioni climatiche, alle stratigrafie e ai valori di temperatura di *set-point* dell'ambiente interno, essi sono stati ripresi dai dati reali dell'edificio. Le tipologie e stratigrafie degli elementi di involucro opaco e trasparente, inserite su Edilclima, sono state riportate in eguale maniera su *DesignBuilder*.

Per quanto riguarda i dati di attività, e quindi di occupazione, illuminazione e apparecchiature elettriche, si è fatto riferimento ai valori consigliati da ASHRAE: tali valori sono reperibili sia nelle tabelle dell'"*Handbook of fundamentals*" [5], sia da *database* fornito da UK NCM ("*UK's National Calculation Method for Non Domestic Buildings*") [19]. I valori dei carichi endogeni sono stati impostati su *DesignBuilder* e riportati su Edilclima nella sezione riguardante i profili orari, a cui si può accedere solo una volta che si è spuntata la modalità di calcolo dinamico orario nella prima fase della modellazione.

In ogni caso, un punto fondamentale dell'inserimento dei dati di *input* all'interno dei due *software* è stato quello di riportare tutto in maniera completamente analoga, al fine di ottenere un confronto consistente delle prestazioni dei due *software*.

6.1 *DesignBuilder - EnergyPlus*

Come ampiamente discusso, radiazione solare e carichi endogeni gravano sul fabbisogno energetico dell'edificio e presentano elevate fluttuazioni temporali: per questo motivo il *software* richiede che per la procedura di calcolo vengano inseriti tutti gli *input* necessari, come i dati climatici della località considerata e i carichi endogeni, sulla base di considerazioni come la destinazione d'uso del locale (i valori cambiano in maniera consistente se si tratta, ad esempio, di una degenza, in cui ci sono apparecchiature elettriche dedicate e l'occupazione è estesa a tutte le 24 ore della giornata, oppure un deposito).

A questo scopo, vengono associate a ciascuna zona del modello tutte le caratteristiche termo-fisiche riguardanti l'involucro, l'occupazione, l'illuminazione, le apparecchiature elettriche e le infiltrazioni.

Viene inoltre definito per ciascun carico un *set* di profili di utilizzo e di occupazione tramite le *schedules*, dal momento che la contemporaneità dei carichi è un fattore molto rilevante per avvicinarsi il più possibile alle condizioni di reale utilizzo del sistema edificio.

In Figura 6.1 è riportato l'*input* geometrico della porzione di edificio di interesse modellato sul *software DesignBuilder*, l'interfaccia grafica per l'utilizzo del motore di calcolo *EnergyPlus*, che al suo interno è fornito di modellatore 3D integrato. In particolare, si riporta il piano terra del Padiglione 1 (uno dei Padiglioni dell'intero complesso ospedaliero), utilizzato per le trattazioni successive. Tale piano presenta un blocco componente nella superficie superiore modellato al solo fine di ricreare le condizioni di adiabaticità nella superficie orizzontale del soffitto.

Nei Paragrafi che seguono vengono riportati puntualmente, per ciascuna voce citata, i passaggi effettuati e le considerazioni fatte nell'inserimento dei dati di *input* per la modellazione.

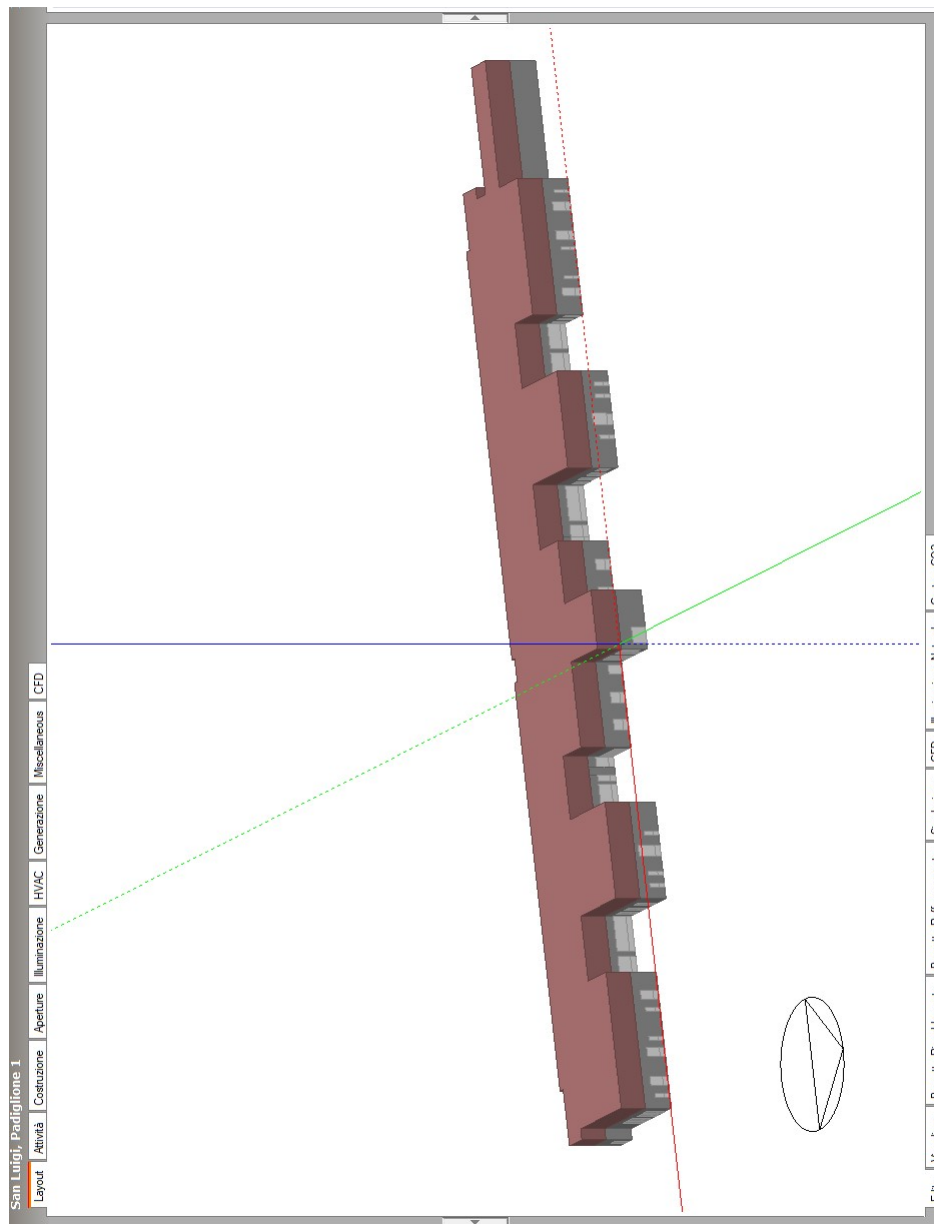


Figura 6.1: Piano terra Padiglione 1.

6.1.1 Dati climatici

Nella sezione "Località" è stato inserito il *file* climatico relativo alla città di Torino "ITA_TORINO-CASELLE_IGDG", di cui si riporta un estratto in Figura 6.2. Quelli attualmente utilizzati e implementati da *DesignBuilder* come *file* climatici

(disponibili gratuitamente) sono i dati orari climatici "G.De Giorgio" [20] [21]. Essi sono ricavati da un periodo di misurazioni che va dal 1951 al 1970.

Il *software* utilizzato per la visualizzazione è "*Elements*" [22], uno strumento *open-source* per la creazione e la modifica di *file* meteorologici personalizzati per la modellazione energetica degli edifici.

Oltre ai dati relativi a longitudine, latitudine e altitudine, sono riportati rispettivamente i valori orari di:

- temperatura di bulbo secco [$^{\circ}\text{C}$];
- temperatura di bulbo umido [$^{\circ}\text{C}$];
- pressione atmosferica [kPa];
- umidità relativa [%];
- temperatura di *Dew Point* [$^{\circ}\text{C}$];
- irraggiamento solare globale [Wh/m^2];
- irraggiamento per radiazione diretta [Wh/m^2];
- irraggiamento per radiazione diffusa [Wh/m^2];
- velocità del vento [m/s].

Risulta particolarmente interessante porre l'attenzione sui dati di irraggiamento forniti: in particolare, il *file* climatico di *EnergyPlus* fornisce la radiazione diretta sul piano normale (voce "*Normal Solar*" in Figura 6.2), a differenza di quanto fornito dal CTI ("Comitato Termotecnico Italiano") e implementato su Edilclima. Tale aspetto sarà oggetto di studio al Paragrafo 6.2.1.

Site Name: Torino-Caselle Torneo-Caselle Time Zone: 1 Longitude (degrees): 7.65 Elevation (m): 282

Time Zone: 1 Elevation (m): 282

Tools: Offset Scale Normalize Normalize By Month

Variables to Hold Constant:

Date/Time	Dry Bulb Temperature (C)	Wet Bulb Temperature (C)	Atmospheric Pressure (kPa)	Relative Humidity %	Dew Point Temperature (C)	Global Solar (Wh/m2)	Normal Solar (Wh/m2)	Diffuse Solar (Wh/m2)	Wind Speed (m/s)
2020/01/01 @ 02:00:00	-1.4	-2.39	97.98	82	-3.76	0	0	0	0
2020/01/01 @ 03:00:00	-1.8	-2.71	97.98	83	-4.01	0	0	0	0
2020/01/01 @ 04:00:00	-2.4	-3.18	97.98	85	-4.32	0	0	0	0
2020/01/01 @ 05:00:00	-3.2	-3.85	97.98	87	-4.84	0	0	0	0
2020/01/01 @ 06:00:00	-3.5	-4.09	97.98	88	-5	0	0	0	0
2020/01/01 @ 07:00:00	-3.6	-4.18	97.98	88	-5.1	0	0	0	0
2020/01/01 @ 08:00:00	-3.6	-4.18	97.98	88	-5.1	0	0	0	0
2020/01/01 @ 09:00:00	-3	-3.65	97.98	87	-4.64	0	0	0	0
2020/01/01 @ 10:00:00	-2.1	-2.84	97.98	86	-3.89	8.17	30	7	0
2020/01/01 @ 11:00:00	-0.8	-1.64	97.98	85	-2.74	49.9	137	26	0
2020/01/01 @ 12:00:00	1	-0.26	97.98	79	-1.96	110.9	247	42	0
2020/01/01 @ 13:00:00	3.3	1.34	97.98	71	-1.28	165.38	338	52	0
2020/01/01 @ 14:00:00	6	2.84	97.98	60	-1.03	187.78	359	55	0
2020/01/01 @ 15:00:00	6.9	3.47	97.98	57	-0.9	198.22	332	62	0
2020/01/01 @ 16:00:00	7.1	3.66	97.98	56	-0.95	118.03	254	43	0
2020/01/01 @ 17:00:00	6.6	3.29	97.98	58	-0.94	55.24	146	28	0
2020/01/01 @ 18:00:00	5.5	2.73	97.98	63	-0.86	10	27	8	0
2020/01/01 @ 19:00:00	3.8	1.87	97.98	72	-0.88	0	0	0	0
2020/01/01 @ 20:00:00	1.4	0.36	97.98	83	-1.03	0	0	0	0
2020/01/01 @ 21:00:00	0.3	-0.38	97.98	88	-1.28	0	0	0	0
2020/01/01 @ 22:00:00	-0.5	-1.01	97.98	91	-1.63	0	0	0	0
2020/01/01 @ 23:00:00	-1	-1.39	97.98	93	-1.87	0	0	0	0
2020/01/01 @ 24:00:00	-0.6	-1.05	97.98	92	-1.6	0	0	0	0

Figura 6.2: Estratto del file climatico .IGDG di Torino-Caselle inserito nel software DesignBuilder.

6.1.2 Costruzione

In Figura 6.3 si riporta un esempio della pagina "Costruzione" di DesignBuilder relativa alla zona di esempio "Ambulatorio1", dove si inseriscono i dati di input per ciascuna tipologia di parete (esterna, controterra, sottosuperfici,etc.): ad esempio,

la dicitura "M16" si riferisce ad una tipologia di parete etichettata con la medesima sigla, per indicare una determinata stratigrafia. Al Paragrafo 6.2.2 è riportato un esempio della tipologia di muri e della stratigrafia. Nella parte inferiore della pagina di Figura 6.3 è presente la sezione relativa alle infiltrazioni, impostate a $1[\text{vol}/\text{h}]$.

In Figura 6.4 è possibile visualizzare il *render* del piano terra dove, in legenda, sono evidenziate le tipologie di costruzione utilizzate.

Template della Costruzione	
Template	Template della costruzione di progetto
Costruzione	
Pareti esterne	M16 Muro esterno facciavista PT ISOLATO
Pareti controterra	Parete controterra di progetto
Tetto piano	S3 Solaio copertura ISOLATA
Tetto inclinato (Occupato)	Tetto Inclinato di progetto
Semi-esposto	
Soffitto semi-esposto	Soffitto semi-esposto di progetto
Pavimento semi-esposto	Pavimento semi-esposto di progetto
Pavimenti	
Pavimento su terra	Pavimento controterra di progetto
Pavimento controterra piano interrato	Pavimento controterra piano interrato di progetto
Pavimento esterno	Pavimento esterno di progetto
Pavimento interno	Pavimento interno di progetto
Sottosuperfici	
Pareti	M2 Muro esterno sottofinestra ISOLATO
Tetto	Sottosuperficie su tetto di progetto
Porta esterna	M12 Porta REI verso esterno
Capacità termica interna	
Costruzione	Massa interna di progetto
Area esposta (mq)	0,00
Geometria, Area e Volumi	
Spessori Superfici Fissati	
Profondità	
Convezione di superficie	
Progetto riscaldamento	
Progetto raffrescamento	
Simulazione	
Linear Thermal Bridging at Junctions	
Permeabilità all'aria	
<input checked="" type="checkbox"/> Infiltrazioni	
Tasso costante (vol/h)	1,000
Programma	On 24/7
Delta T e Coefficienti di Velocità del Vento	
Costo	

Figura 6.3: Esempio scheda "Costruzione" per l'inserimento su *DesignBuilder* dei dati di *input* per gli elementi di involucro opachi.

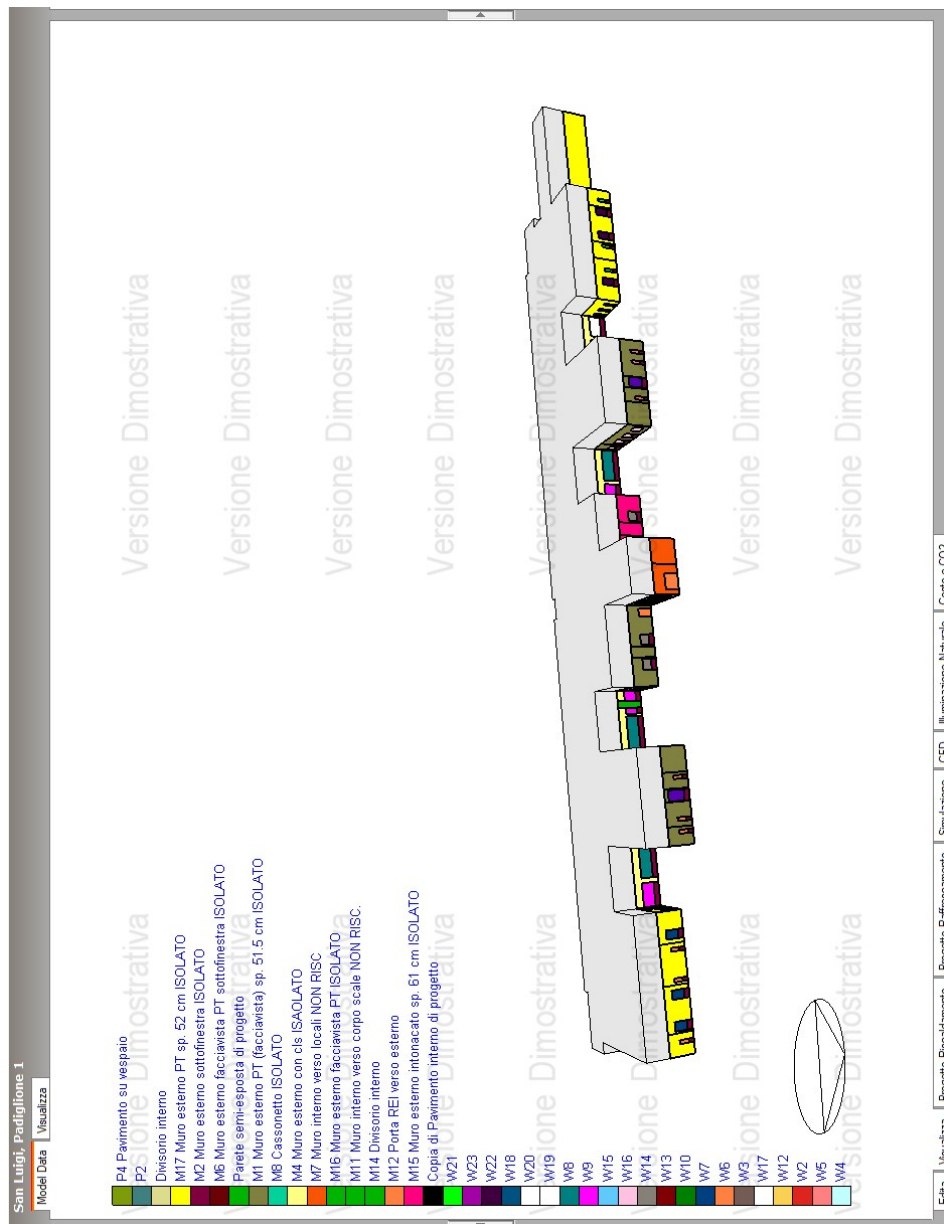


Figura 6.4: Risultato del rendering del piano terra Padiglione 1 dell'ospedale San Luigi (TO).

6.1.3 Aperture

In Figura 6.5 si riporta un esempio della pagina "Aperture" di *DesignBuilder* relativa alla zona di esempio "Ambulatorio1". L'etichetta W13 fa riferimento alla tipologia di elemento finestrato a cui corrispondono determinate proprietà dell'elemento

trasparente (esempi di tipologie di elementi finestrati sono riportati al Paragrafo 6.2.3).

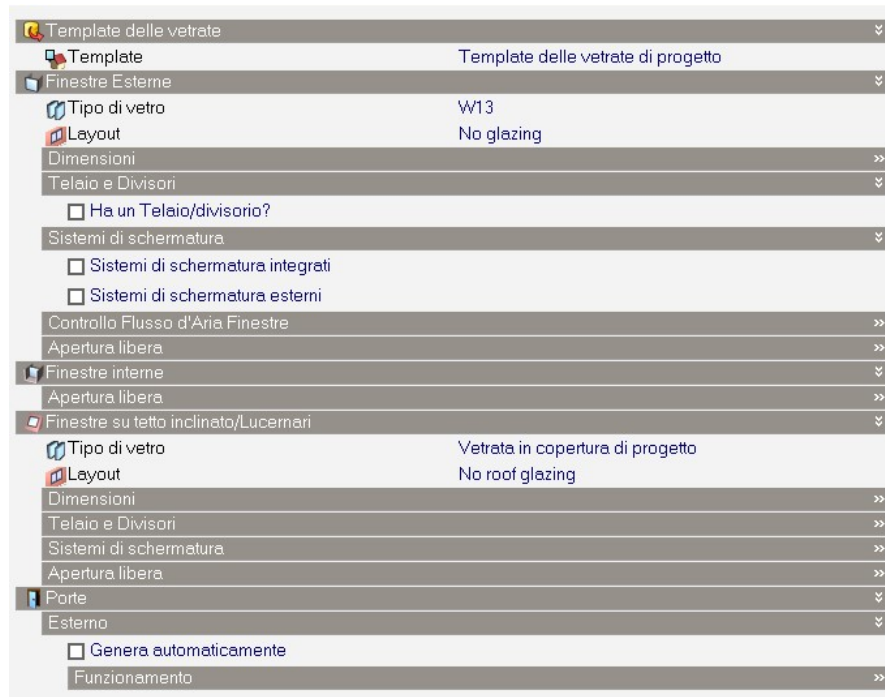


Figura 6.5: Esempio della sezione "Aperture" per gli elementi di involucro trasparenti all'interno del *software DesignBuilder*.

In Figura 6.6 è riportato un estratto della pagina del programma utilizzata per la definizione della vetrata, all'interno della quale sono stati inseriti i dati in ingresso di fattore solare e trasmittanza [W/m^2K], avendo selezionato come metodo di definizione "2-Semplice".

Metodo di definizione	2-Semplice
Definizione semplice	
Fattore solare (FS)	0,850
Visible transmittance	0,800
Valore-U (ISO 15099 / NFRC) (W/mq-K)	4.949

Figura 6.6: Esempio scheda "Aperture" per la definizione dei dati di *input* per la tipologia di vetro W13.

6.1.4 Zonizzazione

Una zona termica è una parte di un edificio che è mantenuta a temperatura uniforme attraverso lo stesso impianto di climatizzazione o ventilazione, con identiche modalità di regolazione [23].

L'attività di zonizzazione sul piano tipo del Padiglione 1 è stata effettuata considerando i locali come omogenei nel caso in cui fossero rispettate le seguenti condizioni:

- stesse condizioni di progetto interne (stesse condizioni termo-igrometriche);
- stessa destinazione d'uso (medesimi carichi endogeni associati);
- stessa esposizione;
- stessa tipologia impiantistica (come conseguenza alle condizioni di cui sopra).

Tale zonizzazione è effettuata, quindi, per riuscire ad ottenere delle aggregazioni di spazi termicamente omogenei serviti dal medesimo sistema di condizionamento, al fine di ottenere una semplificazione in termini di procedura di calcolo.

In Figura 6.7 è riportato l'elenco di tutte le zone termiche risultanti avendo applicato le considerazioni di cui sopra, mentre in Figura 6.8 è mostrata una vista del piano tale da rendere visibile la separazione delle zone. In legenda sono riportati i codici rappresentativi delle *schedules* associate, che verranno trattate nel dettaglio alla sezione "Attività" al Paragrafo 6.1.5, in cui verranno approfonditi i singoli apporti interni e i relativi profili orari utilizzati per tenere conto del profilo di occupazione e di utilizzo.

In Figura 6.7 le voci evidenziate in verde corrispondono alle zone non climatizzate e per le quali non vengono definiti profili di occupazione e di utilizzo.

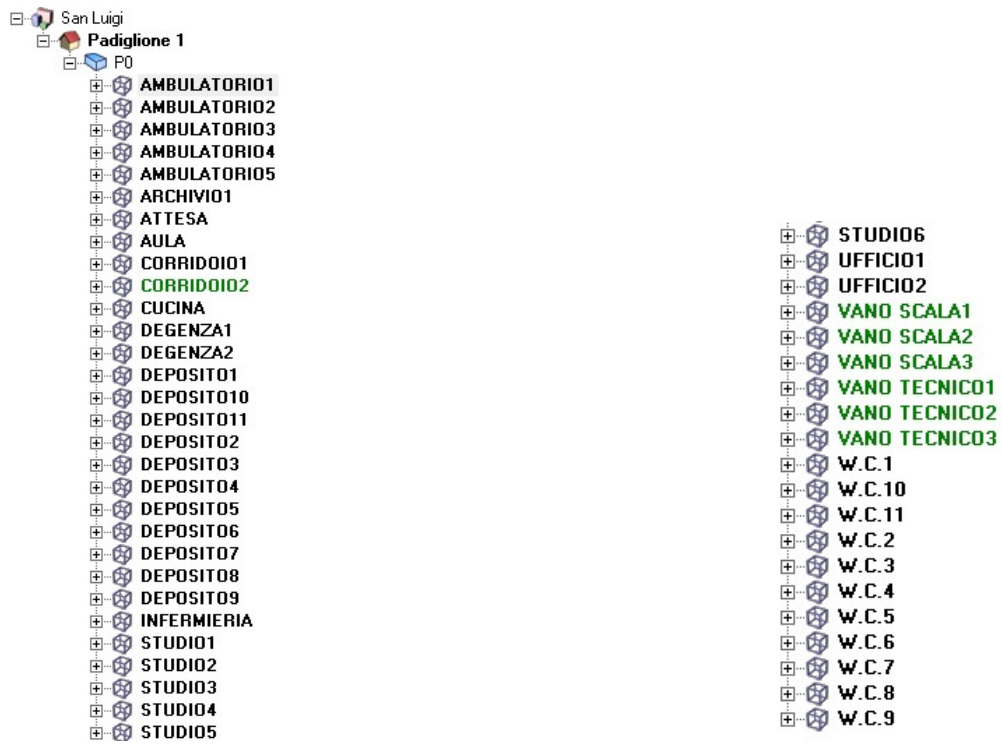


Figura 6.7: Zone termiche risultanti dalla zonizzazione del piano terra del Padiglione 1.

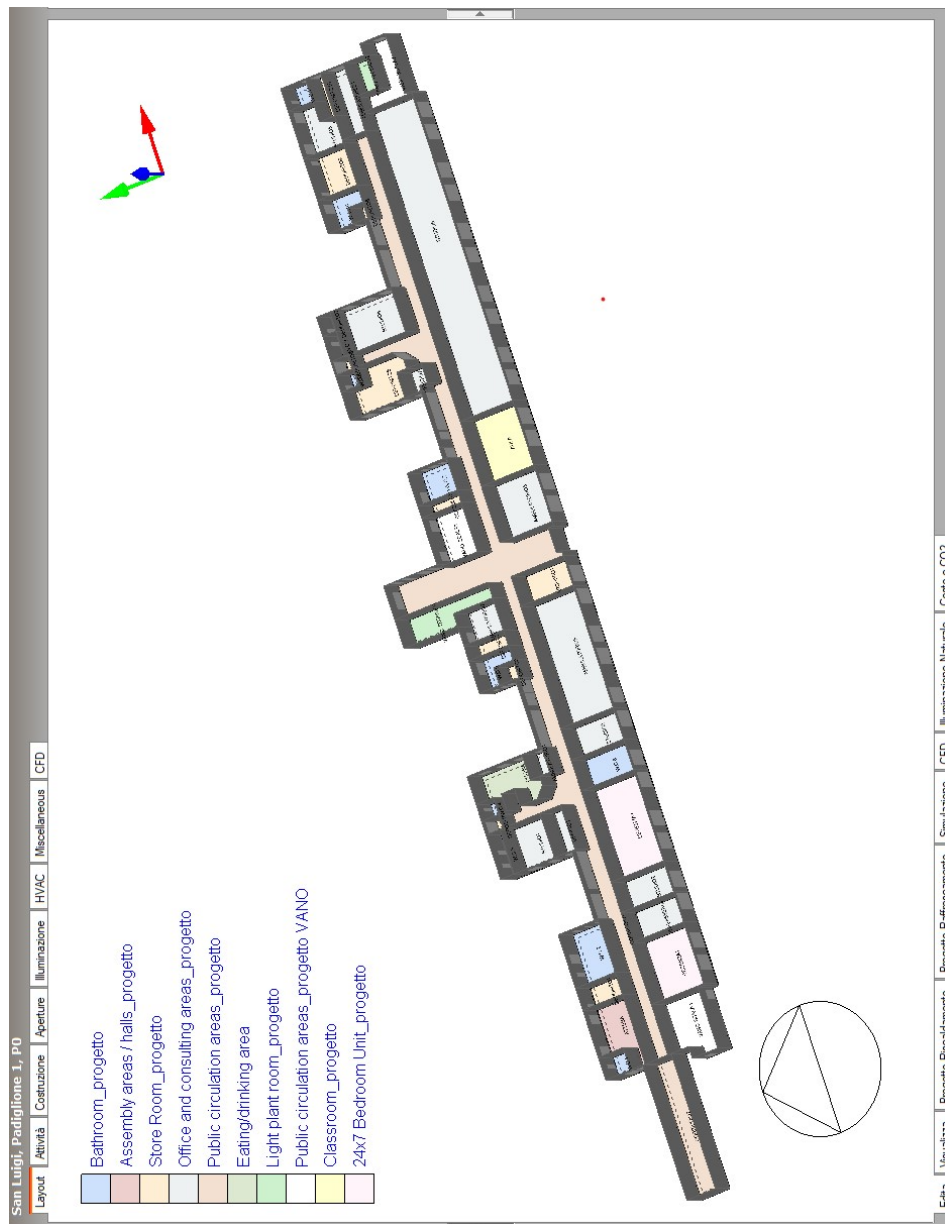


Figura 6.8: Zonizzazione con *DesignBuilder* del piano terra Padiglione 1 dell'ospedale San Luigi (TO).

6.1.5 Attività

Nella scheda "Attività" dei dati del modello (di cui si riporta un estratto in Figura 6.9) è necessario inserire il "*Template*" che si desidera associare alla zona selezionata. Nel caso della zona di esempio "Ambulatorio 1" quello selezionato è "*Office and consulting areas*", uno dei *template* relativi all'attività di edifici facenti parte della categoria Ospedali/case di cura (settore C2 "*Residential Institution - Hospital and Care Homes*"). Estratti di schede specifiche di questa sezione sono riportati nei Paragrafi successivi.

Nella 6.9 si notano le altre caratteristiche associate alla zona termica come il tipo di zona (in questo caso impostata su "1-Climatizzato"), la categoria del condizionamento ("1-Non residenziale"), l'inclusione della zona nei calcoli termici, etc.

Scorrendo nella sezione è possibile accedere alle informazioni riguardanti superfici e volumi.

Nella parte riguardante l'occupazione è possibile impostare la spunta di locale occupato, visualizzare il valore di [$m^2/persona$] derivanti dalla scelta del *template* ed il "Programma" orario corrispondente. Quest'ultimo riguarda la *schedule* di occupazione che verrà trattata nel dettaglio al Paragrafo successivo.

Infine, è possibile visualizzare i valori di temperatura di *set-point* impostati sia nel caso di riscaldamento che di raffrescamento (per la modellazione del caso studio non è stata considerata la sezione relativa alla temperatura di attenuazione).



Figura 6.9: Esempio della sezione "Attività" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del software DesignBuilder.

6.1.5.1 Occupazione

In questo Paragrafo si riporta un estratto del *Template* di attività relativo all'occupazione. Nella prima parte è presente il dato relativo alla densità di occupazione, espresso in $[persone/m^2]$. Un altro dato interessante per l'occupazione è il tasso metabolico: come si evince da Figura 6.10 anche qui è possibile fare riferimento ad una *schedule* che, in questo caso, è "Standing/walking" a cui corrisponde un valore di tasso metabolico per persona pari a $140[W/persona]$. La frazione latente è impostata a 0.5, mentre il fattore metabolico a 0.9 per tenere conto della presenza di uomini, donne e bambini. La corrispondente frazione sensibile dell'apporto per occupazione viene calcolata come prodotto tra tasso metabolico, frazione latente, fattore metabolico e densità di occupazione, ottenendo così dei $[W/m^2]$ di natura sensibile.

Nella parte a destra in Figura 6.10 è visualizzabile anche il profilo di occupazione impostato secondo il *Template* di occupazione "Hosp_CellOff_Occ". Il profilo orario è descritto per la settimana lavorativa, i *weekend* e tutte le tipologie di

giornate particolari che potrebbero avere profili differenti (come, ad esempio, i periodi di ferie). Si noti come, trattandosi di un ospedale, nella maggior parte dei casi i profili sono estesi a tutte le tipologie di giornata dal momento che non vi sono periodi di non occupazione dovuti a ferie o chiusure.

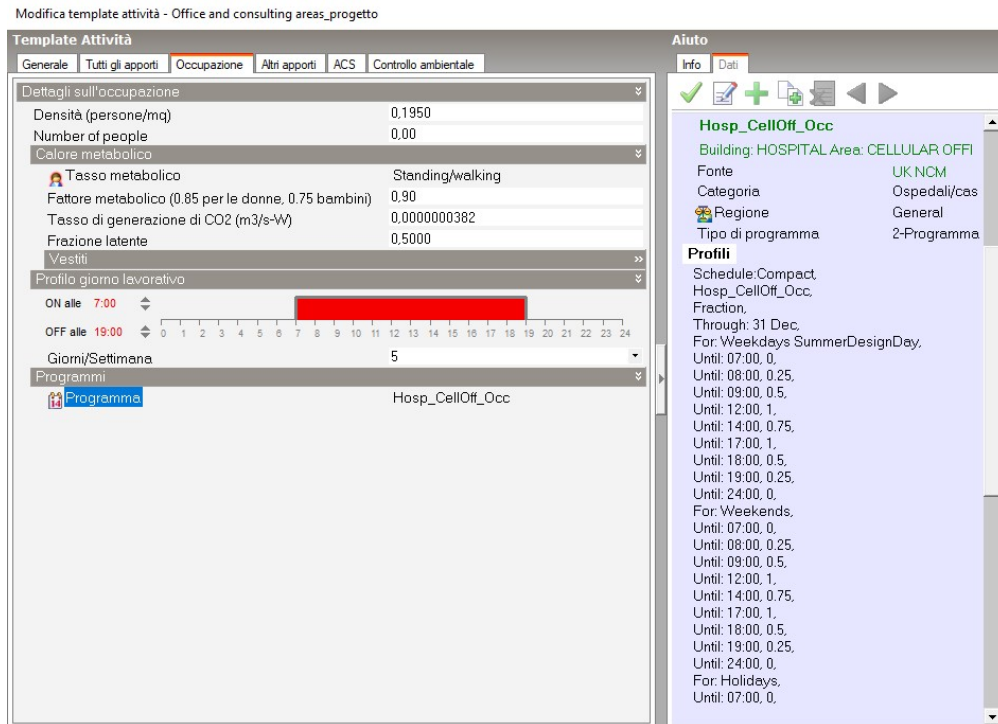


Figura 6.10: Esempio della sezione "Occupazione" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del software *DesignBuilder*.

Tutti i dati visualizzati in precedenza fanno parte delle linee guida fornite da ASHRAE nell'"*Handbook of Fundamentals*" [5]. Come precedentemente anticipato, si tratta di valori tabellati che posso essere reperibili anche tramite *database*.

In Figura 6.11 un estratto del *database* UK NCM [19] visualizzato con l'ausilio del programma "Access", all'interno del quale è possibile reperire tutti i valori di *input* relativi alle schede di "Attività", sia in termini di carichi interni, sia in termini di *schedules*, fattori di occupazione e fattori di utilizzo.

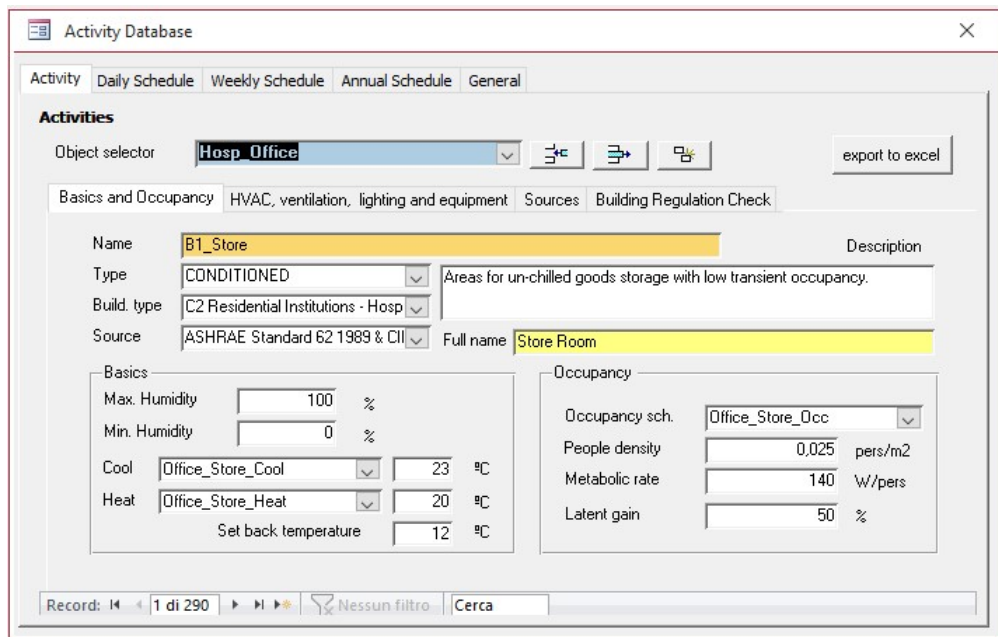


Figura 6.11: Estratto del *database* NCM - Fonte per i valori di attività ASHRAE inseriti nel *software DesignBuilder*.

6.1.5.2 Apparecchiature elettriche

Come nel caso degli apporti interni per occupazione, tramite il *Template* di attività si può accedere alla scheda "Altri apporti" per visualizzare e modificare i dati relativi alle apparecchiature elettriche.

In Figura 6.12 è riportato un estratto della scheda relativa ai dispositivi di ufficio in cui è presente il valore degli apporti espresso in $[W/m^2]$ e il valore della frazione radiante relativa, impostato a 0.2.

Nella zona a destra è riportato il profilo orario assegnato per la definizione dell'utilizzo delle apparecchiature della zona di interesse. Il profilo selezionato è "Hosp_CellOff_Equip" e, anche in questo caso, i profili sono estesi a tutte le tipologie di giornate.

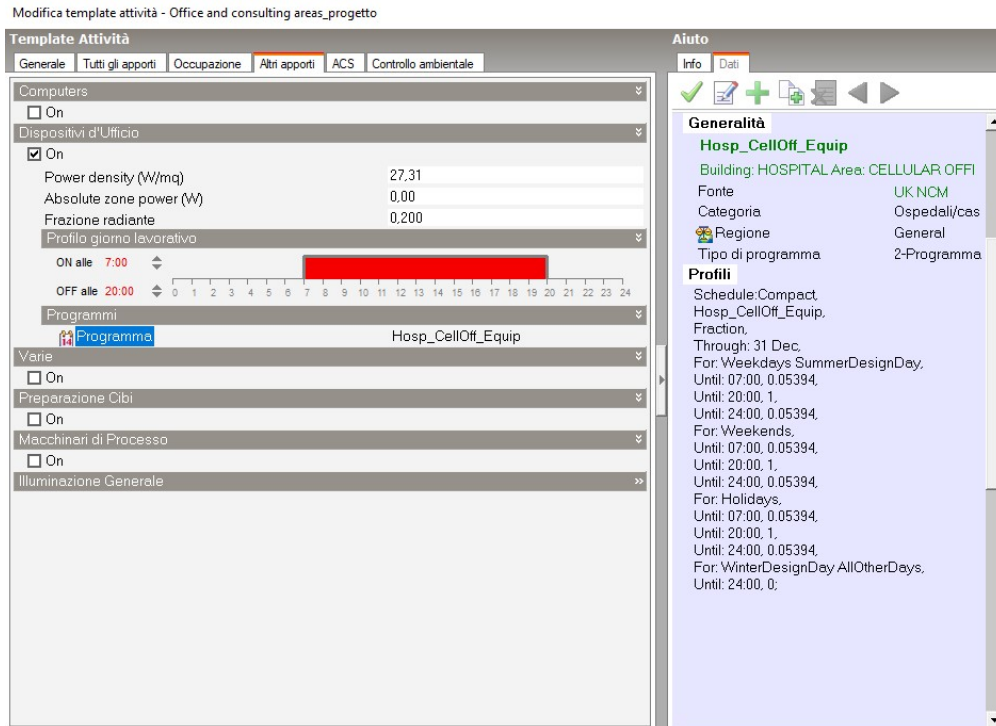


Figura 6.12: Esempio della sezione "Altri apporti- Dispositivi di ufficio" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del software *DesignBuilder*.

6.1.5.3 Illuminazione

Come ultima scheda di attività, si riporta similmente ad occupazione e dispositivi d'ufficio anche la parte relativa all'illuminazione. In Figura 6.13 è riportata la sezione relativa agli apparecchi di illuminazione con il programma di profilo orario associato "Hosp_CellOff_Light". Il valore di densità di potenza di illuminazione è, in questo caso, visualizzabile nella scheda "Illuminazione" esterna alla scheda "Attività", di cui si riporta un estratto in Figura 6.14. Oltre al valore di $[W/m^2]$ è presente il valore relativo alla frazione radiante e quello relativo alla frazione visibile, modificabili nel caso si volesse tenere conto di tipologie specifiche di apparecchi.

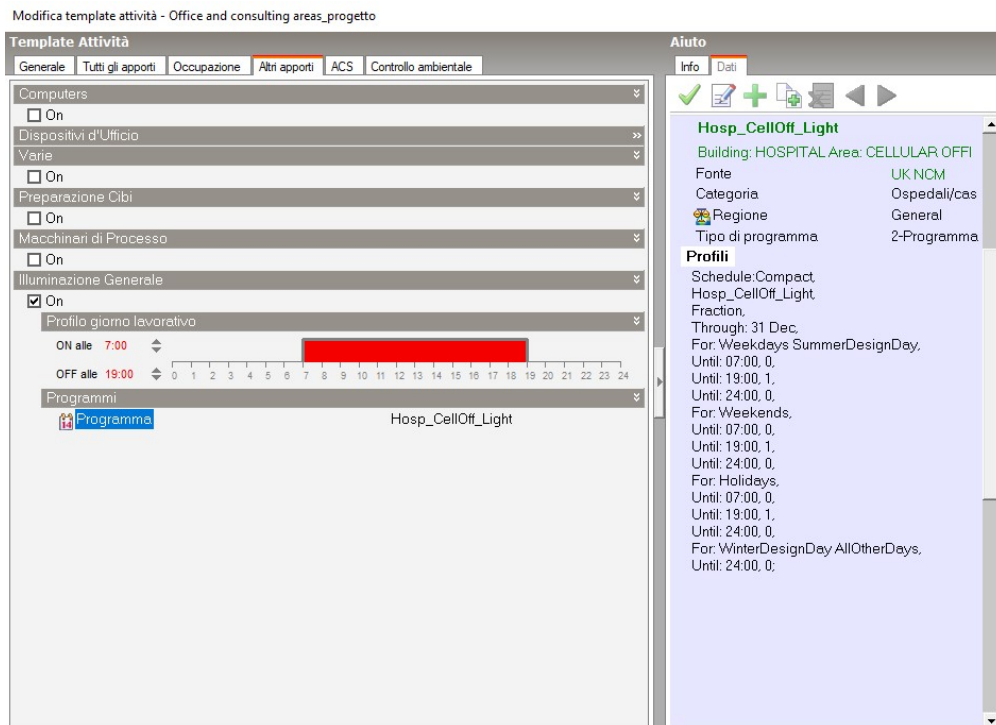


Figura 6.13: Esempio della sezione "Altri apporti- Illuminazione Generale" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del software *DesignBuilder*.

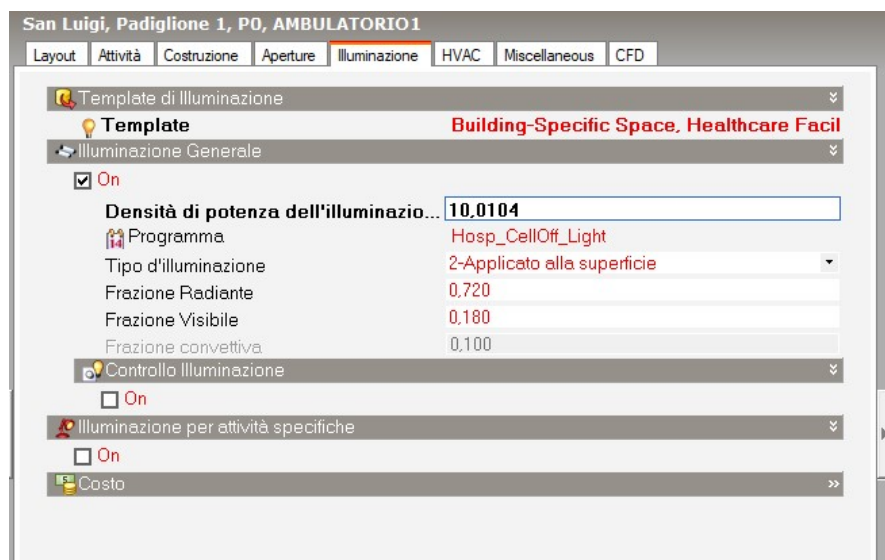


Figura 6.14: Esempio della sezione "Illuminazione" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del software *DesignBuilder*.

6.1.5.4 HVAC

Nella sezione HVAC ("Heating, Ventilation and Air Conditioning") si è impostato unicamente il valore di *set-point* mantenuto costante sia per il riscaldamento che per il raffrescamento (a meno di alcune zone in cui non è presente il raffrescamento come, ad esempio, i depositi), senza occuparsi della tipologia di impianto che, per questa trattazione, non è stato modellato. Il programma di profilo orario è impostato su "On 24/7" nel caso di condizionamento presente, per fare in modo che lo stesso valore di temperatura impostato sia mantenuto per tutte le 24 ore.

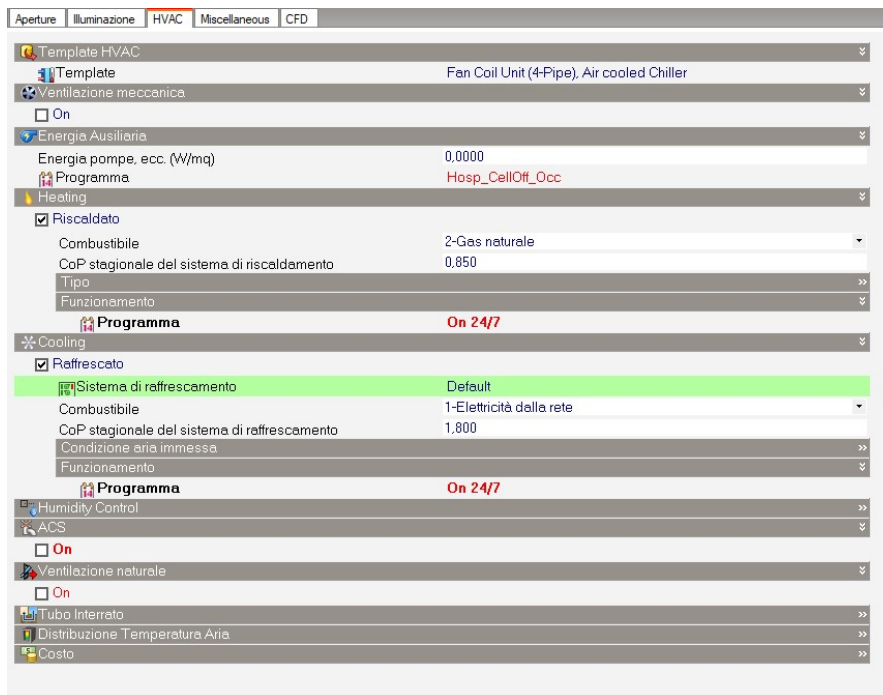


Figura 6.15: Esempio della sezione "Altri apporti- Dispositivi di ufficio" per la zona di esempio "Ambulatorio 1" all'interno del *software DesignBuilder*.

6.2 Edilclima - Calcolo dinamico orario secondo UNI EN ISO 52016

Dal momento che gli *input* inseriti nei due *software* di simulazione sono i medesimi, in questo Paragrafo si riporta una breve panoramica dei dati inseriti per la modellazione energetica su Edilclima. In questo caso, ci si riferisce all'utilizzo di Edilclima ai fini dell'implementazione del calcolo dinamico orario secondo UNI EN ISO 52016.

In Figura 6.16 è riportato un estratto della sezione "Dati generali - Dati progetto" in cui è possibile spuntare l'opzione di calcolo dinamico orario nella parte di "Calcoli aggiuntivi". Senza questa specifica, il calcolo viene effettuato in regime semi-stazionario e non è possibile accedere alle sezioni relative ai profili orari, caratterizzanti questa metodologia di calcolo.

Figura 6.16: Sezione Dati di progetto all'interno del *software* Edilclima.

6.2.1 Dati climatici

Nella sezione "Dati generali - Dati climatici" è stato inserito, nella finestra dei dati orari, il *file* modificato per uniformare gli *input* dei due diversi *software* di calcolo, dal momento che i dati riportati sul *file* .epw di *EnergyPlus* e quelli forniti da CTI non risultano combaciare (poichè quello fornito da CTI si riferisce a misurazioni più recenti). Per poter trasferire i dati climatici di *EnergyPlus* su Edilclima, è stato necessario tenere conto di alcuni aspetti come la pressione di vapore e l'irraggiamento richiesti da Edilclima. In particolare, come anticipato al Paragrafo 6.1.1, il *file* climatico inserito su *EnergyPlus* fornisce il valore di radiazione diretta sul piano normale. Nel caso di Edilclima il *file* climatico fornito dal CTI riporta la radiazione diretta su piano orizzontale.

Al fine di impostare i dati in ingresso richiesti da Edilclima, è stato manipolato il *file* climatico a partire da quello di *EnergyPlus* tramite foglio di calcolo *Excel* per la conversione della radiazione. In Figura 6.17 è riportato un estratto del *file* climatico inserito all'interno di Edilclima.

Mese	Giorno	Ora	Temp. [C]	Ir. diretta [W/m²]	Ir. diffusa [W/m²]	Ir. globale [W/m²]	Umidità rel. [%]	Press. vapore [Pa]	Vel. vento [m/s]	Ir. vet. N [W/m²]	Ir. vet. NE [W/m²]	Ir. vet. E [W/m²]	Ir. vet. SE [W/m²]	Ir. vet. S [W/m²]
1	1	00	-1.4	0.0	0.0	0.0	92.0	146.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	01	-1.8	0.0	0.0	0.0	93.0	437.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	02	-2.4	0.0	0.0	0.0	95.0	425.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	03	-3.2	0.0	0.0	0.0	97.0	407.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	04	-3.5	0.0	0.0	0.0	98.0	402.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	05	-3.5	0.0	0.0	0.0	98.0	398.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	06	-3.5	0.0	0.0	0.0	98.0	398.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	07	-3.0	0.0	0.0	0.0	97.0	414.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	08	-2.1	6.0	7.0	13.0	96.0	441.0	0.0	4.8	4.9	5.1	5.1	5.0
1	1	09	-0.2	31.5	26.0	57.5	95.0	495.0	0.0	20.6	36.1	293.6	377.1	261.8
1	1	10	1.0	78.3	42.0	120.3	79.0	519.0	0.0	34.9	34.9	268.1	431.9	363.2
1	1	11	3.3	119.1	52.0	171.1	71.0	590.0	0.0	44.4	44.4	205.6	440.1	442.8
1	1	12	6.0	131.3	55.0	186.3	60.0	562.0	0.0	46.9	46.9	101.4	372.8	453.3
1	1	13	6.9	107.7	52.0	159.7	57.0	568.0	0.0	42.7	42.7	42.7	254.7	385.6
1	1	14	7.1	61.5	43.0	104.5	56.0	566.0	0.0	31.6	31.6	31.6	123.6	246.9
1	1	15	6.6	29.2	28.0	57.2	58.0	566.0	0.0	20.0	20.0	20.0	48.2	152.5
1	1	16	5.5	0.0	8.0	8.0	63.0	570.0	0.0	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
1	1	17	3.8	0.0	0.0	0.0	72.0	578.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	18	1.4	0.0	0.0	0.0	83.0	561.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	19	0.3	0.0	0.0	0.0	89.0	550.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	20	-0.5	0.0	0.0	0.0	91.0	534.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	21	-1.0	0.0	0.0	0.0	93.0	523.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	22	-1.0	0.0	0.0	0.0	93.0	523.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	23	-0.6	0.0	0.0	0.0	92.0	535.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	00	0.2	0.0	0.0	0.0	99.0	552.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	01	0.5	0.0	0.0	0.0	98.0	558.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	02	0.8	0.0	0.0	0.0	97.0	563.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	03	1.0	0.0	0.0	0.0	96.0	565.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	04	1.2	0.0	0.0	0.0	95.0	567.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	05	1.3	0.0	0.0	0.0	94.0	564.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	06	1.4	0.0	0.0	0.0	93.0	561.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	07	1.6	0.0	0.0	0.0	94.0	576.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	08	1.8	0.0	8.0	8.0	95.0	592.0	0.0	4.7	5.2	6.3	6.5	5.7
1	2	09	2.0	0.0	38.0	38.0	97.0	614.0	0.0	22.2	22.7	30.1	32.9	29.4

Figura 6.17: Estratto del file climatico del CTI di Torino modificato e inserito nel software Edilclima.

6.2.2 Costruzione

In Figura 6.18 è riportata la vista della sezione riferita agli elementi costruttivi. In particolare, si vuole mostrare un esempio di stratigrafia dell'elemento opaco con siglai M16. Dall'immagine è possibile visualizzare come, per ciascun materiale, siano definite le proprietà di conducibilità $[W/mK]$, densità $[kg/m^3]$ e capacità termica $[kJ/kgK]$.

Nel calcolo della trasmittanza delle pareti, Edilclima considera che soltanto l'intercapedine non ventilata abbia una sua resistenza come singolo strato. Le intercapedini debolmente e fortemente ventilate hanno una procedura diversa e secondo cui si calcola una resistenza totale della stratigrafia, in accordo con le linee guida definite dalla Norma UNI EN ISO 6946:2008 ("Elementi costruttivi - Prestazioni termiche dei componenti e dei prodotti edilizi - Calcolo della trasmittanza termica" [24]).

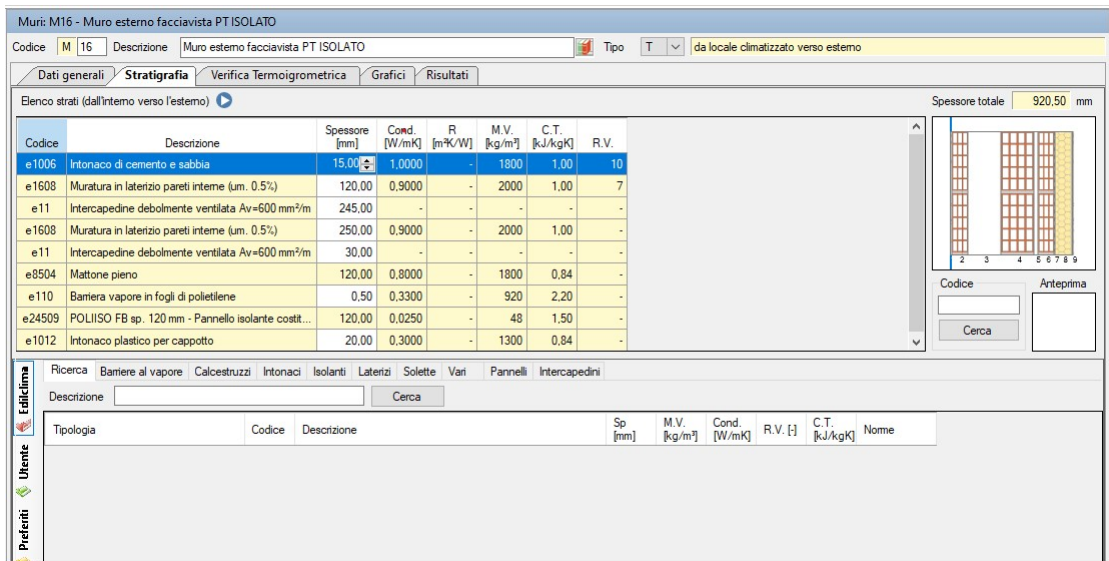


Figura 6.18: Esempio di stratigrafia muro "M16 - Muro esterno facciavista isolato" inserito all'interno del *software* Edilclima.

In Figura 6.19 è riportata una vista 3D del piano terra dell'ospedale. Le diverse tipologie di costruzione sono evidenziate con differenti colori in base alla diversa stratigrafia assegnata.

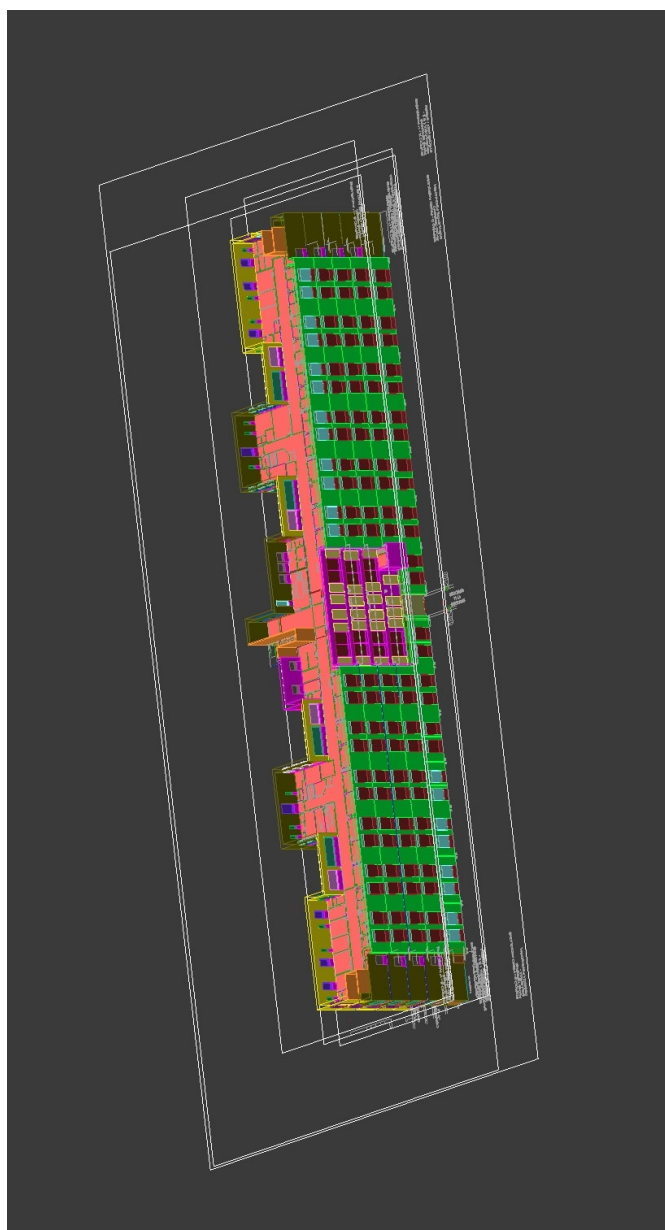


Figura 6.19: Vista 3D piano terra ospedale San Luigi (TO) da Edilclima.

6.2.3 Aperture

In questo Paragrafo si riporta una scheda di esempio riferita alla sezione "Componenti di involucro" allo scopo di mostrare uno degli elementi trasparenti del modello. In particolare, in Figura 6.20 è possibile vedere un estratto della sezione relativa alla definizione degli elementi finestrati, all'interno delle quali sono specificate le caratteristiche costruttive e le proprietà termiche degli elementi come emissività e fattore di trasmissione solare.

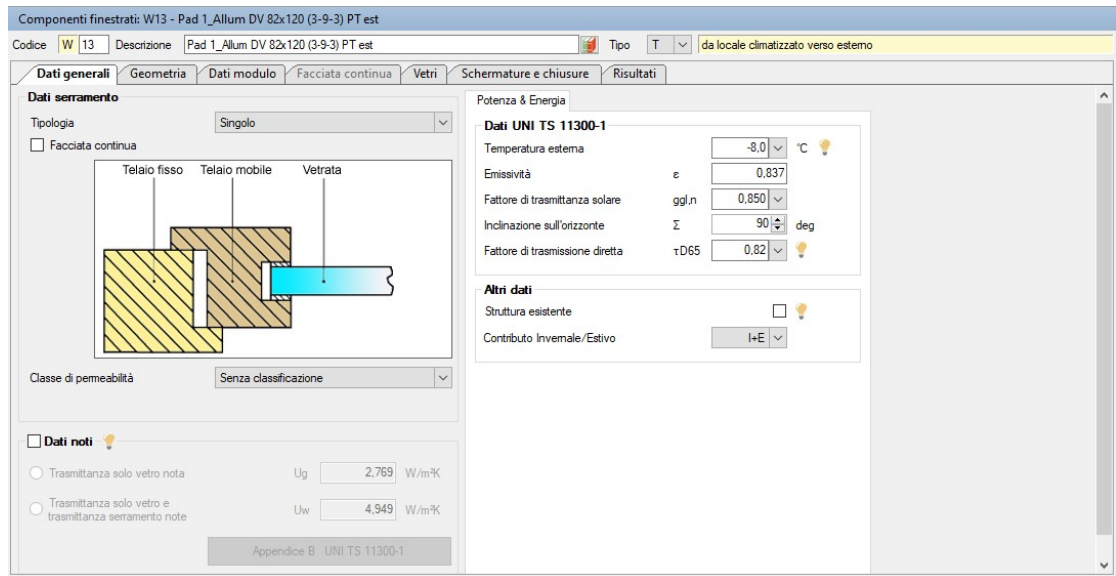


Figura 6.20: Esempio di componente finestrato "W13 - Pad 1_Allum DV 82x120 (3-9-3) PT est" inserito all'interno del *software* Edilclima.

6.2.4 Zonizzazione

La zonizzazione è stata effettuata in maniera analoga al caso di *DesignBuilder* e risulta dunque la medesima. Si ricorda che tale aggregazione di locali viene fatta sulla base di considerazioni quali stesse condizioni di progetto interne, stessa destinazione d'uso, stessa esposizione e stessa tipologia impiantistica.

6.2.5 Attività

Per quanto riguarda l'attività e quindi i dati relativi a occupazione, apparecchiature elettriche e apparecchi luminosi, si faccia riferimento alla Figura 6.22. Per ciascuna zona termica è possibile, nella sezione "Profilo orario", inserire i dati relativi agli apporti interni in termini di $[W/m^2]$. Nella stessa scheda è necessario definire anche il *set-point* di temperatura sia per il riscaldamento che per il raffrescamento.

Nella zona inferiore della scheda è riportata in forma tabellare la sezione caratterizzante gli aspetti di calcolo dinamico, all'interno della quale è possibile definire, per ciascuna ora del giorno, i valori di temperatura di *set-point* da mantenere (utile, per esempio, in caso di attenuazione notturna), il fattore di occupazione f_{occ} e i fattori di utilizzo per apparecchiature elettriche $f_{int,A}$ e per i sistemi di illuminazione $f_{int,L}$. Una volta inseriti questi parametri, i valori di flusso termico riferiti a ciascun apporto si modificano rispetto al valore nominale inserito, sulla base del fattore inserito di ora in ora, al fine di tenere conto di fattori dinamici come la contemporaneità dei carichi e le modalità di utilizzo.

La sezione appena descritta è stata completata durante la modellazione facendo riferimento alle *schedules* inserite su *DesignBuilder* e riferite ai valori ASHRAE, al fine di avere perfetta corrispondenza tra i due modelli.

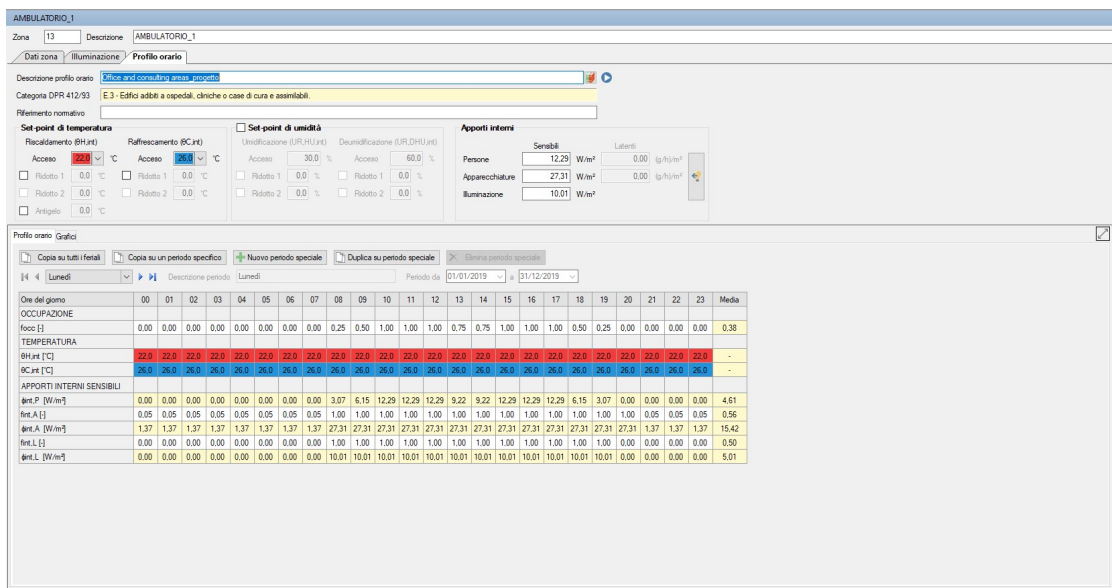


Figura 6.22: Esempio di scheda "Profilo orario" di una zona di esempio inserita all'interno del software Edilclima.

6.3 Edilclima - Calcolo semi stazionario secondo UNI TS 11300

Per quanto riguarda il modello per il calcolo semi-stazionario, si faccia riferimento ai dati di costruzione e di *input* grafico precedentemente descritti al Paragrafo 6.2.

In questo caso, a differenza di quanto mostrato in Figura 6.16, non è stata spuntata la casella riferita al calcolo dinamico orario e, pertanto, non risultano attive le sezioni relative ai profili orari. Per questo motivo, ai fini del calcolo semi-stazionario, non si è fatto riferimento ai valori di apporti interni in $[W/m^2]$ degli apporti interni. Questo è dovuto al fatto che in regime semi-stazionario, per come è definito, non vi è la possibilità di assegnare dei fattori di occupazione o di utilizzo, quindi il calcolatore manterrebbe costanti tali valori, arrivando a sovrastimare i fabbisogni energetici in maniera del tutto irrealistica. Non potendo tenere conto dei valori utilizzati ai fini del calcolo dinamico, si è fatto riferimento ai valori dettati da Norma per la categoria di edifici E.3 ("Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili"). Nelle Figure 6.24 e 6.23 sono riportate le schede di zona e locale per una zona di esempio, dove è possibile visualizzare, ad esempio, il valore di $[W/m^2]$ assegnato agli apporti interni, i dati di superficie e volume, le temperature di *set-point*, i $[vol/h]$ di infiltrazioni, etc.

The screenshot shows the 'Dati zona' (Zone Data) form for 'AMBULATORIO_1'. The form is divided into several sections:

- General Information:** Zona: 13, Descrizione: AMBULATORIO_1.
- Category:** Categoria DPR 412/93: E.3 (Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili).
- Internal Gains:** Apporti interni: 8,00 W/m²; Numero di appartamenti: 1.
- Dimensional Characteristics:**
 - Superficie in pianta: netta 6,94 m², lorda 9,25 m².
 - Volume: netto 22,19 m³, lordo 34,70 m³.
 - Superficie esterna lorda: 18,08 m² (con strutture tipo N).
 - Superficie esterna lorda: 18,08 m² (senza strutture tipo N).
 - Superficie esterna lorda: 18,08 m² (con strutture tipo A).
 - Rapporto S/V: 0,52 m⁻¹.
- Thermal Capacity:** Capacità per unità di superficie: 165 kJ/m²K; Superficie totale: 18,08 m².
- Winter Power Data:** Fattore di ripresa (fRH): 23 W/m²; Rendimento recuperatore (nr): 0,00.

Figura 6.23: Esempio di scheda "Dati zona" di una zona di esempio inserita all'interno del *software* Edilclima per il calcolo in regime semi-stazionario.

The screenshot shows the 'Dati locale' (Local Data) form for a zone named 'AMBULATORIO_1'. The form is organized into several sections:

- Room Data:**
 - Altezza netta: 3.20 m
 - Volume netto: 22.19 m³
- Temperature interne (Internal Temperatures):**
 - Potenza invernale (Brt.p.H): 22.0 °C
 - Energia invernale (Brt.e.H): 22.0 °C
 - Energia estiva (Brt.e.C): 26.0 °C
- Apposti interni aggiuntivi (Additional internal gains):**
 - Energia invernale: 0.0 W
 - Energia estiva: 0.0 W
- Ventilazione (Ventilation):**
 - Metodo di calcolo: Calcolo con ricambi d'aria
 - Portata d'aria esterna (Qsp): 0.0 10³ m³ / s pers
 - Indice di affollamento (n): 0.04 pers / m²
 - fvz: 0.60
- Ricambi d'aria di riferimento (Reference air changes):**
 - Potenza invernale (n_p.H): 0.42 Vol/h
 - Energia invernale (n_e.H): 1.00 Vol/h
 - Energia estiva (n_e.C): 1.00 Vol/h
 - Calcolo orario (n): 1.00 Vol/h

Figura 6.24: Esempio di scheda "Dati locale" di una zona di esempio inserita all'interno del *software* Edilclima per il calcolo in regime semi-stazionario.

Capitolo 7

Risultati delle simulazioni

7.1 Analisi comparativa delle tre metodologie di calcolo

Dal momento che i piani costituenti l'intero Padiglione 1 dell'ospedale San Luigi di Torino risultano simili sia in termini di costruzione che in termini di destinazione d'uso degli ambienti, si è scelto di fare riferimento a tre piani tipologici: il piano terra, il piano intermedio e l'ultimo piano. E' stato quindi possibile riportarsi ai fabbisogni energetici totali dell'intero Padiglione 1 tramite simulazioni separate dei piani tipologici. In questo modo non si ottengono simulazioni troppo onerose dal punto di vista computazionale. Tale procedura è stata effettuata per tutte e tre le metodologie di calcolo.

Nelle Tabelle 7.1, 7.2 e 7.3 sono riportati i valori di fabbisogno energetico per il riscaldamento e per il raffrescamento dei tre piani tipologici, rispettivamente per il calcolo dinamico dettagliato, il calcolo dinamico semplificato ed il calcolo semi-stazionario.

Calcolo dinamico dettagliato - Fabbisogno energetico Piani tipologici		
	Riscaldamento [kWh]	Raffrescamento [kWh]
Piano terra	189'186	28'954
Piano intermedio	118'871	80'997
Ultimo piano	171'542	90'756

Tabella 7.1: Fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con *DesignBuilder* per i piani tipologici del Padiglione 1.

In Tabella 7.1 si nota che, per i risultati di riscaldamento, i piani disperdenti hanno i valori maggiori di fabbisogno energetico mentre quello intermedio, presentando condizioni di adiabaticità sia per quanto riguarda il soffitto che il pavimento, richiede una spesa energetica minore. Per quanto concerne il fabbisogno di raffrescamento, rispetto a quello che accade al piano intermedio, il piano terra ha un fabbisogno di raffrescamento minore dal momento che la dispersione del pavimento controterra aiuta il raffrescamento; il piano che presenta la copertura, invece, richiede un fabbisogno di raffrescamento più alto di entrambi i piani, per via del peso che risulta avere il contributo di irraggiamento della componente solare rispetto alla dispersione del tetto verso l'esterno.

Calcolo dinamico semplificato - Fabbisogno energetico		
Piani tipologici		
	Riscaldamento [kWh]	Raffrescamento [kWh]
Piano terra	170'841	56'202
Piano intermedio	137'553	81'886
Ultimo piano	178'760	64'841

Tabella 7.2: Fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima per i piani tipologici del Padiglione 1.

In Tabella 7.2 si può osservare che, per quanto riguarda i risultati di fabbisogno per il riscaldamento, i piani tipologici presentano comportamenti differenti. Come ci si potrebbe aspettare dall'esperienza comune, i piani esposti controterra ed in copertura (con grandi superfici disperdenti verso l'esterno), mostrano i valori maggiori di spesa per il riscaldamento. Il piano intermedio del padiglione, invece, avendo condizione al contorno di adiabaticità sia per la superficie orizzontale superiore che per quella inferiore, presenta un valore inferiore in termini di energia di riscaldamento. Avendo imposto una tipologia di superficie di pavimento e tetto intermedi, il calcolatore considera, aldilà dell'adiabatico, la massa termica delle superfici. Come si evince dagli *output* su base oraria ottenuti dal *software*, tutto quello che viene accumulato all'interno delle pareti adiabatiche, sarà giocoforza rilasciato verso l'ambiente interno, non potendo disperderlo esternamente. Questa energia è dovuta alla presenza di apporti endogeni nelle zone interne al piano (occupanti, apparecchiature elettriche e apparecchi per l'illuminazione) ed esogeni (radiazione solare entrante).

Un discorso speculare si può fare in merito al raffrescamento. Piano terra e ultimo piano presentano i valori di fabbisogno più bassi, mentre, in questo caso, il piano intermedio ha un consumo energetico maggiore. Gli effetti evidenziati in precedenza circa l'accumulo di calore nelle pareti adiabatiche, che viene quindi

ceduto di nuovo all'ambiente interno, hanno un riscontro opposto in questo caso, poiché vanno a gravare sul carico di raffrescamento.

Alla luce dei risultati ottenuti dalla due simulazioni di calcolo dinamico, risulta utile evidenziare le differenze emerse tra il calcolo dinamico dettagliato e quello semplificato. Rispetto a ciò che accadeva nel caso dettagliato (Tabella 7.1), sia per il riscaldamento che il raffrescamento, si assiste ad un andamento in controtendenza per quanto riguarda i due piani disperdenti. In particolare, per quanto riguarda il fabbisogno di raffrescamento, si nota una richiesta di energia per il piano intermedio prossima a quella ottenuta tramite calcolo dinamico dettagliato. Una differenza molto rilevante però risulta essere che nel caso di calcolo dinamico dettagliato, rispetto al piano intermedio, il piano terra presenta un valore di fabbisogno energetico di raffrescamento minore mentre l'ultimo piano maggiore; nel caso di calcolo dinamico semplificato e sempre rispetto al piano intermedio, invece, si ottiene un valore minore sia al piano terra che e all'ultimo piano. Ciò significa che, rispetto a quanto si poteva evincere dalla simulazione dinamica dettagliata, nel caso di simulazione semplificata il piano disperdente verso l'esterno in copertura non risente allo stesso modo del carico solare ma, al contrario, disperde in maniera tale da avere un fabbisogno per raffrescamento minore rispetto al piano adiabatico.

Uno dei punti fondamentali su cui porre l'attenzione è quindi che il piano intermedio viene trattato nei due calcoli similmente, mentre i calcoli effettuati sui piani disperdenti si traducono in valori di fabbisogni energetici molto diversi: quanto detto si nota, oltre che dall'andamento di cui si è appena discusso, confrontando i valori di energia calcolata in termini assoluti da metodo dinamico dettagliato per il raffrescamento del piano terra e quella calcolata da metodo semplificato, che risulta essere circa il doppio. Allo stesso modo, il risultato per il raffrescamento dell'ultimo piano da calcolo dinamico semplificato si riduce di circa il 40% rispetto al dinamico dettagliato. Il fatto che le differenze maggiori si apprezzino considerando piano terra ed ultimo piano potrebbe essere dovuto alle semplificazioni caratterizzanti il calcolo semplificato come, ad esempio, il modo in cui vengono assegnati i valori di capacità termica areica degli elementi di involucro edilizio (si veda Paragrafo 5.2.1.4).

Calcolo semi stazionario - Fabbisogno energetico		
Piani tipologici		
	Riscaldamento [kWh]	Raffrescamento [kWh]
Piano terra	199'627	40'056
Piano intermedio	155'187	50'326
Ultimo piano	182'870	41'578

Tabella 7.3: Fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo semi-stazionario con Edilclima per i piani tipologici del Padiglione 1.

Nel caso del calcolo in regime semi-stazionario, di cui gli *input* sono riportati in Tabella 7.3, si apprezzano le maggiori variazioni di fabbisogno energetico in termini assoluti rispetto al caso di calcolo dinamico dettagliato. In questo caso però, l'assenza degli effetti dinamici si traduce in una maggiore uniformità nei risultati dei diversi piani tipologici. Anche qui si nota, come nel caso del calcolo dinamico dettagliato, una diminuzione del fabbisogno di raffrescamento per l'ultimo piano.

In Tabella 7.4 sono riportati infine i valori del fabbisogno per il riscaldamento ed il raffrescamento per le tre metodologie di calcolo in riferimento all'intero Padiglione 1. Tali fabbisogni sono stati ottenuti dalla somma dei fabbisogni di piano terra, due piani intermedi ed ultimo piano.

Fabbisogno energetico Padiglione 1		
	Riscaldamento [<i>kWh</i>]	Raffrescamento [<i>kWh</i>]
Calcolo dinamico dettagliato	598'469	281'704
Calcolo dinamico semplificato	624'707	284'815
Calcolo semi-stazionario	692'871	182'286

Tabella 7.4: Fabbisogno energetico dell'intero Padiglione 1 [*kWh*] per il riscaldamento e il raffrescamento per le tre metodologie di calcolo.

Al fine di valutare in maniera intuitiva di quanto il calcolo dinamico semplificato e quello semi-stazionario si discostano dal calcolo dinamico dettagliato, in Tabella 7.5 sono riportate le variazioni percentuali dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento dell'intero Padiglione 1.

Variazione percentuale del fabbisogno energetico del Padiglione 1 rispetto al calcolo dinamico dettagliato		
	Riscaldamento [%]	Raffrescamento [%]
Calcolo dinamico semplificato	4	1
Calcolo semi-stazionario	16	-35

Tabella 7.5: Fabbisogno energetico dell'intero Padiglione 1 [*kWh*] per il riscaldamento e il raffrescamento - Confronto percentuale tra le tre metodologie di calcolo.

Come atteso, la metodologia di calcolo che maggiormente si discosta da quella condotta tramite calcolo dinamico dettagliato è quella in regime semi-stazionario, il quale porta ad una sovrastima dei consumi di riscaldamento e ad una sottostima ancora più evidente del fabbisogno di raffrescamento.

L'analisi condotta al fine di comparare il comportamento delle metodologie di calcolo (con particolare *focus* sui calcoli dinamici) porta, dunque, a riflettere sul fatto che per una tipologia di edificio che presenta tre piani tipologici come in questo caso (e quindi un piano disperdente verso il terreno, uno adiabatico intermedio e

uno disperdente verso l'esterno in copertura) la differenza percentuale tra le tre metodologie di calcolo a livello di intero edificio non è particolarmente elevata. Si vede infatti che, in Tabella 7.5, i risultati ottenuti da calcolo dinamico semplificato si discostano del 4 e dell'1% (rispettivamente per riscaldamento e raffrescamento).

D'altra parte, considerando i singoli piani tipologici, è evidente come a livello di singoli piani disperdenti i valori di fabbisogno energetico ottenuti siano notevolmente diversi in base al calcolo dinamico effettuato. Questo significa che una differenza esigua a livello di intero edificio si ottiene non perché i calcolatori ragionano effettivamente allo stesso modo ma, piuttosto, perché in questa situazione precisa i valori ottenuti per il piano intermedio nel caso di metodo dinamico dettagliato e semplificato risultano molto simili, mentre per i piani terra e ultimo piano si hanno valori molto diversi ma che tendono a compensarsi e a portare ad un risultato globale comparabile. Si tratta di un aspetto su cui porre particolare attenzione dal momento che se si prendesse in considerazione un edificio sviluppato in verticale e composto da diversi piani intermedi, i risultati delle due simulazioni risulterebbero non confrontabili. Al contrario, se si avesse un edificio sviluppato in orizzontale su un unico piano disperdente verso il terreno, i risultati verrebbero completamente sballati. Stessa situazione si otterrebbe nel caso in cui si dovesse operare un'analisi solo su un piano terra o ultimo piano e non su un intero edificio.

L'ultima analisi svolta in merito alla comparazione tra i metodi riguarda unicamente i due modelli dinamici. Si è valutato, infatti, di riportare gli andamenti dei fabbisogni annuali del piano intermedio, valutando solo una porzione del piano definita da alcune delle zone più significative per esposizione, apporti e superficie in pianta. I locali selezionati pesano per circa il 55% sui fabbisogni energetici dell'intero piano. Questa scelta è stata effettuata per via delle complicazioni derivanti dal fatto che, dall'implementazione del calcolo dinamico orario semplificato, risulta ad oggi impossibile ottenere i dati orari relativi all'intero piano. L'unico modo attraverso cui si otterrebbero tali informazioni sarebbe quello di considerare un'unica zona per tutto il piano, a differenze del calcolatore *EnergyPlus* che produce i risultati per singola zona e per intero piano o edificio. Gli andamenti ottenuti sono apprezzabili dai grafici di Figura 7.1 per il riscaldamento e di Figura 7.2 per il raffrescamento. Oltre all'andamento annuale, è stato possibile ottenere per tali zone le potenze di picco: nel caso di calcolo dinamico dettagliato la potenza di riscaldamento è pari a 47[kW] mentre quella di raffrescamento è pari a 45[kW]; nel caso di calcolo dinamico semplificato rispettivamente 56[kW] e 55[kW], con aumento rispetto al caso precedente del 19% e del 22%. Si assiste anche in questo caso ad una differenza in termini di potenza tra i due modelli e, di conseguenza, una differenza per quanto riguarda il progetto di dimensionamento per la climatizzazione.

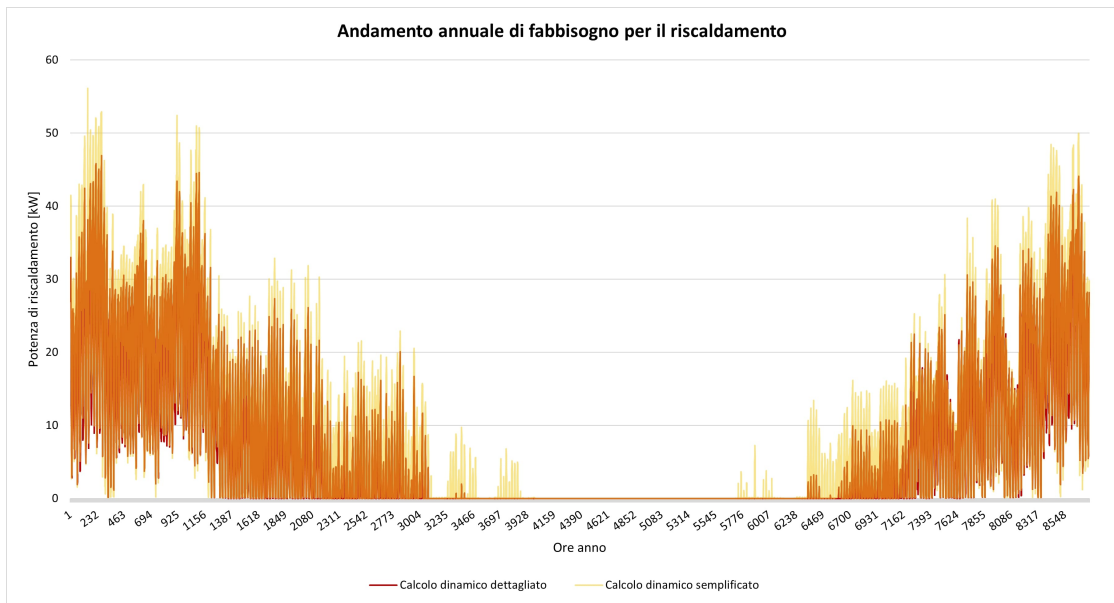


Figura 7.1: Fabbisogno energetico annuo di riscaldamento valutato per alcune zone significative del piano intermedio sia con metodo dinamico dettagliato che semplificato.

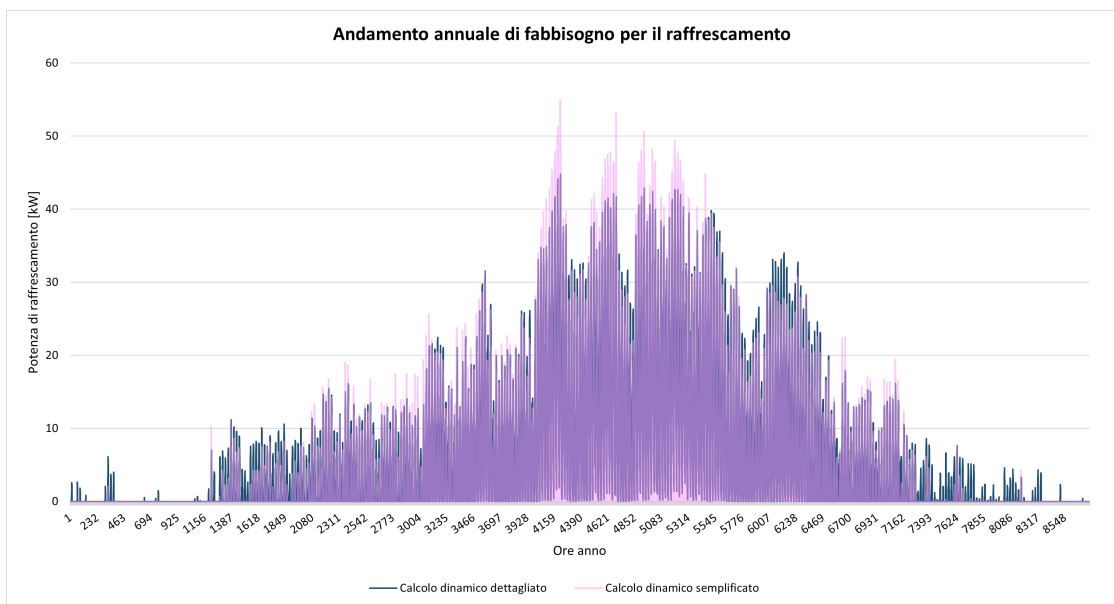


Figura 7.2: Fabbisogno energetico annuo di raffrescamento valutato per alcune zone significative del piano intermedio sia con metodo dinamico dettagliato che semplificato.

7.2 Analisi di sensibilità sulle variabili di influenza

Per condurre un'analisi di sensibilità sulle variabili di influenza, su ogni singolo modello, è stato preso in considerazione un piano tipologico. Nella trattazione il piano scelto è quello intermedio che, come già detto, presenta condizioni di adiabaticità sia nella superficie orizzontale superiore che in quella inferiore.

Ai fini dell'analisi, sono state scelte due zone termiche particolarmente energivore, in cui è richiesto sia riscaldamento che raffrescamento e in cui sono presenti apporti interni per occupazione, per presenza di apparecchiature elettriche e per illuminazione: gli ambienti selezionati sono "Studio6" e "Ambulatorio3". Come si evincerà nelle successive trattazioni, invece di simulare l'intero piano si è deciso di considerare la somma delle due zone più significative come studio rappresentativo di tutto il piano, supponendo che quello che accade a queste due zone sia quello che accadrebbe se si facesse l'analisi su tutto il piano.

Lo scopo di questa parte dell'elaborato è quello di studiare come variano i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento per queste zone andando a variare alcune delle variabili di influenza e come questo influenza il fabbisogno dell'intero piano intermedio.

Le analisi sono state condotte a partire dalle condizioni "base" su cui sono stati fatti i modelli energetici in termini di infiltrazioni (poste in tutti i locali a $1[\text{vol}/h]$), di $[W/m^2]$ da carichi endogeni (risultanti dallo studio delle linee guida fornite da ASHRAE) e, infine, di valori della frazione convettiva degli apporti interni. A partire da queste condizioni, il valore di infiltrazione per i due ambienti selezionati è stato impostato a $0.1[\text{vol}/h]$, $0.3[\text{vol}/h]$, $0.5[\text{vol}/h]$ e $0.8[\text{vol}/h]$; i carichi endogeni sono stati invece variati a partire dal valore base (corrispondente al 100%) dell'80%, 50%, 20% e 0%; infine, è stato variato il valore della frazione convettiva degli apporti a partire dai valori imposti da normativa per il caso di calcolo dinamico semplificato. Ciascuna analisi è stata condotta tenendo invariate le condizioni base delle altre variabili di influenza.

7.2.1 Variazione infiltrazioni

Nelle tabelle che seguono sono riportati i risultati ottenuti dall'analisi effettuata con calcolo dinamico dettagliato, dinamico semplificato e semi-stazionario, andando a variare il valore di $[\text{vol}/h]$ di infiltrazioni degli ambienti selezionati, rispettivamente per il riscaldamento e il raffrescamento.

I risultati di fabbisogno energetico sono riportati sia per gli ambienti "Studio6" e "Ambulatorio3", sia per la somma dei due, supponendo che questa sia assimilabile a ciò che accade a livello di intero piano intermedio.

Calcolo dinamico dettagliato					
Fabbisogno energetico riscaldamento [kWh]					
Locale	0.1 [vol/h]	0.3 [vol/h]	0.5 [vol/h]	0.8 [vol/h]	1 [vol/h]
Studio 6	41	773	2'288	5'792	8'764
Ambulatorio 3	26	352	983	2'404	3'594
Totale	67	1'126	3'271	8'196	12'358
Variazione rispetto al caso base	-99%	-91%	-74%	-34%	-

Tabella 7.6: Fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento da calcolo dinamico dettagliato con *DesignBuilder* per diversi valori di infiltrazioni.

Calcolo dinamico dettagliato					
Fabbisogno energetico raffrescamento [kWh]					
Locale	0.1 [vol/h]	0.3 [vol/h]	0.5 [vol/h]	0.8 [vol/h]	1 [vol/h]
Studio 6	43'553	37'462	32'294	26'469	23'590
Ambulatorio 3	16'557	14'256	12'322	10'168	9'095
Totale	60'110	51'718	44'616	36'637	32'686
Variazione rispetto al caso base	84%	58%	36%	12%	-

Tabella 7.7: Fabbisogno energetico [kWh] per il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con *DesignBuilder* per diversi valori di infiltrazioni.

Dalle Tabelle 7.6 e 7.7, il calcolo dinamico dettagliato risulta essere sensibile alla variazione del valore di infiltrazione. Questo aspetto è visibile in maniera chiara apprezzando le variazioni percentuali inserite nell'ultima riga delle tabelle, calcolate rispetto alla condizione base di 1[vol/h]. Le maggiori variazioni si hanno inoltre nel caso del fabbisogno per riscaldamento dove, per un valore di infiltrazioni diminuito fino a 0.1[vol/h], si arriva ad avere una variazione del 99% rispetto al caso di partenza.

Calcolo dinamico semplificato					
Fabbisogno energetico riscaldamento [kWh]					
Locale	0.1 [vol/h]	0.3 [vol/h]	0.5 [vol/h]	0.8 [vol/h]	1 [vol/h]
Studio 6	0	0	571	3'475	6'142
Ambulatorio 3	0	0	220	1'362	2'402
Totale	0	0	791	4'837	8'544
Variazione rispetto al caso base	-100%	-100%	-91%	-43%	-

Tabella 7.8: Fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima per diversi valori di infiltrazioni.

Calcolo dinamico semplificato					
Fabbisogno energetico raffrescamento [kWh]					
Locale	0.1 [vol/h]	0.3 [vol/h]	0.5 [vol/h]	0.8 [vol/h]	1 [vol/h]
Studio 6	45'473	38'866	33'465	27'823	25'026
Ambulatorio 3	17'898	15'296	13'171	10'945	9'830
Totale	63'371	54'162	46'636	38'768	34'856
Variazione rispetto al caso base	82%	55%	34%	11%	-

Tabella 7.9: Fabbisogno energetico [kWh] per il raffrescamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima per diversi valori di infiltrazioni.

Osservando le Tabelle 7.8 e 7.9 si evince che, anche in questo caso, la variazione del valore delle infiltrazioni ha un impatto molto rilevante sul valore dei fabbisogni energetici. Nel caso di calcolo dinamico semplificato per il fabbisogno di energia di riscaldamento, in particolare, per valori di infiltrazioni diminuiti fino a $0.3[\text{vol/h}]$ l'unica fonte di carico termico è rappresentato dalle infiltrazioni: questo significa che per valori molto bassi di infiltrazioni o, in generale, in assenza di infiltrazioni, non occorre offrire energia di riscaldamento. Valutando ancora una volta le variazioni percentuali riportate nelle tabelle, si evidenzia quanto questa metodologia di calcolo sia ancora più sensibile alle infiltrazioni rispetto al calcolo dinamico dettagliato.

Calcolo dinamico semi-stazionario					
Fabbisogno energetico riscaldamento [kWh]					
Locale	0.1 [vol/h]	0.3 [vol/h]	0.5 [vol/h]	0.8 [vol/h]	1 [vol/h]
Studio 6	3'164	6'006	9'221	14'409	18'003
Ambulatorio 3	1'281	2'401	3'666	5'703	7'114
Totale	4'445	8'407	12'887	20'112	25'117
Variazione rispetto al caso base	-82%	-67%	-49%	-20%	-

Tabella 7.10: Fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento da calcolo semi-stazionario con Edilclima per diversi valori di infiltrazioni.

Calcolo semi-stazionario					
Fabbisogno energetico raffrescamento [kWh]					
Locale	0.1 [vol/h]	0.3 [vol/h]	0.5 [vol/h]	0.8 [vol/h]	1 [vol/h]
Studio 6	20'796	18'027	15'784	13'503	12'408
Ambulatorio 3	8'306	7'215	6'327	5'417	4'593
Totale	29'102	25'242	22'111	18'920	17'001
Variazione rispetto al caso base	71%	48%	30%	11%	-

Tabella 7.11: Fabbisogno energetico di riscaldamento del piano intermedio al variare delle infiltrazioni nelle zone termiche "Ambulatorio3" e "Studio6" per le tre metodologie di calcolo.

Nel caso di calcolo semi-stazionario si ripresenta una maggiore variazione del fabbisogno nel caso di riscaldamento ma, valutando le variazioni percentuali, si nota come in questo caso la metodologia di calcolo risulta essere meno influenzata dal valore di infiltrazioni inserito in fase di modellazione.

In un'ultima analisi, si noti come, per tutte e tre le metodologie di calcolo, risulta che, nel caso di fabbisogno energetico per riscaldamento, i [kWh] di consumo energetico aumentano all'aumentare delle infiltrazioni. Tale fenomeno è in linea con la fisica del problema dal momento che le infiltrazioni rappresentano l'ingresso non controllato di aria esterna. Durante il periodo in cui si necessita di energia di riscaldamento, l'aria esterna è tipicamente più fredda di quella interna, sia durante le ore notturne che diurne. Si tratta dunque di una maggiore quantità di aria che deve essere riscaldata ai fini del *comfort* termo-igrometrico e che concorre all'aumento di perdite dovute, ad esempio, al fatto che maggiori infiltrazioni comportano un abbassamento della temperatura degli elementi di involucro.

Nel caso del raffrescamento si assiste ad un effetto contrario: l'energia richiesta

in questo caso diminuisce all'aumentare delle infiltrazioni. In questo caso, l'aria esterna, specialmente nelle ore notturne, potrebbe essere ad una temperatura minore dell'aria interna, con conseguente inversione del gradiente termico. Le infiltrazioni d'aria fredda possono contribuire a raffreddare l'edificio riducendo il carico di raffreddamento richiesto dall'impianto di climatizzazione.

Nelle Figure 7.3 e 7.4 sono riportati i grafici raffiguranti l'andamento dei fabbisogni rispettivamente di riscaldamento e di raffreddamento al variare delle infiltrazioni, per i tre diversi modelli di calcolo. Nei grafici è evidente come, a prescindere dalla variazione dei valori di infiltrazione, i risultati più divergenti dal caso di calcolo dinamico dettagliato si ottengono nel caso del riscaldamento.

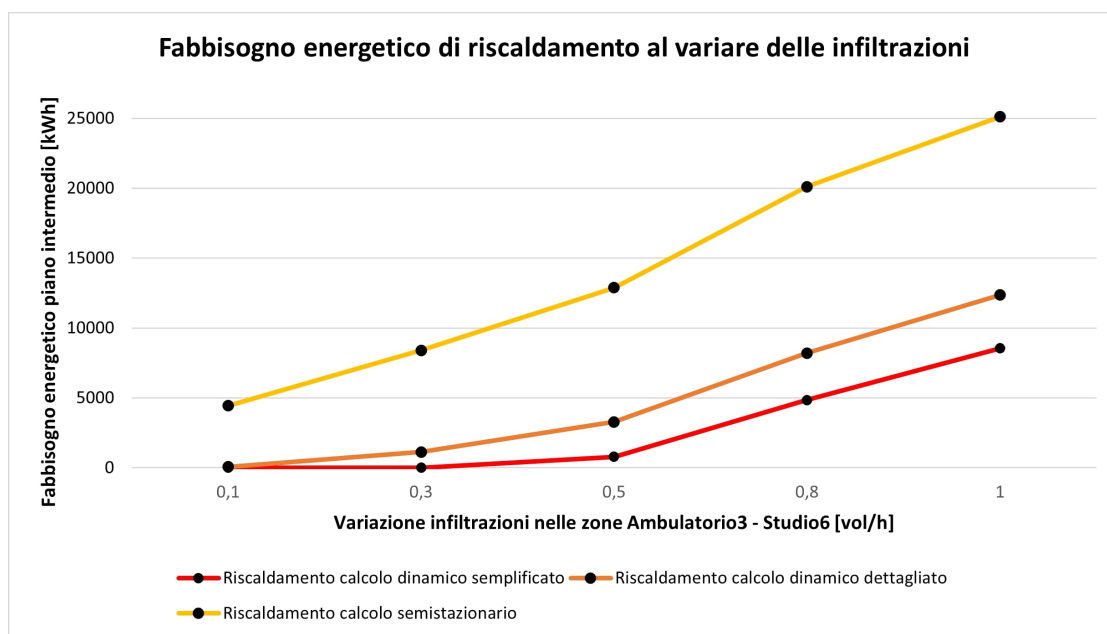


Figura 7.3: Confronto fabbisogno energetico di riscaldamento del piano intermedio al variare delle infiltrazioni nelle zone termiche "Ambulatorio3" e "Studio6" per le tre metodologie di calcolo.

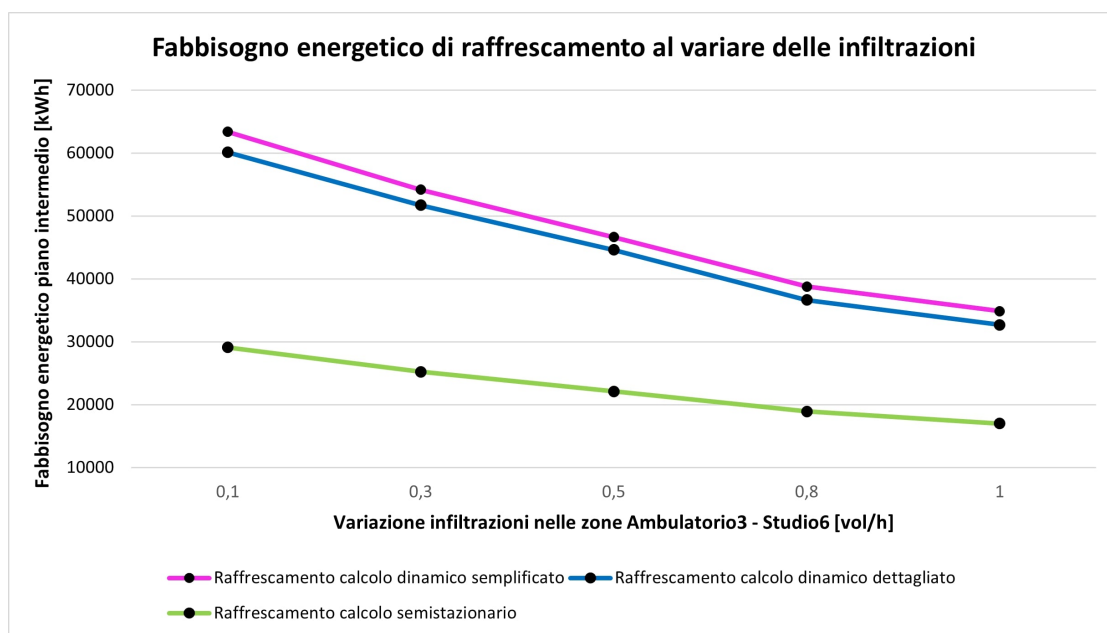


Figura 7.4: Confronto fabbisogno energetico di raffrescamento del piano intermedio al variare delle infiltrazioni nelle zone termiche "Ambulatorio3" e "Studio6" per le tre metodologie di calcolo.

Considerando i due modelli di calcolo dinamico, si nota come per il raffrescamento l'impatto maggiore si abbia a bassi tassi di infiltrazione: ciò può essere dovuto al fatto che, in caso di calcolo dettagliato, le perdite di calore vengono calcolate in maniera più complessa (ad esempio considerando anche le capacità termiche dei materiali), il che può portare a differenze più marcate nei risultati quando le condizioni di infiltrazione sono meno dominanti, cioè quando gli effetti dettagliati del comportamento dell'edificio diventano più significativi.

7.2.2 Variazione carichi endogeni

Similmente all'analisi di cui sopra, nelle tabelle che seguono sono riportati i risultati ottenuti dall'analisi effettuata con calcolo dinamico dettagliato e dinamico semplificato. In questo caso il calcolo semi-stazionario non è stato preso in considerazione dal momento che, per sua natura, non permette di imporre dei valori orari dei carichi interni. Lo studio è stato condotto andando a variare il valore dei $[W/m^2]$ dovuti ai carichi endogeni presenti negli ambienti selezionati per le analisi, rispettivamente per il riscaldamento e il raffrescamento.

La percentuale indicata si riferisce all'aumento/diminuzione dei carichi rispetto al loro valore nominale e per tutte e tre le tipologie di carico presente: occupanti, apparecchiature elettriche, apparecchi luminosi.

I risultati di fabbisogno energetico sono riportati sia per gli ambienti "Studio6" e "Ambulatorio3", sia per l'intero piano intermedio.

Calcolo dinamico dettagliato					
Fabbisogno energetico riscaldamento [kWh]					
Locale	0%	20%	50%	80%	100%
Studio 6	28'627	21'929	14'416	10'502	8'764
Ambulatorio 3	11'196	8'649	5'772	4'264	3'594
Totale	39'822	30'578	20'188	14'766	12'358
Variazione rispetto al caso base	222%	147%	63%	19%	-

Tabella 7.12: Fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento da calcolo dinamico dettagliato con *DesignBuilder* per diverse percentuali di carichi endogeni.

Calcolo dinamico dettagliato					
Fabbisogno energetico raffrescamento [kWh]					
Locale	0%	20%	50%	80%	100%
Studio 6	1'441	4'314	11'204	18'139	23'590
Ambulatorio 3	621	1'735	4'365	7'013	9'095
Totale	2'061	6'048	15'569	25'152	32'686
Variazione rispetto al caso base	-94%	-81%	-52%	-23%	-

Tabella 7.13: Fabbisogno energetico [kWh] per il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con *DesignBuilder* per diverse percentuali di carichi endogeni.

Come per l'analisi precedente, è evidente che la variazione percentuale che si ha andando a variare il valore dei carichi endogeni rispetto al caso base (ovvero quello in cui si mantengono inalterati i valori di *schedule* impostati come *input*) è molto più elevata nel caso del riscaldamento. Questo si traduce in un valore di fabbisogno di riscaldamento nel caso in cui gli apporti interni siano assenti di più di tre volte maggiore rispetto al caso iniziale.

Calcolo dinamico semplificato					
Fabbisogno energetico riscaldamento [kWh]					
Locale	0%	20%	50%	80%	100%
Studio 6	31'749	24'634	15'801	9'294	6'142
Ambulatorio 3	12'490	9'698	6'219	3'655	2'402
Totale	44'239	34'332	22'020	12'949	8'544
Variazione rispetto al caso base	418%	302%	158%	52%	-

Tabella 7.14: Fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima per diverse percentuali di carichi endogeni.

Calcolo dinamico semplificato					
Fabbisogno energetico raffrescamento [kWh]					
Locale	0%	20%	50%	80%	100%
Studio 6	1'423	3'881	9'671	18'057	25'026
Ambulatorio 3	572	1'544	3'818	7'105	9'830
Totale	1'995	5'425	13'489	25'162	34'856
Variazione rispetto al caso base	-94%	-84%	-61%	-28%	-

Tabella 7.15: Fabbisogno energetico [kWh] per il raffrescamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima per diverse percentuali di carichi endogeni.

Con l'analisi di sensibilità condotta variando i carichi endogeni, risulta che il calcolo dinamico semplificato è molto sensibile a tale variazione e in misura maggiore rispetto al caso dinamico dettagliato. Infatti, in questo caso si ottiene un valore di fabbisogno di riscaldamento nel caso di assenza di carichi endogeni di più di cinque volte maggiore rispetto al caso base.

L'andamento dei fabbisogni può essere apprezzato dai grafici di Figura 7.5 e 7.6, rispettivamente per il riscaldamento ed il raffrescamento. I grafici sono riportati sia per il caso di calcolo dinamico dettagliato sia per quello semplificato.

Dal momento che i valori di apporti interni sono inseriti in egual modo nei due *software* di calcolo e che profili giornalieri, fattori di occupazione e fattori di utilizzazione sono i medesimi, la differenza riscontrata tra gli *output* è da rimandarsi a come questi incidono sul sistema edificio e, in particolare, alle differenze che i due calcolatori presentano in termini di scambi di calore. Gli apporti interni, infatti, agiscono come fonte di calore all'interno dei locali: nel caso di riscaldamento si tratta di apporti gratuiti mentre nel caso di raffrescamento di elementi che gravano sul carico da asportare dall'ambiente. Il calcolo dinamico dettagliato considera

in modo più accurato la capacità termica dell'edificio e l'effetto dell'accumulo di calore sui fabbisogni energetici. Questi effetti di interazione tra accumulo di calore e rilascio risultano più evidenti per alcuni valori percentuali dei carichi endogeni rispetto al carico di base.

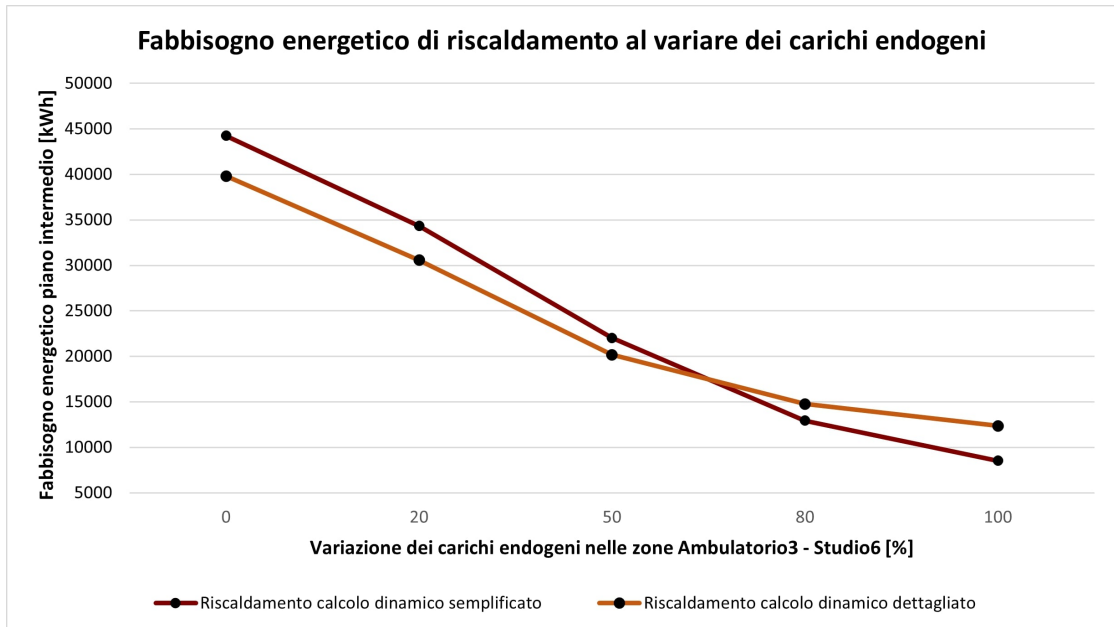


Figura 7.5: Confronto fabbisogno energetico di riscaldamento del piano intermedio al variare dei carichi endogeni nelle zone termiche "Ambulatorio3" e "Studio6" per le due metodologie di calcolo dinamico.

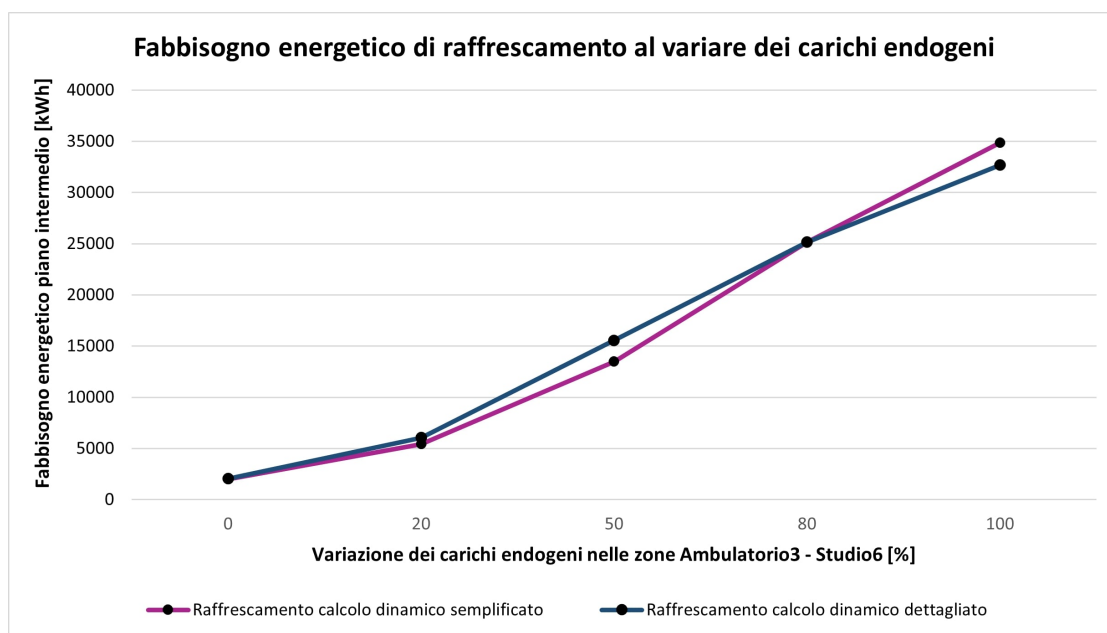


Figura 7.6: Confronto fabbisogno energetico di raffreddamento del piano intermedio al variare dei carichi endogeni nelle zone termiche "Ambulatorio3" e "Studio6" per le due metodologie di calcolo dinamico.

7.2.3 Variazione della frazione convettiva degli apporti interni

L'analisi di sensibilità riguardante la variazione della frazione convettiva degli apporti interni è stata effettuata a partire dalle linee guida dettate da UNI EN ISO 52016-1 per quanto concerne il calcolo dinamico semplificato. In Edilclima, secondo la Norma e come discusso al Paragrafo 5.5, è possibile definire un'unica frazione convettiva f_c riferita sia alle apparecchiature elettriche, sia agli apparecchi luminosi. La UNI EN ISO 52016-1 non distingue, infatti, tra apporti interni dovuti ad occupanti, apparecchiature e illuminazione, applicando di fatto una semplificazione e, per questo motivo, considera una sola frazione convettiva applicata a tutti gli apporti interni. Si tratta di una semplificazione apportata nel metodo di calcolo che non tiene conto del fatto che, diverse tipologie di apparecchi, avrebbero una quota di carico convettivo e radiante molto diverse (basti pensare alla differenza che si avrebbe in realtà tra un apparecchio elettrico fornito di ventola e un lampadina). Da Norma, il valore di frazione convettiva degli apporti interni f_c da utilizzare è impostato a 0.4 (si veda la Figura 5.3).

Discorso completamente diverso per il caso dinamico dettagliato: in questo caso la prima distinzione tra i valori di frazione convettiva e radiante viene fatta

tra apparecchi elettrici e luminosi; inoltre, sulla base della tipologia di ciascun apparecchio, viene considerata una frazione differente.

Dal momento che il programma Edilclima permette di specificare la frazione convettiva solo in fase di impostazioni di calcolo globali per la simulazione, senza dare la possibilità di specificare un valore per ciascun locale, in questo caso l'analisi è stata condotta su tutto il piano intermedio andando a forzare i valori di tutti gli ambienti su *DesignBuilder*. Nel primo caso si è semplicemente variato il valore di f_c dalle opzioni di calcolo implementata su Edilclima, nel secondo caso si sono variati puntualmente tutti i valori di frazione radiante per ciascun apparecchio in modo tale da ottenere il corrispettivo convettivo desiderato. Per valutare come la variazione di tale frazione incida sul fabbisogno energetico del piano intermedio, si è deciso di condurre le simulazioni su un piano tipologico (piano intermedio) per tre diversi valori di f_c :

- la prima analisi è stata condotta andando ad imporre che tutta la quota degli apporti interni fosse completamente radiativa impostando un valore di f_c pari a 0;
- la seconda analisi è stata effettuata non modificando il valore della frazione convettiva pari a 0.4 per il calcolo semplificato ma andando ad imporre tale valore per il calcolo dinamico dettagliato su tutti gli apparecchi, al fine di uniformare le condizioni dei due modelli;
- per ultimo, si è deciso di valutare una quota iteramente convettiva, con valore di f_c pari a 1.

Calcolo dinamico dettagliato		
Fabbisogno energetico piano intermedio [kWh]		
	Riscaldamento [kWh]	Raffrescamento [kWh]
fc=0	112'548	69'641
fc=0.4	115'934	76'696
fc=1	127'225	94'867

Tabella 7.16: Fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con *DesignBuilder* - Confronto dei fabbisogni rispetto alla variazione di frazione convettiva degli apporti interni (apparecchiature elettriche e apparecchi luminosi).

Risulta che il calcolo dinamico dettagliato è molto sensibile alla variazione della frazione convettiva degli apporti interni. Si apprezza, infatti, una variazione elevata tra il valore forzato a 0.4 (scelto per uniformare la condizione "base" con quella del calcolo dinamico semplificato) e i valori di frazione posti a 0 (per cui si ha

una diminuzione del 9% del fabbisogno di raffrescamento rispetto al caso base) e 1 (per cui si ottiene un aumento del 24%). Variazioni minori rispetto al caso base si hanno nel caso del riscaldamento (rispettivamente del 3% con $f_c = 0$ e del 10% con $f_c = 1$), il che significa che la sensibilità alla frazione convettiva dei carichi endogeni del calcolo dinamico dettagliato si riscontra maggiormente nel calcolo del fabbisogno energetico per raffrescamento. E' interessante notare che la forte sensibilità del calcolatore a questa analisi, porta ad ottenere dei valori di fabbisogno di energia di raffrescamento che passano, tra i due casi più estremi, da 69641 [kWh] a 94867 [kWh], con una variazione di fabbisogno nel caso completamente convettivo rispetto a quello completamente radiativo del 36%.

Calcolo dinamico semplificato		
Fabbisogno energetico piano intermedio [kWh]		
	Riscaldamento [kWh]	Raffrescamento [kWh]
fc=0	135'309	79'199
fc=0.4	137'553	81'886
fc=1	144'530	88'970

Tabella 7.17: Fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico semplificato con Edilclima - Confronto dei fabbisogni rispetto alla variazione di frazione convettiva degli apporti interni (apparecchiature elettriche e apparecchi luminosi).

I risultati ottenuti da calcolo dinamico semplificato di Tabella 7.17 indicano che la sensibilità alla variazione del valore della frazione convettiva nel calcolo del fabbisogno energetico di raffrescamento è presente ma in misura minore rispetto al caso dettagliato: infatti, in questo caso, si assiste ad una diminuzione del 3% passando dalla condizione di base a $f_c = 0$ ed un aumento del 9% nel caso di $f_c = 1$. Come nel caso precedente, il fabbisogno per il riscaldamento è anche qui meno interessato dalla variazione della frazione convettiva, con una variazione del 2 e del 3% rispetto al caso base, rispettivamente impostando un valore pari a 0 e pari 1.

In Tabella 7.18 è possibile visualizzare efficacemente la variazione percentuale del fabbisogno per riscaldamento e raffrescamento del calcolo dinamico semplificato rispetto a quello dettagliato. La variazione più alta si ha per valori minori di della frazione convettiva, con il massimo in corrispondenza di f_c pari a 1, ovvero nel caso in cui si supponga che il carico dato dagli apporti interni sia di natura interamente convettiva. Dal momento che la parte radiativa degli apporti è quella che è maggiormente legata agli effetti di accumulo o rilascio e sfasamento, è possibile intuire che ancora una volta venga confermato come le semplificazioni apportate al sistema nel caso di calcolo dinamico semplificato abbiano un riscontro in termini di fabbisogno energetico. Al contrario, la quota convettiva, che istantaneamente

prende parte al bilancio di energia sull'aria, risulta incidere in maniera meno significativa.

Gli andamenti dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento al variare della frazione convettiva sono mostrati in Figura 7.7

Padiglione 1 - Variazione percentuale fabbisogno energetico rispetto al dinamico dettagliato		
	Riscaldamento [kWh]	Raffrescamento [kWh]
fc=0	20%	14%
fc=0.4	19%	7%
fc=1	14%	-6%

Tabella 7.18: Confronto del fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico semplificato rispetto al calcolo dinamico dettagliato al variare della frazione convettiva.

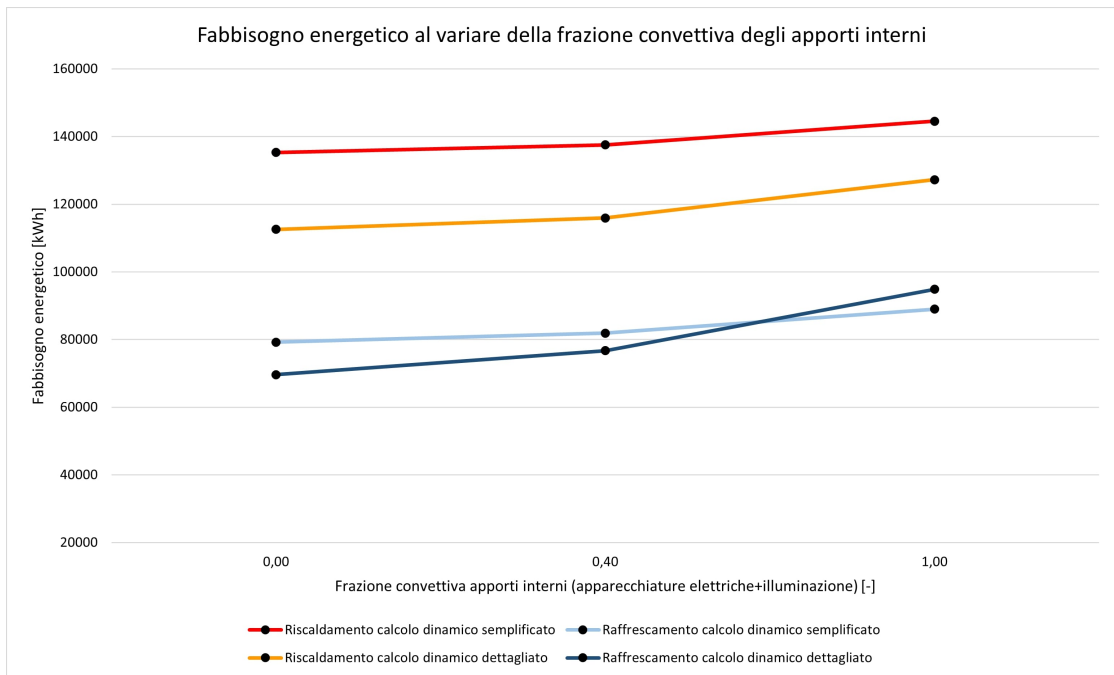


Figura 7.7: Confronto fabbisogno energetico di riscaldamento del piano intermedio al variare della frazione convettiva per le due metodologie di calcolo dinamico.

7.3 Analisi di implementazione di algoritmi e opzioni di calcolo per il metodo dinamico dettagliato

Le analisi che seguono riguardano esclusivamente il calcolo dinamico dettagliato, implementato tramite l'ausilio del motore di calcolo *EnergyPlus* e della sua interfaccia grafica *DesignBuilder*. Quest'ultimo *software*, infatti, permette di scegliere tra una vasta gamma di opzioni di calcolo per le simulazioni energetiche. In questa parte della tesi ne sono state scelte alcune al fine di condurre l'analisi.

7.3.1 Algoritmi di calcolo per la conduzione e la convezione

Come descritto ai Paragrafi 4.2 per la conduzione e 4.8 per la convezione, *DesignBuilder*, in quanto interfaccia grafica del calcolatore *EnergyPlus*, offre la possibilità di implementare diversi algoritmi di calcolo sulla base di come viene considerato il trasferimento di calore per conduzione e per convezione.

Questa parte dell'elaborato si pone come scopo quello di valutare come la scelta da parte del modellatore di implementare diversi algoritmi di calcolo possa o meno portare a riscontri differenti in termini di fabbisogni energetici.

In Tabella 7.19 sono riportate alcune delle combinazioni di algoritmi descritti ai Paragrafi 4.2 e 4.8 e implementati in questa analisi. Il primo caso vede l'implementazione dell'algoritmo CTF per la conduzione, TARP per la convezione interna e DOE-2 per quella esterna. Si tratta degli algoritmi impostati di *default* dal calcolatore e scelti per questo motivo come base per tutte le precedenti analisi.

DB - Fabbisogno energetico Padiglione 1 - Algoritmi di calcolo		
	Riscaldamento [kWh]	Raffrescamento [kWh]
1) CTF 2) TARP 3) DOE-2	598'469	281'704
1) DF 2) TARP 3) DOE-2	598'674	281'323
1) CTF 2) <i>Simple</i> 3) <i>Simple Combined</i>	653'617	259'684
1) DF 2) <i>Simple</i> 3) <i>Simple Combined</i>	653'787	259'838

Tabella 7.19: Fabbisogno energetico Padiglione 1 [kWh] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con *DesignBuilder* per diversi algoritmi di calcolo - 1) Algoritmo per la conduzione; 2) Algoritmo per la convezione interna; 3) Algoritmo per la convezione esterna.

Dagli *output* di fabbisogno energetico ottenuti si nota come la scelta di algoritmi di calcolo differenti non porti a delle discrepanze apprezzabili in termini di consumo energetico dell'intero Padiglione 1 nel momento in cui si varino le modalità di calcolo del trasferimento di calore per conduzione. In particolare, i due algoritmi di conduzione presi in considerazione sono le funzioni di trasferimento e le differenze finite. Questo effetto è in linea con il sistema edificio che è stato modellato, dal momento che differenze consistenti tra i due modelli di calcolo dovrebbero evidenziarsi nel caso di edificio con caratteristiche specifiche come, ad esempio, la presenza di materiali a cambiamento di fase nella stratigrafia degli elementi di involucro. In questa condizione, le differenze finite dovrebbero portare a risultati più affidabili. Risulta comunque importante valutare la maggiore pesantezza di calcolo dal punto di vista computazione che questo algoritmo di conduzione comporta.

Differentemente da quanto detto per gli algoritmi di calcolo per la conduzione, nel caso in cui si operi una scelta diversa negli algoritmi di calcolo per la convezione interna e la convezione esterna, i risultati sul fabbisogno energetico si modificano in maniera consistente, con una variazione di circa l'8% tra il caso di algoritmi TARP con DOE-2 e *Simple* con *Simple Combined* per il raffrescamento; nel caso di riscaldamento si arriva a variazioni di circa il 9%.

7.3.2 Calcolo della frazione latente per gli apporti dovuti all'occupazione

Come ultima analisi, è stato valutato il fabbisogno energetico per il riscaldamento ed il raffrescamento andando a variare l'opzione di calcolo riguardante la frazione latente degli apporti per occupazione. Il *Software DesignBuilder*, infatti, offre la possibilità di scegliere sia il calcolo con metodo dinamico, sia un valore mantenuto costante durante la simulazione, indipendentemente dalle condizioni. Nel primo caso la frazione latente viene calcolata all'interno di *EnergyPlus* in fase di esecuzione in base a come variano di ora in ora le condizioni di temperatura e del valore del tasso metabolico in $[W/persona]$.

Si è voluto valutare, per un piano tipo, come varia il fabbisogno variando tale opzione: i risultati ottenuti sono visualizzabili in Tabella 7.20.

Fabbisogno energetico Padiglione 1		
Calcolo frazione latente		
	Riscaldamento $[kWh]$	Raffrescamento $[kWh]$
Valore costante	619'806	279'916
Calcolo dinamico	598'469	281'704

Tabella 7.20: Fabbisogno energetico $[kWh]$ per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con *DesignBuilder* - Confronto in base al calcolo della frazione latente degli apporti per occupazione.

Risulta che rispetto al calcolo dinamico della frazione latente il fabbisogno per riscaldamento nel caso di frazione latente costante aumenta del 4% mentre quello per raffrescamento diminuisce dell'1%.

Per apprezzare come e se la scelta di variare questa opzione di calcolo porti ad una maggiore convergenza con i risultati ottenuti da calcolo dinamico semplificato, si riporta in Tabella 7.21 la variazione percentuale tra il fabbisogno calcolato da metodo dinamico semplificato rispetto a quello dettagliato sia nel caso di frazione latente costante (caso a) sia nel caso di calcolo dinamico della frazione latente (caso b).

Padiglione 1 - Confronto frazione latente costante (caso a)/da calcolo dinamico (caso b) e dinamico semplificato		
	Riscaldamento [kWh]	Raffrescamento [kWh]
Dinamico semplificato - Caso a	0.8%	1.8%
Dinamico semplificato - Caso b	4.4%	1,1%

Tabella 7.21: Confronto del fabbisogno energetico [kWh] per il riscaldamento e il raffrescamento da calcolo dinamico dettagliato con frazione costante/da calcolo dinamico con quello da calcolo dinamico semplificato.

Nel caso di riscaldamento si assiste ad una minore variazione percentuale tra calcolo dinamico semplificato e quello dettagliato con frazione latente costante, rispetto al caso di dinamico dettagliato con calcolo dinamico della frazione latente. Questo fenomeno potrebbe essere dovuto al fatto che, all'interno del *software* Edilclima, l'*input* richiesto nella sezione "profili orari" per gli apporti per occupazione riguarda unicamente il valore di apporto sensibile in [W/m^2] utilizzato per il calcolo dinamico mantenuto costante durante la simulazione, il che risulta in una maggiore affinità con i risultati ottenuti dal calcolo dinamico dettagliato con frazione latente costante.

Capitolo 8

Conclusioni

Dalla prima analisi effettuata emerge che, in questo caso studio specifico, anche se a livello di intero edificio le discrepanze sono meno evidenti, i fabbisogni energetici calcolati per singolo piano tipologico differiscono notevolmente in base alla metodologia di calcolo utilizzata. In particolare, tale differenza si nota anche tra i due modelli di calcolo dinamico (quello dettagliato e quello semplificato). Se l'edificio fosse formato da un unico piano sviluppato orizzontalmente, la differenza percentuale tra le due metodologie di calcolo sarebbe molto elevata. Questo implica che in caso si dovesse operare uno studio come, per esempio, una diagnosi energetica su di un singolo piano di un edificio energivoro come quello studiato, la scelta tra un calcolo dinamico dettagliato e uno semplificato potrebbe portare a risultati significativamente diversi.

Per quanto riguarda l'analisi di sensibilità effettuata variando le infiltrazioni, in edifici isolati e con alti carichi endogeni, come il caso proposto nello studio, il fabbisogno (soprattutto nel caso del riscaldamento) risulta fortemente influenzato dalle infiltrazioni. Tra i metodi di calcolo di fabbisogno energetico, quello dinamico semplificato risulta esserne inoltre il più influenzato. Quello delle infiltrazioni è un tema molto importante. Esse, infatti, risultano pesare molto sul risultato finale di fabbisogni energetici ma, d'altra parte, sono uno degli *input* più difficili da tenere in considerazione. Questo accade perché, sia che si abbia un edificio esistente che di nuova costruzione, si tratta di dati molto difficili da stimare e misurare rispetto a quanto accade per gli endogeni (ad esempio, nel caso di apparecchiatura risulta immediato risalire al dato di targa di assorbimento di energia, da cui l'apporto in ambiente). Il fatto che il contributo delle infiltrazioni abbia una tale rilevanza, evidenzia la necessità e l'importanza, soprattutto nel caso di edifici con carichi endogeni elevati e isolati termicamente, di prevedere un impianto ad aria fornito di recuperatore di calore.

Per quanto riguarda la variazione dei carichi endogeni, anche in questo caso il calcolo dinamico semplificato è il più sensibile, con la variazione maggiore osservata

per il riscaldamento.

La variazione della frazione convettiva influenza meno il fabbisogno di riscaldamento. Tuttavia, il calcolo dinamico dettagliato risulta essere il più sensibile a queste variazioni, probabilmente perché il metodo semplificato considera inizialmente una condizione standardizzata con un'unica frazione per tutti gli ambienti e gli apporti.

L'alta variabilità dei risultati, derivante dalla modifica delle variabili di influenza, sottolinea l'importanza fondamentale dell'accuratezza nell'inserimento dei dati di *input* per ottenere un'analisi energetica affidabile. L'importanza di tali analisi si riscontra, ad esempio, negli interventi di risparmio energetico dove la valutazione affidabile del potenziale risparmio è strettamente legata all'accuratezza con cui esse vengono condotte.

Infine, dallo studio condotto considerando unicamente il calcolo dinamico dettagliato tramite l'utilizzo del calcolatore *EnergyPlus*, si evince che la scelta dell'algoritmo di calcolo per il trasferimento di calore per conduzione non porta a differenze significative. Tuttavia, cambiare gli algoritmi di convezione provoca variazioni apprezzabili. Inoltre, l'implementazione del calcolo dinamico della frazione latente in *EnergyPlus*, rispetto a una frazione costante, accentua ulteriormente le differenze nei risultati ottenuti rispetto a quelli di Edilclima, che utilizza una frazione costante.

Bibliografia

- [1] Enrico Fabrizio e Ing Matteo Bilardo. «Building Performance Simulation (BPS)». it. In: () (cit. a p. 2).
- [2] «Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 aprile 2024, sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)». it. In: () (cit. a p. 2).
- [3] «E-book Logical Soft - Calcolo dinamico orario con la nuova UNI EN ISO 52016». it. In: () (cit. a p. 2).
- [4] CTI - Comitato Termotecnico Italiano. *Prestazioni energetiche degli edifici : le UNI/TS 11300*. Presentazione. 2008. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.infobuildenergia.it/Allegati/703.pdf> (cit. a p. 4).
- [5] Refrigerating and Air-Conditioning Engineers American Society of Heating, cur. *2009 ASHRAE Handbook: fundamentals*. en. Inch-pound ed. Atlanta, GA: ASHRAE, 2009. ISBN: 978-1-933742-54-0 (cit. alle pp. 6, 26, 31, 60, 73).
- [6] Technical Committee ISO/TC 163 and CEN/TC 89. *Energy Performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 1: Calculation procedures*. European Standard. 2017 (cit. alle pp. 6, 42).
- [7] Cellai Gianfranco, Martino Anna e Baggio Paolo. «Prestazioni energetiche degli edifici : le UNI/TS 11300». In: *Comitato Tecnico Italiano - Ente di normazione federato all'UNI* (2019). URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.infobuildenergia.it/Allegati/703.pdf> (cit. a p. 8).
- [8] CTI - Comitato Tecnico Italiano. *Prestazioni energetiche degli edifici Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*. Specifica Tecnica. Ottobre 2014 (cit. alle pp. 8, 9).
- [9] Dandri Fabio. «Glossario del bilancio termico dell'edificio». it. In: (2019) (cit. a p. 10).

- [10] U.S. Department of Energy. «EnergyPlus™ Version 22.1.0 Documentation». en. In: () (cit. alle pp. 40, 41).
- [11] Ilaria Ballarini, Andrea Costantino, Enrico Fabrizio e Vincenzo Corrado. «A Methodology to Investigate the Deviations between Simple and Detailed Dynamic Methods for the Building Energy Performance Assessment». en. In: *Energies* 13.23 (nov. 2020), p. 6217. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en13236217. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/23/6217> (visitato il 18/03/2024) (cit. a p. 42).
- [12] Mazzarella Livio, Scoccia Rossano, Colombo Paola e Motta Mario. «Improvement to EN ISO 52016-1:2017 hourly heat transfer through a wall assessment: the Italian National Annex». In: *Energy and Buildings* 210 (2020). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778819328439> (cit. a p. 42).
- [13] Corrado V., Ballarini I., De Luca G. e Tootkaboni M.P. «Approfondimento teorico del modello di calcolo orario semplificato (UNI EN ISO 52016-1:2018) e applicazione al settore residenziale». In: *Report Ricerca di Sistema Elettrico* (2019). URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www2.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/tecnologie-efficienza-risparmio-edifici/report-rds_ptr_2019_035.pdf (cit. a p. 43).
- [14] REHVA. *EPB Standards - Energy Performance of Buildings Standards*. 2024. URL: <https://www.rehva.eu/activities/epb-center-on-standardization/epb-standards-energy-performance-of-buildings-standards> (cit. alle pp. 44, 45).
- [15] European Committee for Standardization. *Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method*. European Standard. 2007 (cit. a p. 45).
- [16] Giovanna De Luca, Franz Bianco Mauthe Degerfeld, Ilaria Ballarini e Vincenzo Corrado. «Improvements of simplified hourly models for the energy assessment of buildings: The application of EN ISO 52016 in Italy». en. In: *Energy Reports* 8 (nov. 2022), pp. 7349–7359. ISSN: 23524847. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.05.120. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352484722009672> (visitato il 18/03/2024) (cit. a p. 54).
- [17] L. Evangelisti, C. Guattari e F. Asdrubali. «On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review». In: *Energy and Buildings* 183 (2019), pp. 607–625 (cit. a p. 55).
- [18] Marc Aubinet. «Longwave sky radiation parametrizations». In: *Solar Energy* 55 (1994). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038092X94904758> (cit. a p. 55).

- [19] UK NCM. *UK's National Calculation Method for Non Domestic Buildings*. Database. 2021. URL: <https://www.uk-ncm.org.uk/> (cit. alle pp. 60, 73).
- [20] DesignBuilder. *DesignBuilder FILE CLIMATICI ORARI - strumenti*. URL: <https://www.designbuilderitalia.it/file-climatici-risorse/> (cit. a p. 63).
- [21] Apache Tika Corpora. *Dati climatici "G.DE GIORGIO"*. URL: [corpora.tika.apache.org](http://tika.apache.org) (cit. a p. 63).
- [22] «Engineering Reference». en. In: (). URL: <https://bigladdersoftware.com/projects/elements/> (cit. a p. 63).
- [23] Università Mediterranea di Reggio Calabria Dipartimento di Agraria. «UNI TS 11300». In: (). URL: [1464_2022_552_39938%20PDF%20\(www.agraria.unirc.it\)](http://1464_2022_552_39938%20PDF%20(www.agraria.unirc.it)) (cit. a p. 68).
- [24] Ente Nazionale Italiano di Unificazione. *UNI EN ISO 6946:2008 - Edilizia - Elementi costruttivi - Prestazioni termiche dei componenti e dei prodotti edilizi - Calcolo della trasmittanza termica*. Norma. 2008 (cit. a p. 79).

