POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Architettura

Corso di Laurea Magistrale

in Architettura per il Progetto sostenibile

Dipartimento Energia – DENERG

Tesi di Laurea Magistrale

Qualità dell'ambiente interno e comportamento energetico di un edificio adibito ad uffici

– applicazione della EN 16798-1 –

Relatore

prof. Vincenzo Corrado

Candidato

Gabriel Sorin Fotache

Correlatore

Ilaria Ballarini

Luglio 2019

SOMMARIO

Il presente elaborato di tesi ha lo scopo di analizzare il comportamento energetico e la qualità dell'ambiente interno di un edificio adibito ad uffici (in questo caso si tratta di un edificio pubblico), applicando una nuova norma tecnica relativa alla prestazione energetica degli edifici, in corso di approvazione.

In primo luogo, viene analizzata la norma tecnica di riferimento, la EN 16798-1, la quale definisce i criteri minimi di qualità dell'ambiente interno che un edificio dovesse avere, ricoprendo ambiti quali il benessere termico, la qualità dell'aria interna (la quale dipende fortemente dalla ventilazione dei locali), l'umidità e l'illuminazione, nonché l'acustica. Essa fa parte di un nuovo pacchetto di norme tecniche che mirano ad unificare a livello internazionale le metodologie per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, il quale viene definito come pacchetto normativo EPBD.

Nella fase successiva si effettua l'analisi energetica grazie all'impiego di un software di simulazione dinamica, il quale è in grado di simulare il comportamento energetico dell'edificio. Questa fase si compone dapprima dalla descrizione dello strumento in maniera dettagliata, e poi dalla sua applicazione al caso studio evidenziato, argomentando in modo puntuale ciascuno dei parametri utilizzati. Il caso studio è un edificio pubblico esistente, tipico del patrimonio edilizio presente sul territorio. Esso è adibito ad uffici, con attività di carattere tipicamente sedentarie, ed è un caso rappresentativo di molti edifici del patrimonio edilizio pubblico. L'analisi del comfort termico, visivo e della qualità dell'aria dell'ambiente interno è stata effettuata utilizzando il profilo di utenza reale dell'edificio; esso è stato costruito sulla base di indagini e rilievi in sito. In questo modo viene analizzato il comportamento degli occupanti e come questo influisce sull'ambiente interno.

Infine, vengono testate alcune soluzioni progettuali, sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione dinamica, che possano migliorare la qualità dell'ambiente interno. Le soluzioni sono selezionate in modo da apportare migliorie relative all'involucro dell'edificio, opaco e trasparente, ad una migliore qualità dell'aria, nonché ad una migliore gestione dell'illuminazione artificiale. Tale gestione deve essere di tipo *user-friendly* per l'utente finale, in modo che quest'ultimo possa avere maggiore consapevolezza sull'uso dell'edificio al fine di beneficiare al massimo del comfort dell'ambiente interno che in questo modo si ottiene.

ABSTRACT

This thesis paper aims to analyze the energy behavior and the quality of the internal environment of an office building (in this case it is a public building), applying a new technical standard relating to the energy performance of buildings, being approved.

First, the reference technical standard is analyzed, EN 16798-1, which defines the minimum quality criteria of the internal environment that a building should have, covering areas such as thermal comfort, indoor air quality (which strongly depends on the ventilation of the premises), humidity and lighting, as well as acoustics. It is part of a new package of technical standards that aim to unify internationally the methodologies for assessing the energy performance of buildings, which is defined as an EPBD regulatory package.

In the next phase the energy analysis is carried out thanks to the use of a dynamic simulation software, which is able to simulate the energy behavior of the building. This phase is first composed by the description of the instrument in a detailed manner, and then by its application to the case study highlighted, punctually arguing each of the parameters used. The case study is an existing public building, typical of the building heritage in the area. It is used as offices, with typically sedentary activities, and is a representative case of many buildings in the public building heritage. The analysis of the thermal comfort, visual and air quality of the indoor environment was carried out using the real user profile of the building; it was built on the basis of surveys and surveys on site. In this way the behavior of the occupants is analyzed and how this affects the internal environment.

Finally, some design solutions are tested, based on the results obtained from the dynamic simulation, which can improve the quality of the internal environment. The solutions are selected so as to make improvements to the opaque and transparent building envelope, to a better air quality, as well as to a better management of artificial lighting. This management must be user-friendly for the end user, so that the latter can have greater awareness of the use of the building in order to fully benefit from the comfort of the internal environment that is obtained in this way.

INDICE

0. Introduzione I

0.1. Obiettivi II
0.2. Articolazione del lavoro III
0.3. Definizione parametri generali del progetto V
0.3.1. Edificio per uffici V
0.3.2. Periodo free-floating V
0.3.3. Utenza reale V

PARTE 1 - DEFINIZIONE DEGLI STRUMENTI DI LAVORO 1

1. Descrizione norma europea FprEN 16798-1 3

1.1. Introduzione e scopo della normativa 3
1.2. Ambiente termico 7
1.3. Qualità dell'aria e ventilazione 17
1.4. Illuminazione 37
1.5. Programmi di occupazione 45

2. Simulazione dinamica 49

2.1. Descrizione generale 49
2.2. EnergyPlus 55
2.3. Design Builder 57

PARTE 2 – IL CASO STUDIO 77

3. Presentazione del caso studio 79

3.1. Informazioni generali e contesto esterno 79
3.2. Il fabbricato 83
3.3. Questionario sul comportamento dell'utenza 97

4. Applicazione del metodo di calcolo dinamico al caso studio 105

4.1. Metodo di lavoro 105
4.2. Preparazione del modello 107
4.3. Dati costruttivi 129
4.4. Dati relativi all'utenza 141
4.5. Zonizzazione termica 149
4.6. Attività 153
4.7. Impianti 163

5. Simulazione e indici di comfort 169

5.1. Parametri di simulazione 169
5.2. Indici di comfort termico 173
5.3. Indici di qualità dell'aria 183
5.4. Indici di comfort visivo 193

PARTE 3 - PROGETTO 201
6. Progetto di miglioramento del comfort 203
6.1. Definizione degli interventi 205
6.2. Analisi delle soluzioni progettuali 207
6.3. Indice di comfort termico 219
6.4. Indice di qualità dell'aria 225
6.5. Indice di comfort visivo 231
7. Conclusioni 237
Riferimenti bibliografici 239
Bibliografia 239
Sitografia 244
Normativa tecnica 245
Indice delle figure 249
Indice delle tabelle 255

0. INTRODUZIONE

Il patrimonio edilizio di proprietà pubblica oggi in Italia è caratterizzato da strutture normalmente molto datate, che non sono in grado di garantire il comfort termico interno e la qualità dell'aria così come la intendiamo oggi. Tali problematiche possono essere risolte mediante interventi di riqualificazione energetica, la quale comporta tutta una serie di operazioni, tecnologiche e gestionali, volte al miglioramento della qualità prestazionale delle costruzioni esistenti dal punto di vista dell'efficienza energetica. In pratica, si tratta di razionalizzare i flussi energetici che intercorrono tra il sistema edificio e l'ambiente esterno.

Un intervento di retrofit energetico permette di ridurre i consumi di energia e di conseguenza ridurre le emissioni inquinanti e dunque l'impatto sull'ambiente. Esso agisce sul sistema edificio, ovvero sull'involucro edilizio opaco e trasparente (mediante l'incremento dell'isolamento termico, la sostituzione dei serramenti, l'installazione di schermature solari ecc.), nonché su tutti gli impianti a servizio del fabbricato (impianti di climatizzazione invernale e/o estiva, di illuminazione, di ventilazione, pannelli fotovoltaici e collettori solari). Un tale intervento, tuttavia, non può garantire che le prestazioni energetiche reali siano quanto meno simili a quelle di progetto, a meno che non si preveda anche una ottimizzazione della gestione dei servizi energetici. Una migliore gestione dell'edificio dipende sicuramente dal comportamento dell'utente in quanto, come si vedrà in seguito, può cambiare a valle dell'intervento di retrofit energetico: se precedentemente all'intervento l'utente era abituato ad utilizzare i servizi energetici con parsimonia al fine di contenere i consumi energetici e, di conseguenza, i costi energetici, in seguito si potrebbe riscontrare un maggiore consumo energetico da parte dell'utente, che vanificherebbe i vantaggi portati dall'intervento. Questo fenomeno viene comunemente identificato con il termine *rebound effect* [29] (o effetto boomerang). Questo fenomeno può essere tuttavia contenuto, sensibilizzando l'utente ai consumi energetici mediante ad un migliore controllo e gestione dell'energia utilizzata.

Gli interventi finalizzati al miglioramento delle prestazioni energetiche sono supportati da una vasta normativa di carattere legislativo a livello internazionale, europeo, nazionale ed anche locale (regionale e/o comunale), supportata a sua volta da una normativa di tipo tecnico. Quella più importante è sicuramente il *Decreto Ministeriale 26 giugno 2015 – Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, conosciuto anche come "Decreto requisiti minimi": tale norma, attualmente in vigore, subentra in seguito all'abrogazione della *Legge 9 gennaio 1991, n.10* [88].

Vi è inoltre un altro tipo di normativa, volta al miglioramento dell'impatto ambientale di una costruzione, solitamente conosciuta con il nome di *Criteri Ambientali Minimi* (CAM). Questi vengono introdotti in Italia grazie alla Legge 221 del 2015 [89] e, successivamente, dal Decreto legislativo 50 del 2016 [86], che ne hanno resa obbligatoria l'applicazione di tutte le stazioni appaltanti. Come definito dal Ministero dell'ambiente, "*i Criteri Ambientali Minimi (CAM) sono i requisiti ambientali definiti per le varie fasi del processo di acquisto, volti a individuare la soluzione progettuale, il prodotto o il servizio migliore sotto il profilo ambientale lungo il ciclo di vita, tenuto conto della disponibilità di mercato*" [23]. Imporre un simile obbligo può garantire che in materia di appalti pubblici venga messo in rilievo la riduzione dell'impatto ambientale e la promozione di modelli di produzione e consumo più sostenibili.

Infine, il comfort termico o benessere termo-igrometrico di un ambiente lavorativo è definito come "*condizione mentale di soddisfazione nei riguardi dell'ambiente termico*" [100], e influenza sensibilmente la salute dell'individuo. Il singolo ambiente di lavoro costituisce un microclima a sé stante, che induce negli individui una sensazione di soddisfazione, o insoddisfazione, per l'ambiente termico. Nello stato di benessere termico il soggetto non avverte né sensazioni di caldo né di freddo. Poiché la maggior parte della popolazione trascorre molto tempo all'interno di edifici chiusi è importante che le condizioni microclimatiche siano mantenute sotto controllo costante, a causa dei possibili danni che si possono arrecare ai lavoratori. Per tutelare la salute e la sicurezza dei lavoratori occorre misurare lo scostamento delle condizioni microclimatiche reali da quelle di benessere e intervenire affinché le condizioni di lavoro siano prossime a quelle di benessere.

Il buon esito di un lavoro simile dipende inoltre da quanto una situazione reale possa essere tradotta in un modello di calcolo, o meglio ancora, da quanto quest'ultimo si avvicina alla reale prestazione energetica dell'edificio. Come accennato in precedenza, ciò dipende innanzitutto dalle caratteristiche intrinseche dell'edificio stesso, ma anche dal comportamento degli utenti. Infatti, a tale proposito, il Dipartimento Energia[1] del Politecnico di Torino ha sottoposto ai lavoratori del Provveditorato agli studi di Torino il questionario *Assessment questionnaire on the utilization of the working spaces for energy audit* (*Questionario di valutazione sull'utilizzo degli spazi di lavoro per l'audit energetico*) in forma del tutto anonima, allo scopo di ottenere maggiori informazioni riguardo all'utilizzo di tutte le componenti del microclima lavorativo che possono incidere sul comfort dell'utente. Inoltre, il Dipartimento Energia, insieme al Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, ha stilato un rapporto[2] [11] riguardante la riqualificazione energetica di edifici scolastici pubblici, dove si applica il D.M. 26 giugno 2015, secondo l'Accordo di Programma. Quest'ultimo è relativo al Piano Annuale di Realizzazione del 2016, che ha come tema di ricerca gli "*edifici a energia quasi zero (nZEB)*", e nello specifico riguarda lo studio della riqualificazione energetica del patrimonio esistente di edifici pubblici che mira a raggiungere lo stato degli edifici a energia quasi zero.

0.1. Obiettivi

Con la presente tesi si intende studiare la qualità dell'ambiente interno di un edificio adibito ad uffici nel periodo free-floating, al fine di ottimizzare i consumi energetici ed il comfort termo-igrometrico.

L'argomento della presente segue le indicazioni contenute nella norma tecnica europea FprEN 16798-1 [97], la quale al momento è in fase di approvazione, aggiornata in data 19 maggio 2018. Essa è parte di una serie di norme che mirano ad uniformare le metodologie per la

---

[1] Il Dipartimento Energia (DENERG) è una struttura del Politecnico di Torino che si occupa di temi legati all'energia ed allo sviluppo sostenibile che hanno l'obiettivo di migliorare le tecnologie energetiche esistenti.

[2] Il rapporto prevede l'effettuazione della diagnosi energetica di un caso studio (Provveditorato agli Studi di Torino) e l'individuazione di una serie di interventi di retrofit che possono inquadrare l'edificio in una ristrutturazione di 1° livello, secondo le definizioni del D.M. 26/06/2015, che mirano a trasformare l'edificio esistente in edificio a energia quasi zero.

determinazione della prestazione energetica di un edificio. L'oggetto di questa prima parte del pacchetto normativo consiste nella definizione dei parametri ambientali interni di input per la progettazione e la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici che riguardano la qualità dell'aria interna, l'ambiente termico, l'illuminazione e l'acustica.

Per raggiungere l'obiettivo prefissato è stato scelto un caso studio a cui applicare il nuovo standard europeo. È stato selezionato il Provveditorato agli Studi di Torino, un edificio per uffici che si sviluppa su nove piani, di cui sette fuori terra. L'edificio rappresenta una situazione di edifici adibiti ad uffici, soprattutto nell'ambito pubblico, risalente tra gli anni Settanta e Ottanta dello scorso secolo; pertanto, in funzione del contesto storico, è possibile individuare la tecnica ed i materiali impiegati nella costruzione. Per gli standard odierni, queste caratteristiche sono lontane dal garantire una buona qualità dell'aria interna, ma può fungere da modello per altre casistiche simili.

Un altro elemento importante utile al raggiungimento dell'obiettivo è l'impiego di un software per la simulazione dinamica, quale EnergyPlus implementato all'interno di Design Builder. Come si vedrà in seguito, un simile software è in grado di eseguire calcoli molto complessi, in regime "dinamico" dettagliato, a differenza di molti altri software commerciali che invece lavorano normalmente in regime "stazionario". Al software sono stati forniti tutti i dati di input acquisiti dalle norme tecniche di riferimento, dai rilievi in sito, nonché dal questionario fornito agli utenti dello stabile. Questi ultimi dati definiscono l'utente reale, che è un altro aspetto fondamentale di questa tesi.

0.2. Articolazione del lavoro

L'elaborato si articola sostanzialmente in tre parti. Nella prima parte vengono presentati gli strumenti utili allo svolgimento del lavoro. Tali strumenti sono la norma europea FprEN 16798-1 ed il software Design Builder. Nella seconda parte viene presentato il caso studio, mediante la descrizione dell'edificio e degli elaborati grafici, e viene descritto il processo di applicazione del software di simulazione dinamica al fabbricato; inoltre, vengono analizzati e processati i risultati ottenuti dalla simulazione al fine di poter costruire gli indici di comfort. La terza parte, infine, illustra alcune delle soluzioni progettuali che possono fornire una migliore gestione dell'edificio da parte dell'utente, e che possa portare ad un miglioramento della qualità dell'ambiente interno.

Di seguito, viene indicato lo schema che illustra la composizione dell'elaborato di tesi.

PARTE 1 – DEFINIZIONE DEGLI STRUMENTI DI LAVORO

Capitolo 1, Descrizione norma europea FprEN 16798-1 – Nel capitolo vengono descritte le principali caratteristiche della norma, quali lo scopo finale e gli ambiti ricoperti. Essa è una guida per i progettisti che assicuri una corretta progettazione della qualità dell'ambiente interno. Inoltre, fornisce gli strumenti utili alla promulgazione di norme e regolamenti a livello nazionale e/o locale, strumenti similari a quelli utilizzati per definire questo standard europeo. Lo studio della norma ha portato inoltre riferimenti a diverse altre norme tecniche da consultare e applicare, alcune delle quali fanno parte del pacchetto di norme per la prestazione energetica degli edifici; la maggior parte di queste ultime sono già in vigore.

Capitolo 2, Simulazione dinamica – I software di calcolo dinamico prendono sempre più piede all'interno delle organizzazioni professionali e didattiche. Questo viene incentivato anche da una sempre più crescente normativa che ne definisce e ne regola l'utilizzo. Essi possono garantire risultati più aderenti alla realtà rispetto a quelli stazionari o semi-stazionari.

PARTE 2 – IL CASO STUDIO

Capitolo 3, Presentazione del caso studio – Nel presente capitolo viene presentato l'edificio oggetto di studio dal punto di vista architettonico. Questo aspetto è importante al fine di capire gli spazi e l'edificio in sé, fase da non sottovalutare nel momento in cui, successivamente, verrà modellato in Design Builder. Occorre tenere presente che il questionario fornito agli utenti ha permesso di definire il profilo dell'utente reale, profilo che stabilisce il comportamento della singola persona in relazione all'uso degli spazi interni, alla regolazione della temperatura nella stagione invernale, all'apertura delle finestre o all'uso di ventilatori (o di climatizzatori a split dove fossero presenti) per raffrescare l'ambiente durante la stagione estiva, nonché alla regolazione dell'illuminazione artificiale e schermature durante tutto l'anno.

Capitolo 4, Applicazione del calcolo dinamico al caso studio – In Design Builder si è proceduto dapprima ad una modellazione di tipo geometrico-grafica, la quale definisce gli spazi interni suddivisi in funzione della destinazione d'uso, come anche gli spazi esterni, utili prevalentemente alla definizione degli ombreggiamenti dovuti agli edifici circostanti. Successivamente sono stati associati i dati di composizione delle stratigrafie che compongono l'edificio e quelli relativi alle aperture. Infine sono stati inseriti i dati ed i profili dell'utenza per poter eseguire la simulazione. Tali dati riguardano le attività metaboliche, i ricambi d'aria, gli apporti termici gratuiti dovuti a irraggiamento solare, ma anche alle apparecchiature da ufficio, e l'illuminazione.

Capitolo 5, Simulazione e output del software – La simulazione vera e propria, quindi, mostra i risultati del lavoro svolto. I risultati ottenuti sono stati estrapolati dal software, analizzati e rielaborati tramite foglio di calcolo utilizzando il software Microsoft Excel. Qui, sono stati calcolati e definiti gli indici di qualità dell'ambiente interno, quali l'indice di comfort termico, l'indice di qualità dell'aria e l'indice di comfort visivo. I dati analizzati si presentano sia in forma tabellare che in forma grafica, al fine di avere una visione più chiara dei risultati ottenuti.

PARTE 3 – PROGETTO

Capitolo 6, Progetto di miglioramento del comfort – Nel capitolo vengono proposte alcune soluzioni che possano migliorare la gestione dell'ambiente interno da parte degli utenti. Esse riguardano l'involucro dell'edificio, opaco e trasparente, che influenza prevalentemente il comfort termico, il sistema di ventilazione meccanica che sopperisce alle criticità dovute alla ventilazione naturale specialmente nelle stagioni intermedie, ed il sistema di illuminazione artificiale, il quale può essere del tutto automatizzato in relazione alla presenza di occupanti ed alla luce diurna.

0.3. Definizione parametri generali del progetto

0.3.1. Edificio per uffici

L'edificio oggetto di studio è costituito da sette piani fuori terra e due piani seminterrati. Questi ultimi sono prevalentemente ad uso archivio ed anche a sala riunioni (secondo piano seminterrato). I piani fuori terra sono caratterizzati da 82 uffici, e sono normalmente disposti sui lati lunghi in pianta, aventi orientamento rispettivamente verso Nord e Sud, serviti da un corridoio centrale. In ciascuno degli uffici sono presenti normalmente uno o due occupanti.

0.3.2. Periodo free-floating

Il periodo free-floating è un periodo nell'anno solare in cui l'impianto di riscaldamento e/o di raffrescamento è spento oppure assente. In questo caso l'impianto di raffrescamento non è presente, per cui il comfort termico dipende solamente dalle caratteristiche dell'edificio (quali l'involucro opaco, l'involucro trasparente, le eventuali schermature) e dal comportamento degli utenti.

Tale periodo inizia nel momento in cui finisce la stagione invernale e finisce con l'inizio di quest'ultima; più precisamente questo periodo ricopre un arco temporale che va dal 16 aprile fino al 14 ottobre. In altre parole, si può dire che il periodo di free-floating inizia e finisce rispettivamente nel momento in cui l'impianto di riscaldamento viene spento ed acceso.

0.3.3. Utenza reale

Il profilo di utenza reale permette di indicare in maniera più corretta il periodo della giornata lavorativa, e di conseguenza della settimana lavorativa, nonché dei momenti in cui l'edificio non è occupato. I dati che permettono di definire un profilo di utenza reale provengono dal questionario di valutazione dell'utilizzazione degli ambienti lavorativi per la revisione energetica che il Dipartimento Energia (DENERG) del Politecnico di Torino ha fornito agli attuali lavoratori del Provveditorato agli Studi di Torino. Tale questionario propone diversi quesiti, come illustrato nel Capitolo 3, e ciascuna domanda prevede un numero diverso di opzioni di risposta.

Il questionario viene trattato in forma anonima.

PARTE 1 -
DEFINIZIONE DEGLI STRUMENTI DI LAVORO

1. DESCRIZIONE NORMA EUROPEA FPREN 16798-1

1.1. Introduzione e scopo della normativa

La norma tecnica in oggetto di studio è uno Standard Europeo facente parte di una serie di norme aventi il fine di uniformare la metodologia per la valutazione della prestazione energetica degli edifici. La raccolta di norme viene chiamata *set di norme EPB* ("set of EPB standards"). La norma fornisce metodi, dati di input richiesti e riferimenti ad altre norme EPB grazie all'introduzione di modelli normativi nelle appendici, indicando anche scelte informative di default.

La norma in oggetto recepisce i requisiti della Direttiva 2010/31/EU[3] [93] del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, riguardante le prestazioni energetiche dell'edificio, che viene successivamente tradotto a livello nazionale nel Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015. Inoltre, andrà a sostituire la norma tecnica UNI EN 15251:2008 [118], intitolata "*Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica*"; essa a sua volta è stata concepita in modo da recepire le linee guida della Direttiva 2002/91/CE[4] [91].

Il gruppo di norme è indirizzato prevalentemente agli utenti professionisti, quali architetti, ingegneri e legislatori. Per quanto riguarda questi ultimi, l'introduzione di una legislazione a livello nazionale o locale, possono fare scelte obbligatorie per tali specifiche applicazioni. Tali scelte, che devono seguire le indicazioni riportate nelle Appendici A e B della presente norma, possono essere validate come appendici alla legislazione nazionale o locale o presentarle in un documento separato. Questa norma può essere superata da norme e regolamenti a livello nazionale o regionale.

Essa specifica parametri dell'ambiente interno richiesti per il comfort termico, la qualità dell'aria interna, l'illuminazione e l'acustica. Specifica, inoltre, come stabilire questi parametri per la progettazione del sistema di costruzione e i calcoli della prestazione energetica. Lo standard utilizza generalmente due tipologie di edifici, quali il residenziale ed il non residenziale. La presente tesi farà riferimento solamente ai parametri ed alle indicazioni riportati per la categoria di edifici non residenziali, essendo il caso studio adibito ad uffici.

---

[3] Il tema principale riguarda il miglioramento della prestazione energetica degli edifici all'interno dell'Unione, tenendo in considerazioni le condizioni climatiche esterne locali, il clima degli ambienti interni e l'efficacia dal punto di vista dei costi (art. 1). Inoltre, introduce e definisce il concetto di "*edificio a energia quasi* zero" sia dal punto di vista tecnico che finanziario. Il tema inoltre è di grande attualità anche per il mondo della normazione tecnica, che porta all'introduzione della specifica tecnica UNI/TS 11300, che funge tuttora da riferimento per la legislazione a livello nazionale per la determinazione delle prestazioni energetiche.

[4] Essa dettava le prime misure volte a promuovere il rendimento energetico degli edifici della Comunità, stabilendo i requisiti minimi di efficienza cui dovevano sottostare i nuovi edifici. In Italia è stata recepita con il Decreto legislativo n. 192 del 2005, e successivi provvedimenti attuativi.

La norma è valida quando i criteri per l'ambiente interno sono regolati dall'occupazione umana e dove la produzione o i processi lavorativi non hanno un maggiore impatto sull'ambiente interno. Vengono specificati inoltre i programmi di occupazione da utilizzare nei calcoli energetici e come diverse categorie per l'ambiente interno possono essere usate.

Non vengono specificati i metodi di progetto, ma piuttosto vengono forniti i parametri di input al progetto dell'involucro dell'edificio, dei sistemi di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione ed illuminazione. Maggiori informazioni sono fornite dal Report Tecnico che accompagna questa norma, riportate nel FprCEN/TR 16798-2 [98], anch'esso in fase di preparazione.

La Parte 1 di questo gruppo di norme comprende due appendici: l'Appendice A è caratterizzata da informazioni e tabelle di riferimento (senza valori), da usare come riferimento per la stesura della legislazione a livello nazionale, mentre l'Appendice B riporta le tabelle con i valori di default.

La qualità dell'ambiente interno implica un consumo di energia degli edifici, il quale dipende da diversi fattori quali: il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione e l'illuminazione. Inoltre, i consumi energetici dipendono in grande misura anche dalle caratteristiche dell'edificio, quali la composizione dell'involucro e la scelta degli impianti, nonché dal suo funzionamento nella fase di esercizio. Recenti studi hanno ampiamente dimostrato che la qualità dell'ambiente interno influenza sensibilmente la salute, la produttività ed il comfort degli occupanti. Una buona qualità dell'ambiente interno ha un effetto positivo, migliorando complessivamente il lavoro e l'apprendimento degli occupanti, riducendo di conseguenza l'assenteismo. Invece, una qualità dell'ambiente interno scadente incide innanzitutto sui costi energetici: sono considerevolmente più alti rispetto ai costi dell'energia usati per lo stesso edificio, dal punto di vista del datore di lavoro, del proprietario dell'edificio o per la società. In secondo luogo, gli occupanti che non si trovano in un ambiente confortevole danno vita ad azioni che possano migliorare la propria situazione di comfort, che di conseguenza possono portare a complicazioni dal punto di vista energetico, come ad esempio aprire le finestre, modificare la temperatura interna, e così via.

La qualità dell'ambiente interno dipende dunque da fattori di discomfort locale, quali la corrente d'aria, l'asimmetria della temperatura radiante, differenze della temperatura dell'aria verticale e temperatura della superficie del pavimento. Lo Standard definisce i criteri di progetto che definiscono i limiti dei fattori di discomfort locale entro i quali si possa avere una buona qualità dell'ambiente interno, in funzione della categoria di ambiente interno, indicato con IEQ (Indoor Environmental Quality).

I criteri per l'ambiente interno che la norma fornisce definiscono la progettazione, il dimensionamento ed i relativi calcoli energetici della progettazione dell'edificio, degli impianti di condizionamento ed i sistemi di illuminazione. Dal punto di vista termico, vengono definiti i dati di input per i calcoli dei carichi per il progetto di riscaldamento e di raffrescamento, nonché il dimensionamento ed i relativi calcoli energetici. Lo stesso vale per i tassi di ventilazione. Per quanto riguarda l'illuminazione, oltre a definire il progetto, la norma include anche l'uso dell'illuminazione diurna. Le categorie di qualità ambientale interna IEQ sono riportate nella Tabella 1.1.

Tabella 1.1. Categorie di qualità dell'ambiente interno

Categoria	Livello di aspettativa
IEQ_I	Alto
IEQ_{II}	Medio
IEQ_{III}	Moderato
IEQ_{IV}	Basso

Un livello di qualità normale è definito come *Medio*. Il livello *Alto* viene utilizzato quando all'interno dell'ambiente sono presenti occupanti con particolari necessità, come per esempio bambini, anziani, persone disabili ecc. Il livello *Basso* non fornisce rischi per la salute, ma diminuisce il comfort.

1.2. Ambiente termico

Per *ambiente termico* si intende un ambiente di lavoro del personale, con particolare riferimento alla condizione termica dell'organismo e quindi ai flussi termici ed alle grandezze termiche che interessano il colpo; queste generano nei singoli soggetti sensazioni di caldo o di freddo. L'uomo può essere considerato come un sistema energetico separato dall'ambiente, soggetto a flussi di energia entranti e uscenti, e capace di trasformare energia in seguito a reazioni chimiche legate al metabolismo. La sensazione termica provata in un ambiente viene formulato dai singoli soggetti in corrispondenza di certi valori assunti da alcune grandezze fisico-tecniche. In condizioni stazionarie, la sensazione di benessere termo-igrometrico dipende principalmente da sei grandezze, quali:

- temperatura dell'aria;
- temperatura media radiante delle superfici che delimitano l'ambiente;
- umidità relativa dell'aria;
- velocità dell'aria;
- attività fisica svolta;
- abbigliamento.

Le prime quattro grandezze fisiche elencate sono di carattere *oggettivo* o *ambientali* e dipendono dalle caratteristiche dell'ambiente termico di riferimento, mentre le ultime due sono di carattere *soggettivo*, relative alle attività che l'individuo svolge all'interno dell'ambiente e al tipo di vestiario.

"*Il corpo umano è un sistema che, attraverso un elevato numero di trasformazioni chimiche molto complesse, trasforma la potenziale energia chimica presente negli alimenti in altre forme di energia, prevalentemente in quella termica*" [12]. Tali trasformazioni vengono definite come *metabolismo*. La quantità di energia derivata dalle attività metaboliche deve essere uguale a quella ceduta all'ambiente sotto forma di energia termica o lavoro; in caso contrario, l'energia termica si accumula oppure si disperde, andando a gravare sul bilancio energetico, e causare un conseguente aumento o diminuzione della temperatura corporea. Quest'ultima, tuttavia, definita anche *isotermia*, viene mantenuta costante dal sistema di termoregolazione del corpo umano. L'energia termica generata dal corpo umano viene dispersa all'interno dell'ambiente attraverso la pelle per convezione e irraggiamento (dovute ad una differenza di temperatura tra la superficie della pelle e l'aria circostante, e la temperatura media radiante delle pareti che circondano il corpo), ed anche per evaporazione.

Nella letteratura tecnica, il parametro di tipo soggettivo, quale l'abbigliamento, viene definito tramite il metodo scientifico dalla norma tecnica UNI EN ISO 9920[5] [102]. Mentre nella prima parte della norma vengono definite le metodologie di calcolo per la stima dell'isolamento

[5] La norma specifica i metodi di valutazione delle caratteristiche termiche in condizioni stazionarie per l'abbigliamento, basandosi sui valori di resistenza termica dei tessuti, dei capi di abbigliamento e degli insiemi di questi ultimi. Essa esamina inoltre l'influenza del movimento corporeo e della penetrazione dell'aria sull'isolamento termico e sulla resistenza evaporativa.

termico e della resistenza al vapore acqueo dell'abbigliamento, che riguardano sia i singoli capi di abbigliamento che gli insiemi, nelle appendici, in particolare l'Appendice A, vengono definiti in modo tabellare i valori puntuali, con la possibilità dunque di costruire degli insiemi, a seconda del caso in oggetto. Per una stima più semplificata del valore dell'isolamento termico fornito dal vestiario, si può fare riferimento anche alle tabelle riportate nelle appendici della norma tecnica UNI EN ISO 7730[6] [100]. Da queste tabelle si possono dunque estrapolare i valori sia della resistenza termica dei singoli indumenti quotidiani o da lavoro, sia quelli relativi ad uno specifico insieme di capi di abbigliamento. Il metabolismo energetico si valuta utilizzando la UNI EN ISO 8996[7] [101], oppure l'appendice B della UNI EN ISO 7730, in funzione del tipo di lavoro che il soggetto è tenuto a svolgere. Durante l'attività lavorativa gran parte dell'energia metabolica viene trasformata in calore, mentre solo in minima parte viene convertita in energia meccanica (lavoro utile).

"*Il comfort termico è definito come "stato psicofisico in cui il soggetto esprime soddisfazione nei riguardi del microclima" oppure come "condizione in cui il soggetto non ammette nessuna sensazione di caldo o di freddo", condizione questa che viene detta di "neutralità termica"* " [12]. Il comfort termico è suddivisibile nelle seguenti due categorie:

- globale, se si vuole studiare il comportamento del corpo nella sua interezza;
- locale, o localizzato, se si vuole studiare solo il comportamento relativo a specifiche zone del corpo.

Per valutare il grado di discomfort all'interno degli ambienti di lavoro è necessario determinare con precisione i valori di tutte le grandezze microclimatiche (oggettive e soggettive). La loro corretta determinazione è fondamentale per ottenere risultati che descrivano correttamente il rischio legato al microclima. Si deve pertanto, al fine di valutare l'influenza di un eventuale scostamento delle condizioni che effettivamente sono riscontrate in un ambiente con quelle di comfort globale, ricorrere ai cosiddetti *indici di comfort globale*, che devono assumere lo stesso valore per tutte le combinazioni delle variabili che danno uguali sensazioni termiche. Nella norma tecnica di riferimento, l'ambiente termico è suddiviso in due principali categorie, quali:

- edifici con ventilazione meccanica;
- edifici senza ventilazione meccanica.

---

[6] La norma presenta metodi per prevedere la sensazione termica globale ed il grado di disagio (insoddisfazione termica) delle persone esposte in ambienti termici moderati. Essa consente la determinazione analitica del benessere termico mediante il calcolo del PMV e del PPD e dei criteri di benessere termico locale, fornendo le condizioni ambientali considerate accettabili per il benessere termico globale così come quelle che rappresentano il disagio locale. La norma è stata elaborata specificamente per gli ambienti di lavoro, ma è applicabile a qualunque altro tipo di ambiente.

[7] La norma specifica vari metodi per la determinazione del metabolismo energetico nell'ambito dell'ergonomia degli ambienti termici di lavoro.

Edifici con ventilazione meccanica

Nel primo caso, ovvero quando l'edificio in oggetto è servito da un impianto di ventilazione meccanica per il riscaldamento e/o il raffrescamento degli ambienti, i criteri di progettazione devono basarsi sugli indici di comfort termico PMV e PPD. Tali indici, che rappresentano rispettivamente il *Predicted Mean Vote* (Voto Medio Previsto) ed il *Predicted Percentage of Dissatisfied* (Percentuale Prevista di Insoddisfatti) sono definiti dalla norma tecnica UNI EN ISO 7730.

L'indice di benessere termo-igrometrico PMV fornisce una previsione del valore medio dei voti di un gruppo di persone sulla base di una scala di sensazione termica a sette punti, come in Tabella 1.2, basato sul bilancio di energia termica sul corpo umano. Tale bilancio è verificato quando la produzione interna di energia termica uguaglia la quantità di energia termica ceduta all'ambiente. Si deve inoltre tenere presente che in un ambiente moderato, il sistema di termoregolazione del corpo umano provvede autonomamente a modificare la temperatura superficiale della pelle e la secrezione di sudore al fine di garantire l'equilibrio termico.

Esso può essere calcolato per differenti combinazioni di metabolismo energetico, isolamento dell'abbigliamento, temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità dell'aria e umidità dell'aria; viene normalmente calcolato in condizioni di regime stazionario. L'indice può essere determinato per via analitica, utilizzando l'equazione contenuta nella UNI 7730 (è necessario munirsi di un calcolatore, di cui viene fornito un esempio di programma in BASIC nell'Appendice D), per via tabellare direttamente dall'Appendice E oppure tramite misurazione diretta. Tale indice, infine, permette di verificare se i requisiti di un determinato ambiente soddisfa i criteri di benessere termo-igrometrico; in caso ciò non avvenisse è possibile partire da una condizione ottimale di neutralità termica e, andando a ritroso, determinare i valori dei parametri da migliorare.

Tabella 1.2. Sensazione termica a sette punti

Voto	Descrizione
+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Abbastanza caldo
0	Né caldo né freddo
-1	Abbastanza freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

L'indice di benessere termo-igrometrico PPD fornisce invece una previsione quantitativa della percentuale di persone termicamente insoddisfatte, che sentono troppo caldo o troppo freddo. Esso è funzione del precedente indice. Nella Figura 1.1 si ha una diretta relazione fra i due indici, che permettono di comprendere meglio il benessere termo-igrometrico, in relazione a quanto già affrontato.

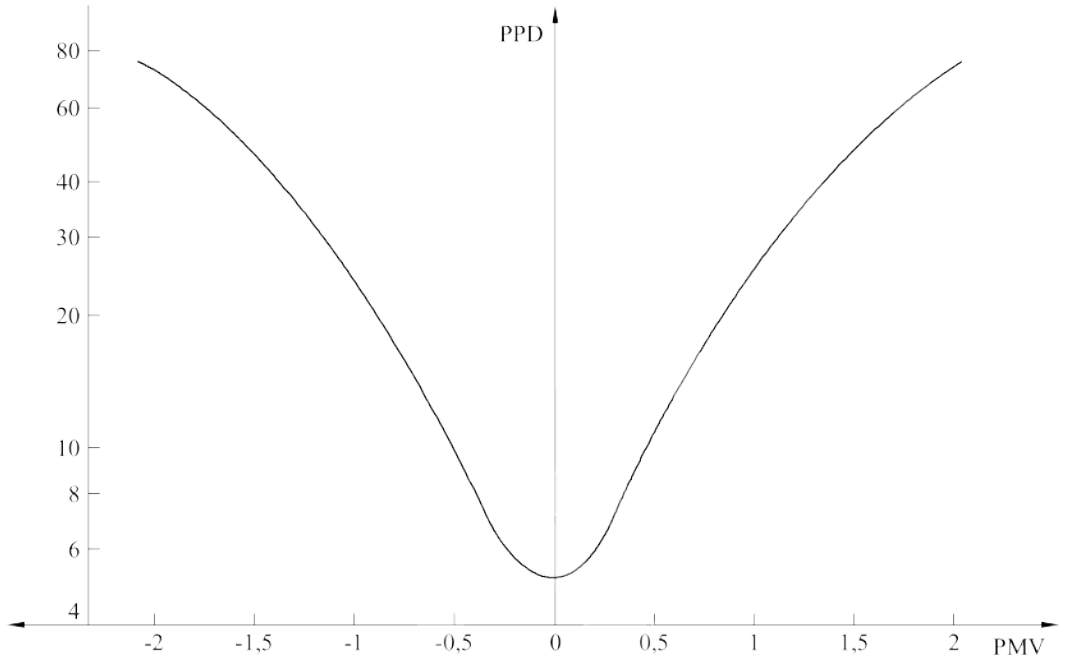


Figura 1.1. Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto medio previsto (PMV)

Di conseguenza, si possono assumere dei valori di riferimento per gli indici di benessere termo-igrometrico PMV-PPD in relazione questa volta alle categorie di qualità dell'ambiente interno. Come illustrato nella Tabella 1.3, a ciascuna categoria corrispondono valori di PMV e PPD sempre meno restrittivi a mano a mano che questa scende di livello. In altri termini, la categoria IV di qualità dell'ambiente interno non prevede rischi per la salute delle persone particolarmente rilevanti, nonostante si abbia un sensibile discomfort termico; pertanto i valori degli indici PMV e PPD sono piuttosto elevati. Al contrario, la categoria I, ovvero quella legata ad occupanti con particolari necessità (come ad esempio bambini, anziani, persone diversamente abili, ecc.), presenta valori decisamente più stringenti, al fine dunque di garantire un maggiore benessere termo-igrometrico.

Tabella 1.3. Valori di riferimento per gli indici di benessere termo-igrometrico per gli edifici serviti da impianti meccanizzati

Categoria	Stato termico del corpo nel suo insieme	
	Predicted Percentage of Dissatisfied PPD [%]	Predicted Mean Vote PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	< 25	-1,0 < PMV < +1,0

L'insoddisfazione termica può essere causata anche da un indesiderato raffreddamento o riscaldamento di una parte del corpo. Le cause più comuni del disagio locale si verificano in presenza di una corrente d'aria, di una differenza verticale di temperatura dell'aria (tra il livello della testa e quello delle caviglie), di un pavimento troppo caldo o troppo freddo, oppure di una asimmetria della temperatura radiante troppo elevata. Le persone più sensibili al disagio locale sono quelle che svolgono attività leggere e sedentarie (non adattabili), mentre livelli di attività più elevati determinano un rischio di disagio locale minore in quanto le persone sono meno sensibili (adattabili).

Come detto in precedenza, il benessere termico è la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico, tuttavia, a causa delle diversità individuali, non è possibile individuare un ambiente termico che soddisfi le esigenze di tutte le persone. Spesso una persona può essere sensibile a diverse cause di disagio locale.

Edifici senza ventilazione meccanica

Occorre precisare che la norma tecnica prende in considerazione la temperatura operativa[8] dell'ambiente termico. Nella presente norma, la temperatura operante è funzione della temperatura esterna media ponderata, suddivisa nei limiti superiore ed inferiore, ed in riferimento alle prime tre delle quattro categorie di qualità dell'ambiente interno. Il limite superiore indicato nella norma vale per la progettazione degli edifici e per il controllo termico passivo, come ad esempio l'orientamento dei sistemi vetrati e le relative schermature, la capacità termica dell'edificio, il dimensionamento delle vetrate azionabili dall'utente, ecc. Nella Figura 1.2 si possono osservare le rette relative alla temperatura operativa in funzione delle categorie di qualità dell'ambiente interno e dei due limiti imposti, nonché la retta della temperatura operativa ottimale.

Anche in questo caso sono stati definiti valori di temperatura operativa interna in funzione delle quattro categorie di qualità dell'ambiente interno, come evidenziato nella Tabella 1.4. Per ottenere dei valori di progetto più dettagliati, al fine di garantire uno strumento più completo al progettista, sono state prese in considerazione le stagioni di riscaldamento e raffrescamento degli ambienti, nonché la tipologia di edificio: in questo caso sono state selezionate le tipologie più diffuse, ossia quella residenziale e gli edifici ad uffici e similari. Viene inoltre evidenziato il tipo di attività delle persone di riferimento.

La temperatura operativa dell'ambiente interno potrebbe subire delle fluttuazioni entro un intervallo secondo le caratteristiche di risparmio energetico o un algoritmo di controllo. I metodi per stimare l'eventuale eccesso di temperatura operativa sono riportati nel Rapporto Tecnico FprCEN/TR 16798-2, mentre alcuni valori di riferimento per la fase di riscaldamento e di

[8] La temperatura operativa è la temperatura uniforme di un ambiente fittizio in cui un soggetto scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa quantità di energia termica che scambia nell'ambiente reale, generalmente non uniforme. Essa è data dalla combinazione tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante: nella pratica si può considerare pari alla media aritmetica delle due temperature.

raffrescamento dell'edificio sono rappresentati nella Tabella 1.5. Questi valori sono indicati nel calcolo dell'energia per riscaldamento e/o raffrescamento secondo il metodo orario.

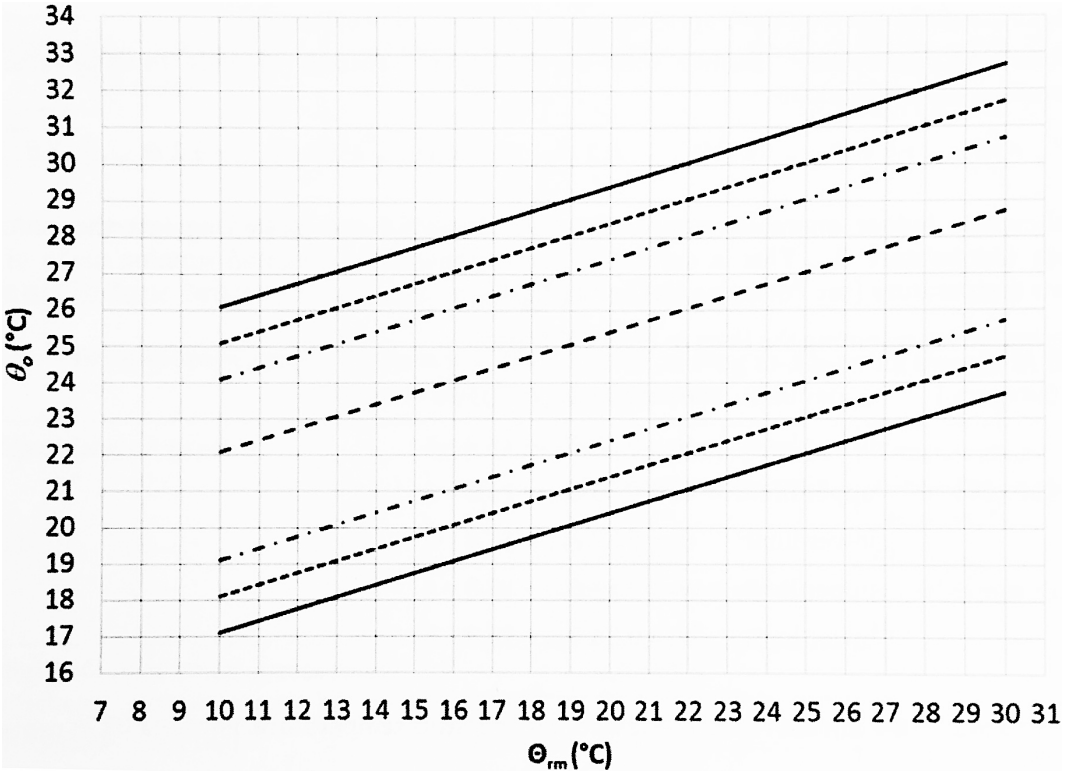


Figura 1.2. Valori di progetto per la temperatura operativa interna per edifici senza sistemi di raffrescamento meccanico in funzione della temperatura media esterna

Tabella 1.4. Valori di progetto per la temperatura operativa interna in inverno ed estate per edifici sprovvisti di sistemi di ventilazione meccanica

Tipologia di edificio\	Categoria	Temperatura operativa [°C]	
		Stagione invernale Circa 1 [clo]	Stagione estiva Circa 0,5 [clo]
Edifici residenziali, spazi di abitazione (camera da letto, soggiorno, cucina, ecc.) Attività sedentaria ~ 1,2 [met]	I	21	25,5
	II	20	26
	III	18	27
	IV	16	28
Uffici e spazi con attività simili (uffici singoli, uffici open space, sala conferenze, auditorium, caffetteria, ristoranti, aule scolastiche, ecc.) Attività sedentaria ~ 1,2 [met]	I	21	25,5
	II	20	26
	III	19	27
	IV	18	28

Quando si hanno invece edifici sprovvisti di ventilazione meccanica per il riscaldamento e/o per il raffrescamento degli ambienti interni, i criteri che definiscono l'ambiente termico possono seguire le indicazioni riferite agli edifici con la presenza di ventilazione meccanica, come sopra descritti, oppure seguire un metodo adattato che tenga in considerazione gli effetti di adattamento. Tale metodo si applica solamente quando si è in presenza di utenti che svolgono attività lavorative di tipo sedentario, che non hanno un regolamento restrittivo riguardo all'abbigliamento da lavoro, e dove le condizioni microclimatiche sono regolate principalmente dagli stessi occupanti attraverso l'apertura o la chiusura di elementi dell'involucro dell'edificio (quali ad esempio finestre, bocchette di ventilazione, lucernari, ecc.). Generalmente, un metodo simile si applica ad edifici per uffici, o comunque simili, quando si ha un'occupazione con attività sedentarie e dove l'accesso ad elementi apribili è facile. Inoltre, gli occupanti possono adattare il proprio abbigliamento liberamente, in funzione delle condizioni climatiche dell'ambiente interno e/o esterno. Un esempio di edificio con simili caratteristiche si può riscontrare negli edifici a carattere residenziale.

Negli edifici in cui è assente il sistema di ventilazione meccanica dunque tale metodo adattivo si rispecchia nel metodo che considera la temperatura operativa. Bisogna tuttavia fare alcune precisazioni: per quanto concerne l'attività progettuale che ha come riferimento temporale la stagione invernale, i valori della temperatura operativa da utilizzare sono quelli della Tabella 1.4; quando invece nell'attività progettuale il riferimento temporale è la stagione estiva e/o le mezze stagioni (primavera e autunno), definito anche come periodo di *free-floating* si devono seguire le indicazioni fornite dalla Figura 1.2 precedentemente illustrata. Tali indicazioni rappresentano il risultato illustrato graficamente dell'applicazione dell'equazione (1.1). La temperatura operativa viene calcolata dunque in funzione della temperatura esterna media pesata su base giornaliera. Come definito in precedenza, essa viene calcolata distintamente per ciascuna categoria di qualità dell'ambiente interno, suddivisa in limite superiore ed inferiore:

Categoria I	limite superiore	$\theta_{\mathrm{o}} = 0{,}33\,\theta_{\mathrm{rm}} + 18{,}8 + 2$	(1.1)
	limite inferiore	$\theta_{\mathrm{o}} = 0{,}33\,\theta_{\mathrm{rm}} + 18{,}8 - 3$	(1.1)
Categoria II	limite superiore	$\theta_{\mathrm{o}} = 0{,}33\,\theta_{\mathrm{rm}} + 18{,}8 + 3$	(1.1)
	limite inferiore	$\theta_{\mathrm{o}} = 0{,}33\,\theta_{\mathrm{rm}} + 18{,}8 - 4$	(1.1)
Categoria III	limite superiore	$\theta_{\mathrm{o}} = 0{,}33\,\theta_{\mathrm{rm}} + 18{,}8 + 4$	(1.1)
	limite inferiore	$\theta_{\mathrm{o}} = 0{,}33\,\theta_{\mathrm{rm}} + 18{,}8 - 5$	(1.1)

La temperatura operativa ottimale invece viene definita dall'equazione (1.2):

$$\theta_c = 0{,}33\ \theta_{rm} + 18{,}8 \qquad (1.2)$$

dove:

θ_o è la temperatura operativa interna, in [°C]
θ_{rm} è la temperatura esterna media pesata, in [°C]
θ_c è la temperatura operativa ottimale, in [°C]

I limiti entro cui viene calcolata la temperatura operante rispetta un valore di temperatura esterna media pesata minima pari a 10 °C e una massima pari a 30 °C.

La temperatura esterna media pesata viene a sua volta calcolata mediante l'equazione (1.3). Essa viene calcolata giornalmente, al fine di ottenere dati maggiormente accurati nella successiva analisi energetica dell'edificio rispetto a dati di tipo stagionale o mensile, sulla base delle temperature dell'aria esterna misurate nei giorni precedenti rispetto a quello considerato. In questi casi può risultare utile predisporre un foglio di calcolo mediante l'uso dello strumento Microsoft Excel, per poter gestire al meglio una simile quantità di dati e di generare illustrazioni grafiche utili a una migliore lettura e comprensione dei dati analizzati.

$$\theta_{rm} = \frac{\sum_{j=1}^{\infty}(\theta_{ed-j} \bullet \alpha^{j-1})}{\sum_{j=1}^{\infty} \alpha^{j-1}} \qquad (1.3)$$

dove:

θ_{rm} è la temperatura media esterna per il giorno considerato, in [°C]
θ_{ed-1} è la temperatura media dell'aria esterna per il giorno precedente, in [°C]
θ_{ed-i} è la temperatura media dell'aria esterna per l'*i-esimo* giorno precedente, in [°C]
α è una costante compresa tra 0 e 1 (il valore consigliato è pari a 0,8), [-]

Si precisa che anche in questo caso la temperatura operativa può essere soggetta a variazioni, come riportato in Tabella 1.5. La temperatura operativa media di progetto può variare rispetto ai valori mostrati per tenere conto, per esempio, del desiderio del risparmio energetico, fino a quando la variazione giornaliera dalla temperatura di progetto rimane entro l'intervallo indicato, e gli occupanti hanno il tempo e l'opportunità per adattarsi alla temperatura così modificata.

Nel particolare caso della stagione estiva, quando si una temperatura operativa interna maggiore di 25 °C si può utilizzare un aumento della velocità dell'aria per compensare l'incremento della temperatura interna, come illustrato nella Tabella 1.6. Tuttavia, la velocità dell'aria deve rimanere sotto stretto controllo, diversamente si può incorrere in una velocità non sufficiente a produrre gli effetti desiderati, oppure nel caso opposto generare una sensazione di discomfort termico, dovuta alla corrente d'aria.

Tabella 1.5. Intervallo di temperature per il calcolo orario dell'energia di riscaldamento e raffrescamento in funzione delle quattro categorie di ambiente indoor

Tipologia di edificio	Categoria	Intervallo di temperatura per la stagione di riscaldamento [°C]	Intervallo di temperatura per la stagione di raffrescamento [°C]
Edifici residenziali, spazi di abitazione (camera letto, soggiorno, cucina, ecc.) Attività sedentaria ~ 1,2 [met]	I	21,0 – 25,0	23,5 – 25,5
	II	20,0 – 25,0	23,0 – 26,0
	III	18,0 – 25,0	22,0 – 27,0
	IV	17,0 – 25,0	21,0 – 28,0
Edifici residenziali, altri spazi (locali di servizio, ripostiglio, ecc.) Attività in piedi – cammino ~ 1,5 [met]	I	18,0 – 25,0	
	II	16,0 – 25,0	
	III	14,0 – 25,0	
	IV		
Uffici e spazi con attività simili (uffici singoli, uffici open space, sala conferenze, auditorium, caffetteria, ristoranti, aule scolastiche, ecc.) Attività sedentaria ~ 1,2 [met]	I	21,0 – 23,0	23,5 – 25,5
	II	20,0 – 24,0	23,0 – 26,0
	III	19,0 – 25,0	22,0 – 27,0
	IV	17,0 – 25,0	21,0 – 28,0

Nei periodi compresi tra le stagioni di riscaldamento e di raffrescamento, ovvero quando di si hanno temperature esterne medie pesate comprese tra 10 e 15 °C, i valori limite della temperatura interna che devono essere utilizzati si trovano tra i valori compresi fra le stagioni, invernale ed estiva. La velocità dell'aria assunta per il calcolo è inferiore a 0,1 [m/s], mentre l'umidità relativa è pari a circa il 40% e 60% rispettivamente per le stagioni di riscaldamento e raffrescamento.

Tabella 1.6. Correzione della temperatura operativa interna, applicabile ad edifici muniti di ventole o sistemi con cui gli occupanti possono agire sulla velocità dell'aria

Velocità media dell'aria [m/s]	0,6	0,9	2,2
Temperatura [K]	1,2	1,8	2,2

1.3. Qualità dell'aria e ventilazione

La *qualità dell'aria interna* (*Indoor Air Quality* o *IAQ*), come definito sul sito del Ministero della Salute [25], "*si riferisce all'aria interna che si respira negli ambienti confinati, quali:*

- *abitazioni;*
- *uffici pubblici e privati;*
- *strutture comunitarie (ospedali, scuole, uffici, caserme, alberghi, banche);*
- *ambienti destinati ad attività ricreative e sociali (cinema, bar, ristoranti, negozi, strutture sportive);*
- *mezzi di trasporto pubblici e/o privati (auto, treno, nave, ecc.)*".

La qualità dell'aria interna dipende essenzialmente dai seguenti parametri:

- controllo della fonte degli inquinanti;
- ventilazione degli ambienti interni;
- filtrazione e pulizia dell'aria.

L'aria presente all'interno degli ambienti chiusi proviene dall'esterno mediante ventilazione. Questa può essere di tipo *naturale* oppure di tipo *meccanico*. Si ricorre a quest'ultima normalmente quando la ventilazione naturale non è sufficiente a garantire una buona qualità dell'aria interna, che dipende principalmente dalle caratteristiche dell'involucro dell'edificio, ma anche da caratteristiche intrinseche degli ambienti, come ad esempio il numero di occupanti presenti, il tipo di attività svolta, e così via. La ventilazione meccanica oltre a garantire una buona qualità dell'aria indoor, abbinata ai sistemi di riscaldamento e/o raffrescamento dell'edificio è in grado di garantire anche il benessere termo-igrometrico, precedentemente descritto. Esiste inoltre una terza forma di ventilazione definita *ibrida*, che mette in relazione quella naturale e meccanica, per sfruttare al meglio le diverse caratteristiche.

Negli ambienti chiusi o semi-chiusi l'ossigeno presente nell'aria viene gradualmente a consumarsi, mentre attraverso i processi di respirazione e di traspirazione umana vengono immessi nell'aria alcuni componenti, quali: vapore acqueo, anidride carbonica CO_2, e altre sostanze organiche. In presenza di una ventilazione inadeguata dell'aria l'accumulo di sostanze inquinanti causa una diminuzione della qualità dell'aria indoor, portando di conseguenza rischi per la salute umana. Con un'adeguata ventilazione l'aria viziata viene diluita con l'aria esterna diminuendo così la concentrazione delle sostanze inquinanti prodotte dalle fonti interne; si elimina di conseguenza anche il vapore acqueo in eccesso.

L'*inquinamento indoor* (o *indoor pollution*), secondo il Ministero della Salute, si definisce come "*la modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica interna, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria stessa, e tali da costituire un pericolo, ovvero un pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo*" [26]. A differenza dell'inquinamento dell'aria atmosferica esterna, il quale è oggetto di attenzione e di studio da molto più tempo ed i cui effetti sulla salute dell'uomo sono piuttosto rilevanti, da diversi anni esiste la necessità di approfondire maggiormente le conoscenze riguardo all'inquinamento dell'ambiente interno, in quanto gli effetti di questo fenomeno risultano piuttosto allarmanti.

L'inquinamento dell'aria indoor influisce negativamente sulla salute delle persone e sulla produttività. Come riportato sul sito del Ministero della Salute, da alcune indagini condotte a livello europeo risulta che "*la popolazione dei centri urbani trascorre in media il 95-97% del tempo negli ambienti confinati privati e pubblici (oltre 20 ore al giorno, delle quali circa la metà nella propria abitazione) e solo l'1% nell'ambiente esterno (outdoor). Recenti studi di settore hanno confermato che, in presenza di fonti interne e con bassi livelli di ricircolo dell'aria, i livelli degli inquinanti riscontrabili negli ambienti indoor (in particolare i livelli dei composti organici volatili COV), possono essere superiori rispetto a quelli rilevati all'esterno, talvolta anche 10-20 volte maggiori, come nel caso della formaldeide [...]. Normalmente, gli occupanti degli edifici risultano esposti non a una singola sostanza, ma a una miscela di sostanze inquinanti, in concentrazioni variabili nello spazio e nel tempo, emesse da sorgenti che possono essere differenti per numero e tipologia*" [26].

Sorgenti di inquinamento dell'ambiente interno

Le sostanze in grado di alterare la qualità dell'aria interna possono essere classificate come:

- agenti chimici;
- agenti fisici;
- agenti biologici.

Gli agenti chimici presenti nell'aria dell'ambiente interno si presentano sotto forma di gas, che provengono di solito dall'aria esterna, ma molti di questi sono prodotti da fonti interne. Gli inquinanti più comuni che determinano un rischio chimico sono i seguenti:

- fumo di tabacco (ETS);
- ossido e biossido di azoto (NO_x, NO_2);
- ossidi di zolfo (SO_x)
- monossido di carbonio (CO);
- ozono (O_3);
- particolato aerodisperso (PM_{10}, $PM_{2.5}$);
- benzene (C_6H_6);
- composti organici volatili (COV o VOC);
- formaldeide (CH_2O);
- idrocarburi aromatici policiclici (IPA);
- amianto e fibre minerali sintetiche.

Per definizione, i *VOCs* sono composti chimici organici dotati di elevata tensione di vapore a temperatura ambiente e basso punto di ebollizione (da circa -50 °C a 260 °C), che provoca l'evaporazione di molte molecole dalla fase liquida o solida presente nel composto verso l'aria indoor [36]. Un esempio tipico è costituito dalla formaldeide che, con il suo punto di ebollizione pari a -19 °C, evapora lentamente dalle vernici, dalle pitture, dai collanti e così via, entrando nell'aria. Essi sono presenti in molti manufatti o sostanze naturali, e non presentano una tossicità acuta, ma possono avere effetti nocivi a lungo termine sulla salute umana. La loro

concentrazione in aria è generalmente molto bassa e i sintomi sull'uomo si sviluppano lentamente.

Le principali sorgenti di VOC sono rappresentate dalle seguenti categorie:

- attività umane;
- emissioni dai materiali da costruzione e arredo;
- uso di prodotti per la casa e per la pulizia degli ambienti;
- infiltrazione di aria esterna.

Le attività umane che contribuiscono all'aumento degli inquinanti chimici nell'aria indoor sono caratterizzate dal fumo di tabacco passivo, la cottura dei cibi ed il riscaldamento degli ambienti. In generale, anche i fenomeni di combustione delle biomasse (per via di una maggiore diffusione di stufe e caminetti) costituiscono fonti di inquinamento.

Quando si parla di emissioni nocive dovute ai materiali da costruzione, si possono scindere in primarie e secondarie: le prime sono dovute al rilascio di composti volatili presenti nel materiale, la cui velocità di emissione dipende dalla diffusione dei VOC all'interno del prodotto e dall'evaporazione della sostanza volatile dalla superficie del prodotto verso l'aria dell'ambiente; le seconde sono caratterizzate da composti prodotti a seguito di reazioni chimiche che hanno luogo all'interno del prodotto stesso o sulla superficie del prodotto a contatto con l'aria o nell'aria indoor, e si verifica una velocità di emissione sensibilmente più bassa rispetto alle emissioni primarie. In questo caso, il problema delle emissioni perdura durante tutto il ciclo di vita utile dell'edificio. Nel momento in cui la costruzione dell'edificio viene terminata vi sono maggiori rischi di contaminazioni di VOC dovuti ai nuovi materiali. Tale rischio diminuisce con il passare del tempo, in questo caso in termini di mesi, e di pari passo si verifica un progressivo degrado fisiologico dell'edificio, e, di conseguenza, vengono rilasciati ulteriori inquinanti nell'ambiente.

L'invecchiamento dei materiali da costruzione ad opera di agenti chimici[9] (ozono, umidità) o fisici (calore e radiazioni UV) può causare emissioni secondarie differite nel tempo, che contribuiscono all'inquinamento indoor.

Gli agenti fisici che incidono sulla qualità dell'aria sono il radon, i campi elettromagnetici (CEM) ed il rumore. Il *radon*[10] [3] è un elemento chimico naturale, radioattivo, incolore, inodore e insapore, appartenente alla famiglia dei gas nobili o inerti: è estremamente volatile e non reagisce con altri elementi. Esso, per le sue caratteristiche chimico-fisiche fuoriesce dal sottosuolo e in atmosfera si disperde rapidamente e non raggiunge quasi mai elevate concentrazioni, ma negli ambienti confinati (abitazioni, scuole, ambienti da lavoro, ecc.) può raggiungere livelli di concentrazioni tali da rappresentare un rischio per la salute degli

---

[9] L'aria indoor contiene molte molecole reattive e radicali liberi, come l'ozono (O_3), gli ossidi di azoto (NO_x), i radicali idrossilici (OH•) e l'anidride solforosa (SO_2), generati dalle attività umane (vapori di cottura, UV, ecc.) o che penetrano dall'esterno.

[10] Maggiori dettagli sono disponibili sul sito di ARPA Piemonte, all'indirizzo: http://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/radioattivita/radon/radon. (ARPA Piemonte, 2015)

occupanti. Il radon è nocivo perché è radioattivo: decadendo produce nell'aria elementi a loro volta radioattivi. Le nuove particelle hanno vita breve, ma si attaccano al pulviscolo e, se inalati, decadono all'interno dei polmoni emettendo radiazioni ionizzanti, le quali producono di conseguenza un danno alle cellule bronco-polmonari che può evolversi in tumore. La norma di riferimento per questo gas è il Decreto Legislativo del 26 maggio 2000, n. 214 [82], che recepisce la Direttiva Europea 96/29/Euratom [90].

L'*inquinamento elettromagnetico* è legato alla generazione di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici artificiali prodotti da:

- impianti radio-TV e per telefonia mobile e altri impianti utilizzati per la trasmissione di informazioni attraverso la propagazione di onde elettromagnetiche;
- impianti utilizzati per il trasporto e la trasformazione dell'energia elettrica;
- centrali di produzione fino all'utilizzatore in ambiente urbano (elettrodotti);
- impianti per lavorazioni industriali;
- tutti quei dispositivi che per funzionare richiedono un'alimentazione di rete elettrica.

Il *rischio biologico* è legato alla presenza nell'aria degli ambienti interni di microrganismi (funghi, batteri, virus, parassiti), allergeni e muffe. I rischi sono classificati in tre tipologie: infettivo, tossico e allergico, e gli effetti si possono manifestare con diversa intensità in relazione a vari fattori quali le condizioni fisiche e la suscettibilità di ciascun individuo.

Nella Tabella 1.7 sono stati raggruppati alcuni dei principali agenti di inquinamento dell'aria degli ambienti interni, di cui sopra. La tabella è stata riprodotto sulla base di quella pubblicata sul sito del Ministero della Salute[11].

Un'altra potenziale causa dell'aumento dell'inquinamento indoor è caratterizzata dalla maggiore efficienza in termini energetici dell'edificio. Quando la necessità per contenere i consumi per riscaldamento e/o raffrescamento dell'edificio prese piede, si diffusero tecniche costruttive sempre più all'avanguardia. Tendenzialmente, l'involucro edilizio, nelle sue due componenti opaco e trasparente, è migliorato grazie ad un isolamento termico sempre più massiccio e infissi con grado di tenuta sempre maggiore. Queste migliorie hanno sì comportato notevoli benefici dal punto di vista termico, ma altrettanti svantaggi per quanto riguarda la ventilazione: la ventilazione naturale, o infiltrazione, in questo caso è caratterizzata da una significativa diminuzione del numero di ricambi d'aria.

Si possono dunque mettere in evidenza diverse considerazioni riguardo all'inquinamento indoor. Per prima cosa, l'aria indoor può essere più inquinata di quella esterna, ma soprattutto ha un impatto più significativo sulla salute delle persone in quanto queste vi sono esposte per un periodo della giornata molto lungo. Anche piccole concentrazioni di inquinanti presenti nell'aria possono causare effetti a lungo termine se costanti nel tempo e negli ambienti più frequentati, come quelli dell'abitazione, del lavoro, dei trasporti pubblici e così via. Bisogna

[11] La tabella citata è consultabile sul sito del Ministero della Salute, al seguente indirizzo: http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4389&area=indor&menu=vuoto.

inoltre tenere in considerazione il fatto che alcune persone (anziani, bambini, malati cronici) sono più sensibili e dunque più soggette a effetti nocivi sulla propria salute rispetto ad altre persone. Inoltre, l'esposizione prolungata ad alcuni inquinanti presenti nell'aria indoor può essere responsabile di patologie specifiche, o dell'aggravamento di patologie preesistenti: numerosi inquinanti contribuiscono all'aumento dell'incidenza di malattie respiratorie croniche, cardiovascolari, asma ed allergie e/o al loro aggravamento. Altri inquinanti invece possono contribuire all'aumento di tumori nella popolazione, a causa prevalentemente della presenza di miscele di composti organici volatili (COV o VOC), che incidono sul sistema nervoso periferico e centrale, che portano ad alterazioni del comportamento e della performance.

Tabella 1.7. Principali agenti indoor e potenziali fonti interne

Fonti	Inquinanti
Processi di combustione a gas o carbone per riscaldare e/o cucinare, camini e stufe a legna, gas di scarico dei veicoli	Prodotti di combustione (CO, NO_x, SO_2, particolato)
Materiali da costruzione e isolanti	Amianto, fibre vetrose artificiali, particolato, Radon; Agenti biologici (per presenza di umidità e/o polvere)
Materiali di rivestimento e moquette	Formaldeide, acrilati, VOC; Agenti biologici (per presenza di umidità e/o polvere)
Arredi	Formaldeide, VOC; Agenti biologici (per presenza di umidità e/o polvere)
Liquidi e prodotti per la pulizia	Alcoli, fenoli, VOC
Fotocopiatrici	Ozono (O_3), polvere di toner, VOC
Fumo di sigaretta	Idrocarburi policiclici, VOC, formaldeide, CO, particolato fine
Impianti di condizionamento	CO_2, VOC (per scarso numero di ricambi d'aria o eccesso di riciclo); Agenti biologici (per presenza di umidità e/o polvere)
Polvere	Agenti biologici (allergeni indoor: acari)
Individui	CO_2, Agenti biologici (batteri, virus, ecc.)
Animali	Allergeni indoor (peli, ecc.)
Sorgenti naturali (lave, tufi, graniti, ecc.)	Radon

Quando la ventilazione naturale non è sufficiente per garantire la qualità dell'aria indoor si deve ricorrere ad una ventilazione di tipo meccanico. Quest'ultima, insieme ai sistemi di condizionamento dell'aria, hanno la funzione di realizzare determinate condizioni di temperatura, umidità relativa e purezza dell'aria negli ambienti chiusi. Tuttavia, se sono mal progettati oppure non vengono sottoposti a periodica manutenzione (pulizia e/o manutenzione dei filtri dell'aria) possono essere proprio questi sistemi a provocare un maggiore inquinamento dell'aria, e causare dunque effetti negativi sul benessere e la salute delle persone. Un esempio può essere costituito dall'installazione inappropriata delle bocchette di ventilazione poste all'esterno: quando viene prelevata aria esterna da ambiente inquinati quali strade trafficate, parcheggi, aree industriali e così via, si viene a costituire l'introduzione di inquinanti dall'esterno in ambienti indoor.

Nella letteratura scientifica da diversi anni la qualità dell'aria dell'ambiente interno viene trattata in maniera sistematica e scientifica, che negli anni ha visto notevoli passi in avanti verso una qualità dell'aria sempre migliore.

In questo scenario, di particolare rilievo sono gli studi condotte dalla *Organizzazione Mondiale della Sanità* (o *World Health Organization – WHO*). Questa ha elaborato diverse linee guida per la qualità dell'aria, incentrate su argomenti specifici, che hanno l'obiettivo di offrire una guida, appunto, per ridurre gli impatti dell'aria inquinata sulla salute umana. Le prime pubblicazioni riguardo a questo argomento risalgono al 1958 quando viene pubblicato il rapporto tecnico *Air pollution*[12] [47]: era la prima forma di pubblicazione che analizzava gli inquinanti dell'aria ed i loro effetti sulla salute. Negli anni successivi altri rapporti tecnici si susseguirono, analizzando sempre di più gli aspetti e la natura degli inquinanti dell'aria fino ad arrivare alle guide della qualità dell'aria nell'area urbana[13]. Dal 1987 in Europa vengono introdotte le *Linee guida per la qualità dell'aria*[14] [48] (*Air Quality Guidelines – AQGs*), un manuale indipendente sull'aria inquinata e la salute. Le *Linee guida* dovevano fornire una base per proteggere la sanità pubblica dagli effetti avversi degli inquinanti dell'aria ed eliminare, o ridurre al minimo, quegli inquinanti dell'aria che sono conosciuti o probabilmente pericolosi per la salute ed il benessere dell'uomo. Inoltre le *AQGs* dovevano fungere da riferimento per le successive elaborazioni di normative a livello internazionale e locale. Gli aggiornamenti approvati negli anni successivi hanno migliorato le conoscenze riguardo a questi inquinanti, aumentandone la platea in seguito a numerosi studi a livello internazionale, e hanno riconosciuto valori più restrittivi per le sostanze già conosciute. Con l'aggiornamento[15] [50] al livello globale del 2005, la concentrazione si è ristretta solamente sui quattro inquinanti più classici: il particolato (PM), l'ozono (O_3), il biossido di azoto (NO_2) ed il biossido di zolfo (SO_2). In queste sostanze è stato riconosciuto un maggiore rischio per la salute e sono oggetto di un programma di riduzione a step di questi inquinanti. Un documento[16] [51] stilato dall'OMS riassume le pubblicazioni più importanti fatte sino dagli anni Cinquanta del Novecento nel campo della qualità dell'aria e della salute: delinea l'evoluzione scientifica sugli effetti sulla salute degli inquinanti dell'aria e la loro interpretazione, fornendo informazioni a supporto per le strategie da adottare.

In ambito normativo, invece, a livello europeo il Parlamento ed il Consiglio in particolare negli 2004[17] e 2010[18] sono state emanate due Direttive che riguardano rispettivamente la limitazione delle emissioni di composti organici volatili dovute all'uso di solventi per pitture e vernici, e l'adeguamento al progresso tecnico dell'Allegato III della Direttiva 2004/42/CE, che a sua volta riguarda il metodo gascromatografico, un metodo di misurazione del contenuto dei VOCs

---

[12] WHO – World Health Organization Technical Report Series, No. 157, 1958

[13] WHO – World Health Organization Technical Report Series, No. 506, 1972

[14] WHO – World Health Organization Regional Office for Europe, No. 23, 1987

[15] WHO – World Health Organization Regional Office for Europe, global update 2005

[16] Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future, 2017

[17] Direttiva europea 2004/42/CE

[18] Direttiva europea 2010/79/UE

secondo la norma ISO 11890-2. In particolare, la Direttiva del 2004 subordina l'immissione sul mercato delle pitture e dei rivestimenti utilizzati in edilizia a:

- un contenuto massimo di VOC diverso per ogni categoria;
- specifici obblighi di etichettatura (natura del prodotto e relativo contenuto di VOC);
- sanzioni;
- delinea i metodi analitici del tasso di VOC;
- definisce i valori limite per le diverse sottocategorie di prodotti.

In Italia, le Direttive sono state recepite rispettivamente dal Decreto legislativo 161/2006 e dal Decreto ministeriale 3 ottobre 2012.

Tipologie di ventilazione

A valle dell'analisi delle possibili sorgenti di inquinamento dell'aria indoor, è necessario soffermarsi sulla progettazione di un sistema di ventilazione adeguato. Come accennato in precedenza, vi sono tre tipologie possibili di sistemi di ventilazione:

- naturale;
- meccanico;
- ibrido.

Nel progetto di dimensionamento del sistema di ventilazione che si vuole adottare, le portate d'aria devono essere in grado di rimuovere completamente le emissioni inquinanti dall'aria indoor. Inoltre, è necessario tenere in considerazione che le emissioni di inquinanti possono essere costanti in ogni periodo considerato oppure variare nel tempo: anche in periodi in cui l'ambiente non viene occupato vi sono emissioni di inquinanti. È necessario dunque che anche in quest'ultimo caso si prendano le dovute misure: al fine di garantire la qualità dell'aria nel momento in cui l'ambiente diviene nuovamente occupato, per eliminare gli inquinanti dall'aria accumulati si possono adottare essenzialmente due tipi di misure:

- ventilare gli ambienti anche nei periodi in cui l'edificio non viene utilizzato, operando con portate inferiori a quelle utilizzate quando l'edificio è occupato;
- ventilare gli ambienti prima che l'edificio venga nuovamente occupato.

Lo scopo della ventilazione, sia naturale che artificiale, consiste dunque nel processo di ricambio dell'aria degli spazi confinati, finalizzato al raggiungimento del comfort termo-igrometrico degli utenti (regolando i livelli di umidità e della temperatura), e al miglioramento e controllo della qualità dell'aria (evitando la formazione di condensa e di muffa ed eliminando gli inquinanti presenti nell'aria). Se le condizioni lo permettono, essa può essere utilizzata anche per il raffrescamento.

La *ventilazione naturale* [6] è ottenuta facendo uso delle differenze di pressione che circondano un edificio, causate dal vento e dall'effetto camino. Essa è funzione di tre fenomeni climatici:

- velocità del vento;
- direzione del vento;

- differenza di temperatura.

La direzione del vento e la sua velocità variano in funzione del luogo in cui l'edificio è ubicato, su base giornaliera e/o stagionale. Attorno all'edificio si viene a generare un campo di pressione, che è in sovrappressione sul lato controvento e in depressione sul lato opposto. La differenza di pressione sui due lati si può sfruttare per indurre una buona ventilazione all'interno dell'edificio. La differenza di temperatura invece, tra interno ed esterno e tra ambienti diversi dell'edificio, sono legate al fenomeno fisico che vede realizzarsi con l'aumento della temperatura la diminuzione della densità dell'aria, con il conseguente aumento di volume dell'aria stessa. Tale fenomeno dà luogo a differenze di pressione e comportano i movimenti dell'aria.

La ventilazione interna degli ambienti è resa possibile da "sistemi di tiraggio naturale" appositamente studiati, ma anche in modo più classico mediante l'apertura di porte e finestre; dipende dunque da tre fattori differenti:

- la tipologia e posizione delle aperture esterne dell'edificio;
- la disposizione e la morfologia dell'edificio rispetto al contesto esterno;
- la morfologia interna dell'edificio.

La ventilazione si innesca pertanto in quattro modi differenti:

- per infiltrazione;
- per effetto camino;
- indotta dal vento;
- combinata.

La ventilazione per *infiltrazione* si verifica in relazione alla tenuta dei serramenti: a causa di gradienti, come la differenza di pressione tra l'interno della casa e l'ambiente esterno o la differenza di temperatura, si generano flussi d'aria. Essa dipende dalla tenuta all'aria delle strutture trasparenti (più precisamente dipende dal grado di tenuta all'aria dei giunti tra vetro e telaio, fra le ante dell'infisso, ma anche e soprattutto dalla giunzione fra l'infisso stesso e la parete), caratterizzate dai serramenti, e dalla permeabilità delle strutture opache, costituite dalle pareti, solai e copertura.

L'*effetto camino* (o *stack effect*) (Figura 1.3) è caratterizzato da un moto d'aria dal basso verso l'alto e si verifica quando si viene a creare una stratificazione in altezza dell'aria a diverse temperature. La ventilazione così indotta è possibile quando l'edificio è costituito da più piani, dove è possibile creare moti d'aria ascendenti realizzati grazie ad un gradiente. In questo caso, il gradiente è dato dalla differenza di densità dell'aria tra la parte bassa e alta del volume d'aria (tra il piano più basso e quello più alto della casa): l'aria all'aumentare della temperatura si espande e tende a salire verso l'alto. La portata dell'aria dipende dunque sia dal gradiente (maggiore è il gradiente, maggiore sarà la portata), sia dalla quota (maggiore è la quota, maggiore sarà la portata). Al fine di consentire questo processo naturale di scambio d'aria è necessario che vi sia posta un'apertura alla base e sulla sommità dell'edificio, in modo da garantire un movimento del flusso dell'aria continuo. La portata d'aria non è molto alta (4-6 ricambi orari dell'aria), tuttavia è utile ad evitare le stratificazioni dell'aria calda nella parte alta degli ambienti interni. Per una buona estrazione dell'aria è necessario che la temperatura

dell'aria esterna non sia troppo alta, oppure, più precisamente, occorre che vi siano differenze piuttosto rilevanti tra l'aria calda nella parte più alta dell'edificio e l'aria esterna.

Il *camino solare* (Figura 1.4) è un dispositivo utilizzato per innescare la ventilazione, grazie al surriscaldamento generato dalla radiazione solare che attraverso un vetro e scalda una superficie assorbente.

La ventilazione *indotta dal vento* (Figura 1.5) sfrutta condotti ad hoc oppure porte e finestre. Essa può essere a lato singolo, quando le aperture sono disposte su un'unica parete, oppure orizzontale, quando il meccanismo della ventilazione si innesca con aperture collocate su pareti opposte e alla medesima altezza. Il passaggio dell'aria da un lato all'altro dell'edificio si attiva a causa della differenza di pressione, la quale si genera dalla sovrappressione (sul lato esposto dell'edificio) e dalla depressione (sul lato opposto) che il vento esercita sull'edificio. Questo tipo di ventilazione è anche detto "passante" oppure "incrociata", e normalmente il flusso è orizzontale. Si innesca anche in assenza di passaggi contrapposti sui lati sopravvento e sottovento, ma in questo caso l'effetto è più limitato. La velocità del flusso dell'aria così ottenuto è maggiore quando le aperture attraverso le quali l'aria lascia l'edificio sono più grandi di quelle d'entrata, le quali devono comunque avere dimensioni adeguate. La migliore distribuzione del flusso d'aria si ottiene con aperture disposte diagonalmente nell'edificio, e quando non vi siano troppi ostacoli negli ambienti interni. L'aria fresca deve in ogni caso lambire anche le parti più massicce e pesanti dell'edificio, in modo che esse disperdano il calore accumulato.

Non sempre, tuttavia, è necessario ricorrere all'apertura di porte e finestre per innescare la ventilazione, ma si possono utilizzare apposite bocchette (Figura 1.6). Questa osservazione nasce dalle problematiche che questo genere di azione comporta, anche se necessaria: infatti, aprendo una finestra si lascia penetrare all'interno di un ambiente confinato sia la luce che il rumore, e ciò non è sempre voluto. L'utilizzo di bocchette permette di non far entrare la luce e, per mezzo di appositi sistemi di abbattimento acustico, neanche il rumore. Questo tipo di ventilazione è definita *combinata orizzontale/verticale*. Tali bocchette si inseriscono per ventilare intercapedini o vespai, all'interno dell'edificio in corrispondenza di cavedi che generano l'effetto camino, e/o sulla sommità dei serramenti (Figura 1.7).

Per garantire una buona ventilazione naturale interna, alcuni ambienti vengono messi in sovrappressione e altri in depressione. Un esempio pratico si ha negli edifici residenziali dove il soggiorno e la camera da letto sono messe in sovrappressione, mentre la cucina ed il bagno in depressione, proprio perché in questi ultimi due ambienti si producono più vapori.

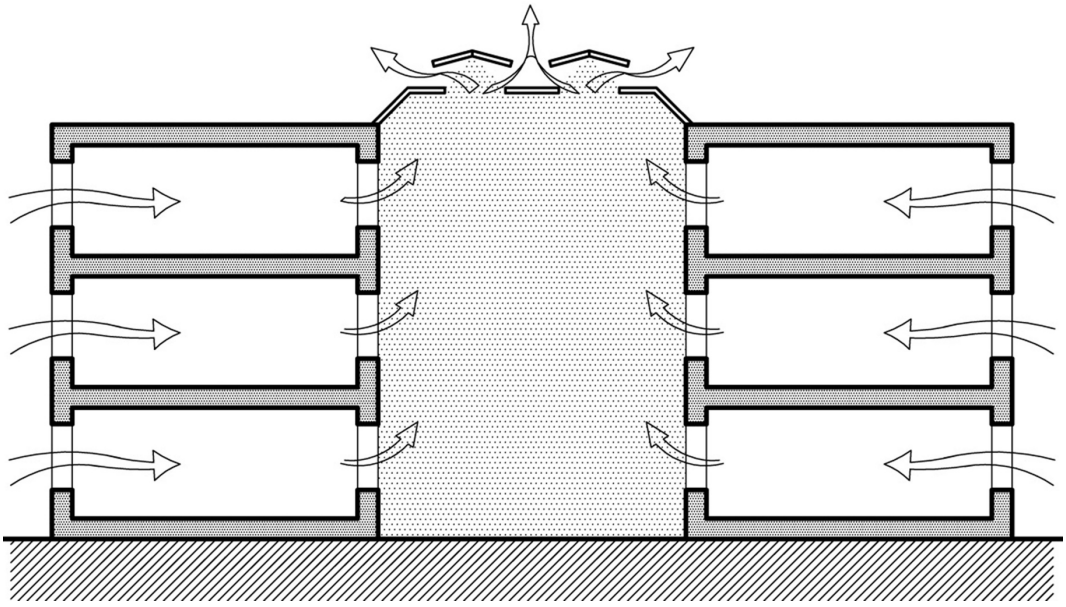


Figura 1.3. Ventilazione per effetto camino - schema di funzionamento generale (Immagine tratta da [16])

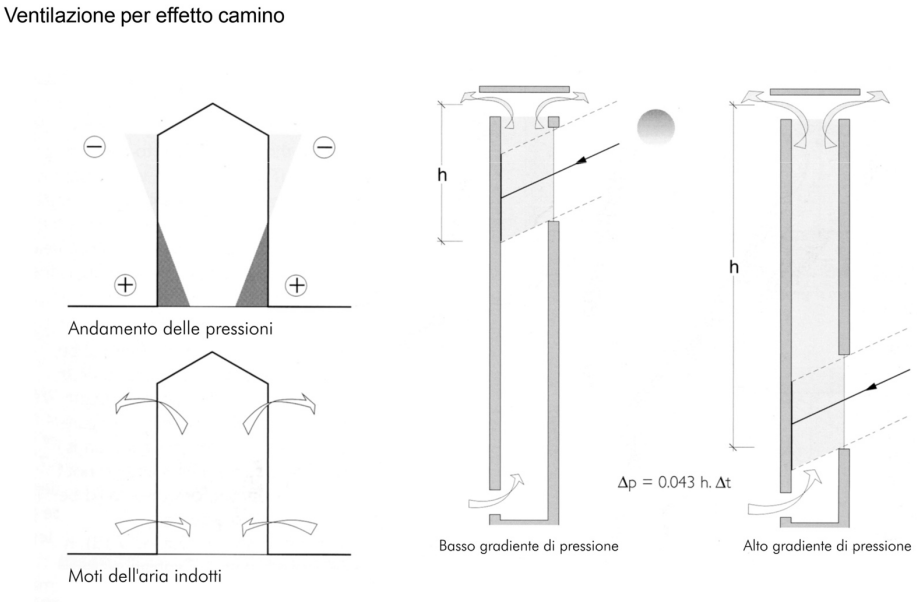


Figura 1.4. Ventilazione per effetto camino - particolare del sistema del camino solare (Immagine tratta da [16])

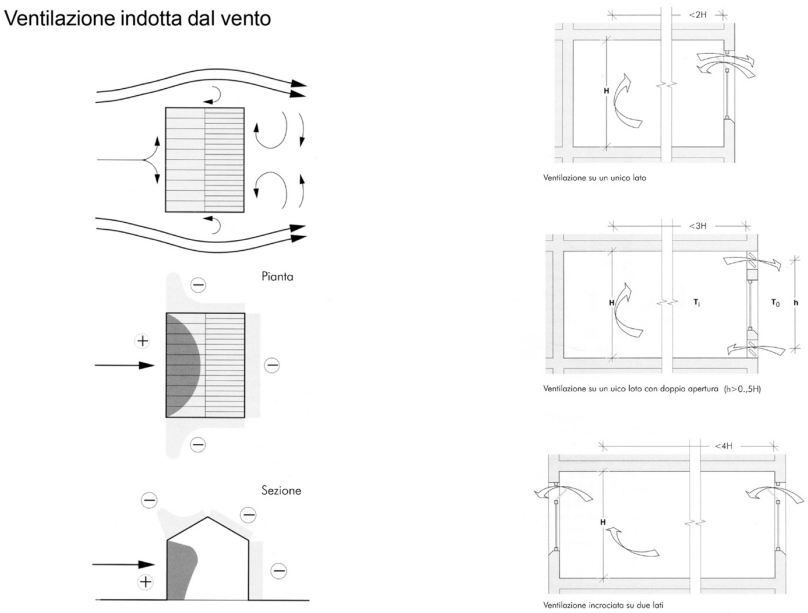


Figura 1.5. Ventilazione indotta dal vento - particolari schematici di funzionamento (Immagine tratta da [16])

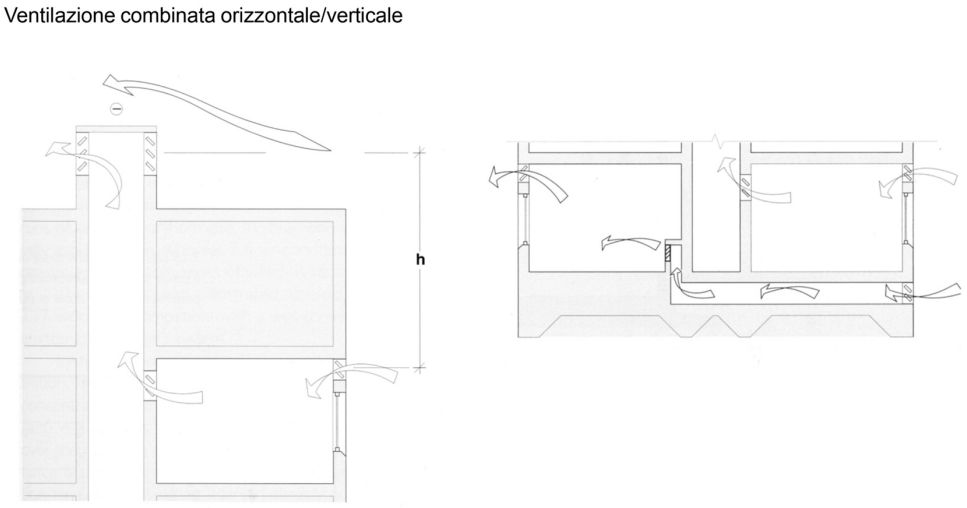


Figura 1.6. Ventilazione combinata orizzontale/verticale – le bocchette possono essere posizionate in diverse posizioni, al fine di garantire un flusso d'aria utile al completo ricambio dell'aria (Immagine tratta da [16])

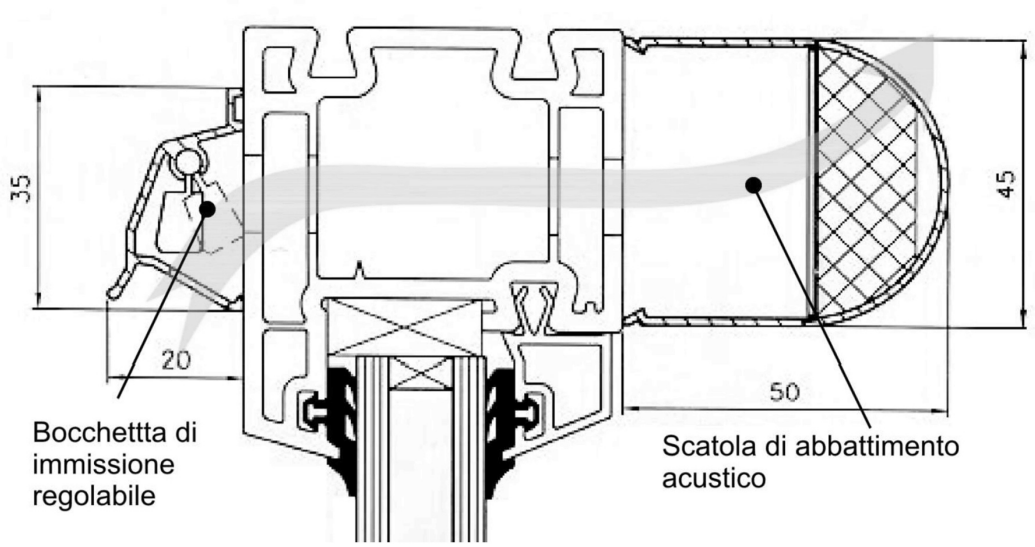


Figura 1.7. Ventilazione per mezzo di bocchetta di immissione, posizionata sulla sommità del serramento (Immagine tratta da [16])

I sistemi di *ventilazione meccanica* (o *ventilazione meccanica controllata* o VMC) (Figura 1.8) sono impianti che garantiscono il corretto ricambio dell'aria degli ambienti interni per mezzo di condotte di ventilazione forzata collegate, negli ambienti interni, ad aspiratori (per la rimozione dell'aria viziata o inquinata) ed a diffusori (per l'immissione di aria nuova). Questo sistema è spesso accompagnato da un recuperatore di calore, che in questo modo permette di riutilizzare il calore estratto (insieme all'aria) dall'ambiente e riscaldare il nuovo flusso d'aria di immissione: si ha, così, un recupero di energia termica ed elettrica. Tale sistema si rende necessario quando la ventilazione naturale non è sufficiente a garantire un adeguato ricambio dell'aria degli ambienti interni con la conseguente eliminazione di tutti gli inquinanti presenti nell'aria.

La VMC con recupero di calore ha riscontrato un notevole sviluppo nel momento in cui, grazie ad una legislazione in materia di efficienza energetica degli edifici più attenta, si è cominciato a costruire edifici che consumassero meno energia per essere riscaldati nella stagione invernale e raffrescati nella stagione estiva. Un migliore isolamento delle componenti opache dell'involucro edilizio e una maggiore tenuta all'aria dei serramenti hanno raggiunto l'obiettivo della riduzione del fabbisogno energetico, influendo tuttavia in maniera negativa sul comfort termo-igrometrico e sulla salubrità degli ambienti e dell'edificio. Un impianto VMC, al fine di contrastare le perdite di energia termica dovute all'apertura di porte e/o finestre per il ricambio dell'aria, è in grado di prelevare l'aria dall'ambiente e, mediante il recuperatore di calore, riscaldare l'aria nuova da immettere all'interno dell'ambiente.

Vi sono principalmente tre tipologie di ventilazione meccanica:

- a semplice flusso autoregolabile (portata d'aria costante, indipendentemente da variazioni della prevalenza nel circuito), dove l'aria viziata viene estratta dai locali umidi (bagno, cucina, lavanderia, ecc.) e l'aria di rinnovo viene immessa dai locali adiacenti

(soggiorno, camera, ecc.) attraverso ingressi d'aria esterni; la circolazione interna è garantita dal passaggio dell'aria al di sotto delle porte;

- a semplice flusso igroregolabile, dove l'aria nuova penetra nell'alloggio per mezzo di appositi ingressi di aria; l'aria viziata viene estratta dai locali umidi tramite bocchette igroregolabili, che si aprono in funzione dell'umidità presente nell'ambiente, o tramite bocchette autoregolabili collegate all'unità di ventilazione;
- a doppio flusso con recupero di calore, dove l'aria viziata estratta e l'aria prelevata dall'esterno e preventivamente filtrata vengono convogliate in un'unità di recupero che assicura il preriscaldamento dell'aria di rinnovo evitando la contaminazione dei due flussi.

Tale sistema, inoltre, può essere abbinato a sistemi di riscaldamento e/o raffrescamento e garantire in questo modo sia il comfort termo-igrometrico che la salubrità degli ambienti indoor.

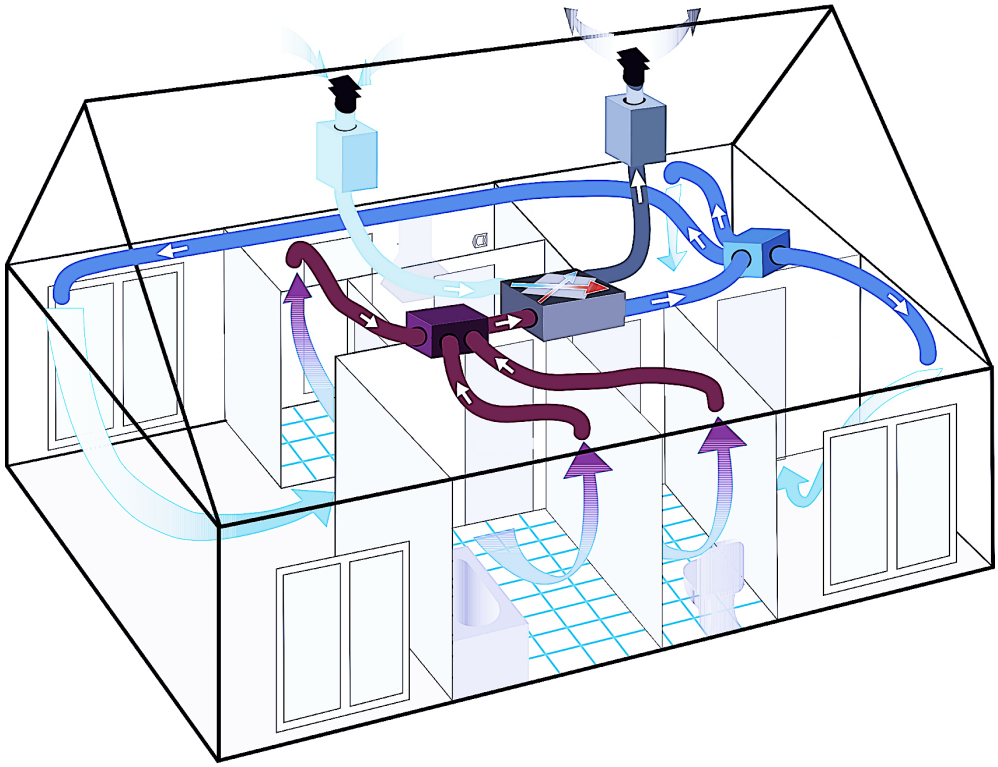


Figura 1.8. Ventilazione meccanica controllata (VMC) con recupero di calore - schema generale di funzionamento (Immagine tratta da: http://www.aeraulica.genova.it/impianti-climatizzazione-genova/ventilazione-meccanica-controllata-vmc-genova/)

Per *ventilazione ibrida* si intende il ricorso alla ventilazione naturale assistita da quella meccanica, in condizioni particolari di insufficiente differenza di pressione. Il flusso dell'aria avviene principalmente grazie alle forzanti naturali del vento e/o della differenza di temperatura e solo parzialmente mediante l'utilizzo di ventilatori elettrici. Il funzionamento degli apparecchi elettrici in regime controllato è ridotto, o continuato a potenze limitate; se associati all'impiego

di fonti rinnovabili, i consumi di energia necessari alla ventilazione degli ambienti si riduce drasticamente, e possono anche essere considerati trascurabili.

Si osserva, dunque, che i sistemi di ventilazione naturale e meccanica sono contrapposti, ed entrambi presentano sia vantaggi che svantaggi nel loro impiego. Tuttavia, recentemente si è più favorevoli a una combinazione di queste tecnologie, al fine di sfruttare al meglio le proprie caratteristiche: ventilazione naturale se praticabile e conveniente, ventilazione meccanica nella misura effettivamente richiesta e con un efficace sistema di recupero termico.

Lo scopo primario dei sistemi ibridi è quello di introdurre aria di rinnovo per il controllo della qualità dell'aria ambiente, ma alcuni provvedono anche al controllo e al benessere termico nel periodo di occupazione degli ambienti.

I campi in cui le tecnologie sostenibili possono essere utilizzate dipendono dal clima esterno e dalle caratteristiche, ubicazione e utilizzo dell'edificio. La ventilazione naturale può essere considerata una tecnologia sostenibile, energeticamente efficiente e pulita e in grado di soddisfare ai requisiti interni fino a quando si mantengono le condizioni ottimali di funzionamento. I metodi di ventilazione naturale tradizionali offrono tuttavia un controllo molto limitato del flusso d'aria. Questi metodi sono stati negli ultimi anni oggetto di applicazione dei nuovi criteri di calcolo e controllo automatizzato, rendendone possibile una migliore comprensione e utilizzo. In alcuni casi si rendono quindi necessari impianti meccanici supplementari. La ventilazione ibrida offre una via per combinare i migliori aspetti della ventilazione naturale e meccanica in maniera appropriata ai vari periodi del giorno e alle varie stagioni dell'anno. Infatti una combinazione di tecnologie può nella maggior parte dei casi rivelarsi ottimale in relazione alle condizioni climatiche esterne caratteristiche del bacino geografico del sito in esame. La principale differenza tra i sistemi di ventilazione convenzionali e ibridi sta nel fatto che questi ultimi sono sistemi intelligenti con dispositivi di controllo in grado di commutare automaticamente il funzionamento da naturale a meccanico al fine di minimizzare i consumi di energia e mantenere un soddisfacente comfort ambientale.

Il progetto del sistema di ventilazione naturale o ibrido deve essere tale da massimizzare lo sfruttamento dei seguenti vettori energetici:

- prevalenza fornita dall'effetto camino;
- campo di pressioni generato dalle correnti ventose;
- riscaldamento elio-termico per incrementare l'estrazione attraverso i camini;
- pannelli fotovoltaici per alimentare ventilatori integrativi.

L'utilizzo complementare di queste quattro strategie permette la realizzazione di un sistema in larga misura indipendente da forniture energetiche di natura convenzionale.

In accordo con la norma UNI EN 16798-7, le portate d'aria di ventilazione per gli edifici da utilizzare per la valutazione dei calcoli energetici, sia per quanto riguarda i carichi di riscaldamento che quelli di raffrescamento, si determinano utilizzando i metodi descritti nella norma. Essa si applica agli edifici caratterizzati da:

- sistemi di ventilazione meccanica (estrazione meccanica, immissione meccanica, o sistema bilanciato);

- sistemi di ventilazione passiva (o naturale) per edifici residenziali e non residenziali;
- apparecchi di combustione;
- apertura di finestre tramite operazione manuale;
- cucine, dove l'uso è immediato (compresi i ristoranti).

Questa norma europea si applica ai sistemi ibridi che combinano sistemi di ventilazione meccanica e passivi, in edifici residenziali e non. In particolare, si sottolinea che i tassi di ventilazione naturale possono essere determinati anche per mezzo di strumenti di simulazione dinamica, come vedremo più avanti.

Metodi per la definizione della qualità dell'aria

Nella norma FprEN 16798-1 sono indicati tre metodi differenti per determinare i parametri della qualità dell'aria interna:

- Metodo 1: metodo basato sulla qualità dell'aria percepita;
- Metodo 2: metodo che usa valori limiti della concentrazione di sostanze inquinanti;
- Metodo 3: metodo basato sulle portate di ventilazione predefinite.

Il *Metodo 1* prevede di individuare il tasso di ventilazione più elevato fra tasso necessario per la riduzione dei rischi per la salute di uno specifico inquinante dell'aria ed il tasso richiesto per ottenere il livello di qualità dell'aria indoor desiderato. Qualora venissero individuate sorgenti inquinanti critiche per la salute è necessario rimanere in ogni al di sotto del valore di soglia indicato nel *Metodo 2*. Il tasso di ventilazione totale si calcola combinando la ventilazione per diluire e/o rimuovere gli inquinanti generati dalle persone e la ventilazione per rimuovere e/o diluire gli inquinanti prodotti dall'edificio e dagli impianti, secondo l'equazione (1.4). I livelli di qualità dell'aria percepita sono predefiniti per tutte quelle persone che non sono in grado di adattarsi facilmente a condizioni diverse negli edifici non residenziali, e le persone che si adattano nel caso degli edifici residenziali. Il tasso di ventilazione totale dipende dalla densità di occupazione e dalla tipologia dell'edificio. Quest'ultimo può essere definito poco inquinante se la maggior parte i materiali da costruzione utilizzati sono basso-emissivi, e l'attività degli occupanti non risulta come inquinante.

$$q_{\mathrm{tot}} = n \bullet\ q_{\mathrm{p}} + A_{\mathrm{R}} \bullet q_{\mathrm{B}} \qquad (1.4)$$

dove:

q_{tot} è il tasso totale di ventilazione per la zona di respirazione, in [l/s]
n è il valore di progetto per il numero di persone presenti nell'ambiente, [-]
q_{p} è il tasso di ventilazione per l'occupazione per persona, in [l/s•persona]
A_{R} è l'area di pavimento, in [m^2]
q_{B} è il tasso di ventilazione per le emissioni dall'edificio, in [l/s•m^2]

Nella Tabella 1.8 vengono indicati i tassi di ventilazione necessari per la diluizione o la rimozione degli inquinanti prodotti dagli occupanti (q_{p}). È importante, tuttavia, per motivi di salute, garantire un tasso minimo dovuto all'occupazione pari a 4 [l/s•persona].

Nella

Tabella **1.9**, invece, vengono indicati i tassi di ventilazione necessari per la rimozione o la diluzione delle emissioni prodotte dagli edifici e/o dagli impianti presenti, per ciascuna delle quattro categorie di qualità dell'aria. Come nel caso precedente, anche qui è importante non scendere sotto la soglia indicata in tabella in grassetto. I valori di questa tabella, inoltre, seguono le *Linee guida* proposte dall'Organizzazione Mondiale della Sanità.

Tabella 1.8. Tassi di ventilazione per adulti sedentari, persone non adattabili, per la diluizione delle emissioni (bio-effluenti) delle persone per le differenti categorie

Categoria	Percentuale attesa insoddisfatta [%]	Flusso d'aria per persone non adattabile [l/s·pers]
I	15	10
II	**20**	**7**
III	30	4
IV	40	2,5

Tabella 1.9. Tassi di ventilazione per diluire le emissioni dalle differenti tipologie di edificio

Categoria	Edificio molto poco inquinante, LPB-1 [l/s·m²]	Edificio poco inquinante, LPB-2 [l/s·m²]	Edificio non inquinante, LPB-3 [l/s·m²]
I	0,5	1,0	2,0
II	**0,35**	**0,7**	**1,4**
III	0,2	0,4	0,8
IV	0,15	0,3	0,6

Con il *Metodo 2* si calcolano i tassi di ventilazione necessari per diluire una singola sostanza secondo l'equazione (1.5). I parametri di riferimento per le sostanze inquinanti si possono trovare nelle appendici della presente norma (FprEN 16798-1); per quanto riguarda invece i valori relativi all'efficacia della ventilazione vi sono riferimenti nella norma UNI EN 16798-3.

$$Q_{\mathrm{h}} = \frac{G_h}{C_{\mathrm{h,i}} - C_{\mathrm{h,o}}} \bullet \frac{1}{\varepsilon \mathrm{v}} \qquad (1.5)$$

dove:

Q_{h} è il tasso di ventilazione necessario per la diluizione, in [m³/s]
G_{h} è il tasso di generazione di una sostanza, in [mg/s]
$C_{\mathrm{h,i}}$ è il valore di riferimento per la sostanza, in [mg/m³]
$C_{\mathrm{h,o}}$ è la concentrazione della sostanza nell'aria, in [mg/m³]
$\varepsilon \mathrm{v}$ è l'efficacia della ventilazione

L'equazione si applica in regime stazionario, ma anche in regime orario, e il metodo richiede che l'immissione di aria esterna nell'ambiente indoor presenti una concentrazione di sostanze inquinanti inferiore a quella dell'aria interna. Al fine di poter applicare tale metodo è necessario individuare tutte le possibili sostanze che incidono sulla qualità dell'aria. Tra queste sostanze è d'obbligo mettere in evidenza l'anidride carbonica (CO_2), in quanto rappresenta le emissioni dovute alle persone (bio-effluenti).

Se l'anidride carbonica (CO_2) viene utilizzata come tracciante per l'occupazione, i valori limite sono indicati nella Tabella 1.10. Tali valori possono essere utilizzati anche nel caso della ventilazione controllata.

Tabella 1.10. Concentrazioni di anidride carbonica CO_2 superiori alla concentrazione esterna assumendo come emissione standard di CO_2 pari a 20 [l/h•persona]

Categoria	Concentrazione di CO_2 corrispondente ai valori in PPM per le persone non adattabili
I	550 (10)
II	800 (7)
III	1350 (4)
IV	1350 (4)

I valori minimi predefiniti del tasso di ventilazione vengono determinati utilizzando il *Metodo 3*, il quale mette in relazione i requisiti sia della qualità dell'aria percepita che la salubrità della zona occupata. Questo metodo è espresso da uno o più dei seguenti parametri:

- ventilazione totale di progetto per persone e componenti dell'edificio (q_{tot});
- ventilazione di progetto per unità di area di pavimento (q_m^2);
- ventilazione di progetto per persona (q_p);
- tassi di ricambio dell'aria di progetto (*ach*);
- tassi di ventilazione di progetto per singolo ambiente e tipologia di edificio (q_{room}).

Con questo metodo, il tasso di ventilazione può essere espresso in funzione delle persone (l/s•persona) oppure in funzione dell'area a pavimento (l/s•m²), come indicato in Tabella 1.11.

Tabella 1.11. Tasso predefinito di ventilazione dell'aria per ufficio (persone non adattabili)

Categoria	Tasso di ventilazione per ambiente	
	[l/s•pers]	[l/s•m²]
I	20	2
II	14	1,4
III	8	0,8
IV	5,5	0,55

Tipologia di edifici

Nella norma si prosegue con la distinzione nella tipologia di edifici tra quelli residenziali e non residenziali.

Nel caso degli edifici non residenziali i tassi di ventilazione per il progetto dei sistemi di ventilazione ed il calcolo dei carichi di progetto di riscaldamento e raffrescamento devono essere specificati in funzione dei requisiti normativi a livello nazionale; qualora non vi fosse una regolamentazione nazionale disponibile, si devono utilizzare uno dei tre metodi precedentemente descritti. Come già accennato, nei periodi in cui l'edificio non viene occupato e la ventilazione viene spenta, è doveroso determinare i tassi di ventilazione necessari per limitare la concentrazione di inquinanti emessi dai materiali presenti all'interno dell'ambiente, in modo da poter assicurare un'adeguata ventilazione prima che l'edificio venga nuovamente occupato.

Nel caso degli edifici residenziali, invece, il tasso di ventilazione viene definito come ricambio orario dell'aria per ogni singolo ambiente, immissione di aria esterna per persona e/o portate di estrazione richieste (bagni e cucine), dato come tasso generale di ricambio dell'aria richiesto o tasso di ventilazione di progetto per ambiente e tipologia di edificio (q_{room}) e le aree di apertura di progetto. Come nel caso precedente, la ventilazione nei periodi in cui l'edificio non viene fruito deve essere sufficiente a rimuovere qualsiasi rischio per la salute.

Gli occupanti dell'edificio possono agire in prima persona sulla ventilazione (naturale in questo caso) e fornire un contatto con l'ambiente esterno mediante l'utilizzo di elementi apribili nell'involucro dell'edificio (ad esempio finestre, bocchette di aerazione, lucernari). Vi è inoltre la possibilità di garantire l'adeguato ricambio dell'aria tramite un controllo remoto, attraverso l'uso di dispositivi meccatronici o di aste di manovra.

I criteri per la definizione dell'umidità dell'aria ottimale dipendono in parte dai requisiti per il comfort termico e qualità dell'aria indoor, e in parte dai requisiti fisici dell'edificio (condensa, muffa, ecc.). Ci sono edifici particolari, quali ad esempio musei, edifici storici, chiese e così via, di cui bisogna prendere in considerazione i requisiti di un'eventuale ulteriore umidificazione. Generalmente gli ambienti non richiedono un'umidificazione o deumidificazione dell'aria, tuttavia nel caso si rendessero necessari al fine di ottenere una migliore qualità dell'aria indoor bisogna evitarne un uso eccessivo.

Un edificio può essere considerato poco inquinante, o molto poco inquinante, se la maggior parte dei materiali da costruzione che caratterizzano l'ambiente interno emettono pochi, o molto pochi, inquinanti (o VOC). Ad esempio, i materiali che possono avere un impatto molto basso per l'ambiente possono essere:

- la pietra;
- il vetro;
- le ceramiche;
- metalli non trattati.

Altri materiali con simili caratteristiche sono quelli che dimostrano di essere poco inquinanti quando testati in camera di ventilazione di prova dopo 28 giorni, in linea con gli standard

internazionali di prova, come ad esempio UNI EN 16516 oppure ISO 16000-3, ISO 16000-9, ISO 16000-11, dove i risultati vengono calcolati secondo l'ambiente di riferimento europeo come specificato nella UNI EN ISO 16516. Nella Tabella 1.12 vengono indicati alcuni delle sorgenti di inquinanti per cui sono specificati valori limite di emissione di inquinanti dei prodotti edilizi per due tipologie di edifici. I valori indicati sono il risultato del lavoro condotto nelle camere di sperimentazione.

Tabella 1.12. Criteri di emissioni inquinanti dei prodotti per le differenti tipologie di edifici

Sorgente	Prodotti basso emissivi per edifici poco inquinati [$\mu g/m^3$]	Prodotti molto bassa emissivi per edifici molto poco inquinati [$\mu g/m^3$]
Totale VOCs (CEN/TS 16516)	< 1.000	< 300
Formaldeide	< 100	< 30
Altri C1A o C1B VOC classificati come cancerogeni	< 5	< 5
Valore R (CEN/TS 16516)	< 1	< 1

1.4. Illuminazione

Il benessere di un soggetto all'interno di un ambiente non dipende solamente dal comfort termo-igrometrico e dalla qualità dell'aria, ma anche dal *comfort visivo*. Esso è definito come la condizione di soddisfazione delle esigenze di ordine visivo espresse dall'utente, ed è determinato essenzialmente da:

- grado di prestazione visiva – è la velocità e accuratezza nello svolgimento di un *compito visivo*;
- gradevolezza dell'ambiente – risulta dal rapporto fra la luce (naturale ed artificiale), l'ambiente (caratteristiche dello spazio e delle superfici) ed il soggetto umano (attitudini, preferenze, aspetti piscologici).

Il *compito visivo* è l'osservazione di dettagli e oggetti in relazione allo svolgimento di una determinata attività, quale ad esempio: leggere e scrivere, osservare caratteristiche generali e dettagli di oggetti, percepire spazi e ingombri, e così via.

Per consentire alle persone lo svolgimento efficace ed accurato dei compiti visivi dovrebbe essere fornita un'illuminazione adeguata ed appropriata, sia essa naturale oppure artificiale. Il livello di visibilità e di comfort richiesti nella maggior parte dei posti di lavoro dipende dal tipo e dalla durata delle attività svolte.

Al fine di ottenere un buon ambiente luminoso, è essenziale che oltre al valore dell'illuminamento richiesto, siano soddisfatte anche le esigenze qualitative e quantitative. Infatti, i requisiti illuminotecnici necessari a garantire il benessere visivo dipendono dalle seguenti tre esigenze fondamentali:

- comfort visivo – quando i lavoratori hanno una sensazione di benessere, indirettamente questo contribuisce anche ad ottenere alti livelli di produttività e una più alta qualità del lavoro;
- prestazione visiva – quando i lavoratori sono in grado di svolgere i loro compiti visivi anche in circostanze difficili e per periodi di tempo prolungati;
- sicurezza – deve consentire lo svolgimento dell'attività ed il movimento in condizioni di sicurezza.

L'ambiente luminoso, inoltre, è caratterizzato anche dai seguenti parametri, in relazione alla luce diurna ed a quella artificiale:

- distribuzione delle luminanze;
- illuminamento;
- direzionalità della luce, illuminazione nello spazio interno;
- variabilità della luce (livelli e colore della luce);
- resa dei colori e l'apparenza del colore della luce;
- abbagliamento;
- sfarfallamento.

Sino dalla fase progettuale, è opportuno prevedere adeguati livelli di comfort visivo, definendo attentamente:

- la collocazione, l'orientamento e le dimensioni dell'edificio;
- l'ubicazione e tipologia delle aperture;
- il controllo della riflessione e degli abbagliamenti delle superfici interne ed esterne;
- geometria interna dello spazio;
- l'eventuale previsione di schermature.

L'illuminazione naturale costituisce un fattore importante, in quanto riproduce i colori in maniera fedele, giova al benessere psico-fisico delle persone, ed è gratuita. Inoltre, una corretta progettazione dell'illuminazione diurna ed un'integrazione ottimale di luce naturale/artificiale possono contribuire in maniera significativa al risparmio energetico negli edifici. Allo stesso tempo tuttavia, una quantità di luce naturale eccessiva può comportare degli svantaggi non indifferenti: ad esempio, in funzione delle condizioni climatiche, un elevato irraggiamento solare in un ambiente chiuso comporta un notevole incremento dei carichi frigoriferi, e di conseguenza un incremento del fabbisogno energetico in fase di raffrescamento (stagione estiva). È necessario, quindi, prevedere un adeguato sistema di schermature.

Il comfort visivo, in generale, dipende dai seguenti fattori:

- livello di illuminamento;
- livello di abbagliamento.

L'*illuminamento* (Figura 1.9) è una grandezza fotometrica risultato del rapporto tra il flusso luminoso (misurato in lumen [lm]) incidente su una superficie elementare e l'area della superficie elementare stessa (equazione 1.5).

$$\mathrm{E} = \frac{d\phi}{dA} \qquad \left[\frac{lm}{m^2} = lx\right] \tag{1.6}$$

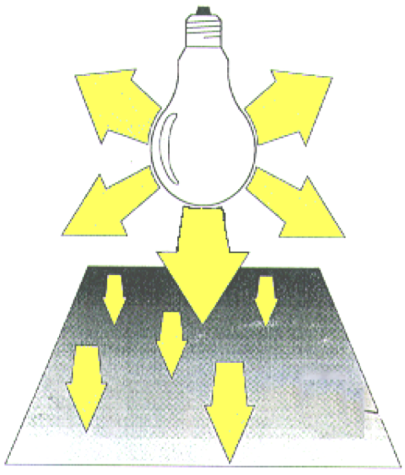


Figura 1.9. Schema rappresentativo dell'illuminamento

La grandezza fa dunque riferimento all'oggetto illuminato e non alla sorgente.

Nel progetto illuminotecnico è necessario tenere in considerazione il fattore di manutenzione, determinato in funzione dell'apparecchio d'illuminazione scelto, all'ambiente circostante ed al programma di manutenzione specificato. Il livello di illuminamento raccomandato per ciascuno comporti è dato dall'*illuminamento medio mantenuto*, determinato dal prodotto dell'illuminamento medio fornito dall'impianto di illuminazione nuovo per il fattore di manutenzione, come nell'equazione (1.6).

$$\overline{\mathrm{E}}_m = E_{\mathrm{med}} \bullet M \qquad (1.7)$$

dove:

E_{med} è l'illuminamento medio iniziale (di progetto), in [lx]
M è il fattore di manutenzione, [-]

L'illuminazione deve essere progettata per rispondere ai requisiti di illuminazione di un particolare compito in modo efficiente dal punto di vista energetico, ma non per questo si deve comprometterne gli aspetti visivi di un impianto di illuminazione. I livelli di illuminamento medio definiti nella norma UNI EN 12464-1 [110] devono essere mantenuti.

L'illuminamento delle zone immediatamente circostanti deve essere correlato all'illuminamento della zona del compito, e dovrebbe fornire una distribuzione delle luminanze ben equilibrate nel compito visivo. Variazione troppo elevate di illuminamento attorno alla zona del compito, possono provocare affaticamento visivo e abbagliamento molesto.

L'abbagliamento, infine, è la sensazione visiva prodotta da superfici che determinano elevati gradienti di luminanza all'interno del campo visivo e può essere percepito come abbagliamento molesto o debilitante. L'abbagliamento prodotto dalla riflessione delle superfici speculari è detto abbagliamento da riflessione o abbagliamento velante. È importante limitare l'abbagliamento per evitare errori, affaticamento e rischio di incidenti.

La quantità di luce diurna varia per tutto il corso della giornata, in funzione delle condizioni climatiche e dell'esposizione dell'edificio. Negli ambienti interni, la luce diurna disponibile decresce rapidamente con il passare delle ore, quindi può essere necessario l'impiego dell'illuminazione supplementare, al fine di assicurare i livelli di illuminamento richiesti sulla postazione di lavoro ed il bilanciamento della ripartizione di luminanza nel locale. Un'accensione automatica o manuale e/o un dispositivo di regolazione della luce possono essere utilizzati per assicura un'appropriata integrazione tra l'illuminazione artificiale e diurna.

La luce diurna può fornire tutta o in parte l'illuminazione necessaria dei compiti visivi, quindi offre la possibilità di realizzare ulteriori risparmi energetici. Inoltre, varia nel tempo in termini di livello, direzione e composizione spettrale e offre schemi variabili di modellato e luminanza, condizioni percepite come vantaggiose dalle persone che si trovano in ambienti di lavoro interni. Le finestre sono fortemente raccomandate nei posti di lavoro per la luce diurna che offrono e per il contatto visivo che offrono con l'ambiente esterno. Tuttavia, è anche importante assicurare che le finestre non provochino effetti molesti id tipo visivo o termico, o una perdita di riservatezza.

La luce naturale comporta diversi vantaggi a livello psico-fisico, come ad esempio:

- luce dinamica nel tempo;
- luce stimolante e produttiva;
- riconoscibilità cromatica degli ambienti.

Tuttavia, è necessario trovare un compromesso fra due criteri progettuali agli antipodi: da un lato c'è il criterio illuminotecnico, dall'altro invece quello termico. Al fine di soddisfare il criterio illuminotecnico, un incremento della superficie finestrata e dei lucernari implica maggiori livelli di luce naturale e maggiori potenziali risparmi energetici per la riduzione dei consumi dovuti all'uso della luce artificiale. Dal punto di termico invece, l'incremento della superficie finestrata comporta maggiori carichi termici estivi, e di conseguenza maggiori consumi per il raffrescamento estivo, ma anche maggiori dispersioni termiche nella stagione invernale.

Per quanto riguarda gli ambienti di lavoro i riferimenti per una corretta progettazione si trovano nella norma EN 12464-1. Per ciascun tipo di ambiente e per ogni singola possibilità attività da svolgere nella norma vengono specificati (tramite apposite tabelle) i valori minimi di illuminamento medio mantenuto, il grado di abbagliamento, l'uniformità dell'illuminamento sul piano del compito visivo, nonché la resa cromatica della sorgente. Per alcuni compiti visivi in edifici e spazi i criteri di illuminazione richiesti sono presenti nella presente norma, nell'Appendice B.5, Tabella B.18. L'illuminazione di emergenza non rientra negli scopi della presente norma.

Nella Tabella 1.13 sono riportati, come esempio, i requisiti illuminotecnici per il tipo di zona, compito o attività richiesti per un edificio adibito ad uffici, secondo il Prospetto 5.26 della norma UNI EN 12464-1. Il prospetto scelto come riferimento dà le indicazioni necessarie per i capitoli successivi della presente tesi.

Tabella 1.13. Esempio di criteri illuminotecnici per un edificio adibito ad uffici in riferimento alla norma europea UNI EN 12464-1:2011

N° di rif. a UNI 12464-1	Tipo di zona, compito o attività	$\bar{E}_m$ [lx]	UGR_L [-]	U_O [-]	R_a [-]
5.26.1	Archiviazione, copiatura, ecc.	300	19	0,40	80
5.26.2	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati	500	19	0,60	80
5.26.3	Disegno tecnico	750	16	0,70	80
5.26.4	Postazioni CAD	500	19	0,60	80
5.26.5	Sale conferenze e riunioni	500	19	0,60	80
5.26.6	Banco della reception	300	22	0,60	80
5.26.7	Archivi	200	25	0,40	80

Un altro parametro fondamentale per quanto riguarda l'illuminazione naturale è rappresentato dal *fattore* (*medio*) *di luce diurna*. Si definisce come *il rapporto tra l'illuminamento E che si realizza su di una superficie orizzontale posta all'interno dell'ambiente considerato grazie alla*

luce proveniente dalla volta celeste (non si considera la radiazione diretta proveniente dal sole), e quello che contemporaneamente si ha su di una superficie orizzontale posta all'esterno senza alcuna ostruzione E_O, calcolato come nella relazione (1.8) e in Figura 1.10 [40].

$$F = \frac{E}{E_o} \qquad (1.8)$$

dove:

F è il fattore di luce diurna, in [%];

E è l'illuminamento su una superficie orizzontale all'interno dell'ambiente considerato, in [lx];

E_o è l'illuminamento su una superficie orizzontale posta all'esterno senza alcuna ostruzione, in [lx].

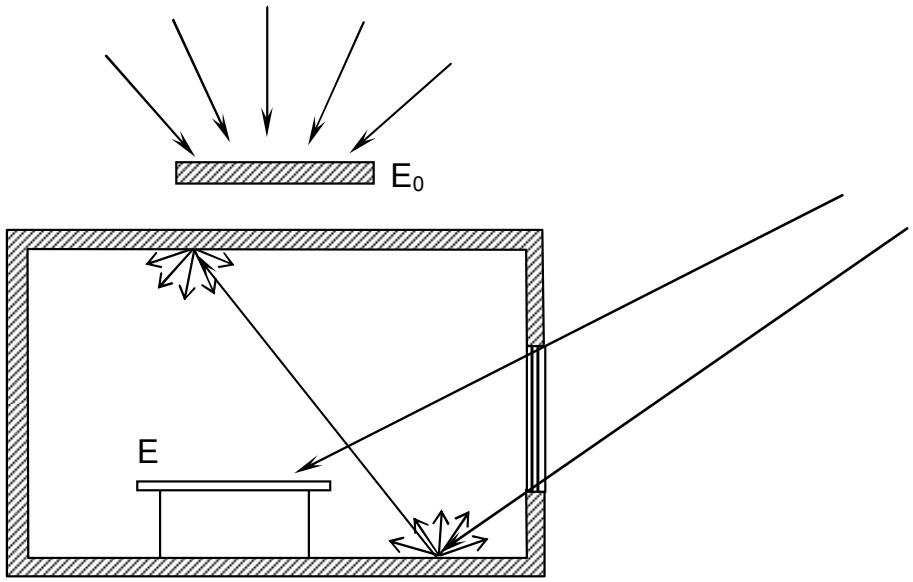


Figura 1.10. Definizione del fattore di luce diurna

Il fattore di luce diurna è funzione delle seguenti grandezze:

- area delle aperture finestrate;
- coefficiente di trasmissione nel visibile del materiale trasparente che costituisce le finestre;
- area dei diversi elementi che costituiscono l'involucro e che sono presenti all'interno del locale (pareti, pavimenti, soffitti, arredi, ecc.);
- presenza di ostruzioni di qualsiasi genere, esterne od interne, che limitino la vista della volta celeste;
- stato di manutenzione delle superfici vetrate e delle superfici interne.

Il fattore di luce diurna D_{Ca} è caratteristico della geometria del locale. Tale parametro consente di valutare la capacità delle aperture trasparenti e dell'involucro di uno spazio chiuso di garantire condizioni di illuminazione naturale confortevoli e un accettabile sfruttamento della luce naturale. Il fattore medio di luce diurna è dato dalla relazione (1.8).

$$D_{\mathrm{Ca,j}} = \left(4{,}13 + 20 \bullet I_{\mathrm{Tr,j}} - 1{,}36 \bullet I_{\mathrm{RD,j}}\right) \bullet I_{\mathrm{Sh,j}} \qquad (1.9)$$

dove:

$D_{Ca,j}$ è il fattore di luce diurna dell'area valutata, in [%];
$I_{Tr,j}$ è l'indice di trasparenza, in [–];
$I_{RD,j}$ è l'indice di profondità dello spazio, [–];
$I_{Sh,j}$ è l'indice di schermatura, [–];

La relazione del fattore di luce diurna viene specificata dalla norma UNI 15193 [116] [117] del 2017 nelle Parti 1 e 2.

La scelta di una sorgente luminosa dipende da più aspetti, tra i quali:

- garantire il comfort visivo
- restituire in modo corretto la cromaticità degli oggetti illuminati;
- minimizzare i consumi energetici;
- minimizzare i costi di manutenzione;
- minimizzare il possibile danno per materiali fotosensibili.

Per operare quindi una corretta scelta della sorgente luminosa è opportuno definire e valutare i seguenti parametri:

- aspetti illuminotecnici:
    - *flusso luminoso* ϕ [lm] – quantità di luce emessa dalla sorgente nell'unità di tempo;
    - *temperatura di colore correlata Tcc* [K] – cromaticità della luce emessa da una sorgente, espressa attraverso la temperatura assoluta (in Kelvin) a cui occorre portare un corpo nero affinché emetta una radiazione di cromaticità uguale a quella emessa dalla sorgente stessa;
    - *indice di resa cromatica Ra* o *CRI* [-] – grado di fedeltà nella restituzione dei colori in rapporto ad una sorgente di riferimento di analoga temperatura di colore;
- aspetti economici:
    - *efficienza luminosa* η [lm/W] – rendimento della sorgente espresso come rapporto tra flusso luminoso emesso e potenza elettrica assorbita;
    - *fattore di mantenimento* o *decadimento* del flusso luminoso *D* [%] – rapporto tra il flusso luminoso emesso dalla lampada in un dato istante della sua vita e il flusso luminoso iniziale;

- *durata media* – periodo di funzionamento, espresso in ore, dopo il quale in un lotto di sorgenti in condizioni di prova, il 50% cessa di funzionare, valutata in funzione di: vita media, vita economica, curva di mortalità, curva di decadimento;

- aspetti funzionali:
  - *regolazione del flusso luminoso* – possibilità, con appositi dispositivi, di regolare il flusso luminoso;
  - *tempo di accensione/riaccensione*[19] – tempo che intercorre tra la chiusura del circuito elettrico e l'emissione del flusso luminoso ad un valore pari all'80%;
  - *posizione di funzionamento* – alcune tipologie di sorgenti luminose presentano limitazioni di posizionamento per un corretto funzionamento;
- emissioni di inquinanti / sostenibilità ambientale.

[19] Con le più recenti tecnologie a LED il fattore del tempo di accensione e riaccensione è pressoché obsoleto, in quanto tale fattore è istantaneo.

1.5. Programmi di occupazione

Al fine del calcolo delle prestazioni energetiche di un edificio in regime dinamico, è necessario non tralasciare un aspetto molto importante: il *programma di occupazione*. Esso rappresenta il profilo di utilizzo reale dell'edificio, o di parte di esso, da parte dell'utente.

Il programma di occupazione contiene parametri di input da utilizzare nei software di calcolo (o simulazione) dinamico nelle tre categorie già analizzate precedentemente:

- riscaldamento e raffrescamento;
- ventilazione;
- illuminazione.

Il programma varia in funzione del tipo di attività che viene svolta all'interno dell'edificio. I dati di input delle principali attività (quali ad esempio scuole, asilo, grandi magazzini, sale conferenze, uffici, ristoranti, appartamenti ed edifici residenziali, ecc.), suddivise a loro volta in sotto-categorie, sono forni dalle Appendici C della norma in oggetto, la FprEN 16798-1, e D della ISO/DIS 18523-1 [126]. Nella prima vengono forniti più generici suddivisi in tre diverse categorie:

- tempo di operazione, suddiviso in:
    - orario di inizio e di fine del programma, in [h];
    - ore di pausa o interruzione del programma, in [h];
    - numero di giorni di utilizzo a settimana, in [dd];
    - numero di ore di utilizzo al giorno, in [h];
    - numero di ore di utilizzo all'anno, in [h];
- apporti interni, suddiviso in:
    - occupanti, in [m^2/pers] e [W/m^2];
    - apparecchi elettrici, in [W/m^2];
    - illuminazione, in [W/m^2];
    - produzione di umidità, in [$g/m^2 \cdot h$];
    - produzione di CO_2, in [$l/m^2 \cdot h$];
- valori di setpoint, suddiviso in:
    - temperatura operativa minima e massima nelle ore di non occupazione, in [°C];
    - temperatura operativa minima nella stagione di riscaldamento, in [°C];
    - temperatura operativa massima nella stagione di raffrescamento, in [°C];
    - tasso di ventilazione minimo, secondo il Metodo 1, in [$l/s \cdot m^2$];
    - umidità relativa minima e massima, in [%];
    - illuminazione e illuminamento, in [lx];

Successivamente, tali valori vengono introdotti in una tabella, suddivisa in: occupanti, apparecchi e illuminazione, che a loro volta vengono scorporati in giorni feriali e festivi (o

weekdays e *weekends*). Per ciascuna di queste categorie verranno forniti dei valori che vanno da 0 a 1, oppure in indicati in percentuale, per ogni ora del giorno: al valore 0 corrisponde una assenza di apporti termici dovuti alla presenza di occupanti, apparecchi elettrici o all'illuminazione, mentre al valore 1 ne corrisponde il pieno utilizzo. È possibile usufruire anche di valori intermedi, qualora in una determinata fascia oraria uno degli apporti influisce sul carico energetico dell'edificio in maniera parziale.

Nella Tabella 1.14 è stato riportato un esempio di programma di occupazione relativo ad un edificio adibito ad uffici. Come si può ben notare, per alcune fasce orarie gli apporti termici delle tre categorie sono pari a 1, mentre tutte le altre sono pari a 0. Questo è soltanto uno dei tanti esempi di programma di occupazione, e solo uno dei tanti rappresentati nella norma tecnica. Naturalmente, tali indicazioni rimangono solamente un riferimento per i dati di input da inserire nel software di calcolo, tuttavia conoscere il reale programma di un caso studio comporta una maggiore precisione nei calcoli da svolgere, ed una maggiore accuratezza dei risultati così ottenuti.

La norma tecnica ISO/DIS 18523-1 tratta in maniera più approfondita questo argomento. Basti pensare che i programmi per il calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio sono suddivisi in vari intervalli dell'anno. A causa degli svariati metodi di calcolo, ci sono molti forati del programma di utilizzo dell'edificio, della zona e dell'ambiente:

- giornaliero;
- mensile;
- stagionale.

Il programma *giornaliero* corrisponde al ciclo minimo di utilizzo dell'edificio, della zona e dell'ambiente, ed anche delle condizioni climatiche e solari. Il calcolo giornaliero si può esprimere in modo semplificato considerando valori di temperatura esterna e irraggiamento solari come media giornaliera, oppure in modo semplificato, considerando i singoli valori orari. Molte nazioni adottano il calcolo *mensile* per i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento, considerando le variazioni mensili di temperatura esterna e l'irraggiamento solare per i diversi orientamenti e inclinazioni dell'edificio. Il metodo di calcolo *stagionale* prevede l'uso di un programma giornaliero per il giorno lavorativo e per il numero di giorni lavorativi per ciascuna stagione per ogni tipo di calcolo sulla base dei valori medi stagionali delle condizioni climatiche, in funzione dell'edificio, della zona e dell'ambiente.

In questo caso la norma fornisce alcune schede di programmi giornalieri nell'Appendice D. Anche questi sono suddivisi nelle tre categorie individuate nel caso precedente (occupanti, apparecchi elettrici, illuminazione), e risulta pressoché simile. Nella prima parte della scheda vengono definiti i principali dati di input, relativi ai carichi di riscaldamento e raffrescamento, ventilazione e illuminazione, come riassunto delle principali caratteristiche dell'ambiente che si sta analizzando. Successivamente, la scheda prevede la suddivisione del programma di utilizzo in tre categorie: a (giorni feriali), b (sabato) e c (domenica e giorni festivi). A ciascuna categoria corrispondono i valori orari in percentuale per le tre categorie di apporti termici, rappresentati in seguito con un diagramma a barre.

Tabella 1.14. Programma di occupazione di un ufficio singolo

Ora	Weekdays			Weekends		
	Occ.	App.	Illum.	Occ.	App.	Illum.
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	1	1	1	0	0	0
11	1	1	1	0	0	0
12	1	1	1	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	1	1	1	0	0	0
15	1	1	1	0	0	0
16	1	1	1	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0

Come accennato precedentemente, un caso studio permette di conoscere il reale utilizzo dell'edificio, che in alcuni casi può risultare significativamente differente in confronto con la normativa. Programmi di simulazione dinamica, come ad esempio Design Builder, permettono di costruire i programmi di utilizzo degli apporti termici per ottenere un risultato più accurato delle prestazioni energetiche dell'edificio a cui ci si riferisce.

2. SIMULAZIONE DINAMICA

2.1. Descrizione generale

La *simulazione dinamica* è un metodo di calcolo finalizzato all'analisi del comportamento del sistema fabbricato-impianto, di conseguenza viene effettuata la stima del fabbisogno energetico di un edificio, al fine di progettare un edificio con maggiore consapevolezza dei fenomeni energetici, e permette dunque di ottimizzare le scelte progettuali risparmiando sui consumi, sui costi di costruzione e di manutenzione. Tale metodo non è più confinato al mondo della ricerca, e in tempi più recenti è entrato a far parte dell'attività professionale di molti professionisti, ed è supportato dalla normativa energetica italiana dal DPR 59/2009 [96], la quale definisce "*i criteri generali, le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici per la climatizzazione invernale e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari*"[20].

A supporto della procedura di calcolo in regime dinamica, o più precisamente in regime orario, vi sono diverse normative a livello internazionale e comunitario, tra cui la UNI EN ISO 52016-1 [128] entrata in vigore nel marzo del 2018. In particolare, la norma specifica i metodi di calcolo per la valutazione dei fabbisogni e dei carichi energetici, sensibili e latenti, per il riscaldamento ed il raffrescamento dell'edificio, della temperatura interna, dell'umidità e delle condizioni dell'aria di rinnovo per l'umidificazione e la deumidificazione necessarie, basati su calcoli orari. Questi metodi di calcolo si applicano sia agli edifici residenziali sia a quelli non residenziali. Le procedure di calcolo orario possono inoltre essere utilizzate come base per i calcoli per opzioni di sistemi di controllo più estensivi. Tale norma si riferisce a sua volta alle procedure di calcolo descritte nella UNI EN ISO 52017-1[21] [129]. Con questa procedura di calcolo è possibile dunque:

- calcolare i fabbisogni di energia per i servizi di riscaldamento e raffrescamento in regime dinamico orario;
- analizzare il comfort estivo di una zona termico in condizioni free-running o in presenza di impianti;
- stimare l'oscillazione della temperatura operante per la valutazione del requisito estivo dei CAM[22] (Criteri Ambientali Minimi);

---

[20] DPR 59/2009, art. 1, comma 1

[21] La norma fornice una procedura di calcolo orario generico, con un numero minimo di assunzioni necessarie a definire le equazioni di bilancio di energia, senza alcuna specifica applicazione, e senza nessuna soluzione tecnica e specifici dati di input. Essa specifica solamente le ipotesi, le condizioni al contorno e le equazioni generali per il calcolo, in regime transitorio orario o sub-orario, delle temperature interne (dell'aria e operativa) e/o dei carichi di riscaldamento, raffrescamento, umidificazione e deumidificazione per mantenere condizioni fissate di setpoint, quali temperatura e umidità, in una singola zona dell'edificio. Inoltre, la norma non impone alcuna tecnica numerica specifica.

[22] I CAM sono i requisiti ambientali definiti per le varie fasi del processo di acquisto, volti a individuare la soluzione progettuale, il prodotto o il servizio migliore sotto il profilo ambientale lungo il ciclo di

- studiare le potenze necessarie al mantenimento delle temperature di progetto per il riscaldamento ed il raffrescamento.

Il metodo di calcolo esegue un'analisi dettagliata del comportamento dell'edificio, ed è in grado di gestire una notevole quantità di dati di input. Inoltre, permette di elaborare informazioni su intervalli temporali (regime dinamico) giornaliero e/o orario (eventualmente anche sub-orario), a differenza dei metodi di tipo "tradizionale", che si basano su regimi stazionari o semi-stazionari, ovvero rispettivamente di carattere stagionale (stagione invernale e stagione estiva), o mensile. La differenza tra i due metodi (dinamico e stazionario o semi-stazionario) consiste nell'accuratezza dei dati risultanti: nel primo caso si può ottenere un comportamento energetico dell'edificio il più vicino possibile alla realtà, mentre nel secondo caso i calcoli sono approssimativi. Un altro fattore da considerare è sicuramente lo stress del processore, il quale esegue i calcoli: una simulazione in regime stazionario, che prevede dunque un calcolo di tipo mensile, richiederà sicuramente meno tempo di una simulazione in regime dinamico, proprio perché la minore mole di informazioni richiede meno tempo perché sia processata.

Al fine di procedere con il calcolo, il software richiede una serie di dati di input, che descrivono il sistema edificio. Come per i software che operano in regime stazionario o semi-stazionario, è necessario introdurre tutte le informazioni che descrivono la geometria dell'edificio e le tecnologie costruttive impiegate nella sua realizzazione, come ad esempio le composizioni stratigrafiche delle strutture verticali ed orizzontali, le aperture con i relativi serramenti, definire le zone termiche (generalmente coincidono con i singoli ambienti, tuttavia la loro definizione è regolata dal tipo di calcolo che deve essere effettuato) e gli impianti, nonché inserire i corretti dati climatici orari in funzione del luogo di ubicazione del sito di progetto. I software di calcolo dinamico vengono arricchiti con dati riguardanti le attività metaboliche, nonché i fattori dinamici e le variabili connesse all'utilizzo degli ambienti da parte degli occupanti, i quali influenzano il sistema dal punto di vista energetico.

Al termine della procedura, i dati di output ottenuti sono informazioni utili al fine di effettuare una previsione del fabbisogno energetico che rappresenti la realtà. Il software di simulazione dinamica è in grado dunque di valutare gli apporti endogeni interni degli occupanti legati all'andamento reale, con intervalli temporari di tipo orario o anche sub-orario.

Sulla base di questi dati, il professionista è in grado di scegliere le migliori soluzioni tecnologiche ed impiantistiche, al fine di ottimizzare la resa e garantire un risparmio energetico ed economico. Questo metodo risulta particolarmente adeguato all'analisi di sistemi impiantistici esistenti. Dal punto di vista impiantistico, utilizzando questo metodo è possibile ottenere un dimensionamento dell'impianto più corretto, in modo da evitare di avere un sovradimensionamento o sottodimensionamento dell'impianto stesso, ottimizzando di conseguenza i costi economici. Per quanto riguarda le caratteristiche del fabbricato, l'applicazione di alcune tecniche di ottimizzazione permette di sfruttare le potenzialità della simulazione sia per confrontare e scegliere le migliori soluzioni di retrofit energetico, sia per

---

vita, tenuto conto della disponibilità del mercato. Sono aggiornati con il Decreto dell'11 gennaio 2017.

definire un modello che meglio rappresenti il comportamento energetico dell'edificio reali ai fini della diagnosi energetica, del controllo dei sistemi e dell'individuazione dei guasti.

È possibile ipotizzare un esempio di applicazione di questa procedura, al fine di comprendere in maniera più semplificata l'approccio metodologico. Ipotizzando di modellare un edificio residenziale, una villetta ad esempio, in un comune del centro Italia, si potrebbe conoscere la temperatura di una stanza esposta a Sud, senza riscaldamento, alle ore 2 di una notte di gennaio. Il software valuta l'apporto dell'irraggiamento solare di giorno, la capacità delle murature di accumulare il calore, l'ingresso di aria per infiltrazione attraverso i serramenti esterni, gli apporti termici dovuti a due persone che dormono all'interno della stessa stanza, e così via. Da un'indagine con la simulazione dinamica potremmo conoscere anche il flusso termico che passa attraverso le murature, la quantità di anidride carbonica nella singola stanza. Il confronto tra i dati ottenuti dalla simulazione e quelli misurati realmente con delle sonde di temperatura sono molto simili.

I risultati che dunque si possono ottenere con un procedimento di calcolo dinamico delle prestazioni energetiche dell'edificio sono:

- temperatura dell'aria e temperatura operativa;
- temperatura media radiante e flussi termici delle superfici, quali pareti, pavimento e soffitto;
- bilancio termico;
- benessere termo-igrometrico secondo gli indici di comfort termici introdotti da Fanger (PMV e PPD);
- qualità dell'aria interna tramite ricambi orari dell'aria, livello di anidride carbonica nell'aria, umidità;
- flussi d'aria e ventilazione meccanica controllata (VMC);
- dispersione dei flussi termici attraverso l'involucro;
- illuminazione naturale;
- controllo degli ombreggiamenti.

Le principali applicazioni della simulazione dinamica sono le seguenti:

- progettazione dell'involucro edilizio;
- dimensionamento degli impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione;
- diagnosi energetica;
- riqualificazione energetica degli edifici;
- progettazione di edifici NZEB (Near to Zero Energy Building, o Edifici a energia quasi zero);
- punteggio aggiuntivo per il protocollo LEED.

Ci sono, naturalmente, anche degli svantaggi legati all'utilizzo di questo metodo. Innanzitutto l'aspetto economico ha un notevole impatto a livello professionale, legato all'acquisto del software stesso nonché della preparazione dei professionisti. Bisogna anche considerare l'attendibilità della simulazione del comportamento dell'edificio, la quale dipende

dall'affidabilità degli algoritmi implementati, dalla loro accuratezza, oltreché dall'incertezza dei parametri richiesti dal software di calcolo per caratterizzare materiali, geometria e impianti. Tuttavia, ciò si può evitare facilmente ricorrendo a software di calcolo che hanno alle spalle un team tecnico specializzato, e la cui azienda promotrice fornisce tutti gli strumenti necessari (manuale di utilizzo, corsi e seminari di formazione, assistenza tecnica) per il corretto utilizzo del programma.

Inoltre, bisogna tenere conto che al fine della simulazione di un edificio esistente risulta difficile reperire tutte le informazioni necessarie sulle proprietà termofisiche dei materiali, i parametri caratteristici dell'impianto termico, nonché prevedere l'uso ed il comportamento delle persone. Un buon modello da utilizzare per il calcolo delle prestazioni energetiche si ottiene calibrandolo per mezzo di misure in situ e ricerche sul caso studio approfondite. Tuttavia, i monitoraggi di lungo termine ed estesi a tutto l'edificio possono fornire le informazioni necessarie, ma sono molto onerosi in termini di tempo e di costo dell'attrezzatura di misurazione.

L'analisi in regime dinamico di un caso studio permette dunque di individuare gli opportuni interventi di retrofit energetico da attuare sull'edificio. Supponendo che le scelte progettuali adottate rispettino pienamente le indicazioni fornite dai risultati della simulazione, e che le opere di costruzione/riqualificazione siano state eseguite in maniera corretta, esiste ancora la possibilità che il consumo energetico dell'edificio non diminuisca, o comunque non si verifichino i risultati sperati. Diversi studi hanno dimostrato che le prestazioni energetiche degli edifici sottoposti a riqualificazione energetica, al netto degli errori materiali e di calcolo, la discrepanza dei risultati è associata ai cambiamenti del comportamento degli utenti. Infatti, la maggiore efficienza energetica ottenuta dall'intervento di retrofit ha portato a una riduzione del conto energetico per i consumatori, la quale deriva da una diminuzione del prezzo del servizio energetico associato, e di conseguenza minori costi di gestione. Pertanto, insieme alla maggiore disponibilità di tecnologie efficienti, gli occupanti sono indotti ad un maggiore utilizzo di questi servizi o di altri beni che richiedono energia. Tale fenomeno si può identificare con il termine *rebound effect* (o *effetto boomerang*) [29]. Più precisamente, il termine indica la differenza tra il valore previsto di risparmio energetico e quello effettivamente misurato. Un'analisi più approfondita del comportamento degli occupanti che si è pertanto modificato può essere utile per determinare il reale effetto dell'intervento di riqualificazione energetica dell'edificio.

La simulazione dinamica è l'unico strumento in grado di analizzare e risolvere le problematiche tipiche degli edifici di nuova costruzione ad alta efficienza, evitando le sempre più frequenti criticità che emergono in fase costruttiva.

La simulazione dinamica è inoltre già prevista e resa obbligatoria per determinati contesti. Il DPR 59/2009 prevede l'utilizzo di motori di calcolo in grado di esaminare l'influenza dei fenomeni dinamici per gli edifici del settore terziario di nuova costruzione con volumetria superiore ai 10.000 m^3. In particolare, il Decreto recita quanto segue[23]:

[23] DPR 95/2009, Art. 4, comma 27, lettera o).

> [...] *Nel calcolo rigoroso della prestazione energetica dell'edificio occorre prendere in considerazione i seguenti aspetti:*
>
> - *[...]*
> - *per gli edifici di nuova costruzione del settore terziario con volumetria maggiore di 10.000 m³, l'influenza dei fenomeni dinamici, attraverso l'uso di opportuni modelli di simulazione, salvo che si possa dimostrare la scarsa rilevanza di tali fenomeni nel caso specifico.*

È bene precisare, tuttavia, che un progetto complesso non necessariamente implica che sia anche complicato da modellare. È possibile, piuttosto, affermare che più strumenti forniti da un software di simulazione dinamica possono esaltare le competenze dei progettisti. Un professionista competente è in grado di proporre ai propri clienti soluzioni ad alta efficienza energetica, dimostrando le reali prestazioni dell'edificio mediante l'utilizzo di software in grado di riprodurre il reale funzionamento del sistema edificio.

I software di simulazione dinamica, come ad esempio Design Builder (utilizzato ai fini della presente tesi), richiedono più dati di input rispetto a software che operano in regime semi-stazionario, e allo stesso tempo forniscono anche più risultati, offrendo l'opportunità al progettista di lavorare a un livello di dettaglio superiore. Per sopperire a questa "problematica", il software viene dotato di auto-compilazione, con dati di default in base al tipo di modello realizzato. Le capacità del progettista saranno poi legate alla lettura e all'interpretazione dei risultati della simulazione, e all'applicazione delle opportune soluzioni progettuali.

Al fine di ottenere una maggiore efficienza in termini energetici dell'edificio, si può ipotizzare di adottare dei sistemi di controllo che, interagendo con l'edificio e con i sistemi tecnici, sono in grado di fornire l'esatto fabbisogno di energia attraverso un'accurata misura della richiesta energetica, in modo da evitare perdite e sprechi di energia. Tali sistemi vengono definiti con il termine *BACS* [19], o *Building Automation and Control Systems*. Il termine BACS si riferisce a sistemi centralizzati che monitorano, controllano e registrano le funzioni dei sistemi di servizio dell'edificio. Le strutture dell'edificio che vengono in questo modo monitorate e controllate tendono mantenere un ambiente più efficiente, riducendo di conseguenza l'impatto sull'ambiente ed i relativi costi dell'energia.

Le strutture che un BACS è in grado di controllare sono le seguenti:

- sistemi meccanici;
- sistemi idraulici;
- sistemi elettrici;
- riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC);
- illuminazione;
- sicurezza e sorveglianza;
- allarmi;
- ascensori.

C'è una crescente sovrapposizione fra i concetti di BACS e la necessità di imparare dai dati acquisiti per rendere più efficienti gli edifici. Ciò include sempre di più tecnologie come la connessione ad internet per diventare *edifici smart* o *domotici*. Un BACS è composto dai seguenti elementi:

- sensori, che misurano valori come temperatura, umidità, livelli di illuminamento, presenza nell'ambiente, e così via;
- sistemi di controllo, che forniscono una risposta ai dati acquisiti, utilizzando algoritmi applicano la logica e inviano i comandi;
- dispositivi di uscita, che eseguono i comandi del sistema di controllo;
- protocollo di comunicazione, che usa il linguaggio dei componenti BACS;
- pannello di controllo, che è l'interfaccia utente per la segnalazione dei dati e l'interazione con i sistemi BACS.

Ci sono molti altri termini simili per indicare l'automazione dell'edificio, come ad esempio *Building Management System* (*BMS*), *Building Control System* (*BCS*) oppure *Building Automation System* (*BAS*). In ogni caso, il BACS è definito dallo standard europeo UNI EN ISO 16484-2 [120] [121].

2.2. EnergyPlus

EnergyPlus è un motore di simulazione energetica che ingegneri, architetti e ricercatori possono usare per modellare sia il consumo di energia (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione) sia l'uso dell'acqua negli edifici. È uno strumento molto potente, ma difficilmente utilizzabile per le consulenze in ambito professionale senza l'impiego di specifici software di compilazione. È privo di un'interfaccia "user friendly", che richiede una compilazione a tastiera di tutti i dati, geometrici e funzionali. Considerata la mole di dati da processare, per un ambito non legato alla formazione o alla ricerca, la realizzazione di modelli di calcolo deve essere mediata da uno strumento in grado di gestire ed agevolare il lavoro del progettista. Alcune delle più note capacità di calcolo di EnergyPlus[24] sono:

- soluzioni simultanee e integrate delle condizioni della zona termica e la risposta dei sistemi HVAC;
- soluzioni basate sul bilancio termico degli effetti radianti e convettivi che producono calcoli di comfort termico delle temperature superficiali e condensazione;
- intervalli di tempo sub-orari definiti dall'utente per l'interazione fra le zone termiche e l'ambiente;
- modello di trasferimento combinato di energia termica e massa che tiene conto dei movimenti dell'aria fra le zone;
- eseguire simulazioni del modello utilizzando dati climatici orari reali per verificare come l'edificio si dovrebbe comportare in condizioni operative reali;
- verificare gli effetti delle modifiche su alcuni parametri chiave di progettazione, quali per esempio: consumo annuo di energia, ore di sovra-riscaldamento ed emissioni di CO_2;
- modelli di disposizione delle aperture finestrate avanzati che includono tapparelle controllabili, vetri elettrocromici, e bilanci termici che calcolano l'irraggiamento solare assorbito dalle finestre;
- simulare l'effetto di ombreggiamento e di riflessione di elementi architettonici come colonne, tende da sole e sistemi di schermatura complessi;
- calcoli dell'illuminamento e dell'abbagliamento per garantire il comfort visivo e indirizzare i sistemi di controllo dell'illuminazione;
- HVAC basato su componenti che supportano i sistemi di configurazione sia standard che nuovi;
- strategie di controllo dei sistemi HVAC e di illuminazione esistenti e sistemi per il controllo definiti dall'utente;
- interfaccia di modellazione funzionale di importazione ed esportazione per la co-simulazione con altri motori di calcolo;

[24] L'elenco viene stilato in funzione di quanto indicato sul sito di EnergyPlus [18]

- rapporti di output sommari e dettagliati, dove l'utente può selezionare la risoluzione temporale da annuale a sub-oraria, con tutte le sorgenti di moltiplicazione dell'energia;
- visualizzare i risultati del comfort con: curve di distribuzione delle ore di sotto-riscaldamento e/o di sovra-riscaldamento, andamento del comfort secondo i criteri ASHRAE 55 (carichi non soddisfatti), Fanger PMV, Pierce PMV ET, Pierce PMV SET, Pierce Discomfort Index (DISC), Pierce Thermal Sens. Index (TSENS), Kansas Uni TSV;
- calcolare il risparmio di energia e di anidride carbonica con EnergyPlus, attraverso il controllo delle luci elettriche in base alla disponibilità di luce naturale. I livelli di illuminamento della luce diurna in un edificio dipendono da molti fattori, tra cui le condizioni di copertura del cielo, la posizione del sole, le posizioni dei sensori a fotocellula, la posizione, la dimensione e la trasmittanza del vetro delle finestre, le tende alle finestre e la riflessione delle superfici interne. La riduzione di illuminazione elettrica è calcolata in base al livello di illuminamento della luce diurna, al setpoint di illuminamento, alla frazione della zona controllata e al tipo di controllo di illuminazione Esportare tutti i dati di calcolo per proseguire la simulazione direttamente nell'interfaccia di EnergyPlus.

2.3. Design Builder

Design Builder è un software di simulazione dinamica creato per facilitare il processo di modellazione e simulazione energetica avanzata di edifici. Viene utilizzato per calcolare il fabbisogno energetico per i servizi di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione degli edifici, nonché per la qualità dell'aria e la produzione di anidride carbonica, illuminazione e, più in generale, del comfort dell'ambiente indoor. Design Builder utilizza il motore di simulazione EnergyPlus, uno strumento ormai standard nel settore della simulazione energetica degli edifici, pertanto è uno strumento preciso e potente e che si occupa di effettuare integralmente i complessi calcoli; allo stesso tempo il software rappresenta l'interfaccia utente del motore di calcolo, più facile da usare.

Il software è stato sviluppato per poter essere utilizzato da una varia platea di professionisti, come ad esempio architetti, ingegneri, lavoratori dei servizi di costruzione, consulenti energetici e relativi dipartimenti universitari. Di seguito, sono stati elencati alcuni dei principali utilizzi del software, come ad esempio:

- importare modelli di progetto realizzati in CAD oppure in BIM;
- modellare velocemente edifici complessi;
- visualizzare il sito di progetto e le ombreggiature;
- comparare alternative di progetto;
- ottimizzare il progetto in ogni fase in relazione agli obiettivi del cliente che mutano durante l'iter progettuale;
- valutare le opzioni di facciate in termini di surriscaldamento, consumi di energia e parametri di schermatura dell'edificio;
- valutare un utilizzo ottimale della luce diurna, modellando sistemi di controllo dell'illuminazione e determinare il risparmio dell'energia elettrica;
- calcolare le proprietà dell'edificio in termini di temperatura, velocità e distribuzione della pressione utilizzando il modulo CFD (Computational Fluid Dynamics);
- semplificare la simulazione energetica di EnergyPlus;
- eseguire la simulazione energetica degli edifici caratterizzati dalla ventilazione naturale;
- generare immagini renderizzate ed animazioni;
- utilizzare il software nelle attività didattiche di modellazione energetica e simulazione nei corsi universitari.

Il software permette di accedere a tutte le funzionalità di simulazione più richieste riguardanti l'involucro edilizio, massa termica, vetri, schermature, energie rinnovabili, HVAC ed analisi finanziaria.

Le tempistiche della realizzazione di un modello in Design Builder sono comparabili, ed a volte inferiori, a quelli richiesti per impostare una simulazione con i vari software per la valutazione energetica in regime semi-stazionario. Il software dispone di un'interfaccia semplificata, che di conseguenza è in grado di ridurre i tempi di lavoro a seconda del livello di definizione della consulenza che si sta andando a realizzare. Questa caratteristica è importante in quanto dà l'opportunità di inserire solamente i dati necessari, risparmiando ore di lavoro che vengono sprecate nella compilazione di dettagli e informazioni non necessarie per il progetto. Tale funzione è inoltre utile per eseguire rapidamente diagnosi o audit energetici.

Bisogna tuttavia separare le attività di impostazione del modello da quelle di simulazione ed analisi dei dati. Design Builder permette di impostare il modello di simulazione in tempi brevi grazie all'interfaccia di modellazione tridimensionale e del suo sistema di gestione gerarchica dei dati. D'altro canto, i tempi necessari per lo svolgimento dei calcoli da parte del software, l'analisi dei risultati e l'ottimizzazione del modello possono variare a seconda delle necessità del progettista: un'analisi approfondita richiederà sicuramente più tempo, considerando un più ampio numero di risultati.

La metodologia di calcolo di Design Builder è stata validata per la norma UNI EN ISO 52016-1[25], secondo le modalità descritte dalla norma UNI EN ISO 15265 [119].

Gerarchia degli elementi

La modellazione in Design Builder si struttura secondo l'illustrazione in Figura 2.1. La struttura gerarchica permette di avere un modello ordinato e lavorare su gradi di dettaglio differenti. I livelli posti più in alto "comandano" quelli più in basso: più precisamente i dati vengono inseriti dal livello superiore nella struttura gerarchica, così i dati del Blocco edificio sono inseriti dal livello Edificio, i dati di Zona provengono dal livello Blocco edificio e, infine, i dati del livello Superficie richiamano quelli del livello Zona, e lo stesso vale per l'ultimo gradino nella gerarchia che è il livello delle Aperture. La struttura così predisposta permette al progettista di definire i settaggi al livello edificio che diventano attivi per tutto l'intero edificio, o fare delle modifiche al livello Blocco edificio per cambiare i dati per tutte le Zone e/o Superfici presenti nel Blocco. Questa caratteristica è molto importante in quanto permette di produrre modelli di simulazione dinamica in tempi piuttosto rapidi ed ottenere di conseguenza risultati molto attendibili, qualora l'iter progettuale sia, per esempio, in fase preliminare e questo procedimento ha lo scopo di presentare al cliente delle scelte progettuali da poter sviluppare in tempi successivi.

Nel caso in cui l'edificio da modellare presenti caratteristiche particolari per cui inserire dati generici non è sufficiente a rappresentare le reali condizioni fisiche e di esercizio, si può scendere di livello per apportare le opportune modifiche. A mano a mano che il grado di dettaglio aumenta e si scende dunque a livelli sempre inferiori, questi riprendono di default i dati inseriti nel livello (o nei livelli) superiore e consentono allo stesso tempo al progettista di poterli modificare.

[25] La UNI EN ISO 52016-1:2018 sostituisce la UNI EN ISO 13790:2008, ritirata il 1° marzo 2018.

Per identificare la posizione esatta dove i dati sono stati inseriti in Design Builder si usano una serie di colori che evidenziano la voce del dato, colori definiti di default dal software. Per esempio, i dati inseriti al livello Edificio in modo di default o definiti dall'utente sono evidenziati "rosso", mentre i dati così acquisiti (in modo automatico) ai livelli inferiori verranno visualizzati in "blu" (vedere Figura 2.2). Ulteriori modifiche nei livelli della struttura gerarchica seguono la stessa logica: colore rosso per i dati modificati rispetto a quelli di default e colore "blu" per quelli acquisiti.

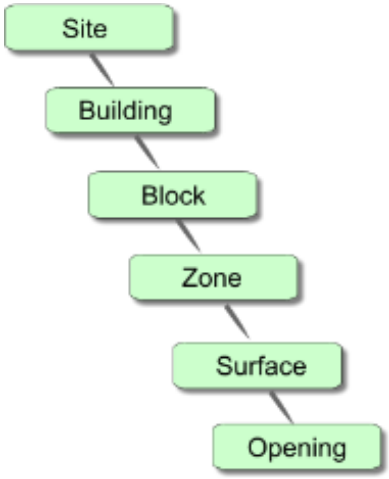


Figura 2.1. Struttura gerarchica del modello in Design Builder (Immagine tratta da [14])

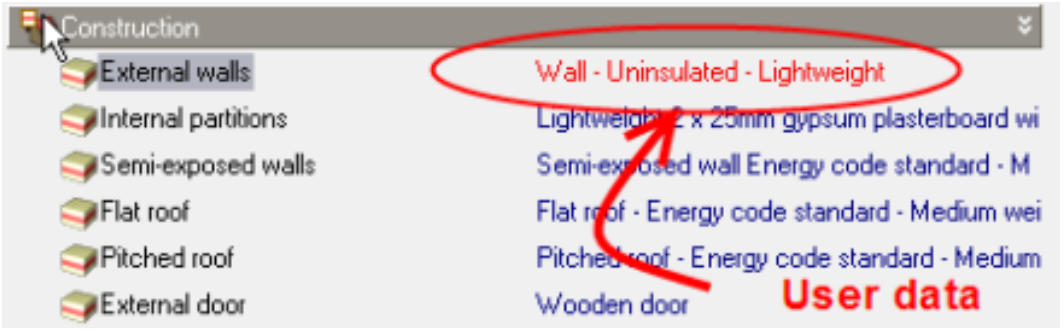


Figura 2.2. Esempio di inserimento dati da parte dell'utente: in rosso vi sono i dati modificati, in blu quelli di default per il rispettivo livello nella struttura gerarchica (Immagine tratta da [14])

Il meccanismo della gerarchia è un modo veloce per l'inserimento dei dati in un modello, tuttavia bisogna fare attenzione a inserire la minima quantità di dati dal sistema di "eredità". Ad esempio, se tutte le Zone in un determinato Blocco hanno la stessa attività ("Lavoro d'ufficio") si deve impostare tale attività solamente al livello del Blocco, e non per ciascuna Zona, come multiplo dello stesso dato. Ciò rende più veloce effettuare modifiche in un secondo momento.

Il software è supportato da un'ampia gamma di strumenti didattici utili per imparare e comprendere come esso deve essere utilizzato. Sul sito[26] è presente una sezione dedicata al Training che si compone, tra le altre cose, da tutorial, webinar e altri materiali digitali. I tutorial sono realizzati in modo da fornire all'utente le basi per la comprensione del funzionamento e della logica del software: con le prime lezioni si dà uno sguardo generale alle possibili funzioni che uno strumento simile è in grado svolgere, per poi passare agli step successivi dove vengono spiegati passo a passo l'interfaccia grafica, le basi della modellazione e la complessa procedura di inserimento dei dati; si conclude poi con una breve panoramica sulla simulazione vera e propria ed i vari risultati che essa può generare. Oltre alle video-lezioni, i produttori di Design Builder mettono a disposizione dell'utente una serie di documenti, ispirati anch'essi alla logica dell'insegnamento dei fondamenti del software proprio come il materiale video, in formato digitale che possono dare un supporto più pratico. Infine, il software stesso è dotato di un Manuale utente in cui viene spiegata in modo dettagliato ogni funzione, servendosi anche di immagini che aiutano l'utente a orientarsi in maniera più facile all'interno dello stesso documento.

La Figura 2.3 illustra l'interfaccia grafica di Design Builder, ovvero il modo in cui si presenta di fronte all'utente. La schermata è stata scomposta in quattro categorie:

1. Barra degli strumenti;
2. Pannello di navigazione;
3. Area di modellazione;
4. Pannello dei dati di modello.

La barra degli strumenti mette a disposizione dell'utente una serie di comandi che vanno dalle impostazioni del file del modello fino alla visualizzazione del modello, in ogni suo aspetto, passando per tutti quei comandi di modifica del modello tridimensionale presenti in molti altri software di modellazione tridimensionale.

Il pannello di navigazione permette di organizzare il lavoro di modellazione in funzione proprio della struttura gerarchica osservata nella Figura 2.1. Si parte dunque dal Sito, per poi scendere all'Edificio (possono essere modellati più di un edificio, tuttavia se hanno dimensioni particolarmente grandi è più opportuno suddividere in più file al fine di non appesantire eccessivamente la procedura di simulazione), al Blocco edificio e così via fino all'Apertura. Per edifici composti da più piani, utilizzando questo pannello si può navigare all'interno di ciascun piano e modellarlo separatamente (se vi è difformità di distribuzione in pianta) ed assegnare gli eventuali dati difformi dal resto dell'edificio. Inoltre, eventuali elementi particolari, come ad esempio le finestre, possono essere modellati andando a selezionare la specifica posizione attraverso l'uso dei menù a tendina.

L'area di modellazione si compone dello spazio tridimensionale disposto attorno all'origine degli assi X, Y e Z. La modellazione in questo software si realizza per mezzo dei *blocchi*, forme geometriche estruse da utilizzare per assemblare un edificio in Design Builder. Si realizzano a partire da disegni bidimensionali su piani orizzontali o verticali e poi si estrudono ottenendo

[26] Disponibile all'indirizzo: www.designbuilder.co.uk

forme tridimensionali. Sono oggetti versatili, e una volta creati si possono muovere le superfici allungandole e/o tagliandole per mezzo di piani arbitrari. Sono sostanzialmente elementi tridimensionali a base quadrata, rettangolare, circolare o poligonale aventi altezza definita dal progettista (può essere relativa all'altezza di un piano dell'edificio o variabile). Sono oggetti semplici che si possono muovere nello spazio tridimensionale.

Al Blocco edificio (che andrà a far parte in modo automatico dell'Edificio) si possono assegnare un'altezza da terra specifica e una posizione sul piano cartesiano definiti dall'utente. Una volta disegnato il Blocco, si apre la finestra specifica attraverso il Pannello di navigazione e si possono modificare ulteriormente disegnando le partizioni interne, le aperture (esterne ed interne), definire le zone termiche, e così via. Se il Blocco disegnato rappresenta un piano generico dell'edificio ed è simile ai piani superiori, si può copiare e successivamente incollare impilandoli uno sopra l'altro fino alla definizione dell'edificio completo.

Al fine di facilitare il lavoro di modellazione, si possono importare file esterni come disegni in CAD e immagini che forniscono una guida più precisa alla definizione dell'edificio. Si possono inoltre importare modelli realizzati in BIM oppure modelli di altri edifici realizzati sempre con Design Builder.

L'area di modellazione si compone di ulteriori schede, quali:

- Modellazione;
- Visualizzazione;
- Progetto di riscaldamento;
- Progetto di raffrescamento;
- Simulazione;
- CFD;
- Illuminazione naturale;
- Costi e impronta ecologica.

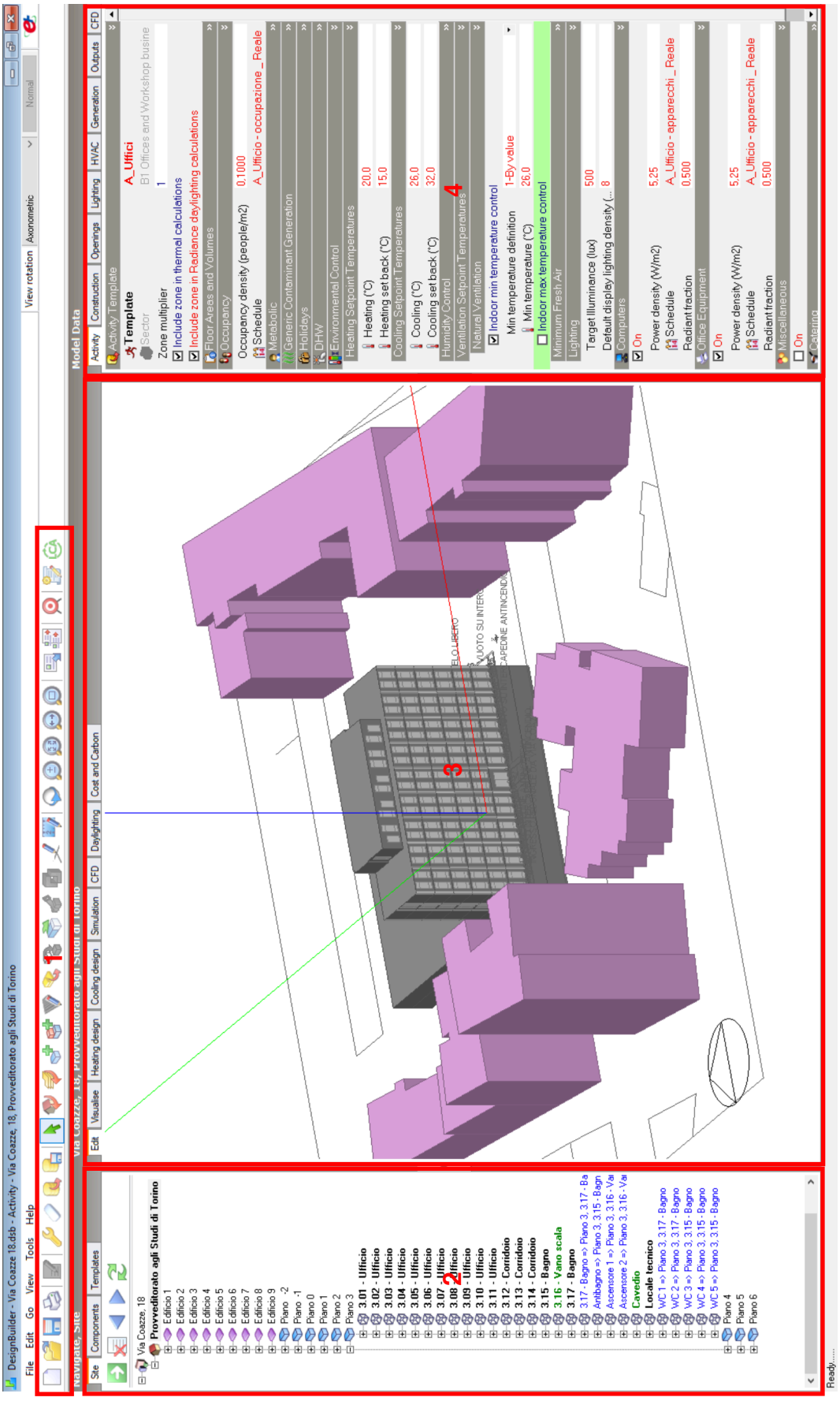


Figura 2.3. Interfaccia grafica di Design Builder

Tramite la scheda Visualizza si ottiene il modello renderizzato, il cui aspetto grafico dipende dalle caratteristiche dei materiali inseriti per le componenti costituenti l'involucro dell'edificio. Da qui si possono impostare la qualità delle immagini render da esportare, così come realizzare brevi animazioni. L'aspetto più importante, tuttavia, di questa funzione è la possibilità di generare il *diagramma solare*, attraverso cui studiare gli ombreggiamenti intrinsechi dell'edificio stesso ed estrinsechi legati all'ambiente (edifici) circostante. Ciò si può fare per ogni momento della giornata (nelle ore diurne) per ogni singolo giorno dell'anno. Si possono pertanto analizzare le criticità ed anche i vantaggi dell'ombreggiamento, individuando i momenti più rappresentativi e sottoporli ad attente analisi progettuali.

Nelle schede del *Progetto di Riscaldamento e Raffrescamento* vengono visualizzati i risultati dei fabbisogni energetici dell'edificio relativi ai servizi di riscaldamento e raffrescamento.

Il fabbisogno energetico per *riscaldamento* viene calcolato usando EnergyPlus secondo quanto previsto dalla UNI EN 12831. La simulazione calcola le capacità termiche richieste per mantenere i setpoint di temperatura e mostrare la dispersione totale attraverso: serramenti, pareti, partizioni, solai, coperture, infiltrazione esterna, ventilazione naturale interna. Per mezzo di opportuni grafici vengono illustrate le temperature (temperatura dell'aria, radiante e operativa) ed il bilancio energetico. Separatamente, vengono quantificati numericamente questi valori e viene generato un resoconto completo per piano dell'edificio e per singola zona.

Per quanto riguarda il *raffrescamento*, invece, viene effettuato per determinare la capacità dell'attrezzatura di raffrescamento meccanico richiesta per andare incontro alle condizioni climatiche nella stagione estiva, corrispondenti al sito di ubicazione dell'edificio. Nelle zone in cui non vi è il raffrescamento meccanico, le temperature di free-floating sono calcolate includendo gli effetti della ventilazione naturale e meccanica. Questi calcoli di progetto sono tradizionalmente effettuati usando il regime stazionario. Con Design Builder si possono effettuare gli stessi calcoli usando il motore di simulazione dinamica EnergyPlus. Come nel caso precedente, i risultati vengono illustrati sotto forma di grafici mettendo in evidenza anche in questo caso le temperature (viene aggiunta temperatura esterna a bulbo secco), il bilancio termico, l'umidità relativa e la ventilazione. Nel caso estivo si analizzano i dati per uno specifico giorno della stagione. In entrambi i casi è possibile personalizzare i grafici illustrati dal software impostando i dati da visualizzare, sotto forma di dati complessivi, dati relativi al sito, al comfort, agli apporti termici interni, e, infine, i dati relativi all'edificio. Questi risultati possono essere visualizzati sotto forma di grafici, griglia, tabella o misto.

Nella *Simulazione* viene analizzato in regime dinamico il bilancio energetico dell'edificio. Prima di lanciare una simulazione si devono specificare alcuni parametri importanti che il risultato deve mettere in evidenza, come il tipo di temperatura interna da analizzare (dell'aria oppure operativa) ed il periodo e la frequenza (mensile/stagionale, giornaliera, oraria e/o sub-oraria) della simulazione. La durata del processo di calcolo dipende dalla complessità del modello e dall'ammontare dei dati inseriti, nonché dai parametri della simulazione stessa. I risultati, come nei casi precedenti, vengono illustrati sotto forma di grafici, griglie e tabelle.

Si deve specificare che al livello del Sito si impostano tutti i dati relativi all'ubicazione dell'edificio (latitudine e longitudine) e dettagli del sito (altezza sul livello del mare, orientamento, esposizione al vento), nonché i dati climatici (nel caso di Design Builder sono di tipo orario).

Pannello di inserimento dati

Il pannello dei dati di modello rappresenta forse l'aspetto più importante del software. Qui, viene definito l'edificio in ogni suo aspetto, utilizzando le seguenti schede:

- Attività;
- Costruzione;
- Aperture;
- Illuminazione;
- HVAC;
- Generazione;
- Risultati;
- CFD.

Attività

La scheda *Attività* permette di definire il tipo di attività (o di utilizzazione) delle zone dell'edificio, che includono informazioni riguardo a:

- tipo di zona;
- livelli di occupazione e temporizzazioni, vacanze, ecc.;
- tassi metabolici;
- acqua calda sanitaria;
- controllo ambientale – setpoint di temperatura di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione, controllo dell'umidità (relativa), tasso minimo di ricambio dell'aria, illuminazione;
- apporti dovuti ai computer;
- apporti dovuti ai dispositivi da ufficio;
- apporti vari.

I valori da utilizzare per definire correttamente queste voci in relazione al progetto su cui si sta lavorando, si devono basare sui riferimenti normativi indicati nel capitolo precedente, in particolare la FprEN 16798-1. Le indicazioni fornite dalle normative sopracitate permettono all'utente progettista di utilizzare valori noti (o di default) nei casi in cui, in riferimento ad un progetto che si sta modellando in Design Builder, questi non siano conosciuto o direttamente quantificabili. Inoltre, possono fungere da riferimento in tutti quei casi dove i dati ottenuti da una casistica reale non siano chiari, o comunque non ci sia un'attendibilità.

Costruzioni

Nella scheda *Costruzioni* si inseriscono i dati relativi al fabbricato. Design Builder utilizza componenti che modellano la conduzione del calore attraverso pareti, coperture, terreno e altri parti opache dell'involucro dell'edificio. Gli elementi costruttivi possono essere selezionati per

definire le proprietà termofisiche e visuali delle varie superfici interne ed esterne dell'edificio. Essi sono composti da una serie di strati di spessore e materiale differenti che caratterizzano la componente edilizia. Le stratigrafie così realizzate si applicano successivamente alle varie componenti edilizie, quali:

- pareti esterne – definiscono le murature della costruzione che separano l'ambiente interno da quello esterno;
- copertura piana – si applica a superfici esterne orizzontali;
- copertura spiovente – si applica alle superfici inclinate esterne, quando l'ambiente interno sottostante è caratterizzato una zona occupata oppure non occupata;
- partizioni interne – definiscono la costruzione delle partizioni interne e quindi la suddivisione dei Blocchi in Zone, e le partizioni tra diversi Blocchi
- elementi semi-esposti – si applicano per pareti, coperture e solai, quando l'elemento divisorio è posizionato tra zona riscaldata ed una zona non riscaldata; il software determina automaticamente quale delle zone è relativamente "esterna" e usa queste informazioni per ordinare correttamente gli strati dei materiali all'interno del componente edilizio (per esempio il muro);
- pavimenti controterra – solaio utilizzato fra una zona interna ed il terreno, che può essere combinato in modo facoltativo con ulteriori elementi costruttivi del terreno;
- pavimenti esterni – solaio adiacente all'ambiente esterno, per esempio un elemento a sbalzo dell'edificio o che per altre ragioni non è adiacente al terreno;
- pavimenti interni o interpiano – solaio che suddivide zone occupate all'interno dell'edificio;
- sottosuperfici – sono eccezioni rispetto alla superficie principale dell'elemento costruttivo, applicabili a pareti, copertura, serramenti;
- massa termica interna – il software utilizza le caratteristiche termiche degli elementi costruttivi quali pareti, solai, coperture, partizioni, ecc. in ogni zona e nei conteggi della massa termica nelle simulazioni; si possono includere masse termiche addizionali che conteggino le partizioni all'interno di una zona, arredi o altre masse che possono incidere sulla risposta termica dinamica della zona;
- adiacenza (solo al livello Blocco edificio) – può essere automatica (viene determinata automaticamente in funzione della posizione all'interno dell'edificio: è una funzione di default dove le superfici esterne sotto il livello del terreno sono considerate adiacenti al terreno e le superfici esterne sopra il livello del terreno sono considerate adiacenti alle condizioni esterne), non adiacente al terreno (se non si trova sotta il livello del terreno), adiacente al terreno o adiabatica (il flusso di calore non viene trasferito attraverso la superficie esterna; si usano di solito quando la superficie suddivide due zone con condizioni sostanzialmente simili);
- ponti termici.

La massa termica interna così definita è usata per specificare la costruzione e l'area degli elementi all'interno dello spazio che sono importanti per i calcoli del trasferimento del flusso di

calore, ma non sono necessariamente importanti geometricamente. Per esempio, è il caso degli arredi all'interno dello spazio, in modo particolare per grandi spazi.

Nella scheda delle Costruzioni possono essere impostati anche i dati relativi alla ventilazione per infiltrazione, attraverso un tasso di ricambio dell'aria costante.

Aperture

Il termine *Aperture* in Design Builder descrive ogni sorta di apertura nell'involucro edilizio dell'edificio. Vengono modellate come se fossero eccezioni alla superficie principale della costruzione. Ci sono cinque tipologie differenti di aperture:

- finestre;
- sottosuperfici: elementi opachi all'interno della superficie che hanno proprietà differenti dall'elemento costruttivo principale, come ad esempio architravi e pannelli leggeri;
- forature;
- porte;
- bocchette di ventilazione.

Inoltre, si definiscono le caratteristiche delle superfici vetrate per le finestre esterne, interne ed i lucernari. Queste caratteristiche riguardano la tipologia e le caratteristiche del vetro (singolo, doppio, triplo e altri tipi di combinazioni), le dimensioni, il telaio ed eventuali divisori, le spallette dei muri (rientranze della finestra rispetto al filo esterno della parete esterna), eventuali sistemi di schermatura e ombreggiamento, nonché il controllo del flusso d'aria ed eventuali programmi (come verrà definito più avanti) di utilizzo. Le porte in Design Builder sono elementi opachi; eventuali porte vetrate devono essere modellate come finestre.

Tutte le aperture possono essere impostate in modo automatico dal Pannello di inserimento dati, oppure possono essere disegnate manualmente mediante gli appositi comandi, andando a lavorare direttamente sulla singola superficie.

Illuminazione

Nella scheda *Illuminazione* vengono definiti tutti i dati relativi all'illuminazione ed ai sistemi di controllo dell'edificio. L'illuminazione generale considera l'illuminazione principale nella stanza. È assunta per essere in grado di essere sostituita dalla luce diurna attraverso il controllo dell'illuminazione, se questa funzione è selezionata. Ci sono due modalità per definire l'uso dell'energia per illuminazione in una zona, impostando le opzioni di modello secondo i seguenti parametri:

- [W/m^2], dove gli apporti massimi per illuminazione sono definiti come W/m^2 indipendentemente dal livello di illuminazione richiesto;
- [W/m^2/100 lux], dove gli apporti massimi per illuminazione sono definiti come W/m^2/100 lux e l'energia per illuminazione attuale per la zona nella simulazione si basa su questo valore più l'area di pavimento ed i requisiti di illuminazione come segue:

Potenza massima di illuminazione [W] = Energia di illuminazione [W/m^2/100 lux] x Area di pavimento della zona [m^2] x Requisiti di illuminazione della zona [lx]] / 100

Quando viene caricata l'illuminazione nel modello, gli apporti interni dovuti all'illuminazione sono calcolati dividendo i dati inseriti in [W/m^2/100 lux] per il livello di illuminamento impostato nella scheda Attività.

L'illuminazione artificiale può essere controllata in funzione della disponibilità della luce diurna naturale. Quando viene attivata la funzione del controllo dell'illuminazione i livelli di illuminamento vengono calcolati per ogni singolo step temporale durante la simulazione, e poi usato per determinare di quanto l'illuminazione elettrica può essere ridotta. Il livello di illuminamento dovuto alla luce diurna in una zona dipende da vari fattori, che includono le condizioni del cielo, la posizione del sole, la posizione dei sensori delle fotocellule, la posizione, la dimensione e la trasmittanza del vetro delle finestre, gli ombreggiamenti e la riflettenza delle superfici interne. La riduzione dell'illuminazione artificiale dipende dunque dal livello di illuminamento della luce diurna, il valore di setpoint dell'illuminamento, la porzione della zona controllata e la tipologia del controllo dell'illuminazione.

HVAC

La scheda *HVAC* definisce gli impianti di riscaldamento e di raffrescamento dell'edificio. Questa sezione è suddivisa in tre sezioni principali per ciascuna delle opzioni di modello:

- semplice;
- compatto;
- dettagliato.

Ci sono opzioni di modello indipendenti di HVAC, come ad esempio la ventilazione naturale e la distribuzione della temperatura dell'aria. Tutte le altre opzioni possono apportare i seguenti dettagli:

- energia ausiliaria;
- ventilazione meccanica;
- riscaldamento;
- raffrescamento;
- controllo dell'umidità;
- acqua calda sanitaria.

L'opzione *semplice* di HVAC è adatta per essere utilizzata nelle fasi di progetto preliminari, o per altri tipi di analisi dove è richiesto il trattamento dettagliato dei sistemi di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione meccanica.

Il sistema HVAC *compatto* permette di modellare i sistemi HVAC con maggiore dettaglio senza la necessità di disegnare una rete del flusso dell'aria e trattare con la complessità dei sistemi di controllo ed i nodi di connessione.

L'operazione *della ventilazione naturale* può essere controllata utilizzando i dati nella scheda HVAC. Con la modalità *calcolata* selezionata nelle Opzioni di modello, al calcolo della ventilazione naturale si aggiungono dati riguardo alle Aperture, per controllare la temporizzazione e l'estensione delle operazioni delle aperture. La tipologia di ventilazione naturale dipende dal fatto che sia Programmata o Calcolata.

Nel primo caso si definisce il flusso dell'aria esterna secondo due modalità:

- per Zona – si inseriscono i tassi orari di ricambio dell'aria nella casella immediatamente sottostante, che vengono calcolati usando:

  m^3/s = ac/h x Volume Zona / 3600

  dove il Volume Zona è il volume dell'aria dello spazio calcolato in funzione delle opzioni per un'eventuale esclusione di elementi costruttivi quali pavimenti e/o soffitti;

- flusso d'aria minimo per persona – il flusso d'aria in [m^3/s] è calcolato come:

  m^3/s = Flusso Minimo x Numero Persone / 1000

  Flusso Minimo è il tasso minimo del flusso d'aria per persona [l/s•pers]

  Numero Persone = Densità Occupazione [pers/m^2] x Area Pavimento Zona [m^2]

La ventilazione naturale Programmata è attiva in ogni momento della simulazione quando:

- la temperatura dell'area nella Zona è maggiore della temperatura di setpoint di raffrescamento per ventilazione;
- la differenza tra la temperatura dell'aria interna ed esterna ($T_{in} – T_{out}$) è maggiore del delta T di ventilazione;

Il programma dell'operazione è attivo in quel momento nella simulazione.

Il tasso di ventilazione nella simulazione è calcolato moltiplicando la tasso massimo di ventilazione [ac/h] per il valore dell'operazione programmata.

Il tasso di *infiltrazione*, che si trova nella scheda Costruzioni, si calcola secondo le modalità Programmata o Calcolata. Nel primo caso si assume per essere costante per tutta la simulazione e può essere impostato in quattro diverse modalità:

- ac/h – è l'opzione di default dove l'infiltrazione è definita in ricambi dell'aria all'ora (ac/h), per esempio il volume di zona all'ora in condizione di pressioni operative standard;
- $m^3/h\text{-}m^2$ a 50 Pa – l'infiltrazione è definita con tasso di flusso d'aria in m^3/h per unità di area di superficie esposta, quando la differenza di pressione fra ambiente interno ed esterno è pari a 50 Pa (unità comunemente usata in Gran Bretagna);
- $m^3/h\text{-}m^2$ a 4 Pa – l'infiltrazione è definita con tasso di flusso d'aria in m^3/h per unità di area di superficie esposta, quando la differenza di pressione fra ambiente interno ed esterno è pari a 4 Pa (unità comunemente usata in Francia e Belgio);
- n50 – ac/h a 50 Pa – l'infiltrazione è definita in ricambi orari dell'aria (ac/h), per esempio il volume di zona per ora, quando la differenza di pressione fra l'ambiente interno ed esterno è pari a 50 Pa (unità comunemente usata in Europa).

Il tasso del flusso dell'aria in [m^3/s] alla pressione standard è calcolato dal ricambio d'aria in [ac/h] usando:

m^3/s = ac/h x Volume Zona / 3600

dove Volume Zona è il volume totale dell'aria dello spazio che include il volume degli elementi costruiti quali il pavimento ed il soffitto, e include metà del volume dei muri di partizione. Il ricambio orario dell'aria alla pressione standard è calcolato usando le equazioni presenti nella UNI EN 12831.

Nel secondo caso, l'infiltrazione è definita dalla posizione in una scala a cinque punti, che va da "Molto povero" a "Eccellente".

Template

In Design Builder la funzione *Template* permette all'utente di caricare velocemente dati all'interno del modello. Questi sono dei database di dati tipici generici, e di seguito sono indicati alcuni di quelli presenti all'interno del software:

- template di Attività;
- template di Costruzione;
- template di Aperture;
- template di Facciate;
- template di HVAC;
- template di Posizione (ubicazione dell'edificio);
- dati climatici orari;
- coefficienti di pressione;
- tassi metabolici;
- regioni legislative;
- codici energetici;
- settori.

Le librerie di template sono caricate automaticamente all'interno del modello quando viene creato il nuovo file. Qualunque cambiamento alla libreria non influenza i modelli di edifici preesistenti poiché fanno riferimento ai propri set di Template di Modello.

Al momento della creazione di un nuovo, e la selezione di un Template di Modello specifico o meno, la libreria così importata all'interno del file viene associata automaticamente ad ogni voce del software. Ciò è utile, come accennato precedentemente, per eseguire simulazioni in tempi brevi utilizzando dati che in questo modo vengono caricati di default. È naturale pensare che qualunque dato si voglia cambiare per meglio rappresentare la situazione del progetto che si modella in Design Builder si debba modificare o, ancora meglio, creare un nuovo template personalizzato. Un nuovo template non necessariamente deve riguardare tutte le informazioni, ma anche solamente una o più voci. Utilizzando poi il Pannello di inserimento dati, per ciascuna scheda si possono personalizzare i Template principali, che a loro volta ne

contengono degli altri. Ciò è utile per un inserimento veloce dei dati, ed un controllo dei dati nel caso di una modifica successiva. Inoltre, si hanno meno probabilità di incorrere in errori di inserimento dei dati, con la conseguenza di non ottenere risultati attendibili dalla simulazione, e incidendo sul fattore tempo nel trovare l'errore e procedere con la sua correzione.

La personalizzazione dei template, infine, permette di "costruire" più scenari, da utilizzare per eventuali comparazioni.

Programmi operativi

In Design Builder, per ottenere risultati più accurati e prossimi al reale uso dell'edificio da una simulazione di tipo dinamica, si ha la possibilità di utilizzare i *programmi (operativi)*. Questi sono utilizzati per definire:

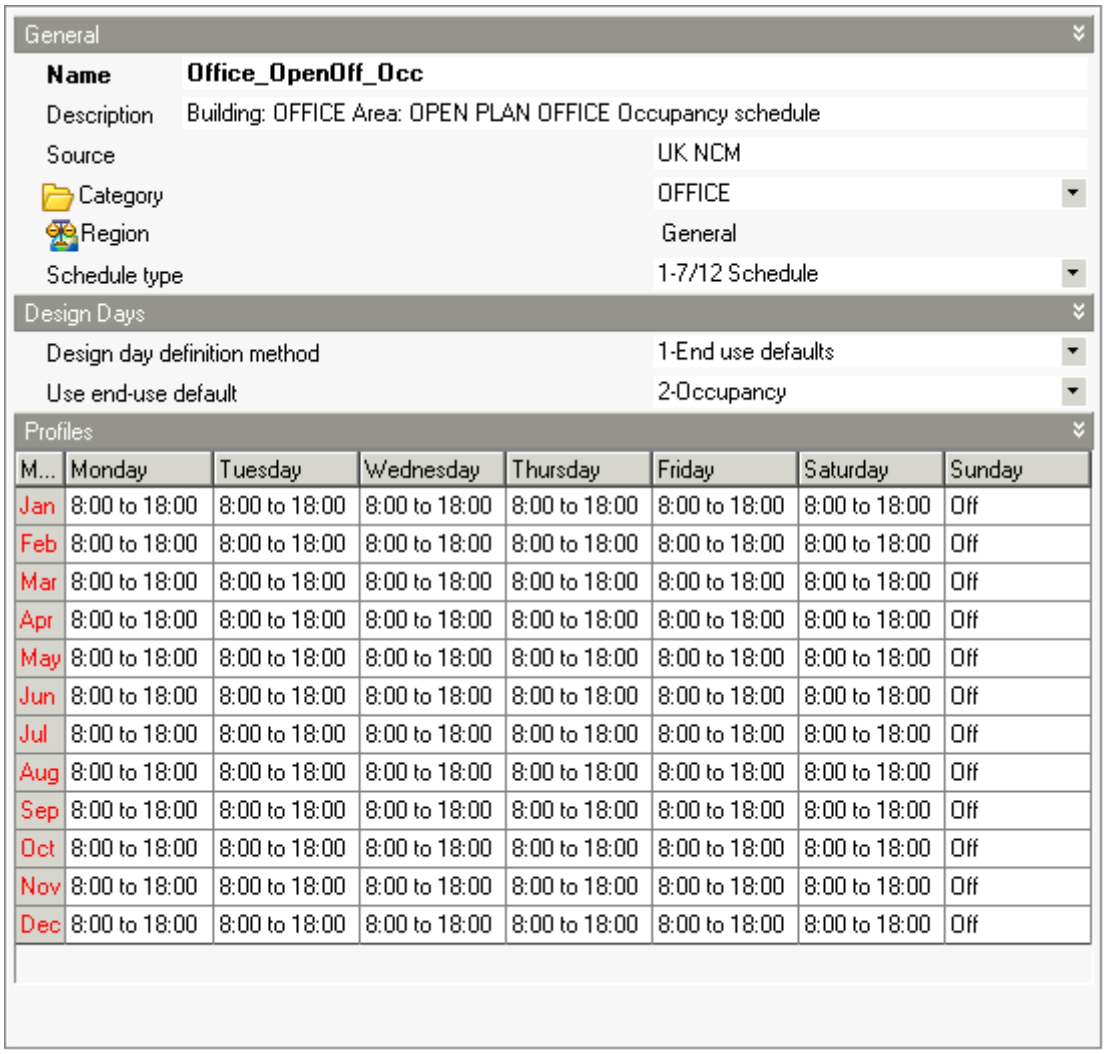
- i tempi di occupazione;
- il funzionamento dell'attrezzatura, illuminazione e HVAC;
- setpoint di temperatura per riscaldamento e raffrescamento.

I programmi si possono definire in due modi:

- programmi 7/12, dove ogni giorno della settimana ed ogni mese dell'anno hanno un'unica variazione definita giornaliera usando dei profili;
- programmi compatti, dove si ha una definizione più flessibile usando EnergyPlus, sotto forma di dati basati sul formato di testo.

Il primo caso si presenta sotto forma di tabella dove le righe rappresentano i mesi dell'anno, e le colonne i giorni della settimana (Figura 2.4). Le celle sono caratterizzate da *Profili*, che si possono aggiungere da una libreria esistente, oppure crearne di nuovi, personalizzati. Anche qui, ci sono due modi per definire il programma:

- usi finali di default – generale, occupazione, illuminazione, attrezzatura, richiesta di riscaldamento, richiesta di raffrescamento, HVAC, richiesta di ventilazione naturale, acqua calda sanitaria;
- profili – sono definiti sia il progetto giornaliero operativo di riscaldamento sia quello di raffrescamento; risulta essere un modo più flessibile e pulito rispetto agli usi finali, ed è una scelta più preferita dagli utenti.



General

Name	**Office_OpenOff_Occ**
Description	Building: OFFICE Area: OPEN PLAN OFFICE Occupancy schedule
Source	UK NCM
Category	OFFICE
Region	General
Schedule type	1-7/12 Schedule

Design Days

Design day definition method	1-End use defaults
Use end-use default	2-Occupancy

Profiles

M...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Feb	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Mar	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Apr	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
May	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Jun	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Jul	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Aug	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Sep	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Oct	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Nov	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Dec	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off

Figura 2.4. Rappresentazione di un programma operativo generico (ufficio) di tipo 7/12 (Immagine tratta da [14])

I *programmi compatti* si definiscono usando una versione leggermente modificata del formato standard di EnergyPlus. Usando questo programma si accede a tutte le funzionalità del programma in un singolo comando (Figura 2.5).

Le righe di comando sono caratterizzate da diversi elementi posti all'inizio della riga, seguiti dai valori che definiscono il programma:

- nome – è il nome del programma;
- tipo di programma – è Fraction anche per programmi per la definizione di setpoint di temperatura, e Any Number per inserire valori maggiori di 1;
- Through (data) – contiene la data finale per il periodo del programma; si possono definire periodi multipli in questo modo, come le variazioni stagionali;
- For (giorni) – contiene i giorni applicabili (weekdays, weekends, holidays, alldays, summerdesignday, winterdesignday, Sunday, Monday, Tuesday, Wednesday, Thursday, Friday, Saturday, customday1, customday2);

- Interpolate (opzionale) – interpola I valori usati nella simulazione;
- Until (ora del giorno) – contiene l'ora finale per giorno corrente;
- Value – valore del programma dell'intervallo temporale specifico, sotto frazione da 0 a 1.

```
SCHEDULE:COMPACT,
Office_CellOff_Light,
Fraction,
Through: 31 Dec,
For: Weekdays SummerDesignDay,
Until: 07:00, 0,
Until: 19:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For: Weekends,
Until: 24:00, 0,
For: Holidays WinterDesignDay AllOtherDays,
Until: 24:00, 0;
```

Figura 2.5. Rappresentazione di un programma operativo generico di tipo compatto (Immagine tratta da [14])

Profili

I *Profili* definiscono le variazioni in occupazione, uso dell'attrezzatura o la temperatura nel corso di un singolo giorno (Figura 2.6). Ci sono tre tipi di profili:

- costante – ha lo stesso valore per tutto il giorno;
- periodo singolo – definisce il periodo "on" impostando i tempi di inizio e di fine per il profilo utilizzando il mouse, seguendo un cursore; l'operazione è assunta come "off" per il resto della giornata;
- custom – il profilo è definito da un numero di intervalli orari (Figura 2.6), ciascuno dei quali può avere valori differenti che variano da 0 a 100; gli intervalli orari sono rappresentati da un numero dividendo, ovvero in il numero di parti in cui l'ora può essere suddivisa: teoricamente non vi è un limite al numero di intervalli, tuttavia è bene tenere presente che un numero eccessivo può influenzare in maniera negativa le tempistiche della simulazione.

Questa funzione definisce il reale utilizzo di una componente dell'edificio, così come fanno altre funzioni descritte precedentemente. Risulta essere molto utile per rappresentare al meglio i momenti in cui, ad esempio, l'impianto di riscaldamento è in funzione e quando invece risulta spenta, ed anche la quantità della potenza erogata. Una simile considerazione può essere applicata all'occupazione dell'edificio, la quale differisce in maniera sensibile in relazione al modo in cui l'edificio viene utilizzato: se l'edificio è adibito ad uffici, esso verrà occupato per un determinato numero di ore della giornata ed in particolari momenti della giornata stessa; al contrario, un edificio adibito a residenza viene utilizzato in momenti diversi della giornata rispetto ad un uso prettamente lavorativo. Ciò ha un impatto notevole sul calcolo

energetico dell'edificio. Si possono fare anche altre considerazioni relative alla regolazione della temperatura interna, all'uso dell'illuminazione artificiale ed ai sistemi di schermatura, così come all'apertura delle finestre per favorire il ricambio dell'aria, e così via.

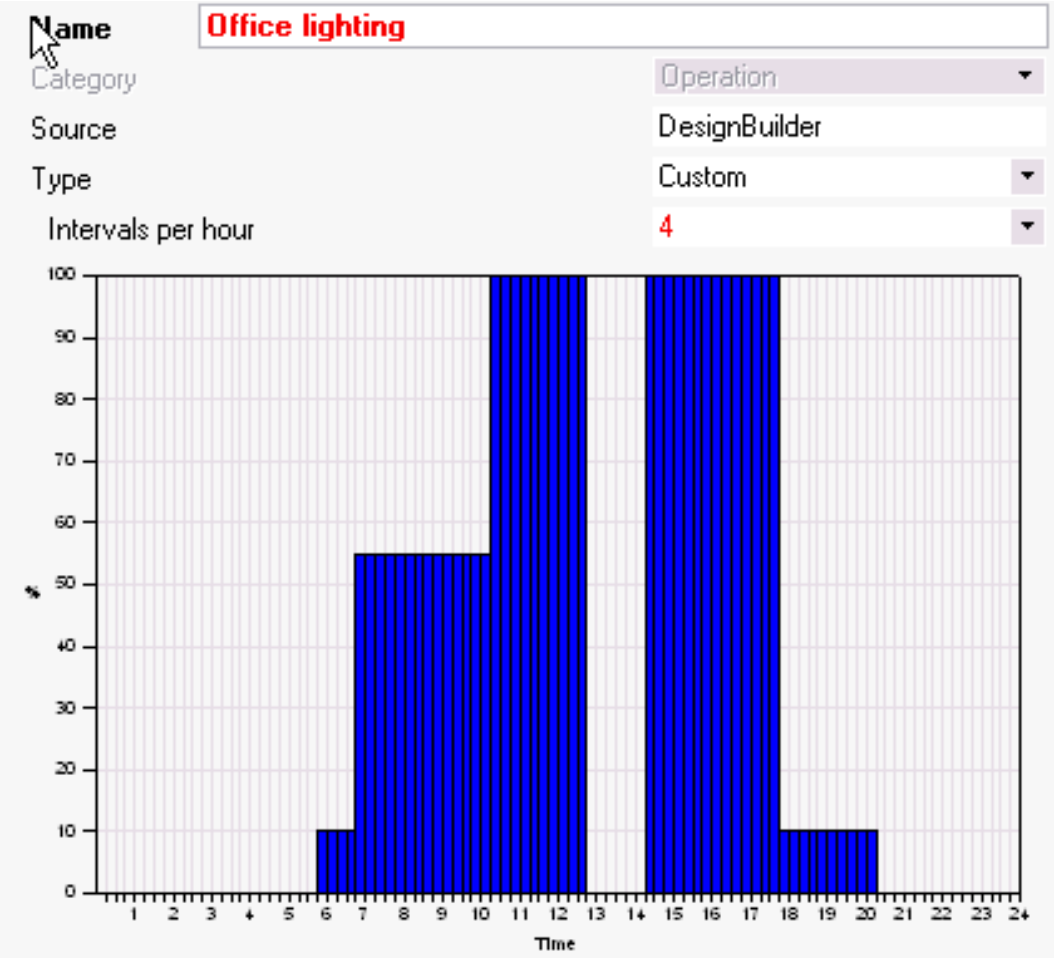


Figura 2.6. Rappresentazione di un profilo giornaliero (illuminazione per uffici) (Immagine tratta da [14])

Il termine *CFD*, o *Computational Fluid Dynamics*, descrive una famiglia di metodi numerici usati per calcolare la temperatura, la velocità e altre proprietà variabili dei fluidi attraverso una regione dello spazio. Quando questi vengono applicati all'edificio possono fornire al progettista informazioni sulle probabili velocità dell'aria, pressioni e temperatura, che si verificheranno in ogni punto attraverso un volume d'aria predefinito e attorno agli spazi dell'edificio. Le analisi CFD in Design Builder possono essere utilizzate sia per le condizioni esterne che interne.

Le analisi CFD delle condizioni esterne (Figura 2.7) forniscono la distribuzione della velocità dell'aria e della pressione attorno alla struttura dell'edificio dovute all'effetto del vento, e questa informazione può essere utilizzata per valutare il comfort dei pedoni., determinare le pressioni locali per il posizionamento delle prese d'aria o di espulsione dell'aria dei sistemi HVAC, e calcolare in modo più accurato i coefficienti di pressioni per le simulazioni della ventilazione naturale secondo EnergyPlus.

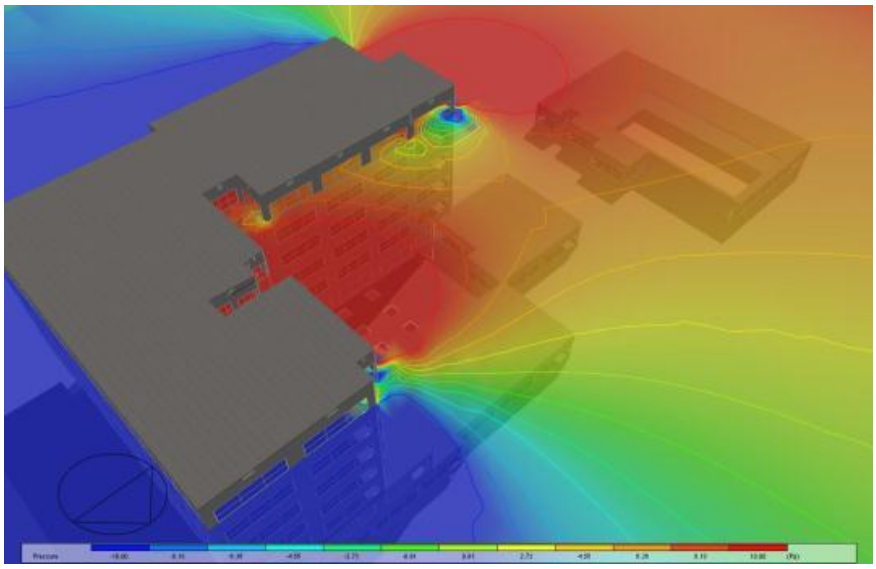


Figura 2.7. Esempio di risultato di un'analisi CFD delle condizioni esterne - studio della pressione del vento (Immagine tratta da [14])

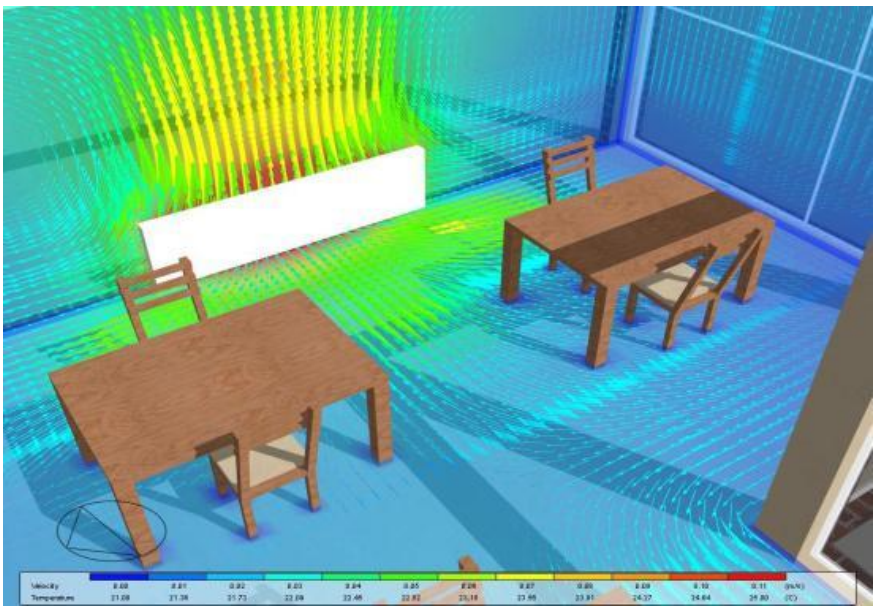


Figura 2.8. Esempio di risultato di un'analisi CFD delle condizioni interne - comfort degli occupanti (Immagine tratta da [14])

Le analisi CFD delle condizioni interne (Figura 2.8) forniscono informazioni sulla distribuzione della velocità dell'aria, della pressione e della temperatura (e altri parametri calcolati) per tutto lo spazio interno dell'edificio. Viene calcolata anche l'"età dell'aria" per indicare la relativa "freschezza" dell'aria e l'indice di comfort ambientale. Questa informazione può essere usata per valutare l'efficacia del progetto dei sistemi HVAC e ventilazione naturale e valutare di conseguenza le condizioni di comfort ambientale interno.

Le analisi CFD delle condizioni interne possono essere calcolate al livello Zona, Blocco edificio ed Edificio. I calcoli possono anche essere eseguiti per singole zone. Le analisi CFD per le condizioni esterne possono essere condotte solamente al livello del Sito.

Ciascuna delle equazioni delle variazioni dipendenti richiede valori significativi al limite del dominio di calcolo in modo che i calcoli generino valori significativi in tutto il dominio. Questi valori sono conosciuti come le condizioni al contorno, e possono essere specificate in vari modi. La specifica delle condizioni al contorno per le analisi esterne è relativamente semplice poiché si tratta di un calcolo isotermico e pertanto richiede solo l'esposizione dell'edificio, la velocità del vento e la direzione del vento da definire. Le condizioni al contorno dell'analisi interna tendono ad essere più coinvolte e possono richiedere l'aggiunta di limiti di superficie della zona quali diffusori di alimentazione, griglie di estrazione, flussi di temperatura e di calore ed anche l'incorporazione di gruppi di modelli che rappresentano occupanti, radiatori, unità fan-coil, ecc. Design Builder fornisce automaticamente le temperature predefinite dei bordi dei muri e delle finestre, ma è importante controllare che queste impostazioni predefinite siano appropriate e che vengano specificate correttamente eventuali condizioni al contorno aggiuntive richieste per il progetto.

Luce diurna

I calcoli della luce diurna sono controllati usando una serie di opzioni nella scheda Luce diurna. Si possono generare differenti tipi di risultati, ma quello che ha maggiore impatto è quello sotto forma di mappa (Figura 2.9).

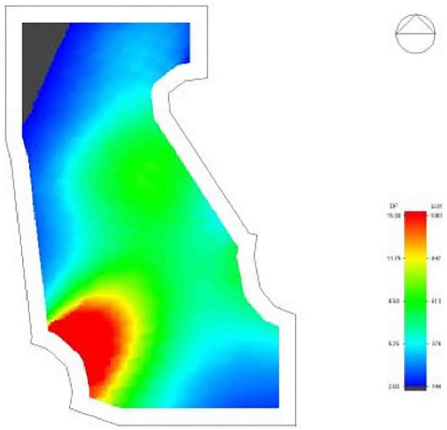


Figura 2.9. Esempio di analisi della luce diurna sotto forma di mappa a scala di colori (Immagine tratta da [14])

La possibilità di generare risultati utili ai fini di una certificazione LEED, BREEAM o altre, è una nota positiva per Design Builder. Ciò può essere utile quando il progettista partecipa a bandi di gara, ed i crediti aggiuntivi si sommano ai punti definiti dal bando stesso. Inoltre, si ha in questo modo la possibilità di verificare se le scelte progettuali adottate o, nel caso di edificio esistente, le reali condizioni di un edificio sono in linea, oltre con quanto previsto dalla normativa vigente, con i criteri indicati dal sistema di certificazione ambientale.

PARTE 2 – IL CASO STUDIO

3. PRESENTAZIONE DEL CASO STUDIO

Nel presente capitolo vengono illustrati le informazioni ed i dati relativi al contesto in cui sorge l'edificio oggetto di studio, le caratteristiche del fabbricato nonché i principali aspetti che descrivono il comportamento degli utenti.

3.1. Informazioni generali e contesto esterno

L'edificio oggetto di studio è oggi sede dell'Ufficio Scolastico Regionale per il Piemonte (Ufficio V – Ambito territoriale di Torino) per conto del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR), ex Provveditorato agli Studi di Torino. Esso è sito in via Coazze, 18 a Torino, nella Circoscrizione 3, come illustrato nella Figura 3.1.

Figura 3.1. Inquadramento territoriale (da *Google Maps*)

Il contesto che circoscrive l'edificio è caratterizzato prevalentemente da edifici a destinazione residenziale, oppure misto terziario e residenziale. Gli edifici circostanti presentano tutti un'altezza simile o inferiore rispetto al caso studio: come mostra la Figura 3.2, l'edificio situato ad est e parte di quello ad ovest presentano un'altezza simile (rispettivamente 6 e 5 piani fuori terra), mentre quello antistante e parte di quello ad ovest sono caratterizzati da 2 piani fuori terra.

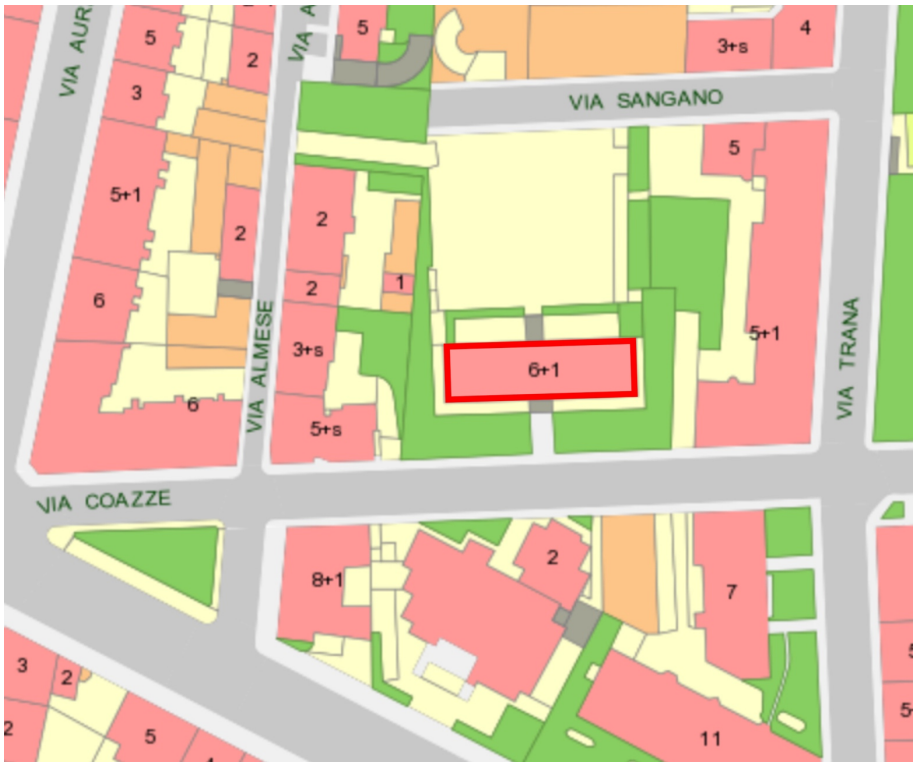


Figura 3.2. Planimetria con indicazione del numero di piani degli edifici adiacenti (elaborazione da *Geoportale del Comune di Torino*)

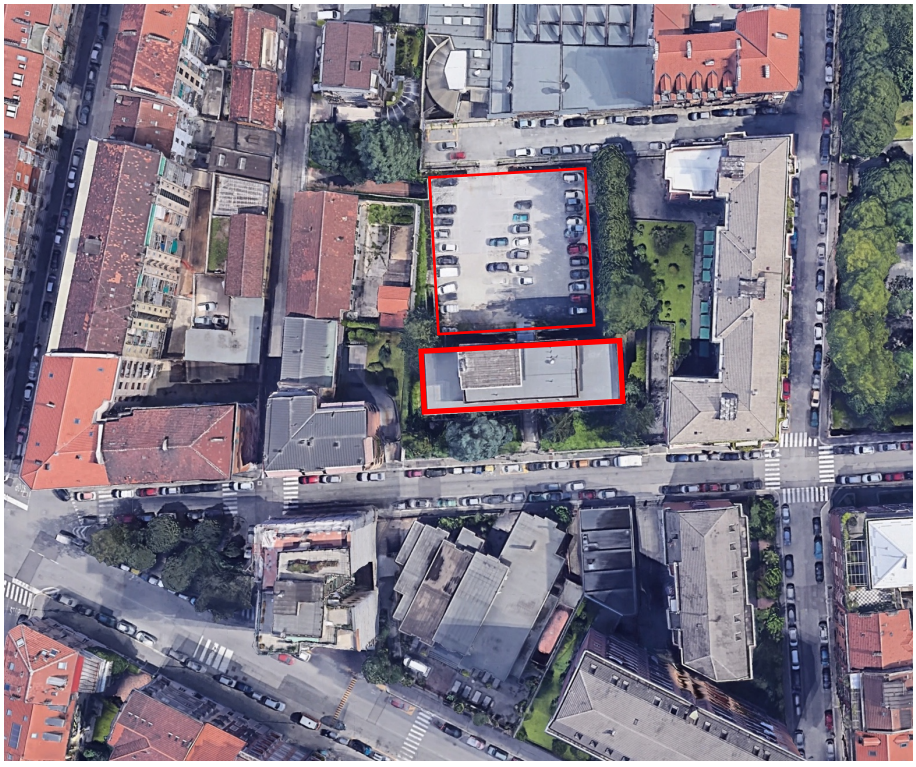


Figura 3.3. Vista dall'alto dell'isolato con individuazione dell'edificio e dell'area adibita a parcheggio (elaborazione da *Google Maps*)

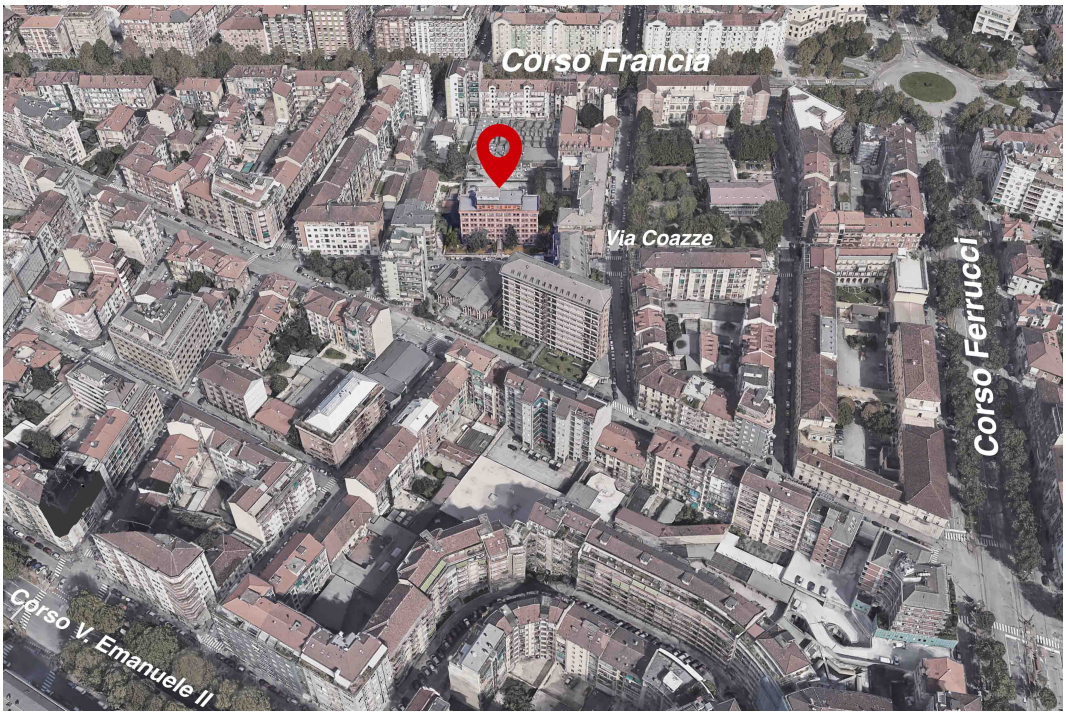


Figura 3.4. Inquadramento dell'edificio del Provveditorato agli Studi di Torino

Si osserva che l'edificio oggetto di studia sia in ombra sul lato est e sud-est durante le ore mattutine, e sul lato ovest nel tardo pomeriggio. Il fronte esposto a sud invece rimane del tutto soleggiato nelle ore diurne.

L'edificio si trova nell'isolato compreso tra le vie Coazze (a sud), Sangano (a nord), Trana (ad est) e Almese (a ovest). Localmente, si trova anche all'interno del triangolo costituito dai Corsi Francia, Ferrucci e Vittorio Emanuele II.

L'edificio si compone da due corpi di fabbrica, caratterizzati da un volume principale di forma parallelepipeda che si sviluppa su 7 piani fuori terra e due interrati, e da un volume secondario che si sviluppa su due piani, localizzato al di sotto del piano stradale (l'attuale area a parcheggio fuori terra). In pianta, esso è disposto su un asse principale Est-Ovest, dunque avente le facciate principali esposte rispettivamente a Nord ed a Sud, con un'inclinazione di circa 3° in senso antiorario.

Il lato prospiciente a Nord presenta una tripartizione della facciata, con un avancorpo, ed ha l'ingresso sul parcheggio fuori terra e dunque su via Sangano. Sul lato esposto a Sud vi è l'ingresso principale su via Coazze.

Figura 3.5. Viste 3D dell'inserimento dell'edificio nel contesto (da *Google Maps*)

3.2. Il fabbricato

La costruzione dell'edificio risale indicativamente nel 1960, ed è caratterizzato da una struttura portante in pilastri di calcestruzzo armato e tamponamenti in laterizio con intercapedine d'aria, priva di isolamento termico, con un rivestimento esterno in paramano.

L'edificio, composto da sette piani fuori terra e due piani interrati, ospita prevalentemente uffici ed archivi.

I piani fuori terra sono composti da una pianta con un perimetro uguale per tutti i piani, ad eccezione di quello in copertura, ed una distribuzione interna ripetitiva per la maggior parte dei piani (piano tipo) ad eccezione del piano terra, terzo e di quello in copertura. Il piano terreno ospita l'ingresso e i servizi per il pubblico, ed è caratterizzato da un ampio ingresso e area reception sul fronte Sud, mentre sul lato nord dell'edificio vi è il sistema di distribuzione verticale (scale e ascensori), che si estende per tutta l'altezza dell'edificio, collegando tutti i piani. Sempre sul lato Nord generalmente ai lati del vano scala vi sono predisposti i servizi igienici. Le due estremità rimanenti della pianta sono caratterizzate da uffici e corridoi di circolazione. Dal primo al quinto piano la distribuzione planimetrica è uguale, ad eccezione del terzo piano. Gli uffici sono disposti sui lati esposti a Nord ed a Sud in pianta, serviti da un corridoio centrale. Il terzo piano riprende in maniera simile la distribuzione degli altri, ma sul lato Est della pianta vi è un unico ufficio. Mentre i primi sei piani presentano una sagoma univoca in pianta, il settimo piano è più piccolo, aperto su tre lati sulla copertura piana, che in questo caso funge da terrazza.

I piani interrati sono prevalentemente ad uso archivio ed anche a sala riunioni (secondo piano seminterrato), che si estende in un corpo fabbrica separato anch'esso seminterrato, al di sotto del parcheggio a raso. Il corpo principale ospita gli archivi, gli spazi di servizio e la centrale termica posta al secondo piano interrato. Il corpo secondario è collegato a quello principale mediante un corridoio con vetrate a tutta altezza; ospita gli archivi, una sala riunioni, un'aula informatica e una cucina. Le pareti perimetrali che si al di sotto del piano stradale sono separate dal terreno mediante un'intercapedine antincendio che corre su tutti i lati, mentre Il solaio inferiore dell'edificio è controterra.

La Tabella 3.1 mostra i dati generali e le caratteristiche geometriche del fabbricato

Tabella 3.1. Dati generali del fabbricato

Caratteristica	Simbolo	Unità di misura	Valore
Volume lordo riscaldato	V_l	m^3	20.638
Superficie netta di pavimento	A_f	m^2	4.511
Superficie dell'involucro disperdente	A_e	m^2	5.789
Superficie dell'involucro finestrato	A_w	m^2	628
Rapporto di forma	S/V	m^{-1}	0,28

La struttura dell'edificio è di tipo a telaio in calcestruzzo armato, con tamponamenti esterni in laterizio. Le pareti sono di tipo a cassa vuota, ovvero caratterizzati da due strati di laterizio forato che definiscono lo spessore della muratura divisi da un'intercapedine d'aria, struttura muraria caratterizzante degli anni Settanta e Ottanta del secolo scorso. La muratura è rivestita internamente da intonaco, mentre il rivestimento esterno è costituito in paramano (pareti perimetrali fuori terra) o intonaco (pareti interrate confinanti con l'intercapedine). Le pareti sottofinestra e quelle che ospitano i cassonetti delle tapparelle avvolgibili hanno uno spessore ridotto e presentano la stessa tipologia di rivestimento esterno delle pareti perimetrali Le partizioni interne sono anch'esse caratterizzate da laterizi forati, intonacati su entrambe le superfici. In Tabella 3.2 sono riportate le caratteristiche termofisiche dei componenti opachi verticali.

Tabella 3.2. Caratteristiche degli elementi edilizi opachi verticali

Codice	Descrizione	Spessore	Trasmittanza termica	Capacità termica areica esterna	Capacità termica areica interna	Trasmittanza termica periodica
		s	U	κ_e	κ_i	Y_{ie}
[–]	[–]	[m]	[W/m²K]	[kJ/m²K]	[kJ/m²K]	[W/m²K]
M1	Parete esterna, piani interrati	0,50	1,01	108,7	53,6	0,27
M2	Sottofinestra (su parete esterna M1)	0,38	1,17	74,6	57,1	0,66
M3	Parete esterna, piani fuori terra	0,44	1,04	118,8	54,6	0,33
M4	Sottofinestra (su parete esterna M3)	0,25	1,66	122,4	58,3	0,77
M5	Parete interna	0,15	1,72	55,0	55,5	1,17
M6	Cassonetto per tapparelle avvolgibili	0,50	1,02	119,2	34,9	0,36

Il prospetto dell'edificio è caratterizzato prevalentemente dal mattone facciavista (paramano), che domina l'intero sfondo delle facciate. Al paramano si alternano elementi intonacati in rilievo (Figura 3.6), che denunciano la struttura portante dell'edificio: le fasce orizzontali segnano la struttura orizzontale dell'edificio definita dal solaio interpiano; gli elementi verticali denunciano in facciata la struttura portante dell'edificio caratterizzata da pilastri in calcestruzzo armato, e per mezzo di spallette la luce delle finestre (Figura 3.7) che si estendono per tutta l'altezza del relativo piano, incrociando la fascia orizzontale. Le finestre sono sormontate da una finta architrave in mattoni, caratterizzata da un corso (verticale) differente da quello del resto della parete (orizzontale). Il sesto piano presenta un cornicione aggettante, seguendo gli stessi criteri formali, sormontato da una ringhiera in muratura, in linea con l'aspetto formale dell'edificio. Questi particolari costruttivi sono stati considerati all'interno della modellazione in Design Builder per tenere conto dell'effetto dei ponti termici.

Figura 3.6. Dettaglio di facciata (lato Sud)

Figura 3.7. Particolare infisso (piano terreno)

I componenti opachi orizzontali disperdenti sono tutti non coibentati. Sono costituiti da una struttura in latero-cemento, sormontata da strati di livellamento in calcestruzzo e finitura. La copertura è piana ed è costituita da una soletta in latero-cemento sormontata da uno strato di calcestruzzo di livellamento e uno strato bituminoso per impermeabilizzare l'edificio dall'azione dell'acqua. In Tabella 3.3 sono riportate le caratteristiche termofisiche dei componenti opachi orizzontali.

Tabella 3.3. Caratteristiche degli elementi opachi orizzontali

Codice	Descrizione	Spessore	Trasmittanza termica	Capacità termica areica esterna	Capacità termica areica interna	Trasmittanza termica periodica
		s	U	κ_e	κ_i	Y_{ie}
[–]	[–]	[m]	[W/m²K]	[kJ/m²K]	[kJ/m²K]	[W/m²K]
S1	Solaio di copertura su parcheggio	0,26	1,38	86,8	55,2	0,44
S2	Solaio di copertura piana	0,30	1,50	108,8	71,2	0,48
P1	Solaio su terreno	0,56	1,46	113,8	59,2	0,12
P2	Solaio interpiano	0,31	1,27	60,9	73,3	0,26

I serramenti possono essere classificati in due tipologie:

1. serramenti con telaio in legno e vetro doppio, posti nei piani fuori terra del corpo di fabbrica principale;
2. serramenti con telaio in alluminio senza taglio termico e vetro singolo, posti nei piani interrati di entrambi i corpi;

Figura 3.8. Infissi (a sinistra il tipo 1, a destra il tipo 2)

I serramenti sono inoltre caratterizzati da chiusure oscuranti, costituite da tapparelle avvolgibili, e da schermature solari, quali veneziane sul lato interno dei serramenti. Esse sono presenti su tutti i serramenti dei piani fuori terra. La gestione degli elementi oscuranti è stata valutata tramite i questionari sottoposti agli occupanti, per individuare comportamenti ricorrenti.

Tabella 3.4. Caratteristiche dei componenti trasparenti

Codice	Descrizione					Area	Fattore di forma telaio	Trasmittanza termica (finestra)	Trasmittanza termica (finestra + chiusura oscurante)	Coefficiente di trasmissione solare totale per incidenza normale (vetro)	Coefficiente di trasmissione solare totale (vetro + schermatura)
	Posizione – piano	Telaio	Vetro	Chiusura oscurante	Schermatura mobile	A	F_F	U_w	U_{w+shut}	$g_{gl,n}$	$g_{gl,sh}$
[–]	[–]					[m²]	[–]	[W/m²K]	[W/m²K]	[–]	[–]
F.L_1	0	L	D	Sì	Sì	2,04	0,83	3.12	1,85	0,75	0,5
F.L_2	1-6	L	D	Sì	Sì	1,82	0,83	3,11	1,85	0,75	0,5
F.A_1	0	A	S	No	No	5,76	0,86	6,23	6,23	0,85	0,85
F.A_2	-1, -2	A	S	No	No	3,55	0,83	6,26	6,26	0,85	0,85
F.A_3	-1, -2	A	S	No	No	1,82	0,83	6,38	6,38	0,85	0,85

Legenda
telaio:
L = legno; A = alluminio;
vetro:
S = singolo; D = doppio.

Nelle pagine successive vengono illustrati gli elaborati architettonici, quali piante e prospetti, che meglio descrivono la struttura dell'edificio. Si hanno dunque:

- Figura 3.9 – pianta del piano terreno;
- Figura 3.10 – pianta del piano tipo, valida per i seguenti piani: primo, secondo, quarto e quinto;
- Figura 3.11 – pianta del piano terzo, la quale presenta alcune variazioni rispetto alla pianta tipo;
- Figura 3.12 – pianta del sesto piano, che accede anche alla terrazza posta in copertura;
- Figura 3.13 – prospetto Nord;
- Figura 3.14 – prospetto Sud;
- Figura 3.15 – prospetto Est;
- Figura 3.16 – prospetto Ovest.

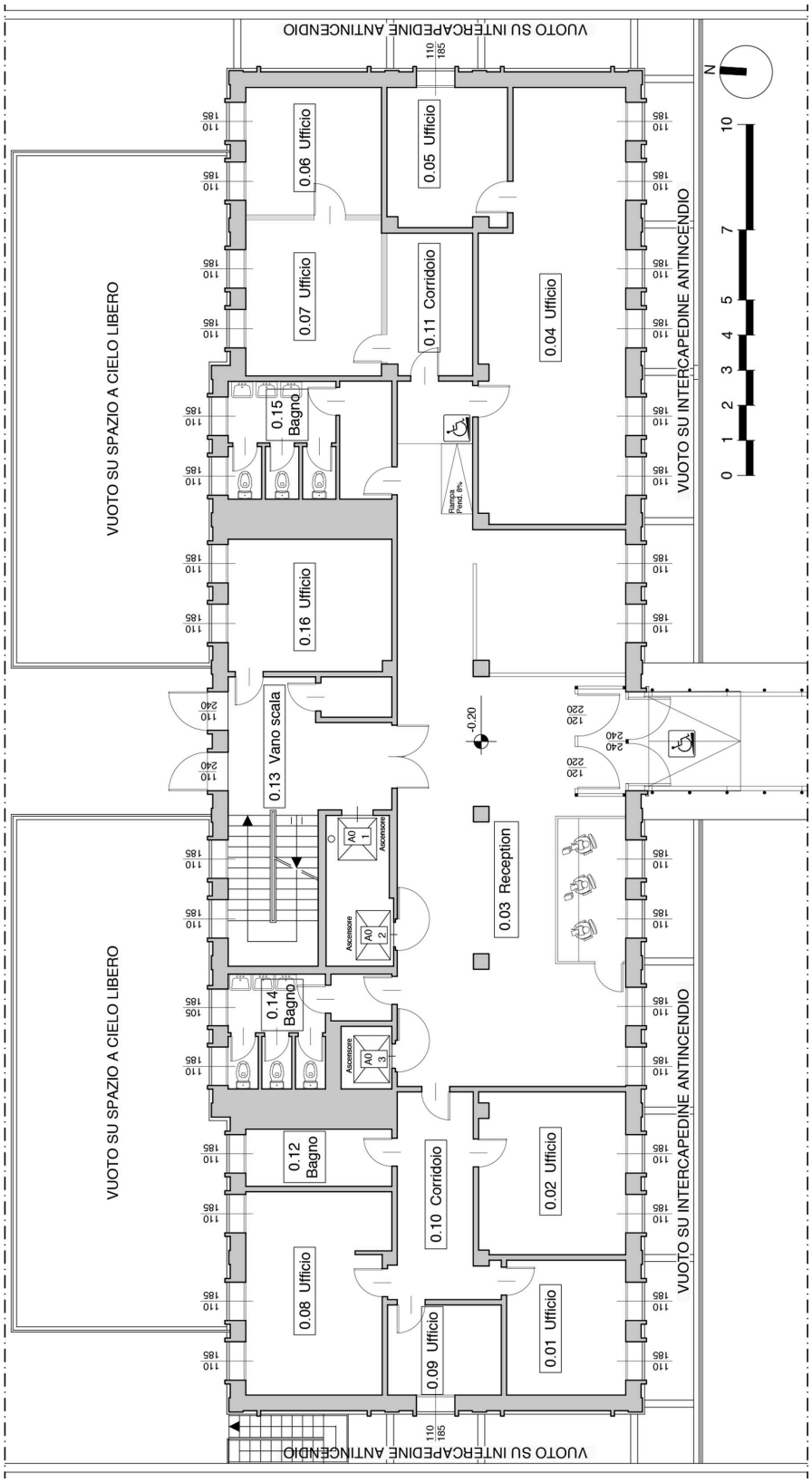


Figura 3.9. Pianta piano terreno – Fuori scala

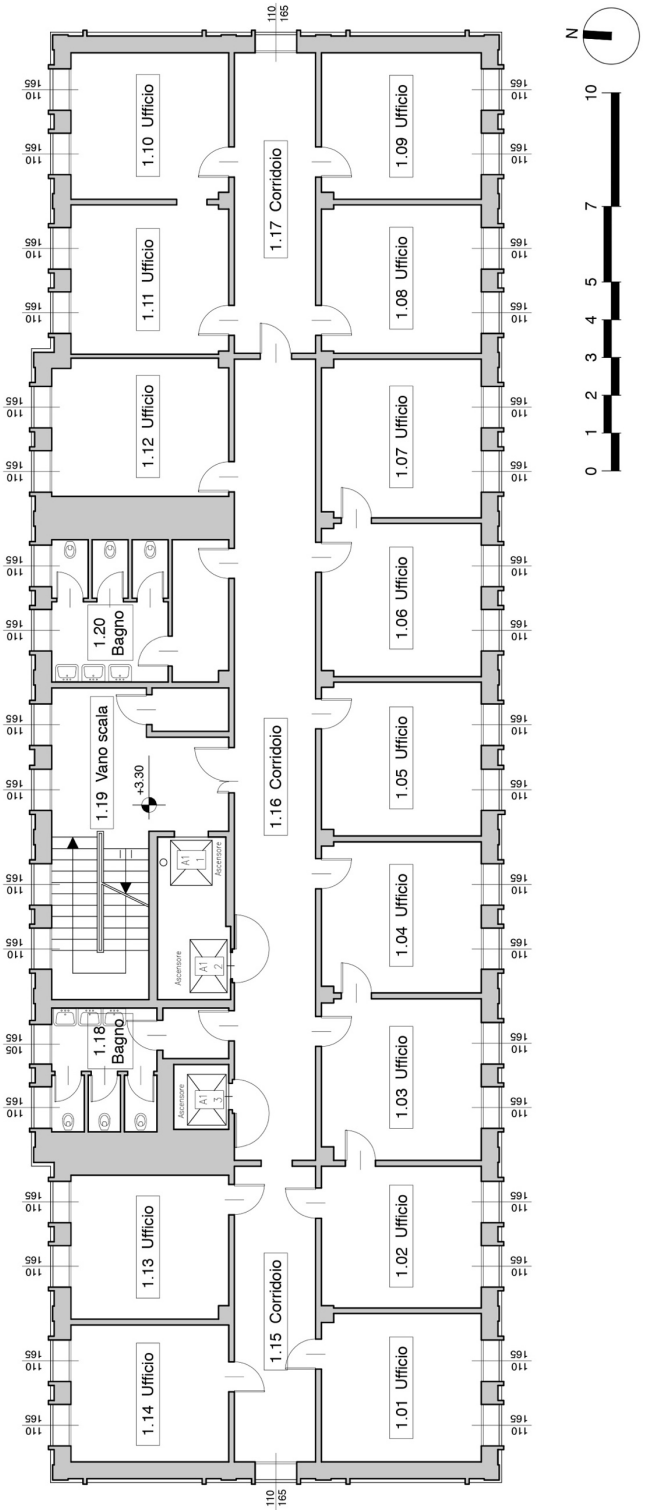


Figura 3.10. Pianta piano tipo - Piano primo, secondo, quarto, quinto – Fuori scala

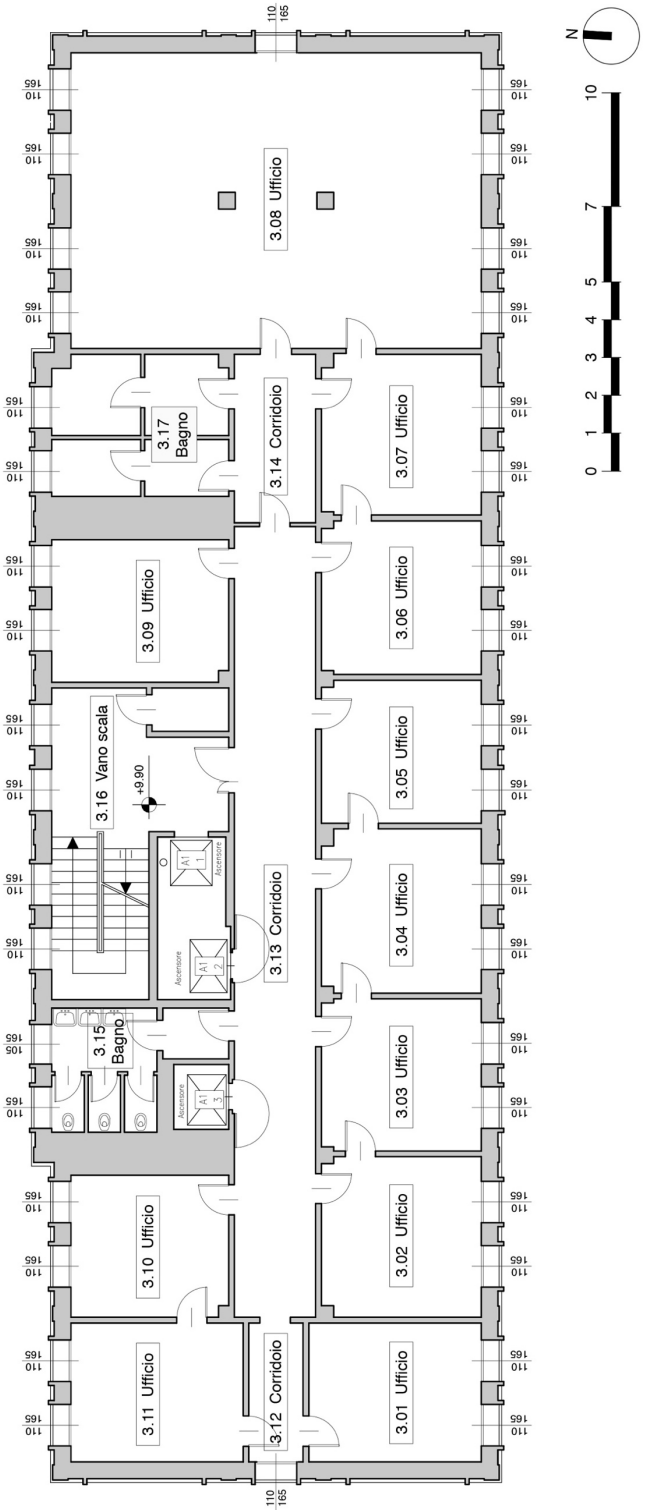


Figura 3.11. Pianta piano terzo – Fuori scala

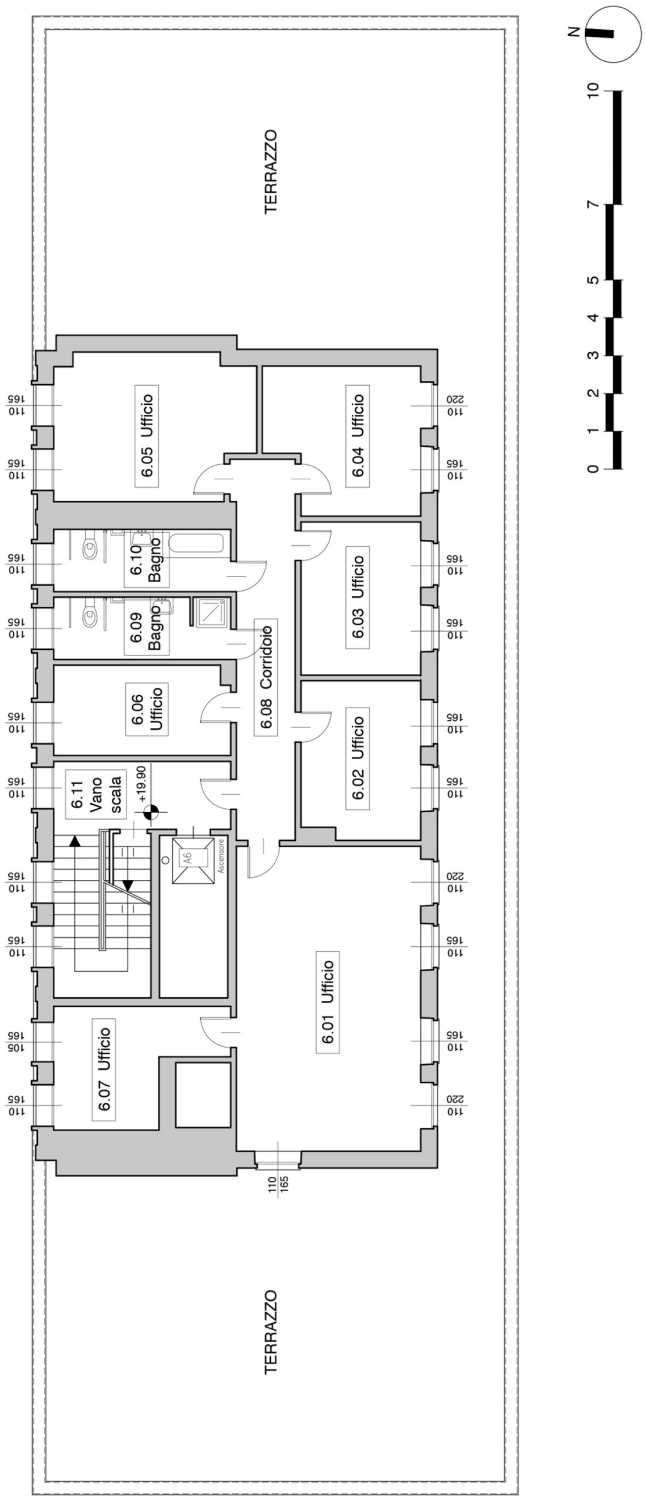


Figura 3.12. Pianta piano sesto - copertura/terrazza – Fuori scala

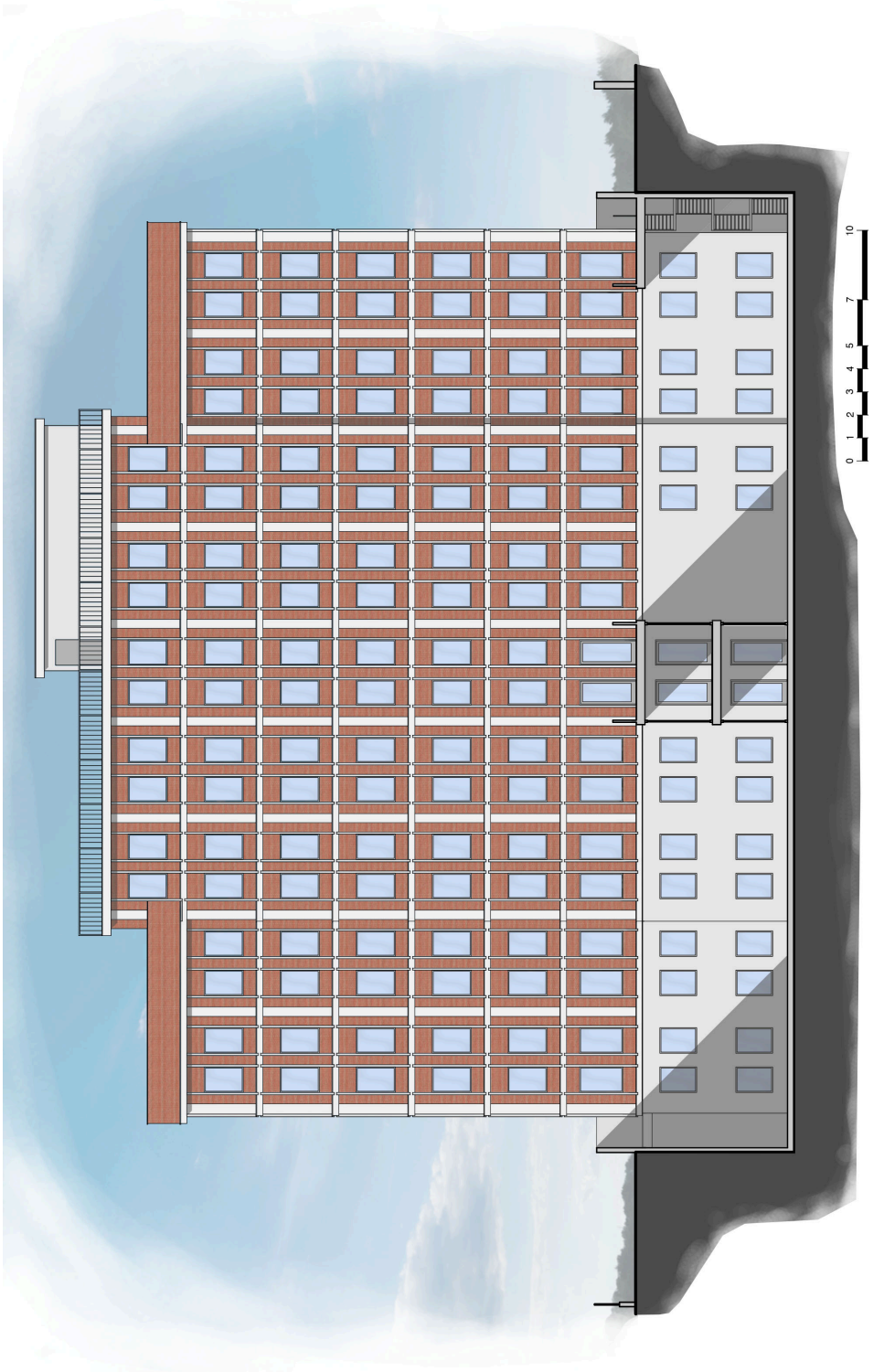


Figura 3.13. Prospetto Nord – Fuori scala

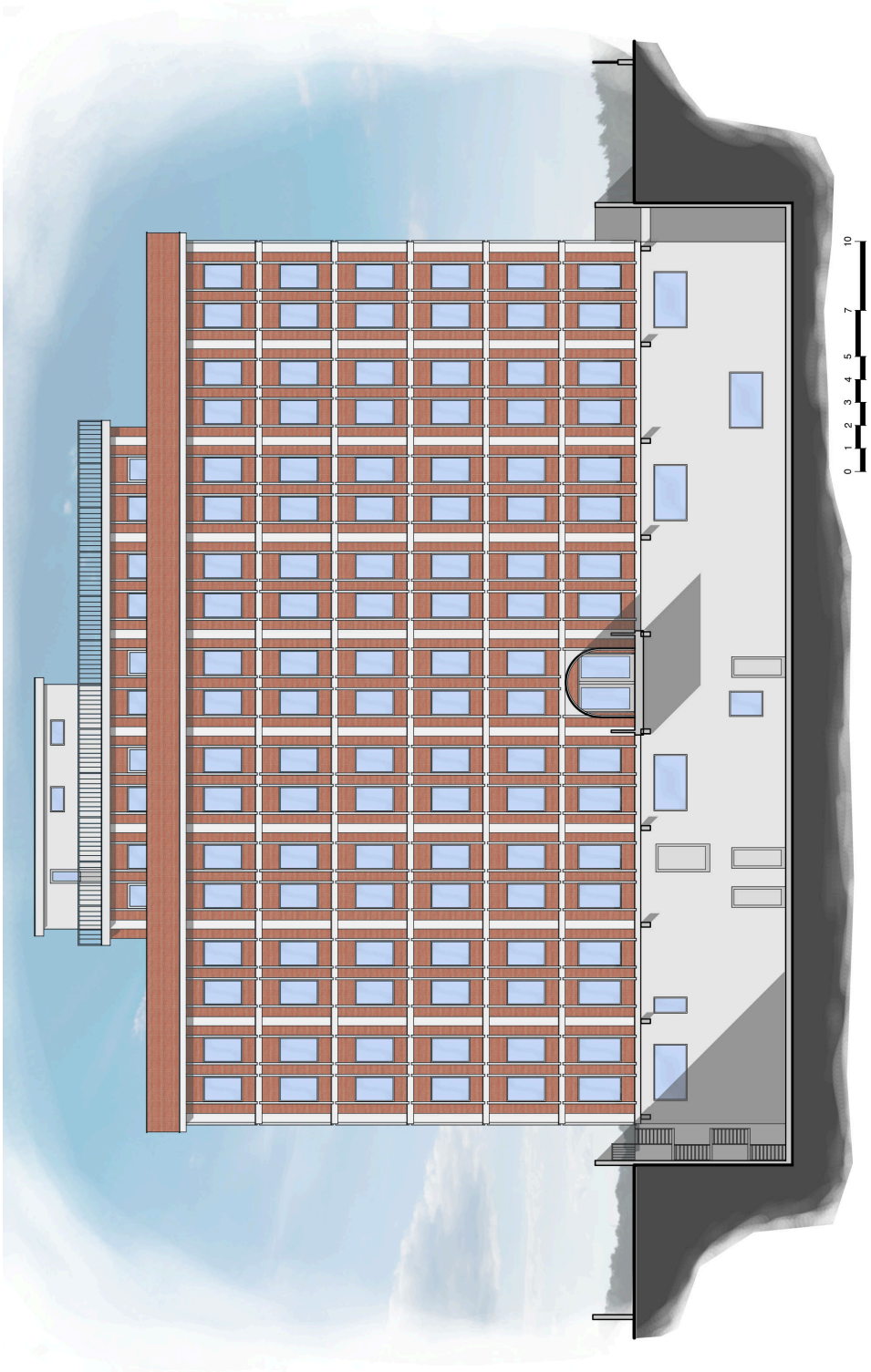


Figura 3.14. Prospetto Sud – Fuori scala

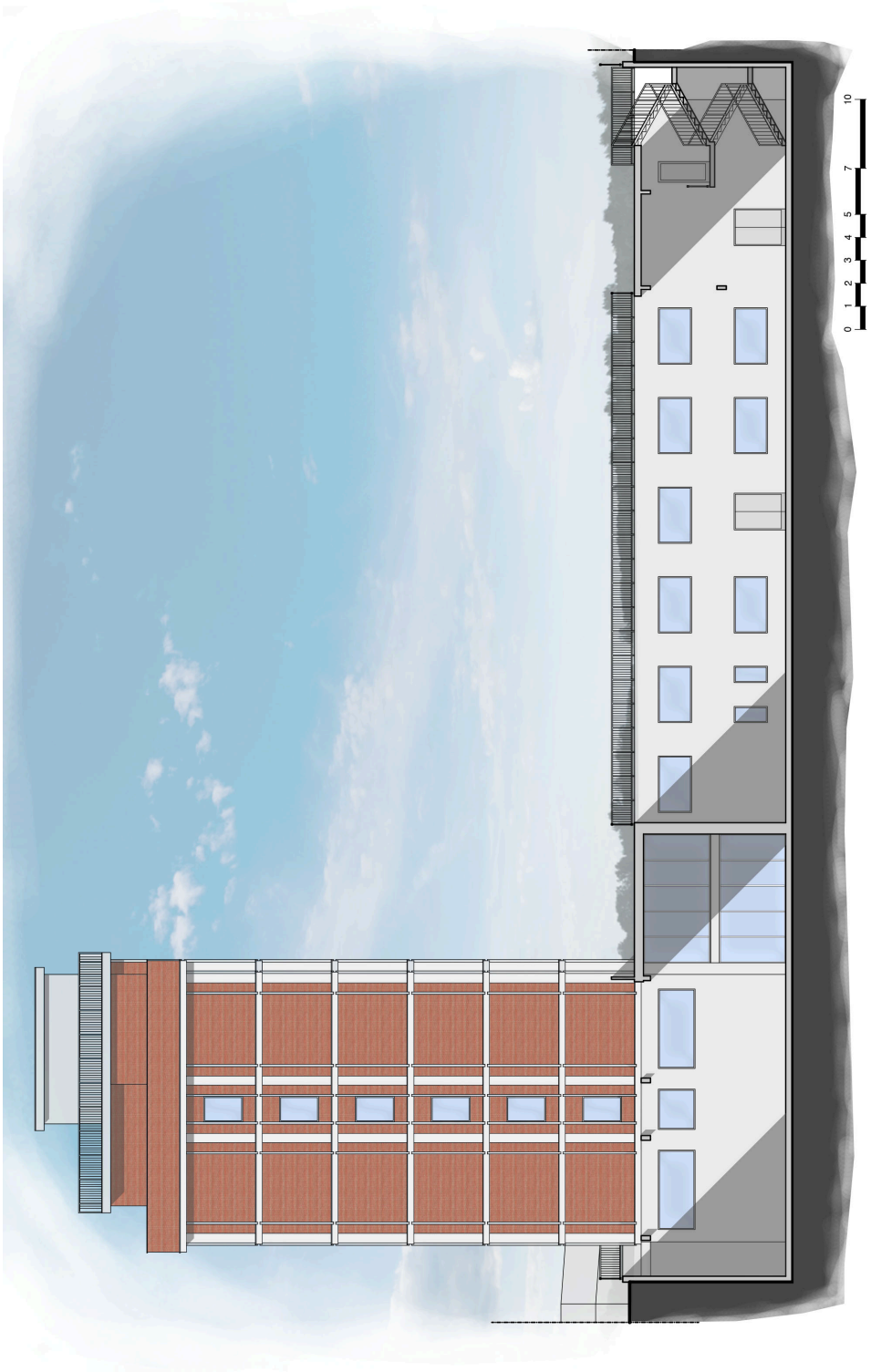


Figura 3.15. Prospetto Est – Fuori scala

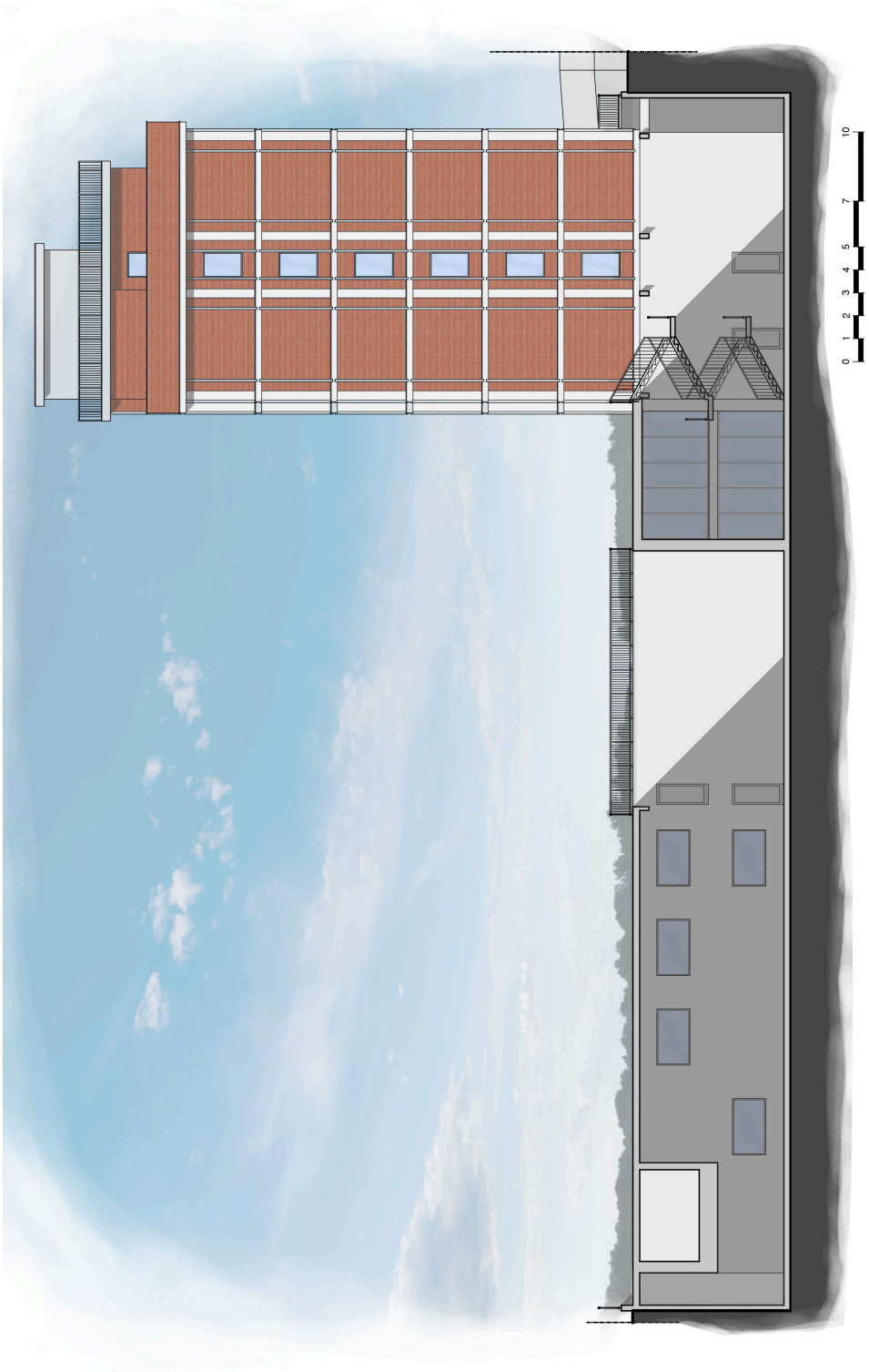


Figura 3.16. Prospetto Ovest – Fuori scala

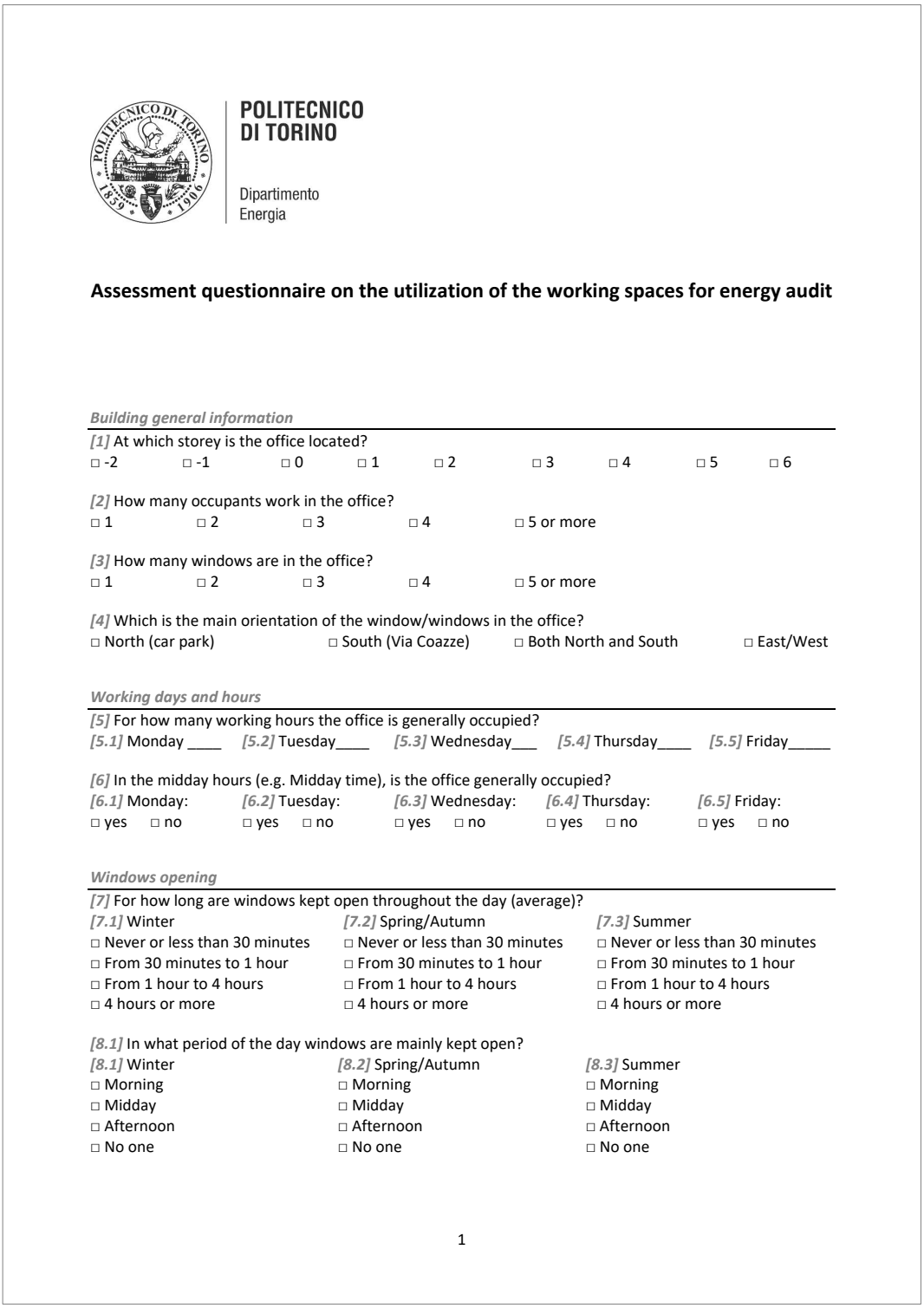
3.3. Questionario sul comportamento dell'utenza

Il format del questionario che è stato sottoposto ai lavoratori del Provveditorato agli Studi di Torino è stato fornito dal Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, e si mostra come illustrato in Figura 3.17, Figura 3.18 e Figura 3.19. Lo scopo di questo tipo di indagine è quello di stabilire i profili di utenza reale, in modo tale da valutare il fattore di occupazione legato al numero di occupanti, le ore effettive di presenza all'interno di ogni ambiente, le abitudini che influenzano il comportamento energetico dell'edificio, quali ad esempio l'apertura delle finestre, correlata alla ventilazione naturale, e la gestione delle schermature mobili e delle chiusure oscuranti. Esso è stato fornito in maniera del tutto anonima, al fine di garantire i diritti alla privacy.

Il questionario si configura come un sistema a domande chiuse, con opzioni a scelta multipla per le risposte, e riguarda i seguenti ambiti:

- informazioni generali sull'edificio;
- giorni e ore lavorative;
- apertura delle finestre;
- gestione delle tapparelle;
- gestione delle veneziane;
- uso dell'illuminazione artificiale;
- sistema di riscaldamento;
- sistemi di raffrescamento (solamente per gli uffici dotati di sistemi split);
- uso di ventole a soffitto per il raffrescamento.

Le risposte al questionario sono state acquisite ed elaborate per mezzo di un foglio di calcolo Excel. Queste informazioni sono state utilizzate successivamente nella modellazione dell'edificio all'interno di Design Builder, per poter definire i profili di utenza reali.



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento Energia

Assessment questionnaire on the utilization of the working spaces for energy audit

Building general information

[1] At which storey is the office located?
□ -2 □ -1 □ 0 □ 1 □ 2 □ 3 □ 4 □ 5 □ 6

[2] How many occupants work in the office?
□ 1 □ 2 □ 3 □ 4 □ 5 or more

[3] How many windows are in the office?
□ 1 □ 2 □ 3 □ 4 □ 5 or more

[4] Which is the main orientation of the window/windows in the office?
□ North (car park) □ South (Via Coazze) □ Both North and South □ East/West

Working days and hours

[5] For how many working hours the office is generally occupied?
[5.1] Monday ____ *[5.2]* Tuesday____ *[5.3]* Wednesday___ *[5.4]* Thursday____ *[5.5]* Friday_____

[6] In the midday hours (e.g. Midday time), is the office generally occupied?
[6.1] Monday: □ yes □ no
[6.2] Tuesday: □ yes □ no
[6.3] Wednesday: □ yes □ no
[6.4] Thursday: □ yes □ no
[6.5] Friday: □ yes □ no

Windows opening

[7] For how long are windows kept open throughout the day (average)?

[7.1] Winter	*[7.2]* Spring/Autumn	*[7.3]* Summer
□ Never or less than 30 minutes	□ Never or less than 30 minutes	□ Never or less than 30 minutes
□ From 30 minutes to 1 hour	□ From 30 minutes to 1 hour	□ From 30 minutes to 1 hour
□ From 1 hour to 4 hours	□ From 1 hour to 4 hours	□ From 1 hour to 4 hours
□ 4 hours or more	□ 4 hours or more	□ 4 hours or more

[8.1] In what period of the day windows are mainly kept open?

[8.1] Winter	*[8.2]* Spring/Autumn	*[8.3]* Summer
□ Morning	□ Morning	□ Morning
□ Midday	□ Midday	□ Midday
□ Afternoon	□ Afternoon	□ Afternoon
□ No one	□ No one	□ No one

1

Figura 3.17. Questionario di valutazione dell'utilizzo degli spazi lavorativi per audit energetico – Parte 1

Roller shutters management

[9] For how long are roller shutters kept closed (at least for half of the window high) throughout the day (average)?

[9.1] Winter	*[9.2]* Spring/Autumn	*[9.3]* Summer
□ Never or less than 30 minutes	□ Never or less than 30 minutes	□ Never or less than 30 minutes
□ From 30 minutes to 1 hour	□ From 30 minutes to 1 hour	□ From 30 minutes to 1 hour
□ From 1 hour to 4 hours	□ From 1 hour to 4 hours	□ From 1 hour to 4 hours
□ 4 hours or more	□ 4 hours or more	□ 4 hours or more

[10] In what period of the day roller shutters are mainly kept closed (at least for half of the window high)?

[10.1] Winter	*[10.2]* Spring/Autumn	*[10.3]* Summer
□ Morning	□ Morning	□ Morning
□ Midday	□ Midday	□ Midday
□ Afternoon	□ Afternoon	□ Afternoon
□ No one	□ No one	□ No one

[11] Roller shutters are generally kept closed after the working hours?

□ yes □ no

Venetian blinds management

[12] For how long are venetian blinds kept closed (at least for half of the window high) throughout the day (average)?

[12.1] Winter	*[12.2]* Spring/Autumn	*[12.3]* Summer
□ Never or less than 30 minutes	□ Never or less than 30 minutes	□ Never or less than 30 minutes
□ From 30 minutes to 1 hour	□ From 30 minutes to 1 hour	□ From 30 minutes to 1 hour
□ From 1 hour to 4 hours	□ From 1 hour to 4 hours	□ From 1 hour to 4 hours
□ 4 hours or more	□ 4 hours or more	□ 4 hours or more

[13] In what period of the day venetian blinds are mainly kept closed?

[13.1] Winter	*[13.2]* Spring/Autumn	*[13.3]* Summer
□ Morning	□ Morning	□ Morning
□ Midday	□ Midday	□ Midday
□ Afternoon	□ Afternoon	□ Afternoon
□ No one	□ No one	□ No one

Artificial lighting

[14] For how long is artificial lighting turned on throughout the day (average)?

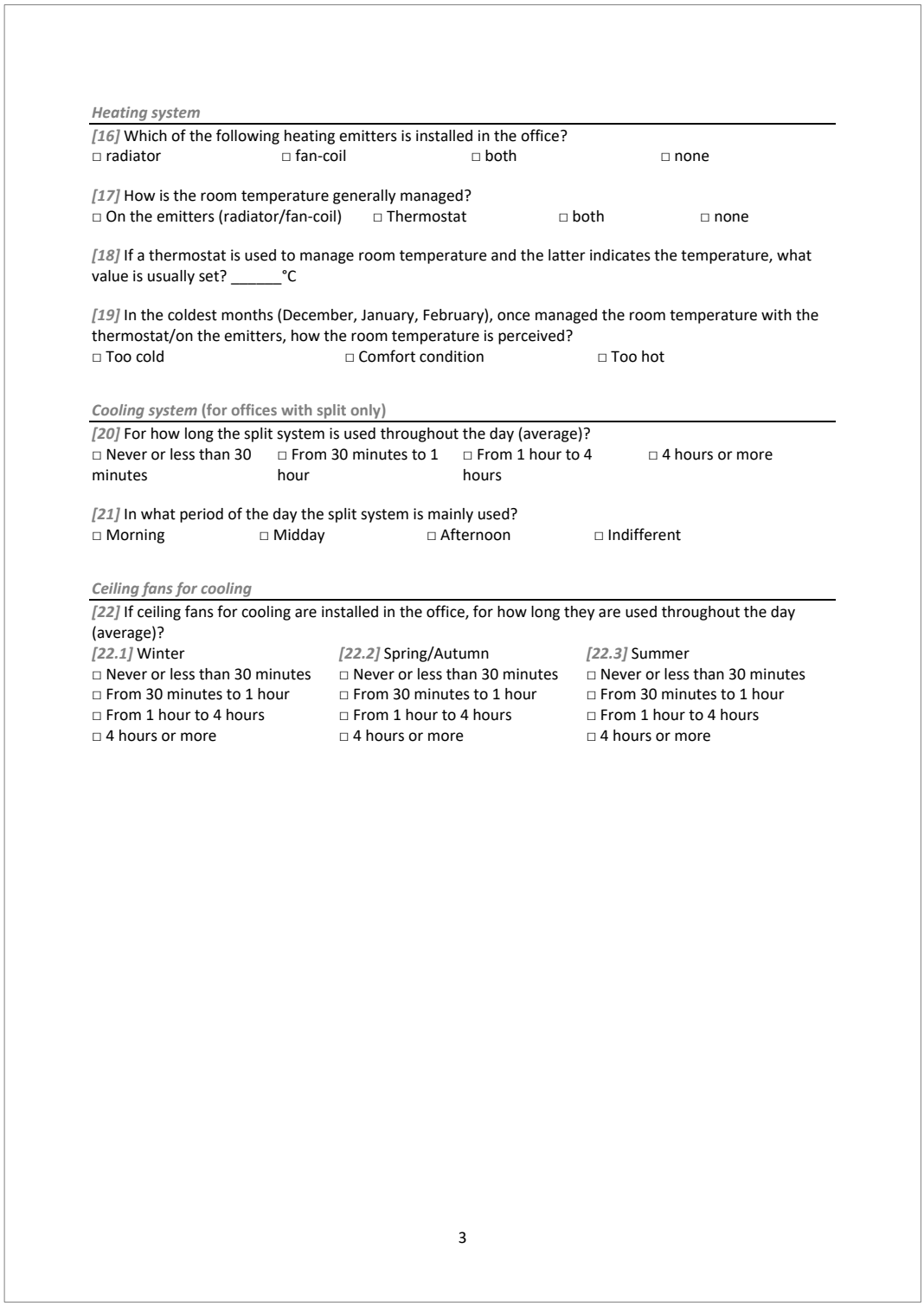
[14.1] Winter	*[14.2]* Spring/Autumn	*[14.3]* Summer
□ Never or less than 30 minutes	□ Never or less than 30 minutes	□ Never or less than 30 minutes
□ From 30 minutes to 1 hour	□ From 30 minutes to 1 hour	□ From 30 minutes to 1 hour
□ From 1 hour to 4 hours	□ From 1 hour to 4 hours	□ From 1 hour to 4 hours
□ 4 hours or more	□ 4 hours or more	□ 4 hours or more

[15] In what period of the day artificial lighting is mainly turned on?

[15.1] Winter	*[15.2]* Spring/Autumn	*[15.3]* Summer
□ Morning	□ Morning	□ Morning
□ Midday	□ Midday	□ Midday
□ Afternoon	□ Afternoon	□ Afternoon
□ No one	□ No one	□ No one

2

Figura 3.18. Questionario di valutazione dell'utilizzo degli spazi lavorativi per audit energetico – Parte 2



Heating system

[16] Which of the following heating emitters is installed in the office?
□ radiator □ fan-coil □ both □ none

[17] How is the room temperature generally managed?
□ On the emitters (radiator/fan-coil) □ Thermostat □ both □ none

[18] If a thermostat is used to manage room temperature and the latter indicates the temperature, what value is usually set? _____°C

[19] In the coldest months (December, January, February), once managed the room temperature with the thermostat/on the emitters, how the room temperature is perceived?
□ Too cold □ Comfort condition □ Too hot

Cooling system (for offices with split only)

[20] For how long the split system is used throughout the day (average)?
□ Never or less than 30 minutes □ From 30 minutes to 1 hour □ From 1 hour to 4 hours □ 4 hours or more

[21] In what period of the day the split system is mainly used?
□ Morning □ Midday □ Afternoon □ Indifferent

Ceiling fans for cooling

[22] If ceiling fans for cooling are installed in the office, for how long they are used throughout the day (average)?

[22.1] Winter	*[22.2]* Spring/Autumn	*[22.3]* Summer
□ Never or less than 30 minutes	□ Never or less than 30 minutes	□ Never or less than 30 minutes
□ From 30 minutes to 1 hour	□ From 30 minutes to 1 hour	□ From 30 minutes to 1 hour
□ From 1 hour to 4 hours	□ From 1 hour to 4 hours	□ From 1 hour to 4 hours
□ 4 hours or more	□ 4 hours or more	□ 4 hours or more

3

Figura 3.19. Questionario di valutazione dell'utilizzo degli spazi lavorativi per audit energetico – Parte 3

Occupazione

L'edificio viene occupato stabilmente da 126 persone che si distribuiscono tra gli uffici, che generalmente ospitano due persone, di cui tre sono presenti, a rotazione, negli archivi. L'orario di occupazione dell'intero edificio è stato fornito dallo staff amministrativo, così come mostrato nella seguente Tabella 3.5, il quale fa riferimento alla stagione di riscaldamento 2016/2017. Sulla base di queste informazioni e dei risultati dei questionari sono stati creati i profili di occupazione per le differenti zone termiche. I profili di occupazione tengono conto, inoltre, dell'occupazione dei locali nelle ore centrali della giornata (pausa pranzo).

Tabella 3.5. Orario di occupazione dell'edificio

Giorno	Ingresso	Uscita
Lunedì – Giovedì	07.45	18.00
Venerdì	07.45	16.00
Fine settimana	Non occupato	

Apertura delle finestre

Le informazioni relative alla gestione delle finestre che si ricavano dai questionari indicano i tempi di apertura nelle ore di occupazione, in funzione delle tre stagioni indicate: inverno, primavera/autunno, estate; viene indicato, inoltre, il periodo prevalente della giornata in cui le finestre vengono tenute aperte. I risultati del questionario sono stati valutati in base all'esposizione dei locali, come illustrato nella Tabella 3.6.

Tabella 3.6. Tempi di apertura delle finestre nelle ore di occupazione

		Stagione		
		Inverno	Primavera/Autunno	Estate
Fronte NORD	Tempi di apertura [h/giorno]	0,5	1,5	> 4
	Periodo prevalente	Mattina	Non c'è un periodo prevalente	Non c'è un periodo prevalente
Fronte SUD	Tempi di apertura [h/giorno]	0,5	2,5	> 4
	Periodo prevalente	Mattina	Mattina	Non c'è un periodo prevalente

Gestione delle chiusure oscuranti

Dall'analisi dei questionari emerge che le chiusure oscuranti (tapparelle avvolgibili) vengono utilizzate soprattutto negli uffici aventi esposizione a sud. Il periodo prevalente nelle stagioni intermedia ed estiva è nelle ore centrali della giornata e/o nelle prime ore del pomeriggio. I risultati del questionario sono riassunti nella Tabella 3.7.

Tabella 3.7. Tempi di utilizzo delle chiusure oscuranti nelle ore di occupazione

		Stagione		
		Inverno	Primavera/Autunno	Estate
Fronte NORD	Tempi di apertura [h/giorno]	0	0	0,5
	Periodo prevalente	Mattina	Non c'è un periodo prevalente	Non c'è un periodo prevalente
Fronte SUD	Tempi di apertura [h/giorno]	0,5	1,5	4
	Periodo prevalente	Mattina	Orario pranzo / pomeriggio	Non c'è un periodo prevalente

Gestione delle schermature solari

Per quanto riguarda le schermature solari (veneziane sul lato interno dei serramenti), esse vengono utilizzate soprattutto negli uffici aventi esposizione a sud, nella stagione estiva nelle ore centrali della giornata e/o nelle prime ore del pomeriggio come illustrato nella Tabella 3.8.

Tabella 3.8. Tempi di utilizzo delle schermature solari

		Stagione		
		Inverno	Primavera/Autunno	Estate
Fronte NORD	Tempi di apertura [h/giorno]	0	0	0,5
	Periodo prevalente	Mattina	Non c'è un periodo prevalente	Non c'è un periodo prevalente
Fronte SUD	Tempi di apertura [h/giorno]	0,5	1	4
	Periodo prevalente	Mattina	Non c'è un periodo prevalente	Orario pranzo / pomeriggio

Utilizzo dell'illuminazione artificiale

Per quanto riguarda l'illuminazione artificiale, dai questionari emerge come non vi siano distinzioni sostanziali tra gli uffici con esposizione a nord oppure a sud. Come illustrato nella Tabella 3.9, nelle stagioni invernale ed intermedia l'illuminazione artificiale viene utilizzata per più di quattro ore al giorno, per poi essere utilizzata molto meno nella stagione estiva.

Tabella 3.9. Tempi di utilizzo dell'illuminazione artificiale

		Stagione		
		Inverno	Primavera/Autunno	Estate
Fronte NORD	Tempi di apertura [h/giorno]	> 4	> 4	2
	Periodo prevalente	Mattina	Mattino	Non c'è un periodo prevalente
Fronte SUD	Tempi di apertura [h/giorno]	> 4	4	1
	Periodo prevalente	Mattina	Mattina	Non c'è un periodo prevalente

4. APPLICAZIONE DEL METODO DI CALCOLO DINAMICO AL CASO STUDIO

4.1. Metodo di lavoro

In seguito alla presentazione del caso studio ed agli strumenti di lavoro si è proceduto con la modellazione dell'edificio all''interno di Design Builder. Nei capitoli successivi verranno illustrati tutti i passaggi effettuati, che vanno dalla semplice modellazione geometrico-grafica fino all'inserimento di tutti i dati di input utili per poter eseguire la simulazione.

Il metodo di lavoro adottato per la modellazione dell'edificio in Design Builder segue il seguente schema:

- rielaborazione dei disegni di pianta;
- adozione del sistema metrico opportuno;
- conversione dei file da formato DWG in DXF;
- importazione dei disegni in formato DXF in Design Builder;
- posizionamento del disegno importato all'interno dello spazio-modello;
- disegno del Blocco edificio corrispondente a ciascun piano dell'edificio;
- disegno delle partizioni interne per ciascun piano, e di conseguenza creazione delle zone termiche (corrispondono al singolo ambiente);
- assegnazione della nomenclatura delle singole zone in relazione a quanto riportato nei disegni in pianta, e conseguenti tipologie di zona (riscaldata, non riscaldata, ecc.)
- disegno dei serramenti esterni ed interni;
- disegno delle sottosuperfici in corrispondenza degli elementi sottofinestra e cassonetti, e delle lesene in prospetto;
- composizione dell'intero edificio mediante sovrapposizione dei piani;
- disegno degli edifici circostanti all'edificio oggetto di studio;
- creazione di template nel Pannello di inserimento dati per ciascuna delle schede presenti (Attività, Costruzione, Aperture, Illuminazione, HVAC) ed inserimento dati relativi a ciascuna voce.

Per definire un metodo di lavoro si può partire dalla fine dell'intero processo progettuale per poi risalire fino al suo punto di inizio, e individuare in questo modo le tappe che caratterizzano questo processo. Più precisamente, si può partire dal risultato atteso. Nel caso specifico, il risultato atteso è caratterizzato da tabelle e grafici che Design Builder può produrre alla fine della simulazione per poter analizzare il comportamento energetico dell'edificio. Nella fase antecedente alla simulazione è necessario fornire tutti i dati di input necessari, i quali caratterizzano l'edificio in ogni suo aspetto, partendo dalla geometria dell'edificio e dalla sua struttura materica, fino ad arrivare a determinare il comportamento dell'utente finale all'interno dello spazio dell'edificio stesso. Questa fase è a sua volta preceduta da una modellazione tridimensionale all'interno del software di simulazione dinamica, che, seppur in modo

"semplificato" per alcuni aspetti, definisce la geometria dell'edificio e lo rappresenta in una forma che rispecchia in modo affidabile l'edificio reale. Questo processo di modellazione può a sua volta essere realizzato in due modi distinti:

- disegnando l'edificio direttamente in Design Builder senza l'ausilio di strumenti di riferimento esterni;
- disegnando l'edificio sulla base di riferimenti esterni (disegni vettoriali, documenti, immagini).

Ciascuna delle due opzioni può richiedere più o meno tempo, a seconda della complessità del progetto e delle capacità del progettista. Nel primo caso è necessario che si conosca in modo approfondito l'edificio da modellare, oppure disporre dei disegni da cui prendere le misure necessarie. Nel secondo caso si dispone di una base su cui "ricalcare" il modello tridimensionale, tuttavia spesso è necessario procedere con una revisione del materiale a disposizione, soprattutto quando si tratta di disegni vettoriali. Questi ultimi normalmente contengono molte informazioni, spesso superflue. Pertanto, si deve procedere con una pulizia integrale del disegno, eliminando le informazioni superflue, eliminare dettagli e rilievi che non possono trovare un riscontro significativo per la modellazione, costruire linee di riferimento e schemi che possono facilitare la modellazione in Design Builder (un esempio può essere dato da un profilo esterno dell'edificio lineare, e/o una semplificazione delle partizioni interne per mezzo di una linea posta in mezzeria), e, infine, definire un'origine del disegno.

Tutte le fasi del processo di modellazione sono descritte in modo dettagliato nei capitoli a seguire.

4.2. Preparazione del modello

Nella prima fase del lavoro sono stati rielaborati i disegni delle piante acquisiti come materiale di base; in questa fase si utilizza il software Autocad. I disegni di pianta schematizzati si rifanno ai disegni di base illustrati nelle figure del capitolo precedente (Capitolo 3). Più precisamente, per quanto riguarda la semplificazione del disegno delle piante, seguendo uno schema di lavoro univoco per ciascuna delle piante (nel caso dei piani ripetuti si è utilizzata una pianta tipo) si procede dall'esterno verso l'interno: sul profilo esterno dell'edificio vengono eliminati tutti gli elementi non necessari alla modellazione, come le lesene, i piccoli aggetti (che corrispondono a gocciolatoi sugli elementi orizzontali in prospetto), ed ogni altro elemento superfluo; il profilo esterno dell'edificio si presenta pertanto come una linea univoca. Successivamente, le partizioni interne sono state schematizzate tramite l'uso di una linea posta in mezzeria del muro. Un esempio di questo tipo di processo si osserva in Figura 4.1, illustrata di seguito.

Queste prime operazioni sono state necessarie in quanto:

- il Blocco edificio si disegna seguendo il profilo esterno dell'edificio, e gli eventuali spessori delle murature dipendono dal tipo di stratigrafia muraria applicata nella scheda Costruzione del Pannello di inserimento dati per tutto l'edificio, o all'occorrenza anche a parti specifiche dell'edificio stesso;
- le partizioni si disegnano secondo una linea centrale, in mezzeria per l'appunto; anche in questo caso la stratigrafia ed il relativo spessore della muratura interna dipendono dai dati inseriti a livello generale, oppure anche a livello locale, nel caso vi fossero differenze sensibili (risulta piuttosto frequente avere delle differenze di spessore delle pareti interne, al contrario di quelle esterne).

Durante la fase di rielaborazione è necessario assumere un'unità di misura specifica del disegno, al fine di facilitare il processo di importazione in Design Builder nella giusta scala. È auspicabile inoltre che si assuma un'origine del disegno (spesso risulta comodo un punto del vano scala in quanto elemento ripetuto nei diversi livelli dell'edificio), utile per un controllo incrociato dei disegni, ed anche di un posizionamento automatico nello spazio tridimensionale durante il processo di importazione.

Nelle figure di seguito riportate (Figura 4.1 e Figura 4.2) si evidenziano i passaggi sopra esposti, in particolare modo la sovrapposizione delle piante mediante l'uso di un punto di origine univoco, che in questo caso corrisponde ad uno spigolo del muro del vano scala, dove è presente anche la struttura portante del vano stesso.

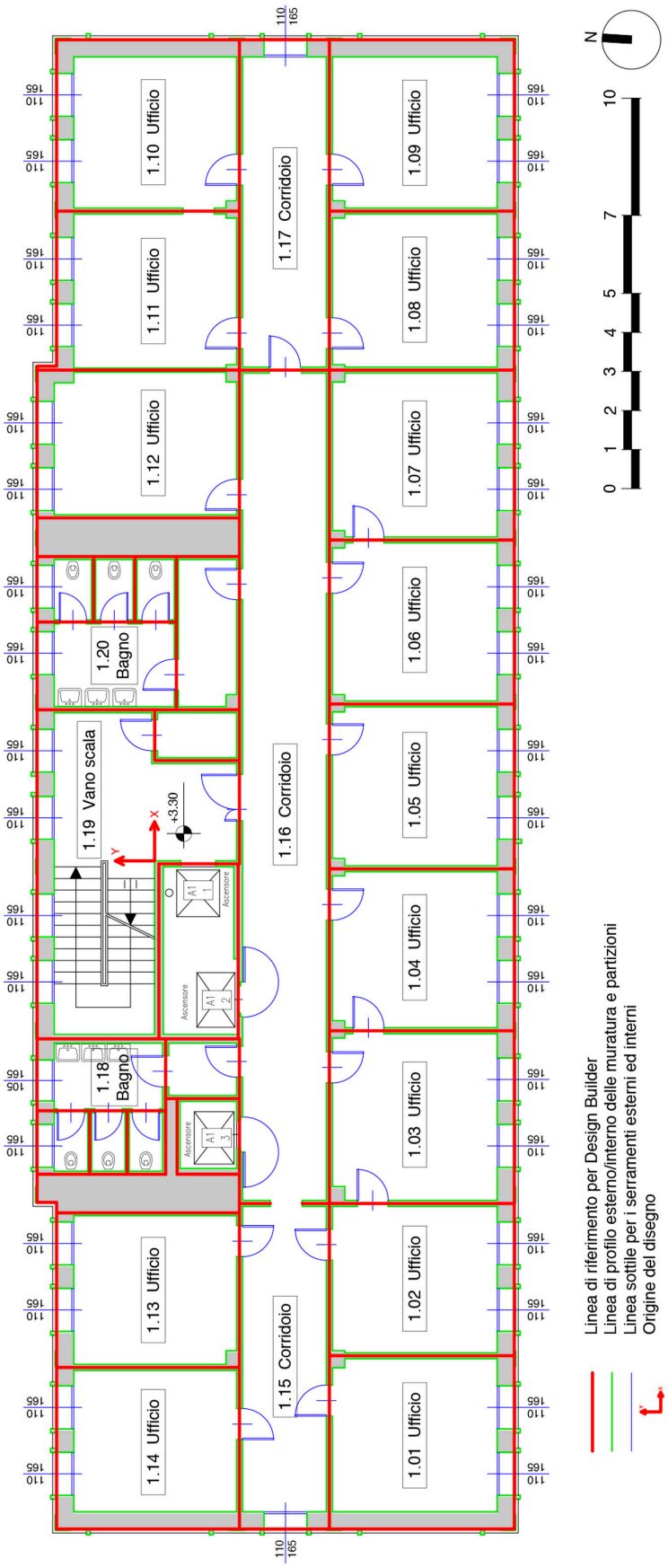


Figura 4.1. Schema di pianta da utilizzare come base per la modellazione in Design Builder – Piano tipo – Fuori scala

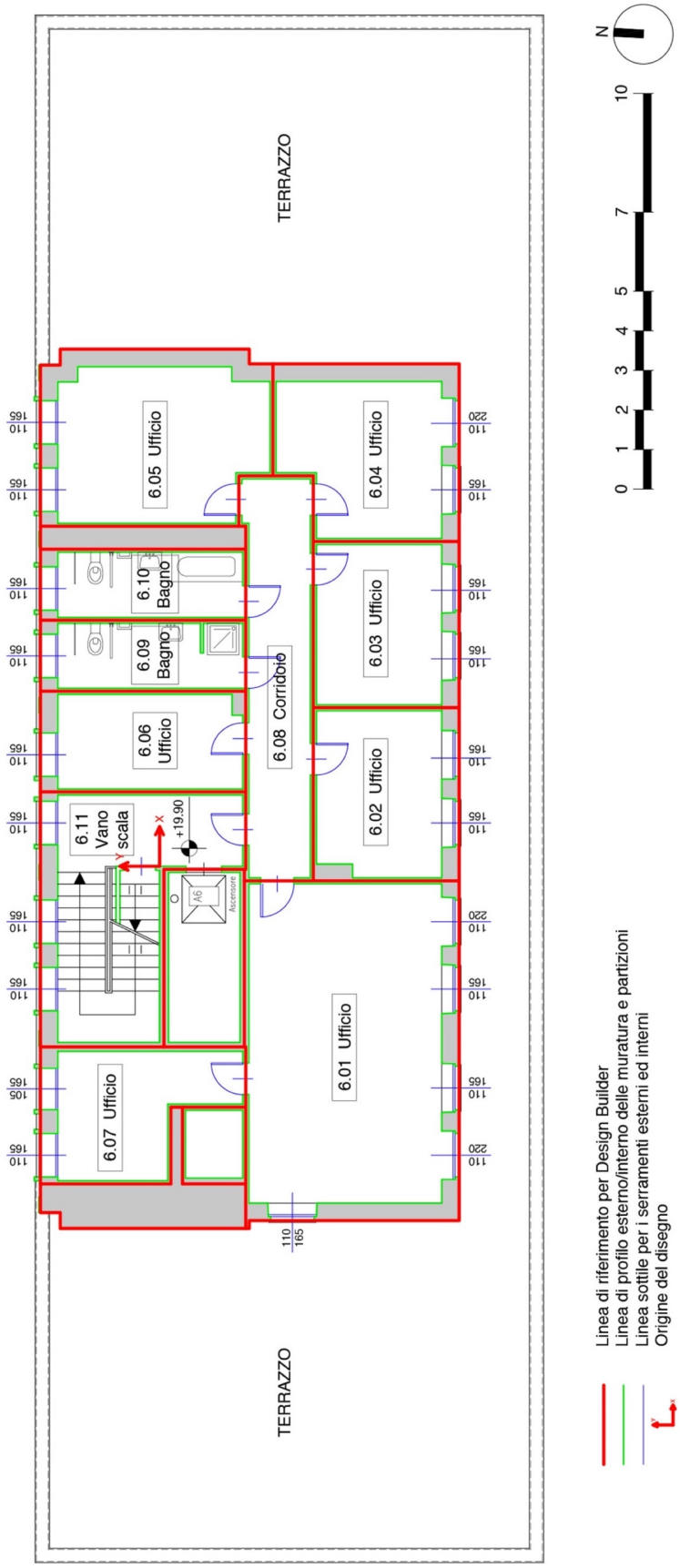


Figura 4.2. Schema di pianta da utilizzare come base per la modellazione in Design Builder – Piano sesto – Fuori scala

Gli errori tipici che si possono commettere sono normalmente legati al fattore scala, in quanto questo dipende da un'unità di misura adottata non univoca, oppure anche semplicemente da un errato procedimento di messa in scala del disegno. Si precisa, inoltre, che l'unità di misura adottata in Autocad non influisce sullo spazio di disegno (anche se in un secondo momento ne dipendono la messa in scala e la stampa, o nei processi esportazione del disegno), ma l'unità di disegno: ciò significa che se il disegno si intende disegnare in metri [m], ciascuna unità di disegno rappresenterà un metro del disegno reale, oppure se è in centimetri ciascuna unità di modello rappresenterà un centimetro.

Conclusa la rielaborazione dei disegni, si procede con l'esportazione da un file di tipo DWG ad uno DXF[27]. Ciò permette di importare in un secondo momento il disegno all'interno di Design Builder nel formato più adatto.

Dati del modello

Prima di importare il file da disegno in formato DXF, nel nuovo file si deve specificare un template del Sito. Come illustrato nella Figura 4.3, il template del Sito può essere modificato per venire incontro alle esigenze del progettista, oppure rimanere invariato come da default ed apportare le dovute modifiche successivamente. Nel caso specifico è stato usato il *TORINO/CASELLE*. Dopodiché sono stati modificati i dati relativi al sito di ubicazione dell'edificio, quali la posizione geografica (latitudine, longitudine, altezza sul livello del mare), nonché i parametri climatici orari necessari alla simulazione.

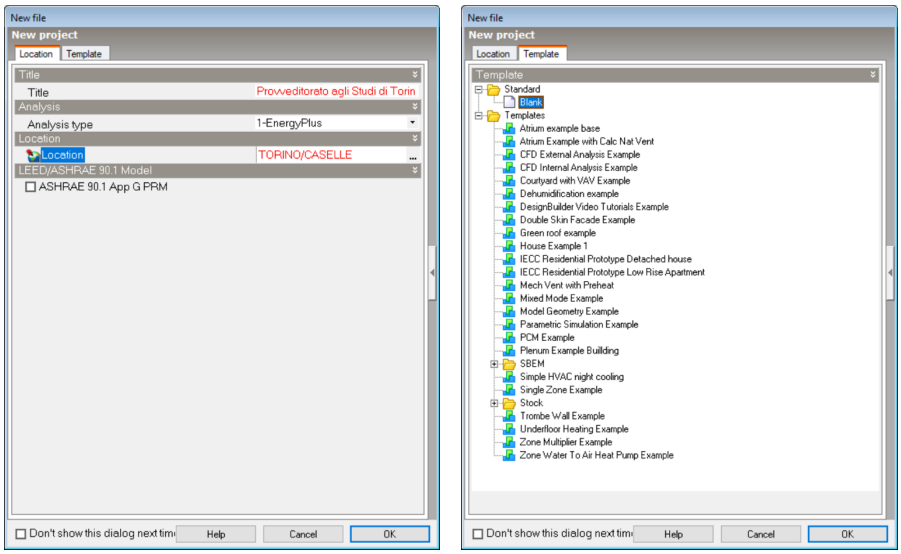


Figura 4.3. Nuovo progetto: definizione dei sistemi di analisi, ubicazione e template del file modello

[27] Il formato DXF, o Drawing Exchange Format, è un formato sviluppato dalla Autodesk come soluzione per scambiare dati tra il programma Autocad e altri software, valido tuttavia anche per altri software di tipo CAD non sviluppati dalla Autodesk.

Proseguendo, mentre i dati climatici per il progetto di riscaldamento vengono lasciati invariati come da default (sono ininfluenti sui risultati attesi in quanto la stagione invernale non viene considerata ai fini della simulazione), quelli per il progetto di raffrescamento, a livello annuale, vengono modificati considerando un rischio pari allo 0,4% di possibilità che possano verificarsi temperature esterne più estreme, riferito alla temperatura a bulbo asciutto. Per quanto riguardano invece i dati climatici per la simulazione, questi sono stati generati automaticamente in funzione dei dati climatici impostati nel Template, specifici del luogo di ubicazione del progetto oggetto di studio. Tutti i dati rimanenti sono stati assunti come da default.

In questa fase viene attivata e definita tramite programma operativo la simulazione della concentrazione di CO_2 dell'ambiente interno in funzione di quella dell'ambiente esterno.

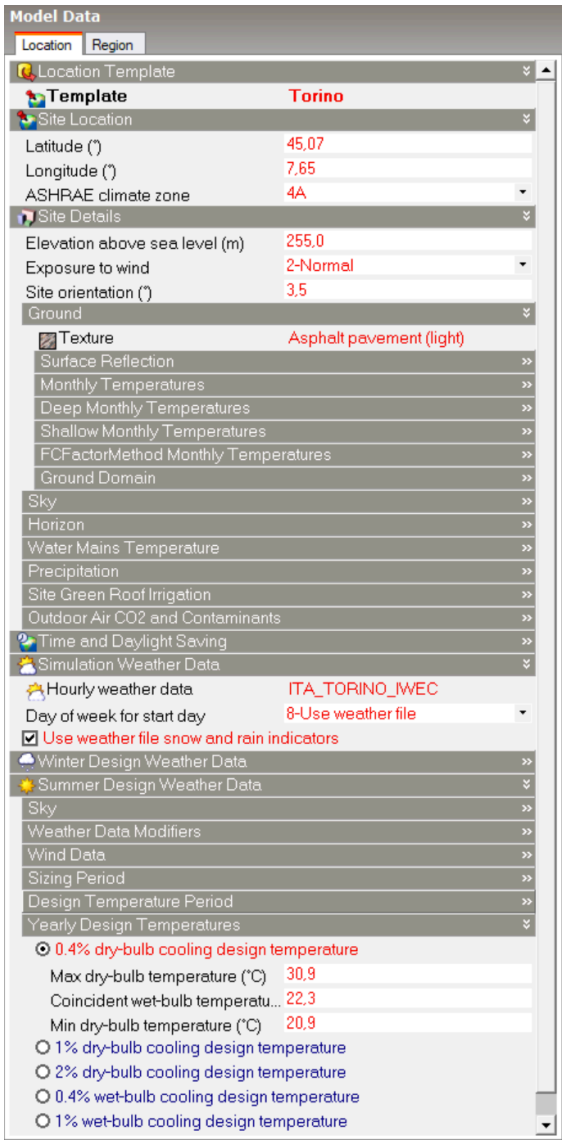


Figura 4.4. Dati Sito – Template – Ubicazione del progetto e relativi dati climatici reali e di progetto

Modellazione dell'edificio con Design Builder

In seguito alla definizione delle caratteristiche del Sito dell'area di progetto, per poter continuare nella modellazione si deve creare dapprima l'Edificio, e si ricorda la struttura gerarchica illustrata nella Figura 2.1 nel Capitolo 2.2:

Sito → Edificio → Blocco edificio → Zona → Superficie → Apertura

Per Design Builder, l'Edificio è una struttura a sé stante, che ha i propri dati predefiniti ed è simulato in modo separato da altri edifici eventualmente presenti, ma che sono accomunati dai dati specificati al livello del Sito. Selezionando i dati di default nella creazione del nuovo Edificio, oppure i dati di altri template più specifici presenti nell'elenco, si generano in automatico tutti i dati preimpostati per le Attività, la Costruzione, le Aperture e così via. A questo punto si procede con l'importazione del disegno e la modellazione vera e propria.

Importando il disegno di base in formato DXF, si specifica l'unità di misura e l'altezza da terra (o dal piano cartesiano dello spazio modello). Successivamente, il disegno dovrebbe posizionarsi in modo automatico al centro dello spazio modello secondo le specifiche adottate in Autocad.

Si procede con il disegno del Blocco edificio, il quale rappresenterà un piano dell'edificio. La modellazione avviene per mezzo di estrusione di uno specifico perimetro disegnato. Come in tutti i software per il disegno bidimensionale e tridimensionale, ci sono elementi che facilitano il processo di modellazione.

La modellazione tridimensionale dell'edificio all'interno di Design Builder segue uno schema ben definito e ripetitivo: i singoli piani modellati per mezzo dei Blocchi si disegnano separatamente (ad eccezione del piano "tipo") e vengono successivamente sovrapposti fino alla definizione dell'intero edificio. Lo schema può essere riassunto in otto punti:

1. posizionamento del disegno di pianta in formato DXF;
2. tracciamento del perimetro esterno;
3. disegno delle partizioni interne;
4. definizione delle singole zone termiche;
5. disegno dei serramenti esterni;
6. disegno di elementi particolari che possono costituire altre dispersioni e/o ponti termici;
7. disegno dei serramenti interni;
8. verifica e controllo delle operazioni eseguite.

Il tempo necessario per la realizzazione di ciascuna operazione è relativa alla complessità del punto stesso. Ad esempio, le operazioni contenute nei primi quattro punti si eseguono in tempi alquanto brevi, poiché si lavora al livello del Blocco edificio. Il punto 4, in particolare, dipende essenzialmente dalle tipologie di zone termiche presenti: un numero elevato di tipologie diverse richiede maggiore tempo nella corretta definizione dei parametri che caratterizza una zona termica; molti dei passaggi, tuttavia, vengono risparmiati grazie all'uso, anche in questo caso, dei template. I punti 5, 6 e 7, invece, incidono notevolmente sul fattore tempo poiché si

scende ulteriormente di livello, fino alla Superficie ed eventualmente fino al livello delle Aperture. Ad aumentare il grado di difficoltà a questi livelli è l'assenza dei riferimenti al disegno, pertanto alcune tipologie di dettagli richiedono misurazioni preventive o in parallelo sul materiale di partenza.

Nei capitoli precedenti, il fattore tempo è stato posto come mezzo di confronto fra diversi metodi di lavoro e fra diversi strumenti utili al raggiungimento di un risultato per un progetto. In questo caso, è necessario fare uso di metodi che possono diminuire il tempo richiesto per la modellazione, facendo tesoro dell'esperienza acquisita nell'utilizzo del software. Per essere più precisi, il disegno dei serramenti esterni e di altri dettagli che influenzano in modo significativo la simulazione può avvenire prima della definizione delle partizioni interne: avendo dunque una singola grande zona termica, il disegno delle aperture e di altri elementi può essere velocizzato grazie alla ripetitività degli elementi architettonici stessi, nonostante si lavori allo stesso modo al livello della Superficie.

Nelle figure di seguito verranno illustrati i passaggi in modo semplificato, indicati nello schema adattato per diminuire il tempo impiegato nella modellazione:

1. posizionamento del disegno di pianta in formato DXF (Figura 4.5);
2. tracciamento del perimetro esterno (Figura 4.6);
3. disegno dei serramenti esterni (Figura 4.7);
4. disegno degli elementi particolari (Figura 4.7);
5. disegno delle partizioni interne (Figura 4.8);
6. definizione delle singole zone termiche (Figura 4.9);
7. disegno dei serramenti interni (Figura 4.10);
8. verifica e controllo delle operazioni eseguite;
9. costruzione dell'edificio mediante l'unione dei diversi piani che lo compongono (Figura 4.11);
10. costruzione dell'area di progetto mediante il disegno degli edifici circostanti (Figura 4.12);

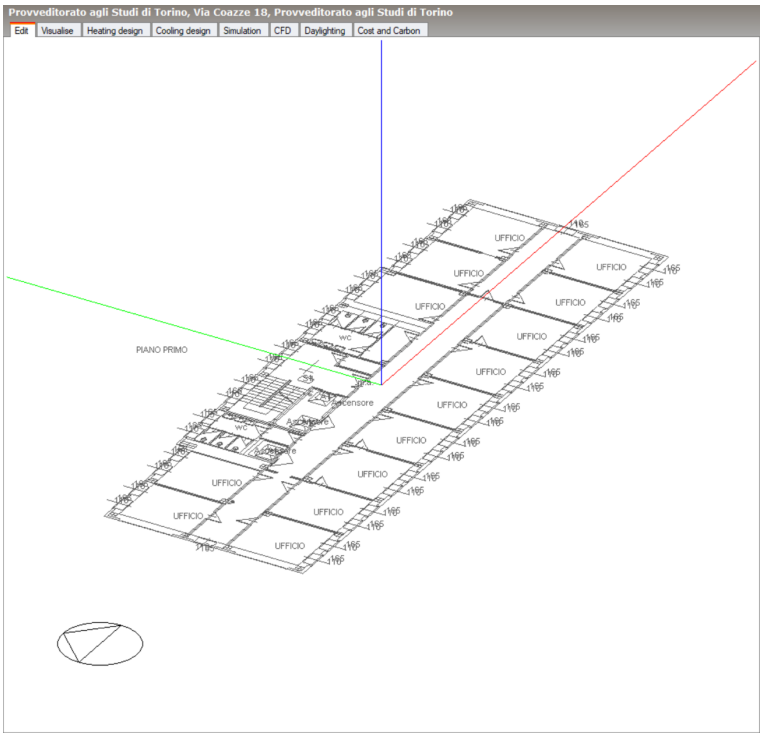


Figura 4.5. Modellazione – Punto 1: posizionamento del disegno in pianta in formato DXF

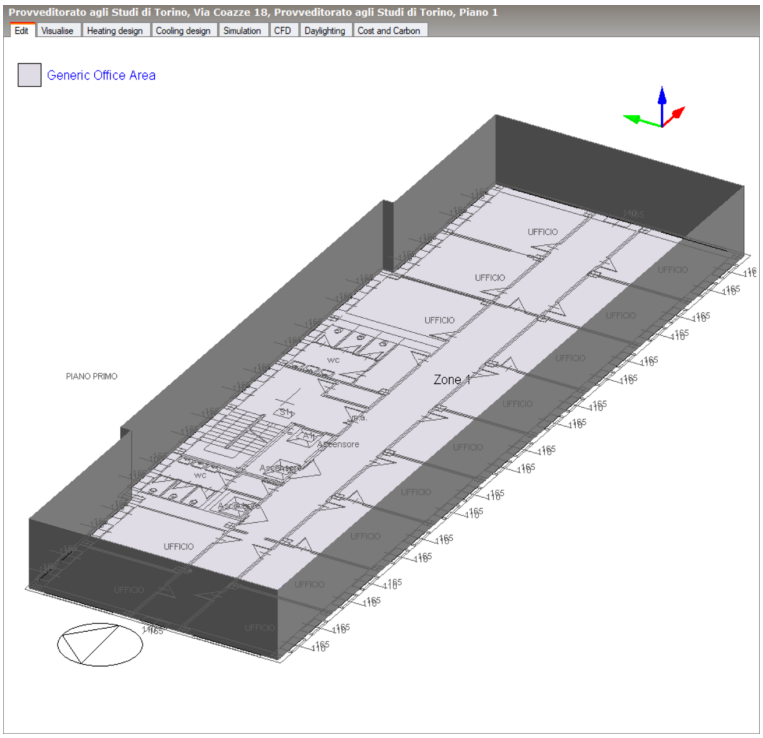


Figura 4.6. Modellazione – Punto 2: tracciamento del perimetro esterno

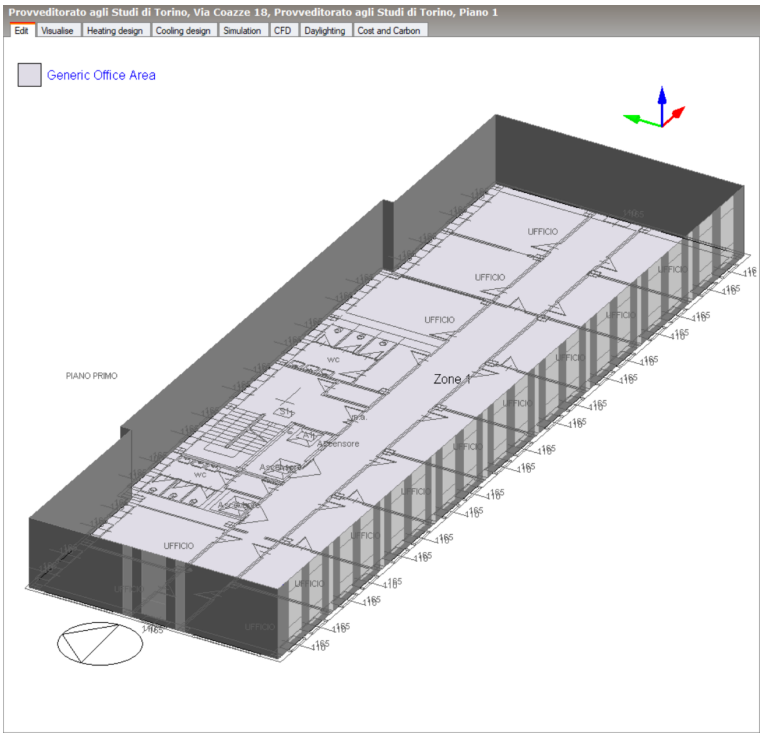


Figura 4.7. Modellazione – Punto 3-4: disegno dei serramenti esterno e degli elementi particolari

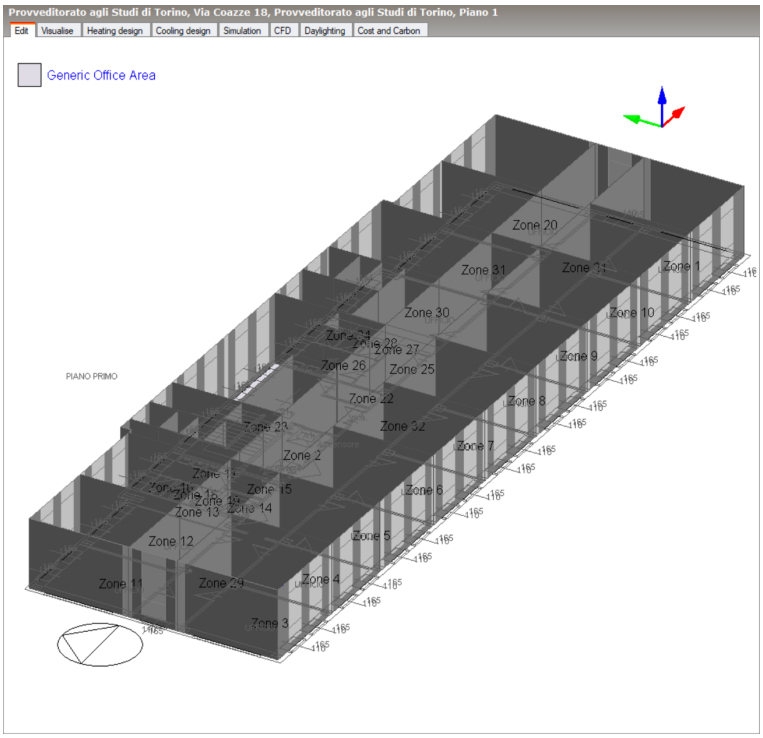


Figura 4.8. Modellazione – Punto 5: disegno delle partizioni interne

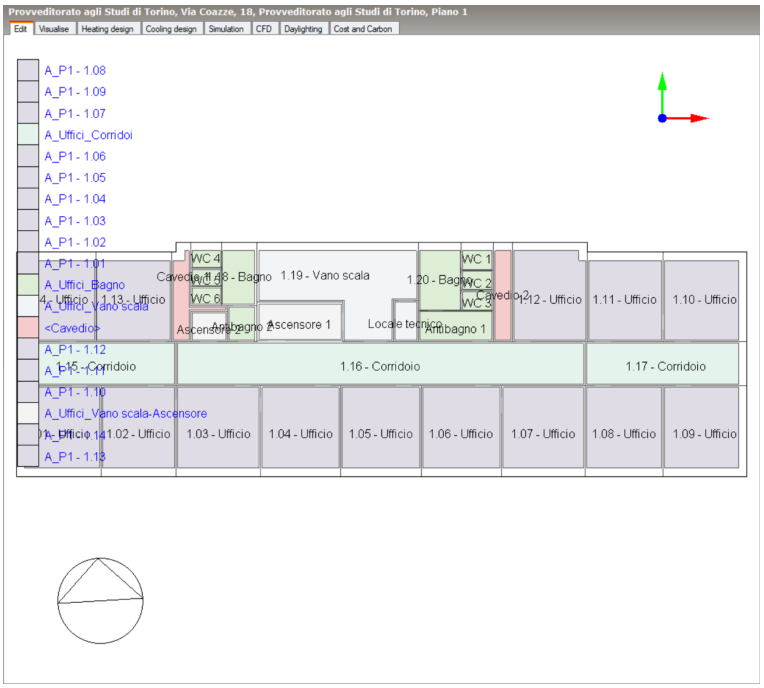


Figura 4.9. Modellazione – Punto 6: definizione delle singole zone termiche (template) e correzione dello spessore delle partizioni dove necessario

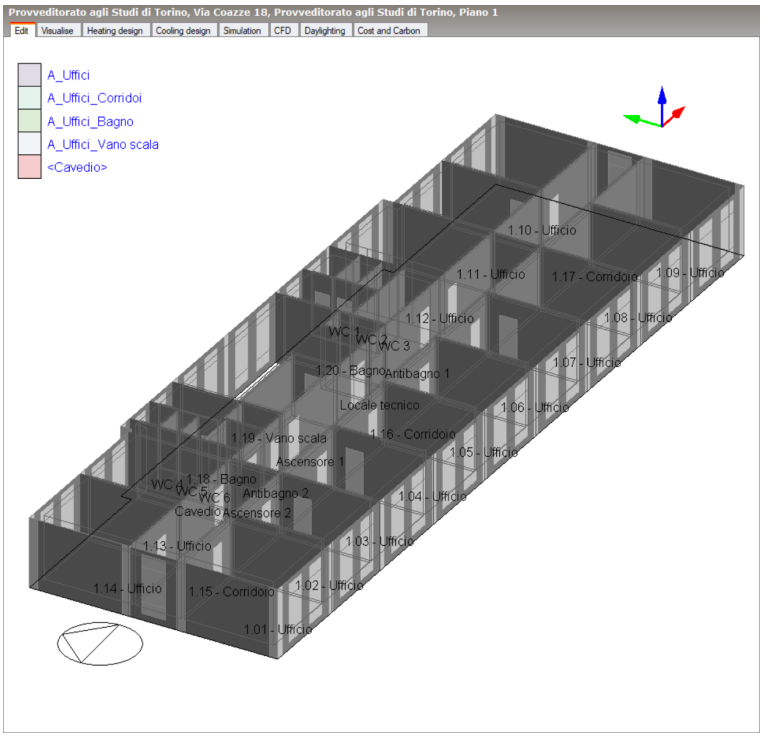


Figura 4.10. Modellazione – Punto 7: disegno dei serramenti interni

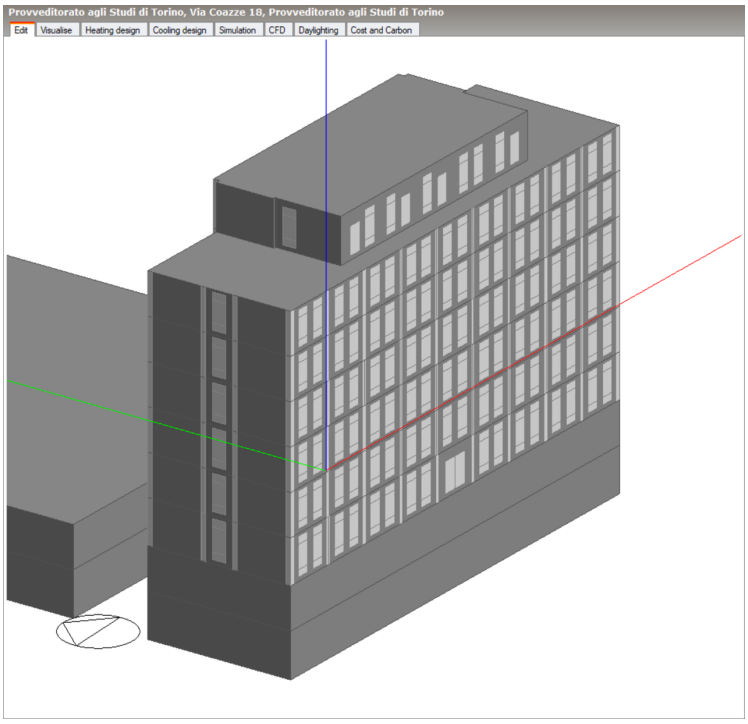


Figura 4.11. Modellazione – Punto 9: costruzione dell'edificio mediante l'unione dei diversi piani che lo compongono

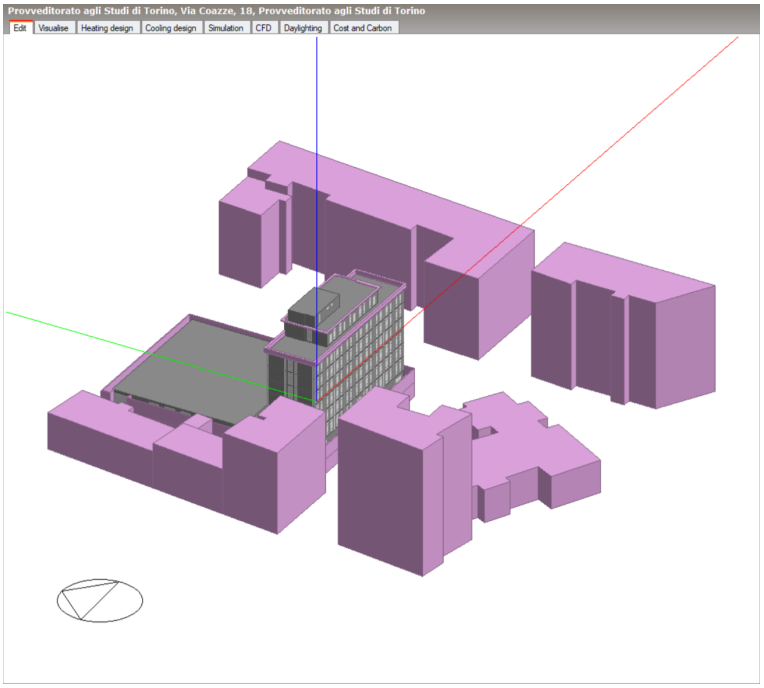


Figura 4.12. Modellazione – Punto 10: costruzione dell'area di progetto mediante il disegno degli edifici circostanti

Opzioni modello

Il passo successivo consiste nella personalizzazione dei dati nel pannello delle Opzioni di Modello.

Nella Figura 4.13 vengono illustrati i Dati generali adottati per il modello. Ciascuno dei temi elencati nella finestra possono essere modificati affinché si abbia la possibilità di definire le voci secondo parametri semplificati e predefiniti oppure arrivare ad un grado di dettaglio molto elevato. I parametri su cui si può lavorare in questa fase sono dunque:

- Costruzione e Aperture;
- Apporti termici;
- Tipo di programma;
- HVAC;
- Ventilazione naturale e Infiltrazione;
- Occupanti.

I dati relativi alla Costruzione ed alle Aperture finestrate sono stati definiti secondo l'impostazione *Generale*, in quanto questa opzione permette di definire le caratteristiche della struttura dell'edificio da una serie di template specifici per ogni tipologia di struttura, che si possono selezionare da una lista.

Per quanto riguarda i dati degli apporti termici, essi si distinguono in tre diverse modalità di selezione:

- *raggruppati* – tutti gli apporti interni (occupazione, computer, attrezzatura per ufficio, attrezzatura varia, processo di ristorazione e illuminazione) sono raggruppati in un singolo valore, ma non generano risultati per la simulazione della distribuzione della temperatura e del comfort;
- *"early"* – gli apporti interni possono essere definiti separatamente nelle varie categorie;
- *dettagliato* – gli apporti interni vengono specificati definendo individualmente ciascun elemento in ogni zona termica.

La modalità di definizione degli apporti termici interni più adatta al presente modello risulta la seconda, in quanto il metodo dettagliato risulta più difficile da configurare a causa di una grande mole di dati. Inoltre, ciò incide notevolmente sui tempi di calcolo durante la simulazione. In presenza di modelli di dimensioni significative si può ottenere un risultato molto attendibile in relazione al metodo dettagliato applicando il metodo *early*. Per fare ciò, si possono calcolare i valori normalizzati delle differenti categorie di apporti termici utilizzando i fogli di calcolo in Excel.

Successivamente si definiscono le modalità di calcolo delle differenti tipologie degli apporti interni.

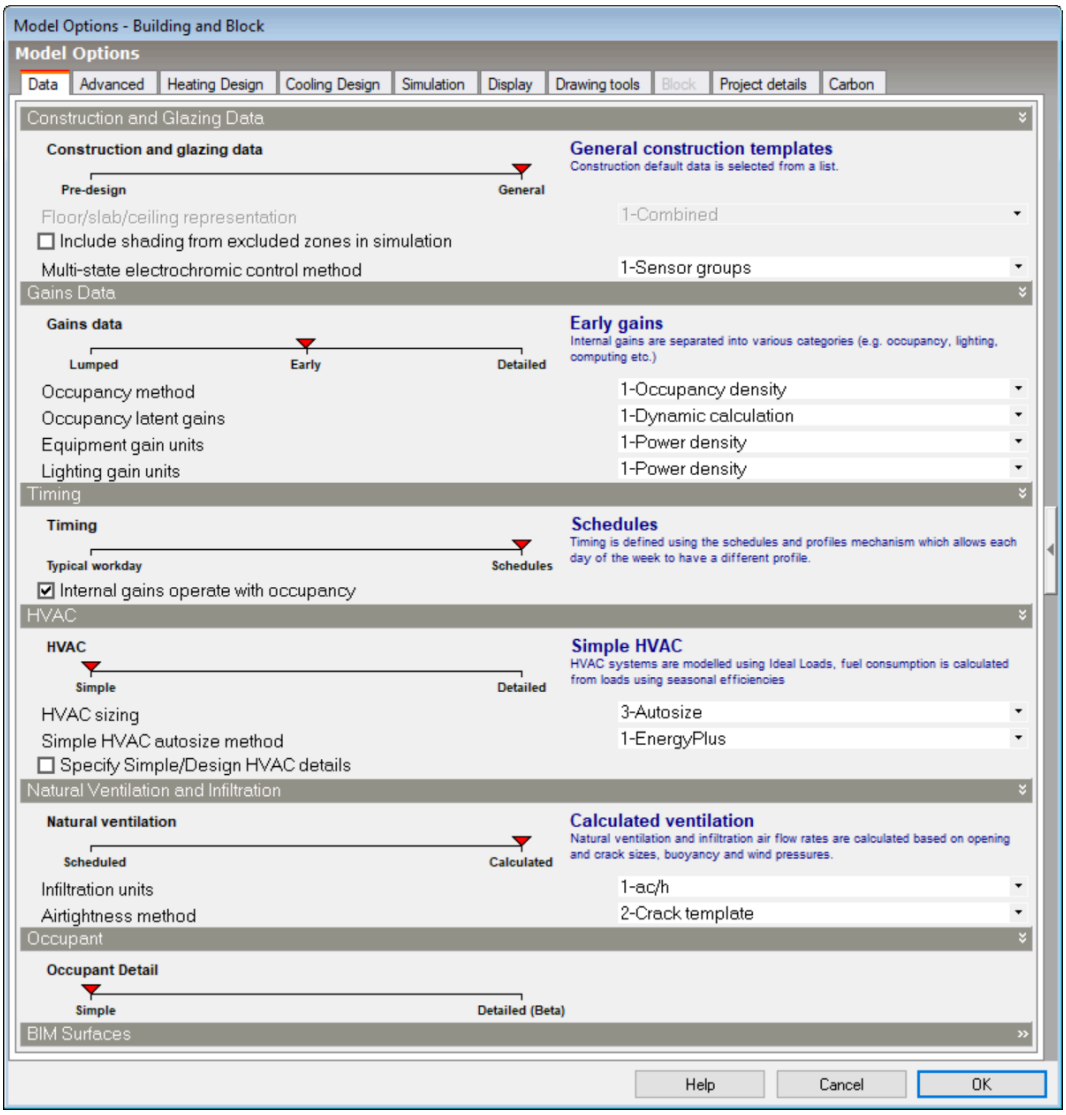


Figura 4.13. Opzioni modello – definizione dei Dati generali del modello

La definizione del Tipo di programma si suddivide fra la *Giornata lavorativa tipica* ed i *Programmi*. La prima è definita da un orario di inizio ed uno di fine della giornata lavorativa, dal numero di giorni lavorativi durante la settimana e le variazioni stagionali. Questo approccio si usa normalmente in una fase preliminare del progetto, e solamente per edifici non residenziali. La seconda modalità, invece, dipende dai programmi (analizzati nel Capitolo 2.2 della presente tesi) che possono essere definiti per ciascun giorno lavorativo della settimana e per ogni mese dell'anno mediante l'uso dei formati sotto forma di Profili e Compatto. Mentre il primo approccio è più generico, il secondo può delineare in maniera più precisa il profilo dell'utente medio, oppure del singolo, permettendo una modellazione più conforme alla realtà.

La categoria HVAC è stata lasciata invariata, mantenendo i dati impostati di default. Tale scelta è motivata dal fatto che nel caso studio non vi sono impianti di raffrescamento e/o di ventilazione meccanica presenti all'interno dell'edificio, pertanto non è necessario modellarla, e si considera dunque come impianto ideale. Si è pertanto adottata la modalità *Semplice*, in

quanto può comunque essere calcolato il fabbisogno energetico. È utile tuttavia per definire correttamente la ventilazione naturale.

La definizione della *ventilazione naturale* avviene in una prima fase nelle Opzioni di modello. Essa può essere essenzialmente di due tipi:

- *programmata* – i tassi di ventilazione sono esplicitamente definiti per ciascuna zona in termini di massimi ricambi orari, e un tasso di ricambio dell'aria programmato e per infiltrazione è definito da un valore ACH costante;
- *calcolata* – i tassi di ventilazione sono calcolati usando la pressione del vento sulle superfici esterne dell'edificio, la dimensione delle aperture ed il loro programma operativo, le dimensioni delle fessure nell'involucro dell'edificio e così via.

Generalmente si usa la prima modalità, per via della velocità e della rapidità dell'inserimento dei dati relativi al modello, ed anche la simulazione procede più velocemente. Nel caso specifico viene usata la *ventilazione naturale calcolata* poiché può garantire risultati più conformi alla realtà.

Si precisa che, essendo l'edificio oggetto di studio sprovvisto della ventilazione meccanica, nella definizione dei parametri caratteristici verranno considerate le indicazioni contenute all'interno della normativa alla base di questa tesi (FprEN 16798-1). In questo caso, i criteri per l'ambiente termico vengono specificati usando il metodo adattivo, che tiene in considerazione effetti di adattamento. Esso si applica unicamente quando sono presenti occupanti con attività sedentarie, che non hanno particolari restrizioni riguardo all'abbigliamento. Le condizioni termiche dell'ambiente interno vengono così regolate principalmente dagli occupanti attraverso l'apertura e la chiusura di elementi nell'involucro dell'edificio, quali finestre, bocchette di ventilazione, lucernari, ecc.

Proseguendo nella definizione dei parametri del modello, si deve specificare la modalità di definizione della ventilazione per infiltrazione. Come riportato nel Capitolo 2.2, l'infiltrazione viene specificata secondo quattro diverse modalità. Nel caso specifico, il metodo adottato è quello dei ricambi orari (*ac/h*). Mentre per l'infiltrazione si è adottato un valore pari a 0,5 h^{-1}[28], per la ventilazione naturale il numero di ricambi orari è stato calcolato secondo il metodo[29] descritto nella norma tecnica UNI 15251. La procedura definisce i seguenti principi:

1. Si calcola il tasso di ventilazione[30] per la zona termica in funzione di:
    a. area di pavimento;
    b. numero di occupanti;
2. Si seleziona il valore maggiore fra i due tassi di ventilazione;

[28] Prospetto D.6 della norma europea UNI EN 12831;

[29] Appendice B della norma europea UNI EN 15251;

[30] Il tasso di ventilazione si definisce secondo il metodo tabellare previsto dalla norma UNI EN 15251, dipende dalla categoria della qualità dell'ambiente interno ed eventualmente dalla tipologia di emissioni dell'edificio.

3. Il tasso di ventilazione in [m^3/h] viene suddiviso per il volume dell'ambiente/zona termica;
4. Si ottiene il numero di ricambi orari.

Nella Figura 4.14 è illustrato in modo schematico il funzionamento della ventilazione naturale. Grazie alla differenza di pressione dell'aria, indotta dal vento, tra l'ambiente esterno e quello interno, si genera un flusso di aria che penetra attraverso le superfici opache e, ancora di più, attraverso le superfici trasparenti dell'involucro edilizio, in funzione della permeabilità all'aria delle varie componenti edilizie. La ventilazione naturale viene indotta, dunque, grazie all'apertura delle finestre o mediante l'uso di prese d'aria, e per infiltrazione.

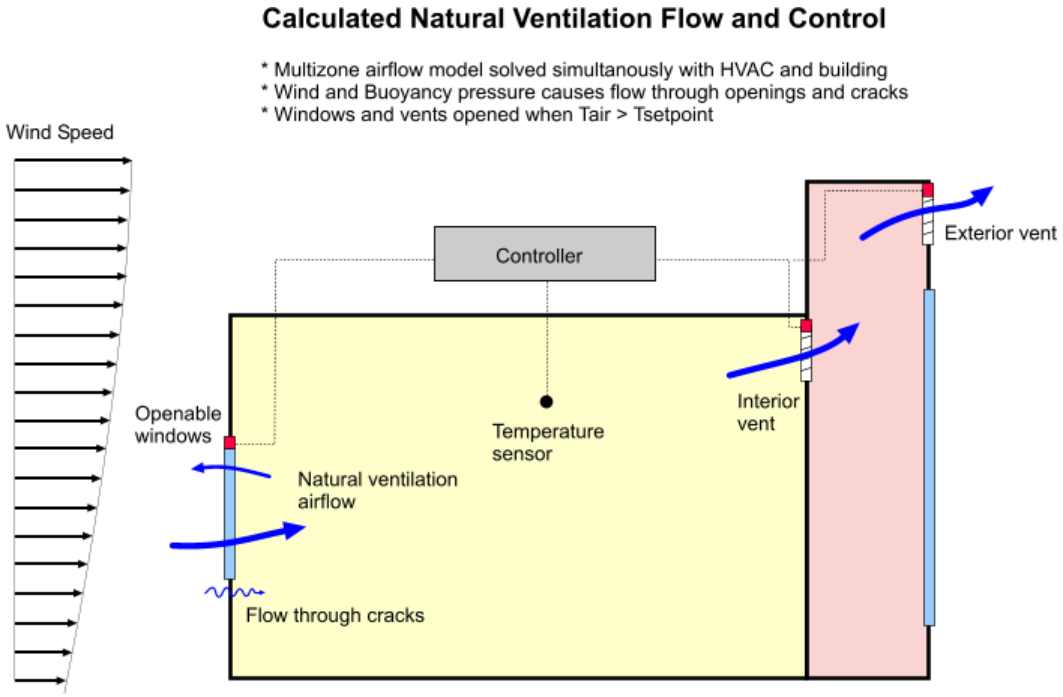


Figura 4.14. Raffigurazione schematica della ventilazione naturale (Immagine tratta da [14])

Nella modalità Calcolata, la ventilazione naturale (e di conseguenza l'infiltrazione) è controllata dal timer (i dati delle finestre e delle prese d'aria vengono specificati nei programmi operativi nella scheda Aperture) e dal setpoint di temperatura per ventilazione nella scheda Attività. I dati relativi all'infiltrazione vengono specificati nella scheda Costruzioni.

Proseguendo, nella scheda dei dati Avanzati (Figura 4.15) vi sono ulteriori parametri che affinano la procedura di calcolo della simulazione. Vi sono dunque i seguenti parametri:

- Semplificazione;
- Impostazioni di adiacenza;
- Ventilazione naturale;
- Illuminazione;
- Filtri;
- Blocco componente.

I processi di calcolo della simulazione dinamica possono essere semplificati e velocizzati (a volte in maniera significativa) attraverso il raggruppamento di zone, pareti e finestre e/o eliminando zone ed elementi non necessari dal modello. I raggruppamenti possono essere effettuati in funzione di:

- *zone con la stessa attività* – riduce il numero di zone, raggruppandole in funzione dell'attività;
- *zone connesse da forature* – le zone sono connesse grazie alle forature (ad esempio per realizzare ambienti a doppia altezza) disegnate al livello della Superficie, all'interno dello stesso Blocco oppure attraverso una moltitudine di Blocchi;
- *zone connesse per selezione* – operazione di raggruppamento manuale delle zone (ad esempio la zona del vano scala può essere costituito da altre zone come il vano stesso della scala, il vano ascensore, vano montacarichi, e/o locali tecnici e accessori presenti sul piano);
- *finestre simili sulla superficie esterna dell'edificio* – le finestre sulla superficie di una Zona aventi la stessa area, struttura, telaio e divisori, sistemi di ombreggiamento, vengono raggruppate in una singola apertura; tale operazione si verifica solamente quando non vi è un controllo dell'illuminazione;
- *incrinature dell'involucro simili* – dipendono dalla Zona su cui si affacciano, nella stessa direzione e aventi altezze simili; si applica solamente quando la ventilazione naturale è impostata come Calcolata.

Nel caso della ventilazione naturale calcolata, qualora le finestre abbiano le stesse dimensioni, tipologia di vetro e sistemi di ombreggiamento non deve essere selezionata l'opzione di raggruppamento delle finestre con caratteristiche simili. Tale opzione deve essere attivata solamente nel caso di percentuali di aperture finestrate differenti e/o di programmi operativi, poiché ogni differenza nelle impostazioni della ventilazione naturale non vengono conteggiati quando verranno verificate le finestre simili sulla superficie della parete.

Successivamente vengono definiti ulteriori parametri per la ventilazione naturale, come il fattore del vento, e la modulazione delle aperture. Per quanto riguarda il primo, normalmente nella simulazione degli edifici si preferisce escludere, o eventualmente ridurre, gli effetti del vento dalle analisi della ventilazione naturale calcolata. Il fattore del vento può avere un valore compreso tra 0 e 1: quando il valore è pari a 0, l'influenza del vento viene esclusa dalle analisi, mentre nel caso il valore fosse pari a 1, si tiene conto di tutti gli effetti prodotti dal vento; si

possono assumere valori intermedi qualora si volessero considerare gli effetti del vento in modo parziale.

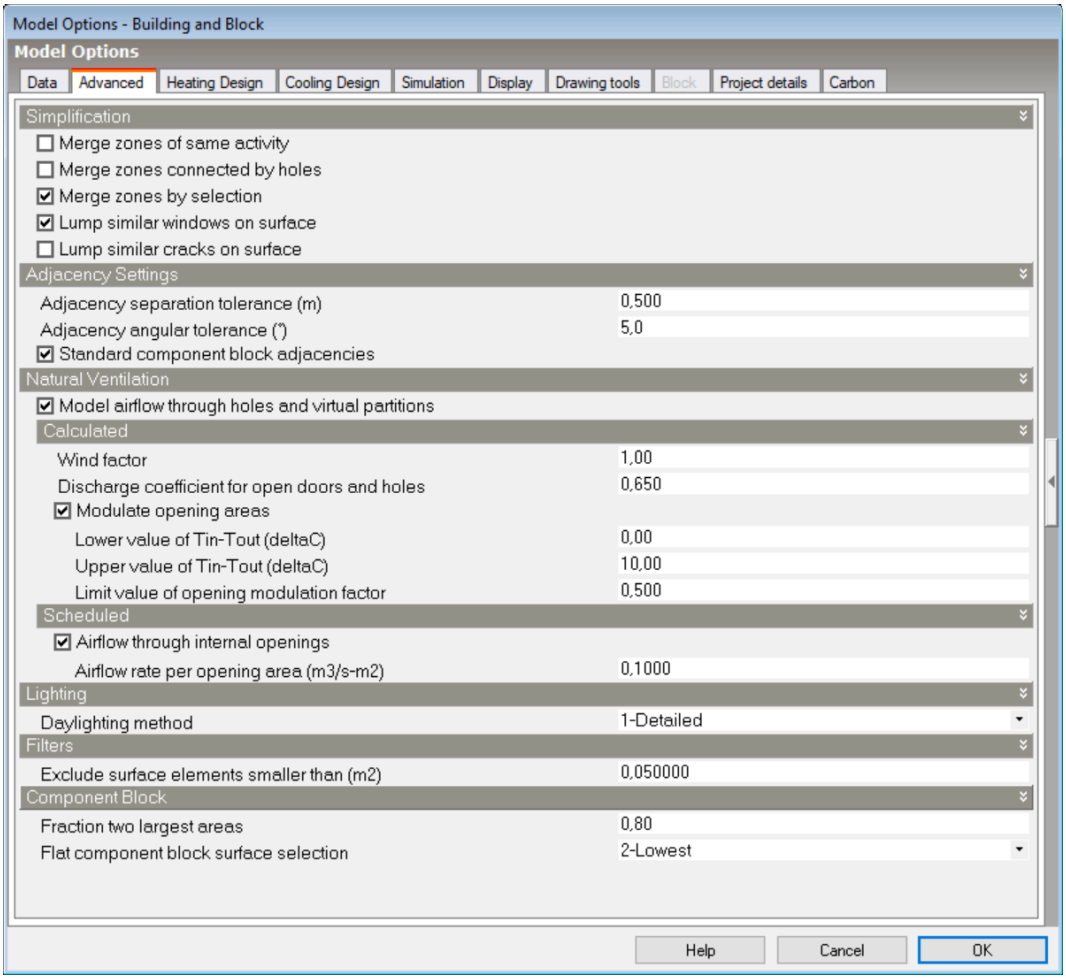


Figura 4.15. Opzioni modello – definizione dei Dati Avanzati del modello

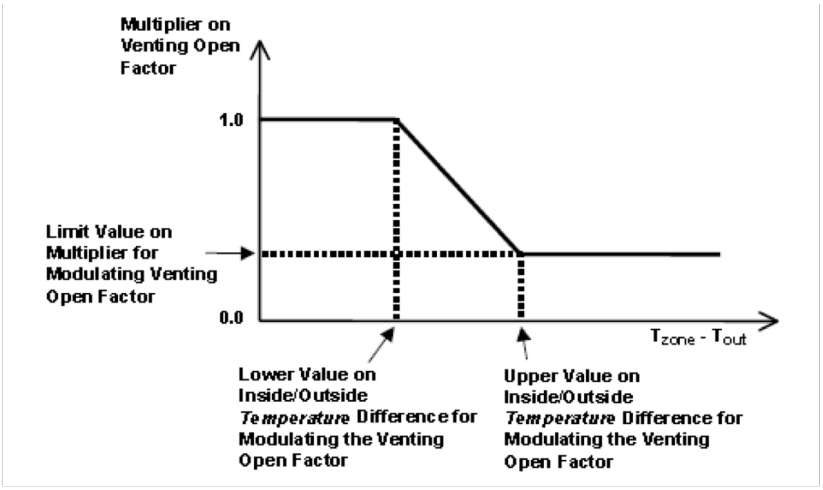
Le aperture, quali finestre e/o porte, possono essere modulate quando si usa la ventilazione naturale calcolata, lavorando sui seguenti parametri:

- valore più basso della differenza di temperatura tra interno ed esterno;
- valore più alto della differenza di temperatura tra interno ed esterno – definisce la temperatura dell'aria esterna più bassa;
- valore limite del fattore di modulazione dell'apertura – dà la riduzione dell'area dell'apertura per la temperatura dell'aria esterna più bassa.

Questi dati vengono usati all'interno di EnergyPlus per calcolare un fattore compreso tra 0 e 1 che moltiplica il fattore di apertura di ciascuna finestra e porta nell'edificio. La modulazione delle aperture può ridurre gli ampi sbalzi di temperatura che possono verificarsi se le finestre o le porte sono troppo aperte, specialmente quando c'è una grande differenza di temperatura interna ed esterna.

Nella Figura 4.16 viene illustrato, mediante l'uso di un grafico e relativa tabella, il concetto della modulazione delle aperture. Per fare un esempio pratico, se il valore più basso della differenza tra la temperatura interna ed esterna ($T_{in} – T_{out}$) è pari a 0, il valore più alto è pari a 15, ed il valore limite del fattore di modulazione delle aperture è pari a 0,05, le finestre e le porte sono aperte al 5% della loro area totale di apertura solamente nel caso in cui l'aria esterna presenta una temperatura di 15°C inferiore a quella dell'aria dell'ambiente interno. Quando le temperature dell'aria interna ed esterna sono le stesse, le finestre sono aperte alla loro massima area di apertura, e quando la differenza di temperatura è pari a 7,5°C le finestre sono aperte a metà fra le due casistiche.

Si sottolinea che lo scopo dell'opzione della modulazione serve a prevenire il discomfort dovuto all'aria molto fredda che viene introdotta nell'ambiente interno. Allora stesso tempo, bisogna considerare che questo controllo eviterà la ventilazione quando la temperatura dell'ambiente interno è troppo calda e quella dell'aria esterna non è particolarmente freddo a causa di una differenza di temperatura troppo elevata. Occorre in questo lavorare sia valore più alto della differenza di temperatura sia sul fattore di modulazione. Inoltre, si considera che con la modulazione attiva, le aperture saranno chiuse completamente se la differenza di temperatura super il valore più imposto.



Temperature difference (Tin - Tout)	Opening Multiplier
Tin - Tout <= [Lower value of Tin - Tout]	1.0
[Lower value of Tin - Tout] < **Tin - Tout** < [Upper value of Tin - Tout]	Factor varies linearly from 1.0 to Limit value of Opening modulation factor.
Tin - Tout >= [Upper Value of Tin - Tout]	Factor = Limit value of opening modulation factor.

Figura 4.16. Opzioni modello – modulazione delle aperture in funzione della differenza di temperatura tra l'ambiente interno ed esterno (Immagine tratta da [14])

Per quanto riguarda la Simulazione (Figura 4.17), è necessario definire i seguenti parametri:

- periodo di simulazione;
- opzioni di calcolo;
- opzioni dell'irraggiamento solare;

- opzioni di calcolo avanzato;
- opzioni di output (produzione dei risultati).

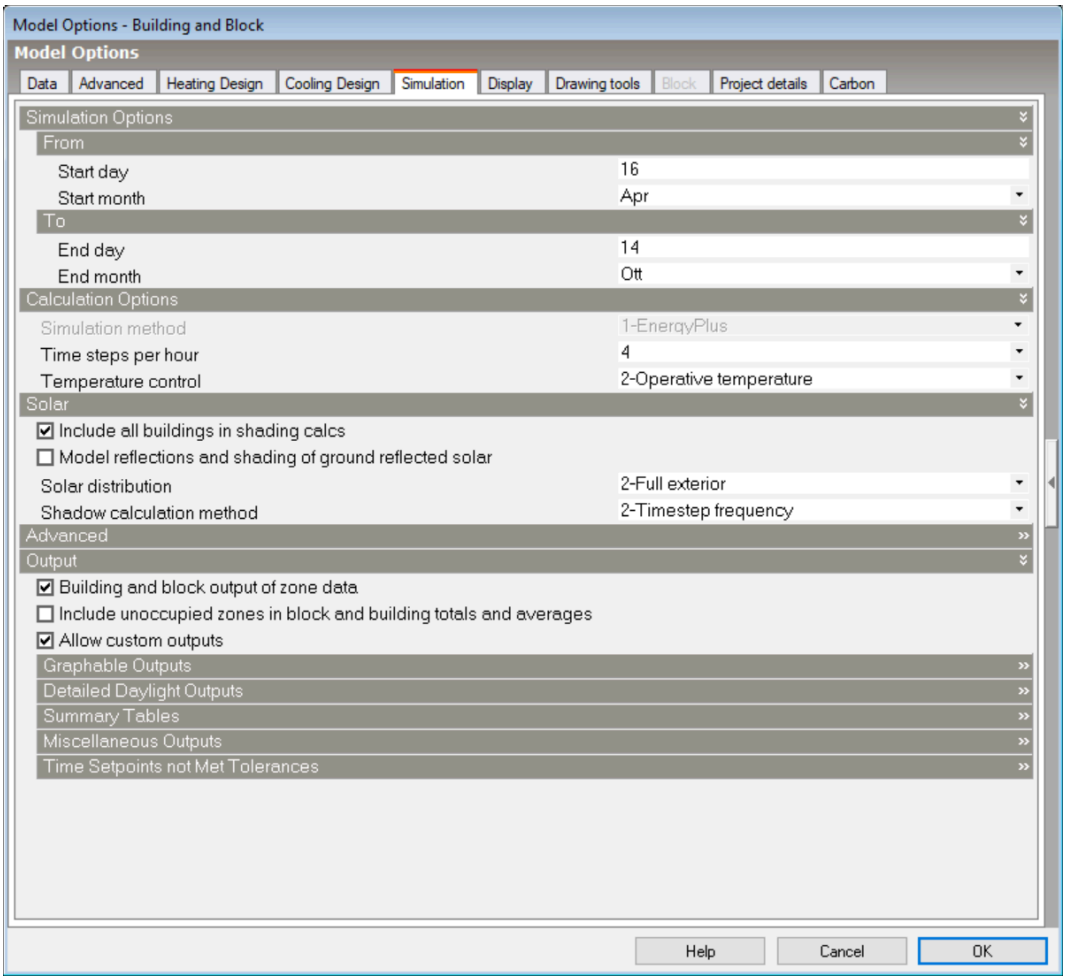


Figura 4.17. Opzioni modello – definizione delle opzioni per la simulazione – dati generali

Il periodo di simulazione viene definito mediante un giorno di inizio ed uno di fine. Grazie a questi parametri è possibile definire il *periodo di free-floating*, ovvero il periodo di riferimento per la simulazione dinamica dell'edificio oggetto di studio, come indicato all'inizio della presente tesi.

Nel punto successivo, ovvero le opzioni di calcolo, si indicano gli step orari (validi solamente per la simulazione) ed il tipo di temperatura dell'ambiente interno. Gli *step orari* sono il numero di volte per cui viene eseguito il calcolo energetico dell'edificio in un'ora. Un numero elevato di step orari fornisce chiaramente un risultato più dettagliato del comportamento energetico dell'edificio, ma allo stesso tempo influisce sul tempo che il software impiega per calcolare i risultati finali. EnergyPlus suggerisce alcuni valori di step orari per la simulazione, come ad esempio:

- *4* – per la simulazione di edifici sprovvisti di impianti HVAC;
- *6* – per la simulazione di edifici dotati di impianti HVAC.

Tutti i dati orari definiti per la simulazione, come ad esempio le condizioni esterne espresse in giorni di progetto o dati climatici, vengono interpolati in funzione del numero di step temporari impostati per il calcolo.

Per quanto riguarda il tipo di temperatura da utilizzare nei calcoli della simulazione dinamica, è necessario fare alcune considerazioni:

- la temperatura operativa (frazione radiante pari a 0,5) può essere utile nel calcolo realistico dell'energia per il riscaldamento ed il raffrescamento, basato sui requisiti di temperatura per la stagione invernale ed estiva definiti per le attività di ciascuna zona termica;
- il controllo dei sistemi di HVAC mediante l'uso della temperatura operativa condiziona l'edificio affinché vengano raggiunte le condizioni di comfort termico;
- il setpoint di temperatura interna definito nel template dell'Attività è generalmente derivato da fonti che riportano la temperatura operativa, per cui un sistema controllato mediante l'uso della temperatura dell'aria, e che raggiunge il setpoint definito, non necessariamente garantisce il comfort termico;
- lo svantaggio del controllo della temperatura operativa è dovuto all'avvio di carichi che possono essere irrealisticamente elevati a causa di ritardi nella risposta termica di pareti, pavimenti e soffitti; se il fenomeno persiste può portare ad un sovradimensionamento dei carichi di raffrescamento di progetto;
- usando il controllo della temperatura operativa di solito conduce a carichi di picco elevati nei calcoli per la progettazione dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento, ed elevati consumi di energia durante le simulazioni;
- il controllo della temperatura dell'aria è più facile da usare, ma può portare ad un dimensionamento inadeguato degli impianti, a meno che non venga introdotto un fattore di sicurezza; generalmente questa opzione porta a sottostimare il consumo di energia dell'edificio.

Nella procedura di definizione delle opzioni dell'irraggiamento solare si possono controllare gli aspetti del modello relativi agli apporti solari. Ciò diventa possibile grazie ai seguenti parametri:

- l'inclusione di tutti gli edifici nei calcoli dell'ombreggiamento;
- la modellazione delle riflessioni e ombreggiamenti del terreno dovuti all'irraggiamento solare;
- la distribuzione dell'irraggiamento solare;
- il metodo di calcolo delle ombre.

L'ampiezza delle ombre varia nel corso della giornata e durante tutto l'anno solare. Ciò limita l'irraggiamento solare diretto su una porzione o sull'intero edificio.

L'opzione della distribuzione solare determina come EnergyPlus tratterà la radiazione solare e la riflessione delle superfici esterne che colpiscono l'edificio, e di conseguenza penetrano all'interno dell'ambiente (zona termica). La modalità scelta è quella relativa a *completamente esterno*, in quanto vengono computate tutte le ombre sulla superficie esterna dell'edificio causate da elementi sporgenti, come anche le spallette di porte e finestre. A differenza delle altre due, viene calcolato l'ombreggiamento esterno e la radiazione solare viene computata come incidente solamente sul pavimento e non su tutte le superfici interne (richiede un calcolo più complesso).

Si possono controllare i dati generati dalla simulazione mediante l'impostazione di una serie di parametri, come in Figura 4.18.

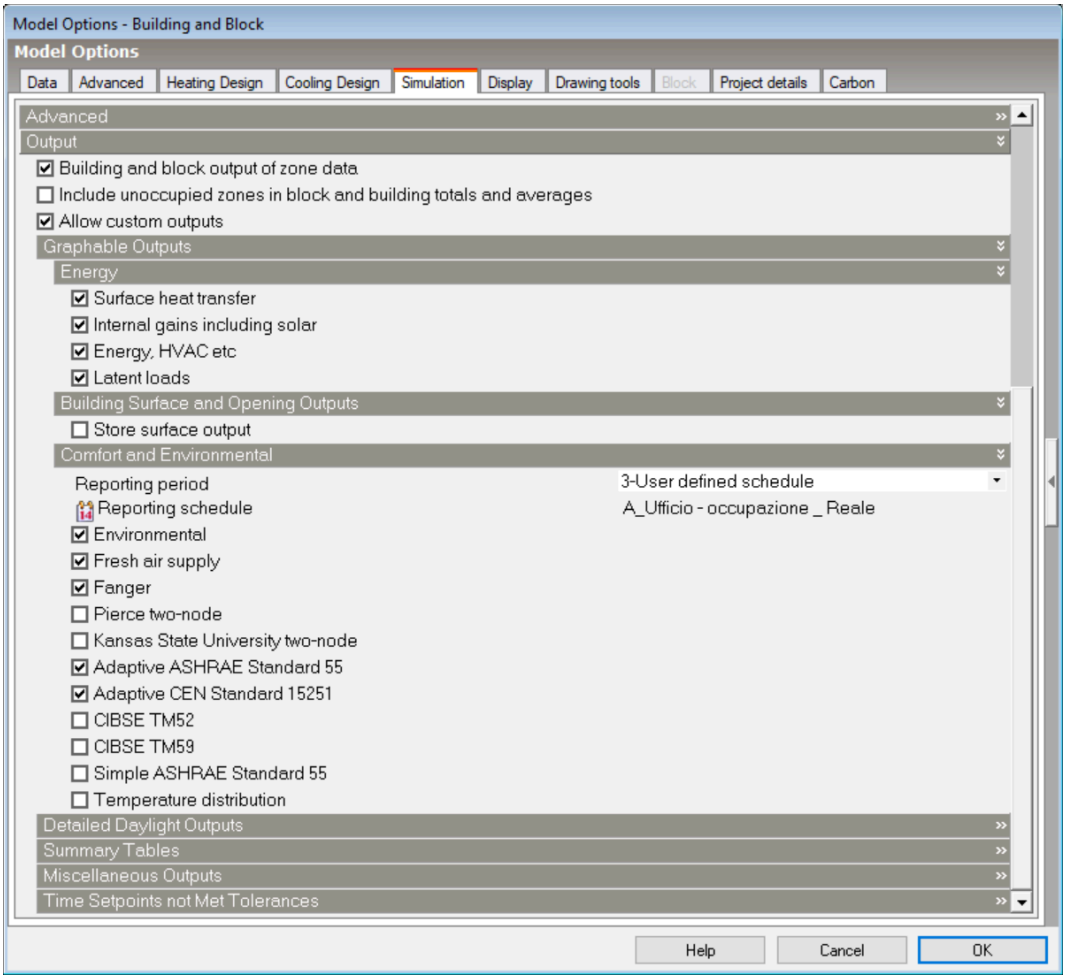


Figura 4.18. Opzioni modello – definizione delle opzioni per la simulazione – output (produzione dei risultati)

4.3. Dati costruttivi

Una volta conclusa la modellazione tridimensionale dell'edificio bisogna procedere con l'assegnazione delle strutture stratigrafiche corrette per ciascuna tipologia.

L'uso del Template ha permesso di organizzare in maniera chiara e semplice la modellazione delle varie strutture stratigrafiche. Nella Figura 4.19 sono illustrati tutti i dati utilizzati per definire il template.

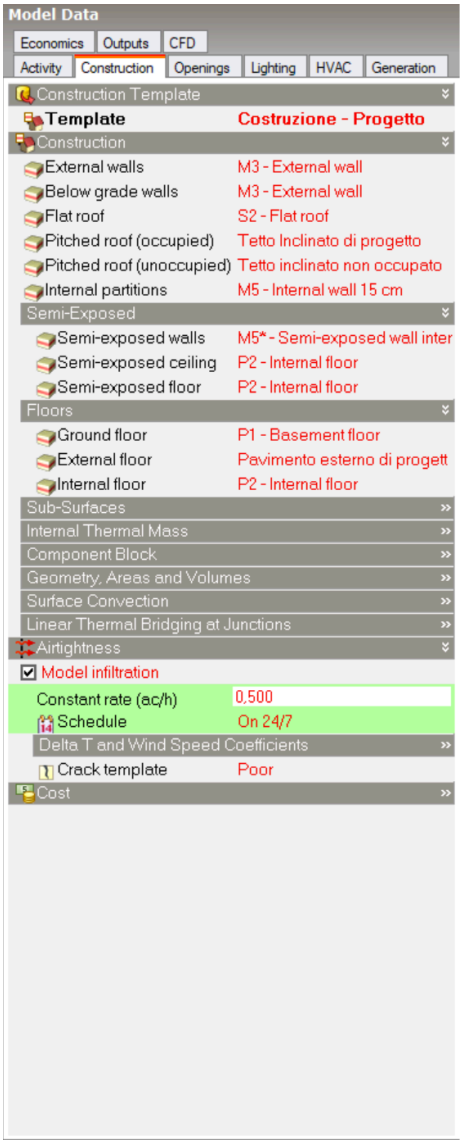


Figura 4.19. Dati Costruzione – Template del modello – Assegnazione delle stratigrafie per ciascun tipo di struttura presente nel modello

Design Builder utilizza una serie di diverse tipologie di strutture per definire correttamente un edificio durante il processo di modellazione, come nella figura di cui sopra. In linea generale, queste strutture vengono raggruppate nei diversi macrogruppi illustrati in figura.

Le pareti esterne e la copertura (piana o inclinata) definiscono l'involucro dell'edifico, separando l'ambiente interno da quello esterno. Le partizioni interne, invece, suddividono l'ambiente interno in altri più piccoli, e in questo caso vengono usate da Design Builder quando suddividono ambienti occupati.

La categoria degli elementi semi-esposti viene utilizzata quando si devono dividere spazi occupati (o riscaldati) da quelli non occupati (o non riscaldati). Vengono pertanto impiegati elementi quali pareti, copertura e solai: la necessità di attribuire questo tipo di strutture all'interno del modello dell'edificio viene determinata da Design Builder in maniera automatica, che analizza quale sia la zona relativamente "esterna" e utilizza queste informazioni per ordinare in maniera corretta gli strati della struttura.

I pavimenti (o, più genericamente, solai) sono controterra, esterni ed interni. Il pavimento controterra viene applicato quando la struttura del pavimento è adiacente al terreno, e la zona assume la corretta adiacenza. Quelli esterni sono adiacenti all'ambiente esterno, mentre i pavimenti interni, suddividono in modo orizzontale gli ambienti interni.

Nella Figura 4.20 viene illustrato lo schema della disposizione delle strutture.

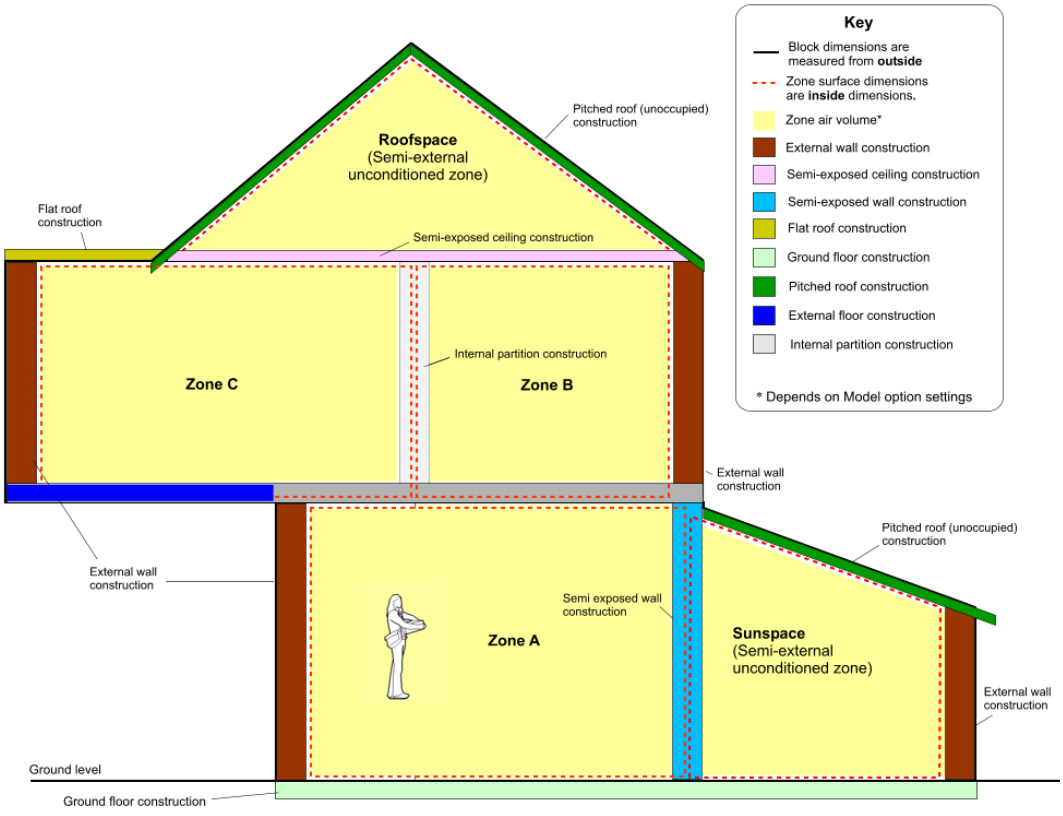


Figura 4.20. Dati Costruzione – Illustrazione schematica della combinazione delle strutture in Design Builder (Immagine tratta da [14])

Il volume della zona è calcolato per tutte le geometrie di default, e rappresenta il volume d'aria dello spazio interno, escludendo il volume del pavimento e del soffitto, ma includono la metà del volume delle partizioni verticali.

L'involucro opaco è costituito, dalle stratigrafie illustrate nelle tabelle di seguito, indicando con:

- *M* – murature;
- *P* – pavimenti;
- *S* – soffitti.

Tabella 4.1. Involucro opaco – M1: parete esterna del basamento (piani interrati)

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Intonaco	0,015	1400	0,700	840	11,1	0,021
2	Mattone forato	0,060	1200	0,430	840	7,4	0,140
3	Intercapedine	0,165	1,3	–	1000	1	0,180
4	Mattone forato	0,120	1000	0,360	840	7,4	0,333
5	Mattone forato	0,120	2000	0,900	840	7,4	0,133
6	Intonaco	0,020	1400	0,700	840	11,1	0,029
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,500	1,014	481	53,6	108,7	0,269	11,08

Tabella 4.2. Involucro opaco – M2: sotto-finestra della parete esterna del basamento (piani interrati)

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Intonaco	0,015	1400	0,700	840	11,1	0,021
2	Mattone forato	0,060	1200	0,430	840	7,4	0,140
3	Intercapedine	0,035	1,3	–	1000	1	0,077
4	Mattone forato	0,120	1000	0,360	840	11,1	0,333
5	Intonaco	0,020	1400	0,700	840	7,4	0,029
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,380	1,173	241	57,1	74,6	0,660	6,79

Tabella 4.3. Involucro opaco – M3: parete esterna

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Intonaco	0,015	1400	0,700	840	11,1	0,021
2	Mattone forato	0,060	1200	0,430	840	7,4	0,140
3	Intercapedine	0,125	1,3	–	1000	1	0,180
4	Mattone forato	0,120	1000	0,360	840	7,4	0,333
5	Mattone pieno	0,120	2000	0,900	840	7,4	0,133
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,440	1,044	453	54,6	118,8	0,329	10,41

Tabella 4.4. Involucro opaco – M4: sotto-finestra della parete esterna (M3)

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Intonaco	0,015	1400	0,700	840	11,1	0,021
2	Mattone forato	0,120	1200	0,430	840	7,4	0,279
3	Mattone pieno	0,120	2000	0,900	840	7,4	0,133
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,255	1,656	405	58,3	122,4	0,770	7,56

Tabella 4.5. Involucro opaco – M5: parete interna

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Intonaco	0,015	1400	0,700	840	11,1	0,021
2	Mattone forato	0,120	1000	0,360	840	7,4	0,333
3	Intonaco	0,150	1400	0,700	840	11,1	0,021
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,150	1,718	186	55,0	55,0	1,174	4,70

Tabella 4.6. Involucro opaco – M6: cassonetti

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Legno	0,020	450	0,120	2700	222,2	0,167
2	Intercapedine	0,230	1,3	–	1000	1	0,180
3	Intonaco	0,010	1400	0,700	840	11,1	0,014
4	Mattone forato	0,120	1000	0,360	840	7,4	0,333
5	Mattone pieno	0,120	2000	0,900	840	7,4	0,133
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,500	1,023	383	34,9	119,2	0,364	9,16

Tabella 4.7. Involucro opaco – P1: pavimento controterra

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Piastrelle	0,010	2300	1,000	840	213	0,010
2	Malta di cls	0,030	2000	1,160	880	69	0,026
3	Calcestruzzo	0,070	2000	1,160	880	69	0,060
4	Cls magro	0,150	2000	1,160	880	69	0,129
5	Ghiaia	0,300	1700	1,200	840	5	0,250
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,560	1,459	1033	59,2	113,8	0,120	14,89

Tabella 4.8. Involucro opaco – P2: pavimento interno (solaio interpiano)

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Piastrelle	0,010	2300	1,000	840	213	0,010
2	Malta di cls	0,070	2000	1,160	880	69	0,026
3	Calcestruzzo	0,040	1000	0,310	880	69	0,129
4	Pignatte	0,180	1600	0,590	840	7,4	0,305
5	Intonaco	0,015	1400	0,700	840	11,1	0,021
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,315	1,272	512	73,3	60,9	0,259	11,08

Tabella 4.9. Involucro opaco – S1: copertura piana sul parcheggio

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Intonaco	0,010	1400	0,700	840	11,1	0,014
2	Pignatte	0,180	1600	0,590	840	7,4	0,305
3	Calcestruzzo	0,040	1000	0,310	880	69	0,129
4	Bitume	0,003	1200	0,170	920	20491,8	0,018
5	Asfalto	0,030	2100	0,700	920	21322	0,043
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,263	1,386	411	55,2	86,8	0,445	8,84

Tabella 4.10. Involucro opaco – S2: copertura piana

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Intonaco	0,010	1400	0,700	840	11,1	0,014
2	Pignatte	0,180	1600	0,590	840	7,4	0,305
3	Calcestruzzo	0,040	1000	0,310	880	69	0,129
4	Calcestruzzo	0,070	2000	1,160	880	69	0,060
5	Bitume	0,003	1200	0,170	920	20491,8	0,018
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,303	1,495	488	71,2	107,8	0,478	9,61

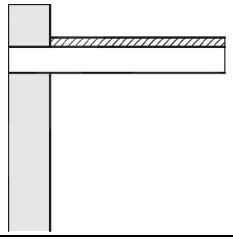
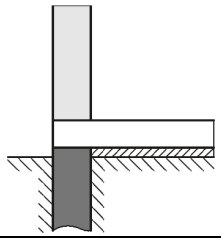
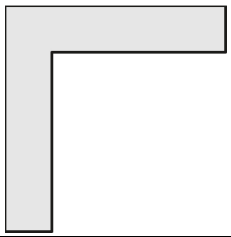
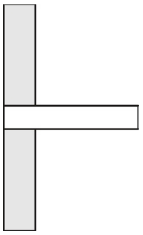
L'adiacenza delle zone termiche si definisce al livello del Blocco edificio. Da essa dipendono i fattori che determinano le condizioni dell'ambiente esterno, o di quello non riscaldato o vicino al terreno, che influenzano i risultati dell'analisi del comportamento energetico dell'edificio oggetto di studio. In Design Builder vi sono quattro modalità per definire l'adiacenza:

- *automatica* – l'adiacenza delle superfici viene determinata in maniera automatica da Design Builder, basandosi sulla rispettiva posizione;
- *non adiacente al terreno*;
- *adiacente al terreno*;
- *adiabatica*.

La modalità automatica è quella più adatta. Le altre opzioni possono essere utilizzate in condizioni particolari, e più facilmente controllabili in quanto caratterizzano una sola porzione del modello.

Infine, per quanto riguarda i ponti termici, si è utilizzato come materiale di base le informazioni contenute nell'"*Atlante dei ponti termici*"[31], ma anche e soprattutto quanto indicato nella norma tecnica UNI EN ISO 14683[32], nella Tabella C.2 dell'Appendice C. In funzione dei valori richiesti da Design Builder per la definizione dei ponti termici lineici si è costruita una tabella (Tabella 4.11) contenente i valori utilizzati.

Tabella 4.11 Ponti termici

Categoria	Immagine	ψ_i [W/mK]	ψ_e [W/mK]
R8 (parete – copertura)		0,70	0,45
GF4 (parete – terreno)		0,65	0,50
C4 (angolo tra pareti)		0,10	-0,15
IF4 (parete – pavimento interpiano)		0,80	0,70
W16 (serramento)		0,15	0,15

[31] Capozzoli ed al., 2011

[32] La norma specifica metodi semplificati per la determinazione dei flussi di calore attraverso i ponti termici lineari, che si manifestano alle giunzioni degli elementi dell'edificio. Inoltre nell'appendice vengono riportati alcuni valori di riferimento della trasmittanza termica lineica.

Aperture

Il termine "*apertura*" viene usato in Design Builder per descrivere ogni tipologia di apertura nell'involucro edilizio. Vengono modellate come eccezioni sulla superficie principale della costruzione. Vi sono dunque cinque tipologie di aperture, che riguardano le finestre esterne ed interne, così come i lucernari in coperture, le porte, anch'esse esterne ed interne, e le bocchette di ventilazione.

Il Template del modello, così come illustrato in Figura 4.21, definisce solamente le finestre esterne ed interne, ed i lucernari, utilizzando parametri quali la tipologia del vetro (in questo caso il doppio-vetro), la tipologia del telaio (in legno) ed eventualmente la percentuale di area vetrata apribile.

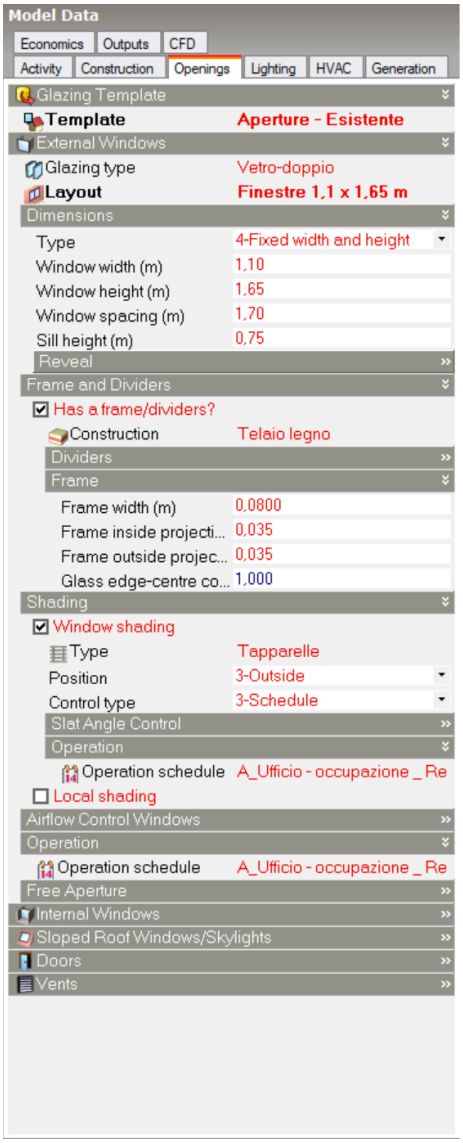


Figura 4.21. Dati Aperture – Template del modello – Definizione delle caratteristiche geometriche delle aperture, dei sistemi di schermatura e del loro programma di utilizzo

Si definiscono, inoltre, i sistemi di ombreggiamento. Nel presente caso, il sistema di schermatura utilizzato maggiormente è rappresentato dall'uso delle tapparelle avvolgibili.

Altri parametri, come il Layout delle finestre, vengono impostati per mezzo di un template separato, all'interno del quale vengono stabilite le dimensioni del serramento in funzione della tipologia di definizione di tali parametri assegnata, l'interasse di disposizione dei serramenti, nonché l'altezza del serramento dal livello del pavimento (davanzale). Viene inoltre definita la profondità della finestra, ovvero la distanza dal filo esterno della superficie muraria (attraverso la definizione delle spallette). Quest'ultimo parametro è piuttosto rilevante in quanto incide, anche se in maniera minore rispetto agli altri fattori, sull'ombreggiamento dell'ambiente interno.

Esistono principalmente due metodologie per disegnare i serramenti, o le altre aperture su di un modello tridimensionale:

- automatico;
- manuale.

Se il modello tridimensionale dell'edificio richiede una modellazione dettagliata, che rispecchi la realtà, è necessario ricorrere alla definizione manuale dei serramenti. Ciò si rende possibile lavorando al livello della Superficie per ciascun Blocco. Si possono pertanto definire, mediante disegno, le dimensioni del serramento, l'altezza dal pavimento, la sequenzialità (nel presente caso le finestre sono accoppiate, rispettando interassi della coppia di serramenti ed interassi fra le varie coppie). Si possono inoltre aggiungere altri dettagli, come il cassonetto o una diversa stratigrafia muraria al di sotto del serramento stesso. Questo processo richiede una certa quantità di tempo per poterlo svolgere, tuttavia eventuali layout preimpostati non possono avere alcuna influenza su quanto modellato manualmente.

Entrando nel merito delle caratteristiche intrinseche del serramento, questo è costituito da un telaio in legno, presumibilmente abete, ed una superficie vetrata a doppio vetro, costituito a sua volta da due lastre di vetro dello spessore pari a 3 millimetri ed un'intercapedine dello spessore pari a 6 millimetri contenente aria. Le dimensioni del telaio sono state ipotizzate sulla base fotografica (Figura 4.23), mentre la profondità della finestra rispetto al filo esterno è stata dedotta posizionando il serramento sul filo interno della parete esterna e sottraendo lo spessore del serramento stesso dallo spessore della parete. Le principali caratteristiche e componenti di un serramento utilizzate da Design Builder sono illustrate nella Figura 4.22.

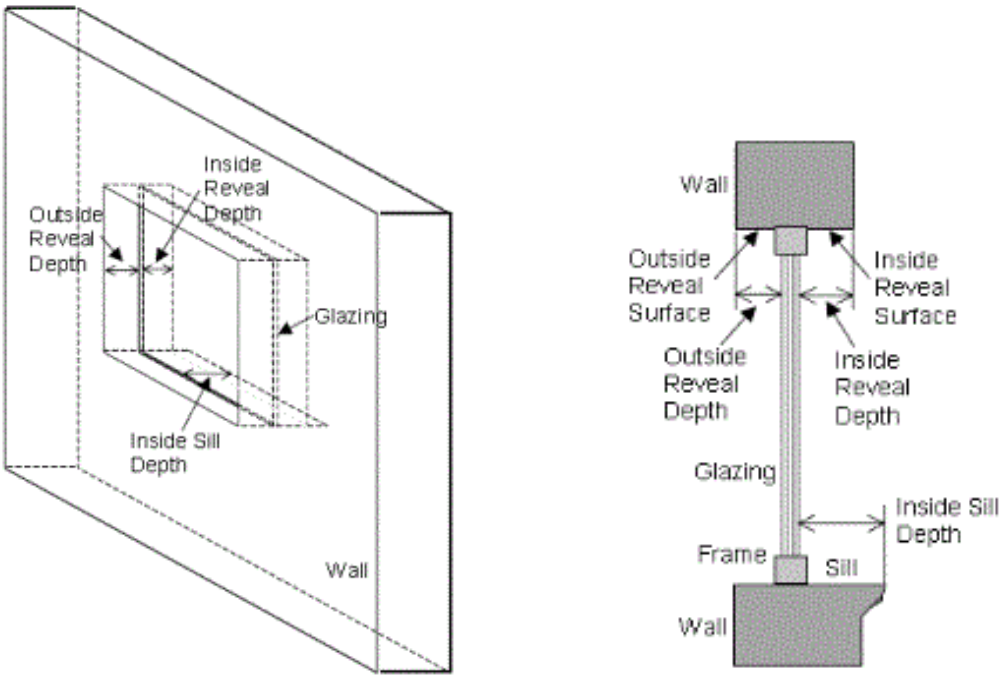


Figura 4.22. Dati Aperture – Illustrazione schematica delle componenti delle aperture

Figura 4.23. Foto di un serramento esistente, caratteristico dei piani fuori terra, con telaio in legno e doppio-vetro

Le operazioni di schermatura/ombreggiamento dei serramenti esterni sono legate alla:

- schermatura della finestra, utilizzando persiane o tapparelle, tende o veneziane, e così via;
- schermatura locale, utilizzando brise-soleil fissi o mobili, oppure elementi sporgenti sulla parete esterna.

Premesso che nel caso studio non vi sono sistemi di schermatura fissa o mobile posta all'esterno della parete in corrispondenza del serramento, si è lavorato dunque sullo ombreggiamento della singola finestra. Le tapparelle avvolgibili sono di tipo a lamella, posizionate all'esterno del serramento. La Figura 4.24 illustra il template utilizzato per la modellazione del sistema di schermatura esterno, dove vengono modellate oltre alle proprietà geometriche delle tapparelle.

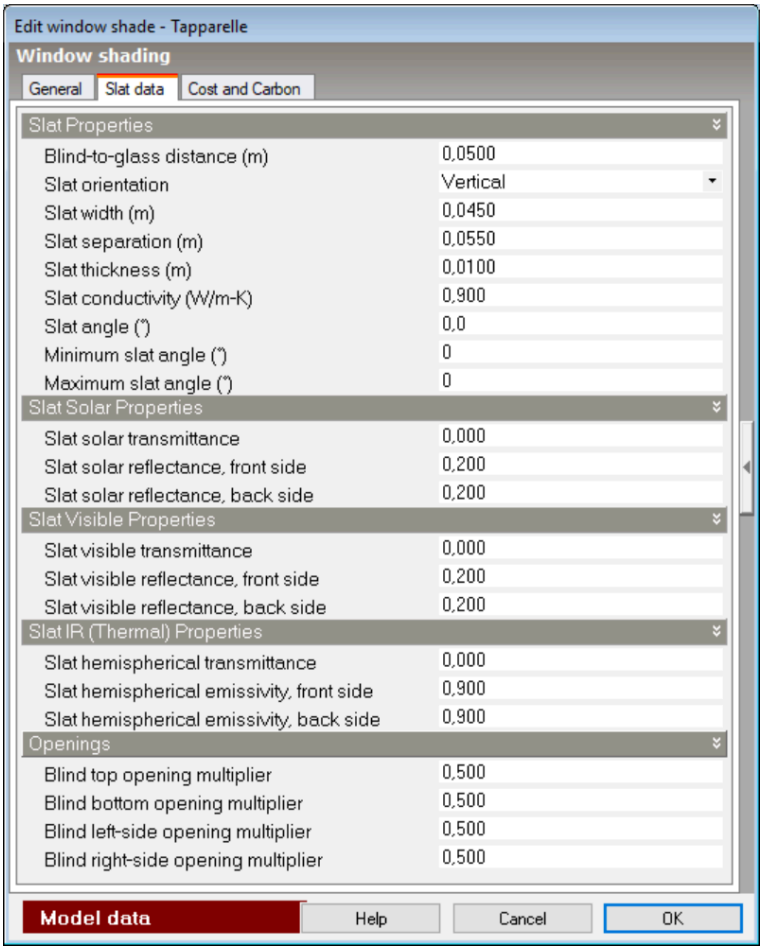


Figura 4.24. Dati Aperture – Modellazione del sistema di schermatura interno (veneziana)

Utilizzando il Manuale utente, grazie alla Figura 4.25 si possono osservare i parametri, così definiti, indicati in maniera schematica.

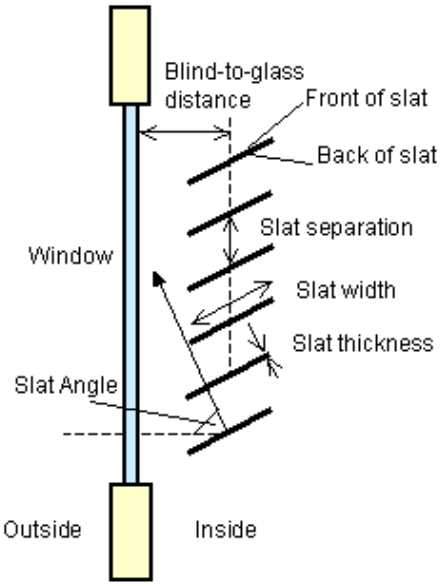


Figura 4.25. Dati Aperture – Illustrazione schematica degli elementi che compongono il sistema di schermatura (a lamelle) (Immagine tratta da [14])

Il programma applicato verrà spiegato in dettaglio nel capitolo successivo, tuttavia è necessario fare alcune considerazioni. Il programma, per poter mettere in funzione la ventilazione naturale durante l'esecuzione della simulazione, deve utilizzare valori compresi fra 0 ed 1, che indicano rispettivamente la chiusura e l'apertura della finestra; valori intermedi non indicano una parziale apertura.

Le finestre sono "aperte" quando:

- $T_{aria,zona} > T_{setpoint}$;
- $T_{aria,zona} > T_{aria\ esterna}$.

Per quanto riguarda le restanti tipologie di aperture, si specifica che non vi sono lucernari o finestre interne, né tantomeno bocchette di ventilazione. Le porte, interne ed esterne, sono state disegnate manualmente, usando lo stesso procedimento delle finestre esterne. Le porte eventualmente vetrate, presenti all'ingresso dell'edificio mentre all'interno suddivide il vano scala dal corridoio, sono state modellate come finestre.

4.4. Dati relativi all'utenza

Come anticipato nei capitoli precedenti, i dati acquisti dal questionario sono stati elaborati mediante l'uso del foglio di calcolo utilizzando il software Microsoft Excel.

Le risposte al questionario sono state convertite in dati, distribuendoli in righe e colonne, al fine di poterli analizzare ed elaborarli ottenendo uno schema comportamentale degli utenti. Nelle righe sono stati predisposti i dati in relazione al piano dell'edificio, mentre nelle colonne sono state distribuite le domande in sequenza, dividendole nei gruppi di competenza. Le corrispettive celle contengono le risposte sotto forma di numeri e parole, così come sono state definite le risposte all'interno del modello del questionario.

In seguito i dati sono stati scomposti in diversi fogli, nelle diverse categorie da analizzare che mirano a fornire le indicazioni circa il comportamento degli occupanti per poter definire le zone termiche ed i programmi operativi da utilizzare in Design Builder.

Profili di utilizzo

I profili di utilizzo, detti anche programmi operativi, sono definiti in funzione di quanto sopra e suddivisi nelle seguenti categorie:

- *occupazione* – periodo della giornata lavorativa in cui l'edificio viene utilizzato dagli occupanti;
- *dispositivi da ufficio* (di seguito "*apparecchi*") – utilizzo di computer e di altri dispostivi da ufficio, quali stampanti e fotocopiatrici;
- *illuminazione* – periodi della giornata in cui gli occupanti utilizzano l'illuminazione artificiale;
- *sistemi di schermatura* – uso e regolazione dei sistemi di schermatura esterna per evitare un eccessivo irraggiamento solare (e abbagliamento) dell'ambiente interno;
- *apertura delle finestre* e *ventilazione naturale* – regolazione dell'apertura delle finestre, e il conseguente ricambio d'aria.

I profili di utilizzo sono costituiti, in linea generale, da una tabella che riassume i dati acquisiti dai questionari e li organizza in funzione dei seguenti parametri:

- piano;
- orientamento:
    - Nord
    - Sud
- stagione:
    - invernale
    - intermedia (primavera/autunno)
    - estiva.

Successivamente, un grafico illustrerà il profilo medio che caratterizza il comportamento dell'utente per ciascuna categoria. Naturalmente, in Design Builder i profili vengono creati

utilizzando il Programma operativo di tipo Compatto (ad eccezione dell'occupazione, dove viene utilizzata invece la modalità Profili) per ciascuna zona termica, in funzione delle proprie caratteristiche. Questi dati sono tuttavia semplici da gestire, grazie all'uso dei Template.

Profili di occupazione

Sulla base dei dati ricavati dai questionari sono stati creati i profili di occupazione ed il fattore di occupazione orario medio giornaliero, per i giorni lavorativi. Per semplicità, nella Tabella 4.12 e nella Figura 4.26 si riporta la media dei fattori di occupazione orari calcolati per ciascuna zona termica della categoria ad uso uffici. Nella modellazione, tuttavia, a ciascuna zona termica è stato attribuito l'opportuno profilo di occupazione.

Tabella 4.12. Fattore di occupazione orario

	Ora del giorno									
	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
Lun	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,79	0,79	0,00
Mar	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,63	0,48	0,48	0,00
Mer	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,75	0,75	0,00
Gio	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,65	0,41	0,41	0,00
Ven	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,56	0,23	0,23	0,00
Sab	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dom	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 4.26. Fattore di occupazione orario medio giornaliero – Giorni feriali

Apertura delle finestre

La Tabella 4.13 mostra, secondo i parametri indicati precedentemente, la durata (in numero di ore) ed il periodo prevalente di apertura delle finestre in riferimento alle tre stagioni di riferimento (invernale, intermedia ed estiva).

Tabella 4.13. Durata e periodo prevalente di apertura delle finestre

Piano	Orient.	Stagione invernale		Stagione intermedia		Stagione estiva	
		Ore	Periodo[1]	Ore	Periodo[1]	Ore	Periodo[1]
0	N	0,50	M	0,50	M	4,00	Ind
	S	0,50	M	2,00	Ind	6,00	Ind
1	N	0,50	M	1,00	M	5,50	Ind
	S	0,50	M	1,00	Mg	6,00	Ind
2	N	0,50	M	1,00	M	6,00	Ind
	S	0,50	M	1,50	M	6,00	Ind
3	N	0,50	M	4,00	P	5,00	P
	S	1,00	M	4,00	Mg	6,00	Ind
4	N	0,50	M	1,50	Mg	5,00	Ind
	S	0,50	M	1,50	M	5,50	Ind
5	N	0,50	M	2,00	Ind	6,00	Ind
	S	1,00	M	3,00	Ind	6,00	Ind
6	N	0,50	Ind	2,50	Ind	6,00	Ind
	S	0,50	Mg	2,50	Ind	2,00	M

[1] Sono stati individuati quattro periodi prevalenti:
M: mattino
Mg: orario pranzo
P: pomeriggio
Ind: nessun periodo prevalente

Per l'apertura delle finestre si è considerato un funzionamento di tipo "on/off": i valori riportati nel grafico (Figura 4.27) e nella tabella (Tabella 4.14) sono pari a 0 e 1, che corrispondono rispettivamente alla chiusura e all'apertura delle finestre. Questa scelta è motivata dal fatto che in Design Builder non è possibile assumere valori compresi nell'intervallo tra 0 e 1.

Per semplicità, il profilo rappresentato nella figura riportata di seguito, con tabella dei valori di riferimento annessa, rappresenta il comportamento medio dell'utente riguardo all'apertura delle finestre nelle tre diverse stagioni di riferimento. Nella modellazione, tuttavia, a ciascuna zona termica è stato attribuito l'opportuno profilo di apertura delle finestre, basato sull'orientamento e sulla posizione all'interno dell'edificio.

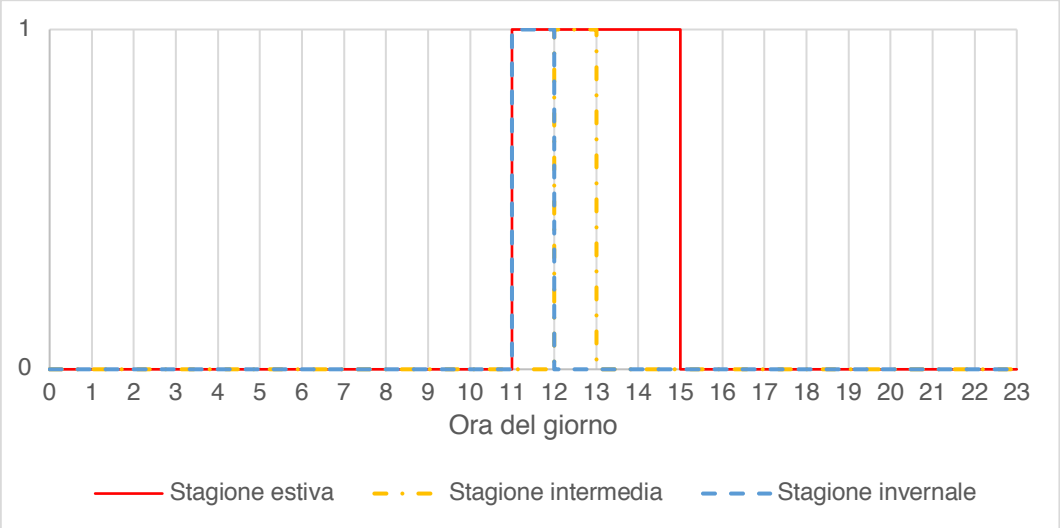


Figura 4.27. Profilo orario medio di apertura delle finestre (zona tipo) per stagione

Tabella 4.14. Profilo orario medio di apertura delle finestre (zona tipo) per stagione

Stagione di riferimento	08:00–08:30	08:30–09:00	09:00–09:30	09:30–10:00	10:00–10:30	10:30–11:00	11:00–11:30	11:30–12:00	12:00–12:30	12:30–13:00	13:00–13:30	13:30–14:00	14:00–14:30	14:30–15:00	15:00–15:30	15:30–16:00	16:00–16:30	16:30–17:00	17:00–17:30	17:30–18:00
Invernale	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intermedia	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estiva	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Gestione delle chiusure oscuranti

Sulla base dei risultati dei questionari sottoposti agli utenti è stato valutato per quanto tempo le tapparelle avvolgibili vengono tenute abbassate (almeno la metà dell'altezza della finestra) nell'arco della giornata, e il periodo della giornata prevalente in cui vengono utilizzate. La Tabella 4.15 mostra, secondo i parametri indicati precedentemente, la durata (in numero di ore) ed il periodo prevalente di gestione delle chiusure oscuranti (tapparelle avvolgibili) in riferimento alle tre stagioni di riferimento (invernale, intermedia ed estiva).

Tabella 4.15. Durata e periodo prevalente di gestione delle chiusure oscuranti

Piano	Orient.	Stagione invernale		Stagione intermedia		Stagione estiva	
		Ore	Periodo[1]	Ore	Periodo[1]	Ore	Periodo[1]
0	N	0,50	P	0,50	P	0,50	P
	S	0,50	Ind	1,00	Mg	2,00	P
1	N	0,50	Ind	0,50	Ind	1,50	Ind
	S	0,50	Ind	1,00	Mg	3,00	Ind
2	N	0,50	Ind	0,50	Ind	0,50	Ind
	S	0,50	Ind	0,50	Ind	3,00	Ind
3	N	0,50	Mg	0,50	Ind	0,50	Ind
	S	1,00	M	3,00	P	6,00	Ind
4	N	0,50	M	0,50	M	0,50	M
	S	0,50	M	1,50	Mg	4,00	P
5	N	0,50	M	0,50	Ind	0,50	Ind
	S	0,50	M	1,50	Ind	3,00	Ind
6	N	0,50	Ind	0,50	Ind	0,50	Ind
	S	0,50	P	1,00	Mg	4,00	P

[1] Sono stati individuati quattro periodi prevalenti:
M: mattino
Mg: orario pranzo
P: pomeriggio
Ind: nessun periodo prevalente

Per la gestione delle chiusure oscuranti si è considerato un funzionamento di tipo “on/off”, così come richiesto dal software Design Builder: i valori riportati nel grafico (Figura 4.28) e nella tabella (Tabella 4.16) sono pari a 0 e 1, che corrispondono rispettivamente al non utilizzo e all’utilizzo delle chiusure oscuranti.

Per semplicità, il profilo rappresentato nella figura riportata di seguito, con tabella dei valori di riferimento annessa, rappresenta il comportamento medio dell’utente riguardo alla gestione delle chiusure oscuranti nelle tre diverse stagioni di riferimento. Nella modellazione, tuttavia, a ciascuna zona termica è stato attribuito l’opportuno profilo di gestione, basato sull’orientamento e sulla posizione all’interno dell’edificio.

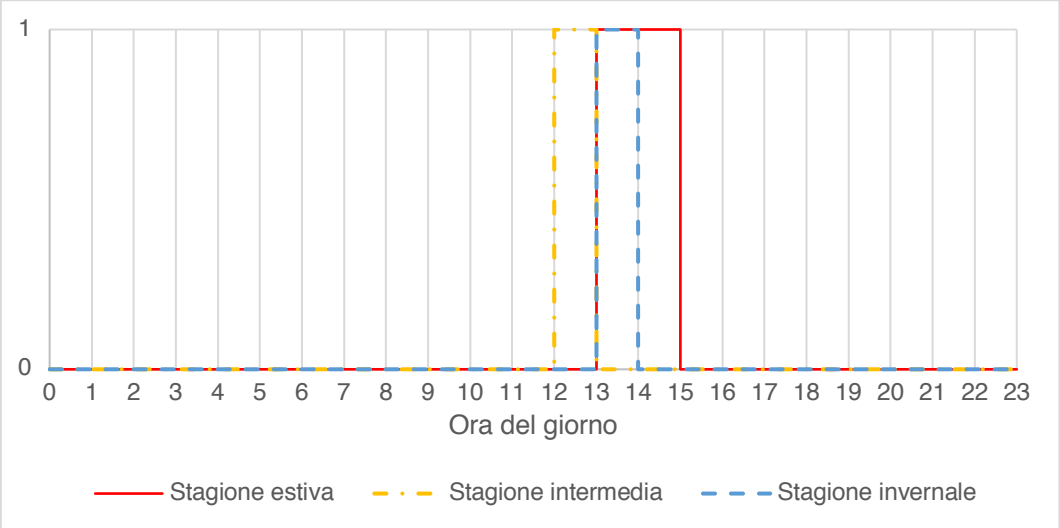


Figura 4.28. Profilo orario medio di gestione delle chiusure oscuranti (zona tipo) per stagione

Tabella 4.16. Profilo orario medio di gestione delle chiusure oscuranti (zona tipo) per stagione

Stagione di riferimento	08:00–08:30	08:30–09:00	09:00–09:30	09:30–10:00	10:00–10:30	10:30–11:00	11:00–11:30	11:30–12:00	12:00–12:30	12:30–13:00	13:00–13:30	13:30–14:00	14:00–14:30	14:30–15:00	15:00–15:30	15:30–16:00	16:00–16:30	16:30–17:00	17:00–17:30	17:30–18:00
Invernale	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Intermedia	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estiva	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Illuminazione artificiale

Sulla base dei risultati dei questionari sottoposti agli utenti è stato valutato per quanto tempo viene utilizzata l'illuminazione artificiale nell'arco della giornata, e il periodo della giornata prevalente in cui viene utilizzate. La Tabella 4.17 mostra, secondo i parametri indicati precedentemente, la durata (in numero di ore) ed il periodo prevalente di utilizzo dell'illuminazione artificiale in riferimento alle tre stagioni di riferimento (invernale, intermedia ed estiva).

Tabella 4.17. Durata e periodo prevalente di utilizzo dell'illuminazione artificiale

Piano	Orient.	Stagione invernale		Stagione intermedia		Stagione estiva	
		Ore	Periodo[1]	Ore	Periodo[1]	Ore	Periodo[1]
0	N	8,00	Ind	6,00	Ind	6,00	Ind
	S	8,00	Ind	8,00	Ind	4,00	M
1	N	8,00	Ind	4,00	M	1,00	Ind
	S	8,00	M	4,00	M	1,50	M
2	N	4,00	M	4,00	M	0,50	Ind
	S	8,00	Ind	3,00	Ind	1,00	Ind
3	N	6,00	P	6,00	P	2,50	Ind
	S	8,00	P	2,00	Ind	0,50	Ind
4	N	7,00	M	4,00	M	1,50	M
	S	7,00	Ind	3,00	M	1,00	Ind
5	N	8,00	Ind	4,00	M	0,50	Ind
	S	6,00	Ind	1,50	M	0,50	Ind
6	N	2,50	M	2,50	M	0,50	Ind
	S	8,00	Ind	4,00	Ind	0,50	Ind

[1] Sono stati individuati quattro periodi prevalenti:
M: mattino
Mg: orario pranzo
P: pomeriggio
Ind: nessun periodo prevalente

A differenza di quanto accade per le chiusure oscuranti, per quanto riguarda l'illuminazione artificiale Design Builder prevede un profilo di funzionamento con fattori di utilizzo compresi tra 0 e 1, accettando quindi valori intermedi. Questo tipo di profilo permette di frazionare su base oraria la potenza elettrica installata.

Per semplicità, il profilo rappresentato nella figura riportata di seguito (Figura 4.29), con tabella dei valori di riferimento annessa (Tabella 4.18), rappresenta il comportamento medio dell'utente riguardo all'utilizzo dell'illuminazione artificiale nelle tre diverse stagioni di

riferimento. Nella modellazione, tuttavia, a ciascuna zona termica è stato attribuito l'opportuno profilo di utilizzo, basato sull'orientamento e sulla posizione all'interno dell'edificio.

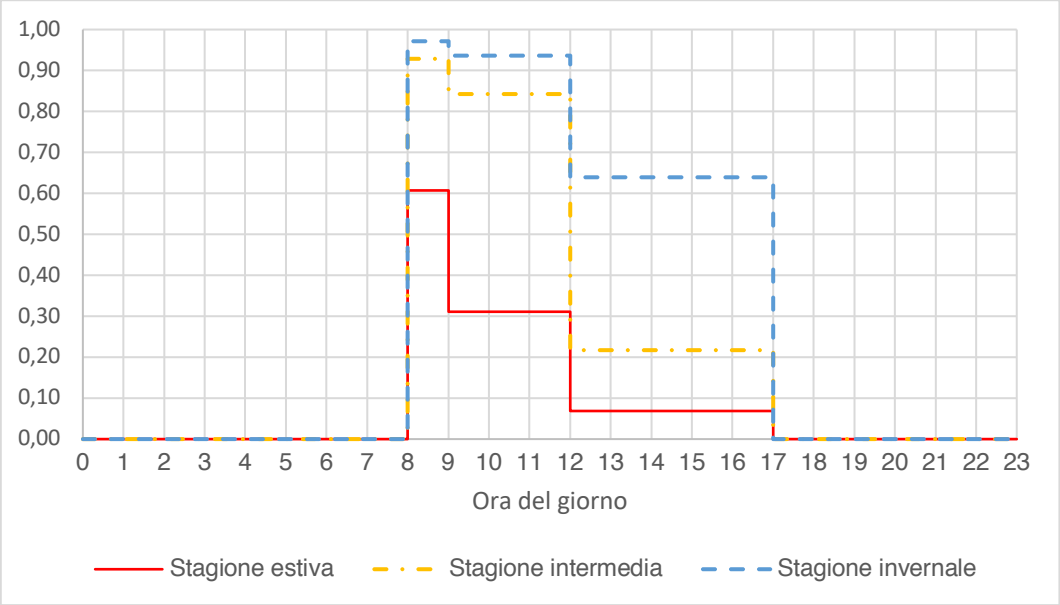


Figura 4.29. Profilo orario medio di utilizzo dell'illuminazione artificiale (zona tipo) per stagione (frazione della potenza elettrica installata utilizzata ora per ora)

Tabella 4.18. Profilo orario medio di utilizzo dell'illuminazione artificiale (zona tipo) per stagione (frazione della potenza elettrica installata utilizzata ora per ora)

Stagione di riferimento	08:00–09:00	09:00–10:00	10:00–11:00	11:00–12:00	12:00–13:00	13:00–14:00	14:00–15:00	15:00–16:00	16:00–17:00	17:00–18:00
Invernale	0,97	0,94	0,94	0,94	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
Intermedia	0,93	0,84	0,84	0,84	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Estiva	0,61	0,31	0,31	0,31	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07

4.5. Zonizzazione termica

Dall'analisi dei dati si osserva un diverso utilizzo degli ambienti in funzione principalmente della loro esposizione, ma anche da un piano all'altro. Al fine di poter rappresentare al meglio il reale utilizzo dell'edificio, si è ritenuto necessario assegnare una zona termica a ciascun ufficio, e più in generale alle rimanenti destinazioni d'uso. Grazie anche ai dati acquisiti in sito mediante rilievo è stato possibile modellare ciascuna zona in base a:

- orientamento
- destinazione d'uso
- numero di occupanti e densità di occupazione;
- apporti termici interni dovuti ai dispositivi da ufficio;
- capacità termica degli arredi;
- sistemi di illuminazione artificiale;
- tasso di ventilazione naturale in ricambi orari.

Le zone termiche prendono la nomenclatura degli ambienti che rappresentano. Per esempio, nel caso degli uffici vengono rappresentate mediante il codice di riferimento che si compone del numero del piano e del numero consecutivo sul piano stesso, mentre nel caso di bagni, corridoi, vano scala e così via, le zone vengono rappresentate dalla destinazione d'uso.

Tabella 4.19. Proprietà delle zone termiche

Zona termica	Piano	Esposizione	Destinazione d' uso	Caratteristiche geometriche		Terminali di emissione
				A_n [m²]	V_n [m³]	
0.01	Terra	S	Ufficio	13,09	31,95	Radiatori
0.02	Terra	S	Ufficio	19,51	62,53	Radiatori
0.03	Terra	S	Ingresso	108,14	346,59	Ventilconvettori
0.04	Terra	S	Ufficio	48,37	155,01	Ventilconvettori
0.05	Terra	E	Ufficio	13,81	44,26	Ventilconvettori
0.06	Terra	N	Ufficio	14,12	45,24	Ventilconvettori
0.07	Terra	N	Ufficio	17,14	54,93	Ventilconvettori
0.08	Terra	N	Ufficio	23,08	73,99	Radiatori
0.09	Terra	O	Ufficio	8,37	26,82	Radiatori
1.01	Primo	S	Ufficio	16,58	49,75	Ventilconvettori
1.02	Primo	S	Ufficio	15,84	47,53	Ventilconvettori
1.03	Primo	S	Ufficio	18,06	54,19	Ventilconvettori
1.04	Primo	S	Ufficio	16,90	50,70	Ventilconvettori

segue

continua

1.05	Primo	S	Ufficio	17,20	51,59	Ventilconvettori
1.06	Primo	S	Ufficio	17,11	51,33	Ventilconvettori
1.07	Primo	S	Ufficio	17,74	53,23	Ventilconvettori
1.08	Primo	S	Ufficio	16,58	49,75	Ventilconvettori
1.09	Primo	S	Ufficio	16,37	49,12	Ventilconvettori
1.10	Primo	N	Ufficio	16,18	48,63	Ventilconvettori
1.11	Primo	N	Ufficio	15,87	47,60	Ventilconvettori
1.12	Primo	N	Ufficio	17,39	52,17	Ventilconvettori
1.13	Primo	N	Ufficio	15,91	47,72	Radiatori
1.14	Primo	N	Ufficio	15,13	45,40	Ventilconvettori
2.01	Primo	S	Ufficio	16,58	49,75	Ventilconvettori
2.02	Primo	S	Ufficio	15,84	47,53	Ventilconvettori
2.03	Primo	S	Ufficio	18,06	54,19	Ventilconvettori
2.04	Primo	S	Ufficio	16,90	50,70	Ventilconvettori
2.05	Primo	S	Ufficio	17,20	51,59	Ventilconvettori
2.06	Primo	S	Ufficio	17,11	51,33	Ventilconvettori
2.07	Primo	S	Ufficio	17,74	53,23	Ventilconvettori
2.08	Primo	S	Ufficio	16,58	49,75	Ventilconvettori
2.09	Primo	S	Ufficio	16,37	49,12	Ventilconvettori
2.10	Primo	N	Ufficio	16,18	48,63	Ventilconvettori
2.11	Primo	N	Ufficio	15,87	47,60	Ventilconvettori
2.12	Primo	N	Ufficio	17,39	52,17	Ventilconvettori
2.13	Primo	N	Ufficio	15,91	47,72	Ventilconvettori
2.14	Primo	N	Ufficio	15,13	45,40	Ventilconvettori
3.01	Primo	S	Ufficio	16,74	50,22	Ventilconvettori
3.02	Primo	S	Ufficio	17,96	53,87	Ventilconvettori
3.03	Primo	S	Ufficio	17,01	51,02	Ventilconvettori
3.04	Primo	S	Ufficio	18,36	55,07	Ventilconvettori
3.05	Primo	S	Ufficio	15,99	47,97	Ventilconvettori
3.06	Primo	S	Ufficio	17,17	51,52	Ventilconvettori
3.07	Primo	S	Ufficio	17,96	53,87	Ventilconvettori
3.08	Primo	S	Ufficio	84,90	254,70	Ventilconvettori
3.09	Primo	N	Ufficio	17,65	52,94	Ventilconvettori
3.10	Primo	N	Ufficio	15,70	47,09	Ventilconvettori
3.11	Primo	N	Ufficio	16,95	50,22	Ventilconvettori
4.01	Primo	S	Ufficio	16,58	49,75	Ventilconvettori
4.02	Primo	S	Ufficio	15,84	47,53	Ventilconvettori
4.03	Primo	S	Ufficio	18,06	54,19	Ventilconvettori

segue

continua

4.04	Primo	S	Ufficio	16,90	50,70	Ventilconvettori
4.05	Primo	S	Ufficio	17,20	51,59	Ventilconvettori
4.06	Primo	S	Ufficio	17,11	51,33	Ventilconvettori
4.07	Primo	S	Ufficio	17,74	53,23	Ventilconvettori
4.08	Primo	S	Ufficio	16,58	49,75	Ventilconvettori
4.09	Primo	S	Ufficio	16,37	49,12	Ventilconvettori
4.10	Primo	N	Ufficio	16,18	48,63	Ventilconvettori
4.11	Primo	N	Ufficio	15,87	47,60	Ventilconvettori
4.12	Primo	N	Ufficio	17,39	52,17	Ventilconvettori
4.13	Primo	N	Ufficio	15,91	47,72	Ventilconvettori
4.14	Primo	N	Ufficio	15,13	45,40	Ventilconvettori
5.01	Primo	S	Ufficio	16,58	49,75	Ventilconvettori
5.02	Primo	S	Ufficio	15,84	47,53	Ventilconvettori
5.03	Primo	S	Ufficio	18,06	54,19	Ventilconvettori
5.04	Primo	S	Ufficio	16,90	50,70	Ventilconvettori
5.05	Primo	S	Ufficio	17,20	51,59	Ventilconvettori
5.06	Primo	S	Ufficio	17,11	51,33	Ventilconvettori
5.07	Primo	S	Ufficio	17,74	53,23	Ventilconvettori
5.08	Primo	S	Ufficio	16,58	49,75	Ventilconvettori
5.09	Primo	S	Ufficio	16,37	49,12	Ventilconvettori
5.10	Primo	N	Ufficio	16,18	48,63	Ventilconvettori
5.11	Primo	N	Ufficio	15,87	47,60	Ventilconvettori
5.12	Primo	N	Ufficio	17,39	52,17	Ventilconvettori
5.13	Primo	N	Ufficio	15,91	47,72	Ventilconvettori
5.14	Primo	N	Ufficio	15,13	45,40	Ventilconvettori
6.01	Primo	S	Ufficio	39,30	123,09	Ventilconvettori
6.02	Primo	S	Ufficio	13,37	40,49	Ventilconvettori
6.03	Primo	S	Ufficio	12,82	38,48	Ventilconvettori
6.04	Primo	S	Ufficio	14,94	44,86	Ventilconvettori
6.05	Primo	N	Ufficio	19,58	58.78	Ventilconvettori
6.06	Primo	N	Ufficio	11,20	33.68	Ventilconvettori
6.07	Primo	N	Ufficio	11,66	37,47	Ventilconvettori
Bagni	Tutti	N	Bagno	244,95	764,86	Radiatori
Corridoi	Tutti	–	Corridoio	528,89	1570,9	Ventilconvettori
Archivi	Interrati	N/S	Archivio	1442,5	4610,5	Ventilconvettori
Vano scala	Tutti	N	Vano scala	216,93	671,25	Ventilconvettori

4.6. Attività

In questa fase della modellazione si ha la possibilità di definire in maniera dettagliata l'attività svolta dagli occupanti all'interno dell'ambiente lavorativo, nonché tutte le condizioni al contorno che caratterizzano l'ambiente stesso. In questa sezione sono stati modellati ed utilizzati più di un template, dove ciascuno di essi rappresenta un'attività differente in funzione delle caratteristiche delle singole zone termiche, raggruppati generalmente in:

- uffici (una zona termica per ciascun ufficio, come da Tabella 4.19);
- archivio
- corridoio;
- vano scala;
- bagno.

Nella Figura 4.30 vengono illustrati tutti i parametri che definiscono le attività svolte in un ambiente, raggruppate nelle seguenti categorie:

- *tipo di zona* (valido solo ai livelli Blocco e Zona);
- *occupazione*;
- *tasso metabolico*;
- *vacanze*;
- *controllo ambientale*;
- *apporti dovuti ai computer*;
- *apporti dovuti ai dispositivi da ufficio*.

Nelle pagine seguenti, ciascuno dei parametri elencati verrà analizzato individualmente, fornendo le descrizioni e le definizioni intrinseche in modo dettagliato, seguito successivamente da informazioni che permettono la modellazione dei dati all'interno di Design Builder. Mentre per ciascun ufficio è stato modellato un template apposito, per tutte le altre zone termiche sono stati modellati template generici. Al fine di migliorare le tempistiche di calcolo durante il processo della simulazione, tutte le zone termiche differenti da quelle degli uffici sono state collegate in modo da risultare come una singola zona termica, per ciascuna categoria (archivi, corridoi, bagni, vano scala). Le informazioni relative ai parametri di input si presenteranno sotto forma di tabelle, rielaborando i prospetti e le tabelle presenti nelle norme tecniche.

In questa fase viene preso come riferimento la modellazione dell'ufficio numero 1 posto al piano terreno, con il codice 0.01. Il procedimento è valido anche per tutti gli altri template.

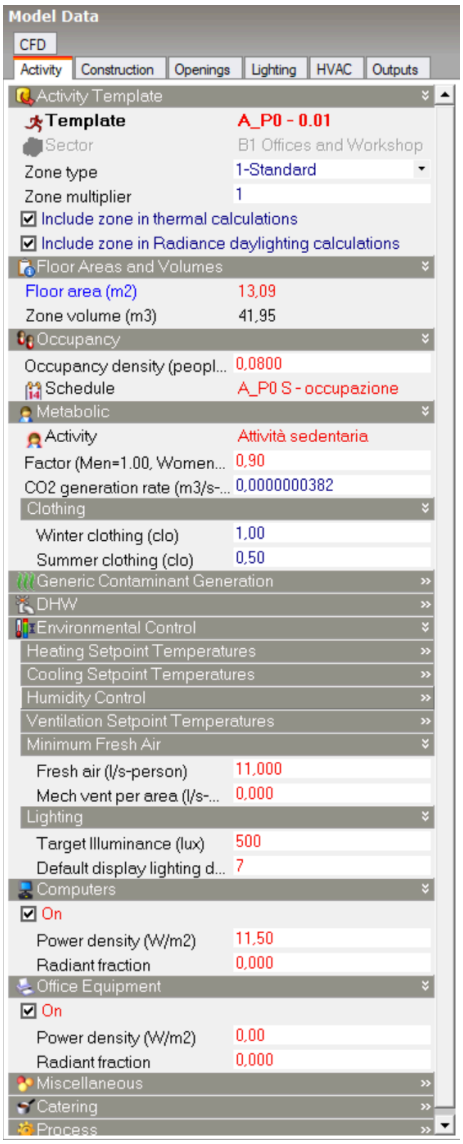


Figura 4.30. Dati Attività – Template di modello – Definizione dell'attività svolta dagli occupanti, dei tassi metabolici, controllo ambientale e degli apporti termici

Nella scheda Attività fino al livello Zona è possibile avere informazioni circa l'area di pavimento ed il volume netto della corrispettiva zona termica, ma anche del Blocco edificio (piano) o dell'intero edificio.

Al livello del Blocco edificio o della Zona termica è possibile definire il Tipo di zona fra diverse opzioni, di cui quelle utilizzate ai fini della modellazione dell'edificio oggetto di studio sono:

- *standard* – la zona è considerata occupata, soggetta ai servizi di riscaldamento e raffrescamento;
- *zona non riscaldata* – è una zona non occupata all'interno dell'edificio, non soggetta ai servizi di riscaldamento e raffrescamento.

L'opzione "standard" viene utilizzata in modo automatico da Design Builder ed è valida per tutti la maggior parte dei template modellati. Le zone termiche prive di impianti di riscaldamento (e/o di raffrescamento) sono state definite come "non riscaldate"; ad esempio, ciò vale per la

bussola d'ingresso, i cavedi, i vani ascensore, i locali tecnici, ma anche per i corridoi nei piani interrati, così come la centrale termica. Il software, inoltre, nel caso della selezione di una tipologia differente da quella standard può modificare, su richiesta, i dati dei template in Attività, HVAC e Costruzione per inserire i dati relativi ad un ambiente non occupata.

Occupazione

I dati che definiscono l'Occupazione indicano il numero di persone presenti nell'ambiente e la durata dell'occupazione stessa. Insieme al tasso metabolico, questo parametro viene utilizzato nel processo di simulazione dell'edificio per calcolare gli apporti termici gratuiti dovuti agli occupanti, e utilizzati successivamente come input energetico all'edificio.

Nella Figura 4.31 viene illustrato tale processo. La densità di occupazione ed il numero di persone presenti sono definite in funzione dei dati acquisiti dai questionari, come riportato in figura.

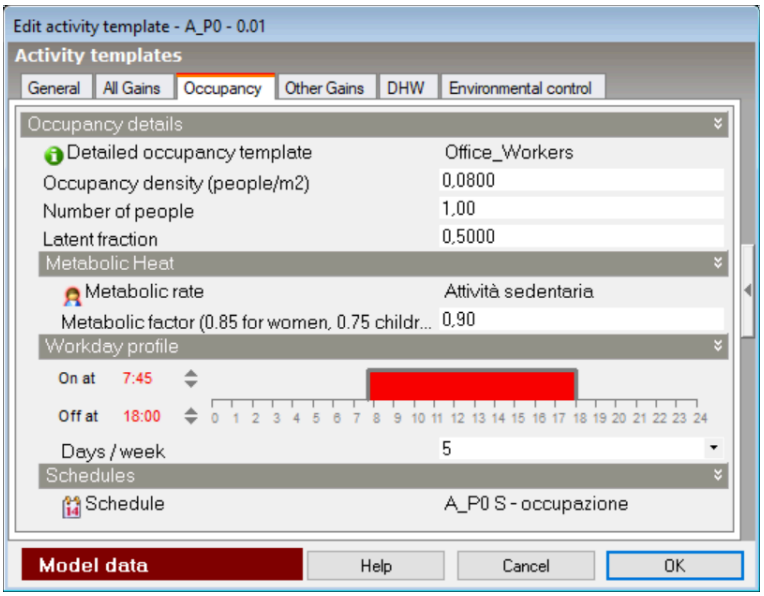


Figura 4.31. Dati Attività – Occupazione: definizione della densità di occupazione, tasso metabolico e programma operativo

Il tasso metabolico determina l'ammontare degli apporti termici dovuti alle persone, e viene selezionato in base al tipo di attività delle persone. Esso viene modificato durante la simulazione per tenere conto delle variazioni di temperatura dell'ambiente. Il tasso metabolico si esprime in W/persona, e rappresenta l'apporto totale per persona comprendendo la quota convettiva, radiante e latente. L'algoritmo di Design Builder determina quale frazione di questo apporto termico è sensibile e quale latente, poi in seguito suddivide la quota sensibile in quote radiante e convettiva, assumendo la frazione radiante pari al 50%.

Convenzionalmente si assume come superficie corporea di una persona pari a 1,8 m^2, per una persona alta circa 1,70 m per un peso di 70 kg, mentre per le donne si usa un valore moltiplicatore pari allo 0,85.

Il tasso metabolico è direttamente correlato alla potenza metabolica specifica M/A, espresso nel Sistema Internazionale di misura in [W/m^2], dove M è la potenza metabolica, e A rappresenta la superficie corporea. Tale rapporto si esprime anche in [met], e si ha:

$$1 \text{ met} = 58{,}1 \text{ W/m}^2$$

Essendo l'attività svolta dagli utenti di tipo sedentario (attività da ufficio) il tasso metabolico si assume pari a 1,2 [met], in accordo a quanto riportato nel Prospetto A.1 della UNI EN ISO 8995 e nel Prospetto B.1 della UNI EN ISO 7730, e si ha dunque:

$$1{,}2 \text{ met} = 70 \text{ W/m}^2$$

In riferimento alla superficie corporea di una persona adulta media, pari a 1,8 m^2, il valore del tasso metabolico espresso in [W/persona] è pari a:

$$70 \text{ W/m}^2 \cdot 1{,}8 \text{ m}^2 = 126 \text{ W/persona}$$

Viene pertanto usato questo valore nella definizione del tasso metabolico. Si usa un fattore metabolico moltiplicatore pari allo 0,90 al fine di rimanere in linea con la media tra i generi.

Nel pannello della scheda Attività si possono definire inoltre i valori dell'abbigliamento degli occupanti, nelle stagioni invernale ed estiva. Questi dati sono utili nella generazione dei risultati per quanto riguarda il comfort termico. L'abbigliamento riduce le dispersioni di calore del corpo umano, ed è classificato in base al suo valore di isolamento termico. L'unità di misura viene espressa come la resistenza termica in [m^{2}K/W], oppure più frequentemente in [clo], e si ha:

$$1 \text{ clo} = 0{,}155 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Il valore dell'isolamento termico dell'abbigliamento può essere stimato direttamente utilizzando i dati presentati nel Prospetto C.1 della UNI EN ISO 7730 per alcune combinazioni tipiche di capi d'abbigliamento, da lavoro o giornaliero (i valori sono quelli dell'isolamento termico intrinseco), o, indirettamente, sommando i valori dell'isolamento di ciascun capo di abbigliamento presenti nel Prospetto C.2 della stessa norma. A tale proposito, può essere d'aiuto anche la norma UNI EN ISO 9920, la quale specifica i metodi di valutazione delle caratteristiche termiche in condizioni stazionarie per un abbigliamento, basandosi sui valori dei tessuti, dei capi d'abbigliamento e degli insiemi di questi ultimi. La norma esamina, inoltre, l'influenza del movimento corporeo e della penetrazione dell'aria sull'isolamento termico e sulla resistenza evaporativa.

In seguito a questa analisi, i valori assunti per l'isolamento termico dell'abbigliamento per le stagioni invernale ed estiva sono i seguenti:

- inverno – 1 clo;
- estate – 0,5 clo.

Dalla definizione di questi ultimi parametri dipende l'impostazione della temperatura operativa dell'aria indoor, in relazione alla qualità dell'ambiente interno, come illustrato nella Tabella 1.5.

Successivamente si imposta il profilo di occupazione mediante l'uso di un programma, il quale è soggetto al piano ed all'esposizione in funzione dei dati acquisiti dai questionari. Nella Figura 4.26 precedentemente illustrata si osserva il profilo medio di occupazione, ma nel caso specifico può essere soggetto a variazioni.

Controllo ambientale

Il Controllo ambientale è la sezione della scheda Attività e del corrispettivo Template in cui si possono definire i requisiti minimi e massimi usando i setpoint, relativi alla zona termica. Quest'ultima è definita dai seguenti parametri:

- setpoint di temperatura per il riscaldamento;
- setpoint di temperatura per il raffrescamento;
- setpoint per il controllo dell'umidità (umidificazione o deumidificazione);
- setpoint di temperatura per la ventilazione:
  - naturale
  - meccanica
- portata di ventilazione minima;
- illuminamento minimo.

Essendo l'edificio oggetto di studio modellato per la determinazione del fabbisogno energetico mediante la simulazione dinamica nel periodo free-floating, non è stato modellato l'impianto di riscaldamento. All'interno dell'edificio l'impianto di raffrescamento è assente, ad eccezione di qualche ufficio dove sono presenti dei sistemi split, pertanto non è stato modellato. Le domande del questionario riguardano anche un'altra modalità di raffrescamento relativa all'uso di ventilatori a soffitto, che tuttavia Design Builder non offre la possibilità di modellarli. Pertanto, i setpoint di temperatura per il riscaldamento ed il raffrescamento si assumono come di default.

Per quanto riguarda il controllo dell'umidità, questo dipende unicamente dalla ventilazione naturale, a causa dell'assenza della ventilazione meccanica. Pertanto, il controllo dell'umidità dipende dalle infiltrazioni attraverso i serramenti e dalle azioni degli utenti, che possono modificarla attraverso l'apertura delle finestre.

Il setpoint di temperatura per la ventilazione naturale controlla l'attivazione della ventilazione naturale. Se la temperatura dell'aria interna è maggiore del setpoint di temperatura (e il programma operativo della ventilazione naturale è in funzione) questa si innesca, e ciò dipende inoltre anche dai parametri definiti per la ventilazione naturale nelle Opzioni di modello (vedere Figura 4.13). Si precisa che usando l'opzione della ventilazione naturale Calcolata nelle Opzioni modello, le finestre vengono aperte quando:

- la temperatura dell'aria interna è superiore al setpoint di temperatura per la ventilazione,
- la temperatura dell'aria interno è maggiore rispetto alla temperatura dell'aria esterna, e
- il programma operativo permette la ventilazione.

Sempre all'interno del Template si specifica il programma operativo relativo alla ventilazione naturale. Il profilo di utilizzo fa riferimento a quanto illustrato nella Tabella 4.13 e nella Figura 4.27, tuttavia, come nel caso dell'occupazione, a ciascuna zona termica verrà assegnato un profilo opportuno.

Per quanto riguarda la ventilazione meccanica si assumono valori di setpoint di temperatura e profilo di utilizzo tali da disattivare questa opzione, in quanto assente dall'edificio.

Ciascuna zona termica, come si è detto in precedenza, è caratterizzata da una determinata attività, svolta dagli occupanti. Tali attività comportano requisiti differenti per quanto riguarda la portata minima di ventilazione. Vi sono due norme tecniche, in particolare, che definiscono i requisiti minimi per la portata di aria esterna da immettere nell'ambiente negli edifici non residenziali adibiti ad uffici. La norma tecnica UNI 10339 al Prospetto 3 indica una portata minima ricambio dell'aria pari a 11 [l/s•persona]. Invece la norma che supporta la presente tesi, ovvero la FprEN 16798-1, prevede una portata d'aria esterna minima pari a 14 [l/s•persona], così come illustra nella Tabella 1.9 e nella Tabella 1.11, all'interno del Capitolo 1.4; verrà di conseguenza utilizzato il valore minimo richiesto più alto tra i due, sia perché la normativa tecnica si è evoluta nel corso del tempo, sia perché un valore soglia più elevato può prevedere un migliore comfort dell'ambiente indoor. Tale valore, inoltre, resta valido per i tre Metodi di calcolo per i tassi di ventilazione 1 (metodo basato sulla qualità dell'aria percepita) e 3 (metodo basato sui di ventilazione predefiniti), secondo quanto previsto dalla norma stessa, e rimane invariata anche per la categoria di qualità dell'ambiente interno (viene assunta la Categoria II). Per quanto riguarda la ventilazione meccanica, anche in questo viene assunto un valore (del tasso di ventilazione) tale da annullare questa funzionalità: più precisamente, il valore assunto è pari a 0 [l/s•persona].

Per quanto riguarda l'illuminazione (artificiale) viene definito il livello di illuminamento minimo da mantenere all'interno dell'ambiente, e la densità di illuminamento. L'illuminamento viene standardizzato dalla norma tecnica UNI EN 12464-1 Si fa riferimento alla Tabella 1.3 a cui vengono aggiunte le informazioni mancanti, come illustrato nella Tabella 4.20.

Tabella 4.20. Livelli di illuminamento medio utilizzati per i Template di Attività, secondo i Prospetti 5.1, 5.5 e 5.26 della UNI EN 12464-1

N° di rif. a UNI 12464-1	Tipo di zona, compito o attività	$\bar{E}_m$ [lx]	UGR_L [-]	U_O [-]	R_a [-]
5.1.1	Zone di circolazione e corridoi	100	28	0,40	40
5.5.2	Corridoi: con presenza personale	150	22	0,40	60
5.26.1	Archiviazione, copiatura, ecc.	300	19	0,40	80
5.26.2	Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati	500	19	0,60	80
5.26.4	Postazioni CAD	500	19	0,60	80
5.26.5	Sale conferenze e riunioni	500	19	0,60	80
5.26.6	Banco della reception	300	22	0,60	80
5.26.7	Archivi	200	25	0,40	80

La densità di illuminamento permette di definire la densità tipica dell'illuminazione per ciascuna attività svolta. Il valore viene utilizzato per assicurare che la densità di illuminamento sia appropriato. Nel caso specifico, i valori di densità utilizzati sono riferiti alla reale illuminazione degli ambienti interni, sulla base dei dati acquisiti da rilievo. Per ciascun ambiente si è rilevata

la tipologia di apparecchio luminoso, la sua potenza ed il numero di apparecchi. In seguito, è stata calcolata la potenza erogata dall'apparecchio luminoso per unità di superficie suddividendo la potenza totale per l'area di pavimento, per ciascuna zona termica. In questo modo si modella in maniera corretta il reale sistema di illuminazione dell'edificio. I valori calcolati si riassumono nella Tabella 4.21.

Per quanto riguarda il profilo di utilizzo dell'illuminazione, esso fa riferimento a quanto illustrato nella Tabella 4.17 e nella Figura 4.29, tuttavia, come nel caso dell'occupazione, a ciascuna zona termica verrà assegnato un profilo opportuno.

Tabella 4.21. Calcolo delle densità di illuminamento per ciascuna tipologia di ambiente

Ambiente	Superficie ambiente [m²]	Potenza totale [W]	Densità di illuminamento [W/m²]
Uffici	1.576,33	12024	7,60
Corridoi	417,63	4212	10,10
Bagni	183,20	1132	6,20
Vano scala	229,97	1008	4,40

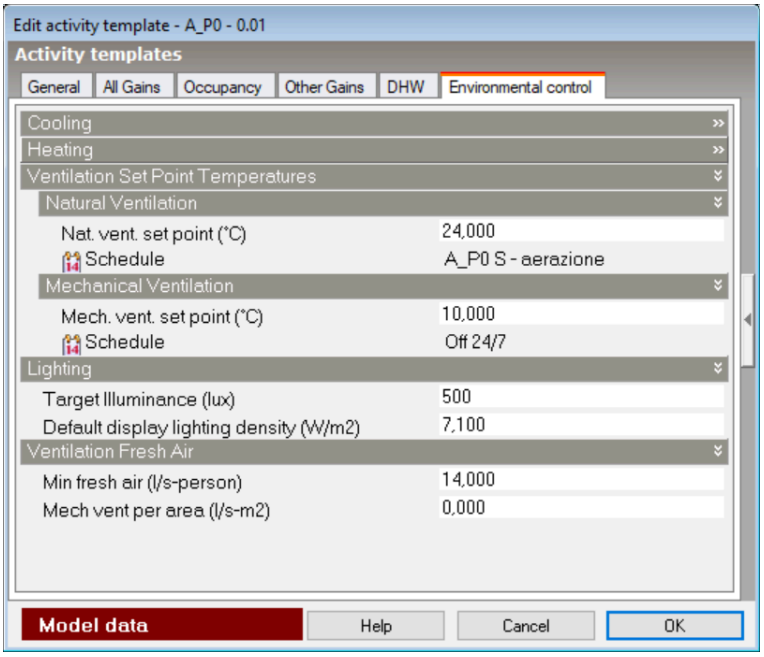


Figura 4.32. Dati Attività – Controllo ambientale: definizione del setpoint di temperatura (di raffrescamento) della ventilazione naturale e rispettivo programma operativa, dei valori di illuminamento (livello e densità) e della portata minima di ventilazione

Nell'ultima parte della definizione del Template nella scheda Attività si definiscono gli apporti termici gratuiti dovuti all'uso dei computer ed ai dispositivi da ufficio (quali stampanti e simili). Dall'analisi delle schede dei prodotti più comuni fra personal computer, stampanti e

fotocopiatrici, si è costruita la Tabella 4.22. Per quanto riguarda i personal computer, sia fissi che portatili, il valore di potenza minimo si ha quando non viene utilizzato oppure è in stand-by, mentre il valore massimo riguarda la massima potenza elettrica che può assorbire; un computer funziona a piena potenza in rari casi, specialmente quando deve processare operazioni complesse. È molto più comune avere un valore medio, nei casi di operazioni di tipo comune. All'interno dell'edificio sono presenti un personal computer per ciascun utente, e il valore di potenza assunto tiene conto anche della presenza, eventualmente, di computer portatili. Per quanto riguarda le stampanti e le fotocopiatrici, invece, normalmente la potenza assorbita è minima quando non vengono utilizzate, per poi avere valori medi e/o massimi durante la fase di stampa. In questo caso, il valore assunto tiene conto sia dei momenti in cui vengono utilizzate alla massima potenza sia di quelli in cui non vengono utilizzate. Le stampanti sono generalmente distribuite una per ciascun ufficio, mentre le fotocopiatrici una per corridoio.

Il profilo di utilizzo dei dispositivi da ufficio fa riferimento a quanto illustrato nella norma 18523-1. In questo caso, come per l'illuminazione artificiale, per la definizione del profilo Design Builder permette di utilizzare valori compresi tra 0 e 1, che indicano rispettivamente il non utilizzo e l'utilizzo dei dispositivi da ufficio. Si precisa che nelle ore in cui l'edificio non è occupato i dispositivi da ufficio continuano ad assorbire potenza elettrica, pertanto nel profilo di utilizzo il valore minimo non sarà pari a 0 ma ad una frazione, in questo caso assunto come 0,25, come illustrato nella Figura 4.33 e nella Tabella 4.23.

La Figura 4.34 illustra i dati assunti per le diverse categorie, e fa da riferimento per i successivi template applicati a ciascuna zona termica, facendo le opportune modifiche.

Tabella 4.22. Potenza elettrica assorbita da personal computer e dispositivi d'ufficio

Tipologia	Potenza assorbita [W]			Valore assunto [W]
	Min	Med	Max	
PC fisso (torre + monitor)	50 – 100	130 – 180	500 – 600	150
PC portatile (notebook)	15 – 30	50 – 80	130	
Stampante multifunzione	11	45	115	45
Fotocopiatrice	10 – 30	400 – 500	750	500

Tabella 4.23. Profilo orario medio di utilizzo dei dispositivi da ufficio (PC e stampanti)

	00:00–08:00	08:00–09:00	09:00–10:00	10:00–11:00	11:00–12:00	12:00–13:00	13:00–14:00	14:00–15:00	15:00–16:00	16:00–17:00	17:00–18:00	18:00–24:00
Valore	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	0,25	0,25

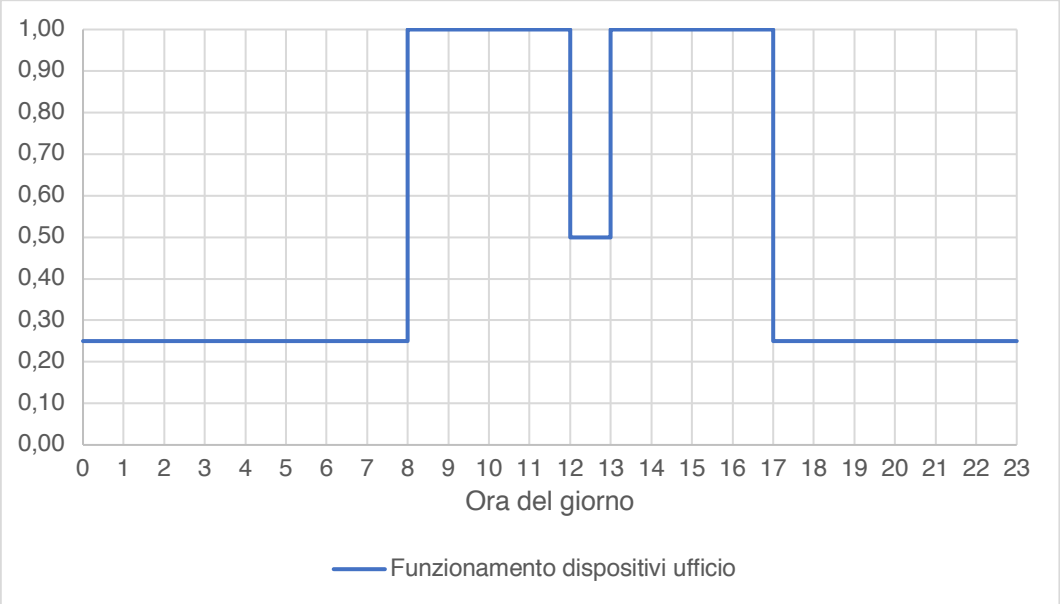


Figura 4.33. Profilo orario medio di utilizzo dei dispositivi da ufficio (PC e stampanti)

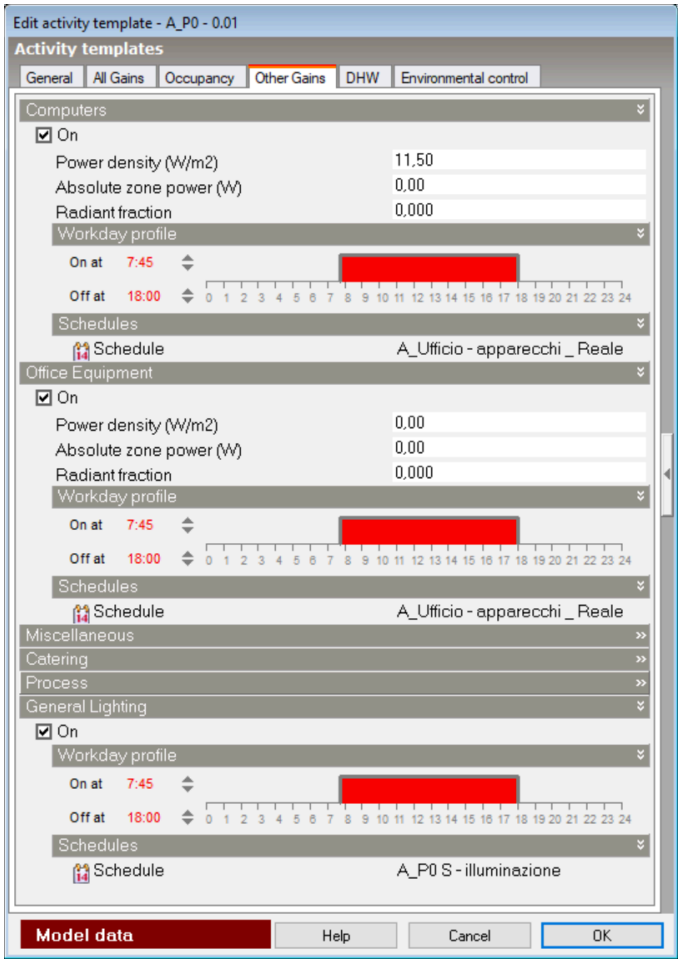


Figura 4.34. Dati Attività – Apporti termici dovuti ai computer ed ai dispositivi da ufficio

4.7. Impianti

Illuminazione

A differenza di quanto indicato nei Template in Attività per quanto riguarda l'illuminazione, dove sono stati definiti i requisiti minimi da rispettare secondo quanto previsto dalle norme tecniche vigenti, in questa fase la definizione dei dati riguarda la modellazione degli apparecchi luminosi presenti nell'edificio oggetto di studio. Il Template (Figura 4.35) si basa essenzialmente su tre aspetti:

- illuminazione generale;
- illuminazione del compito (visivo);
- controllo dell'illuminazione.

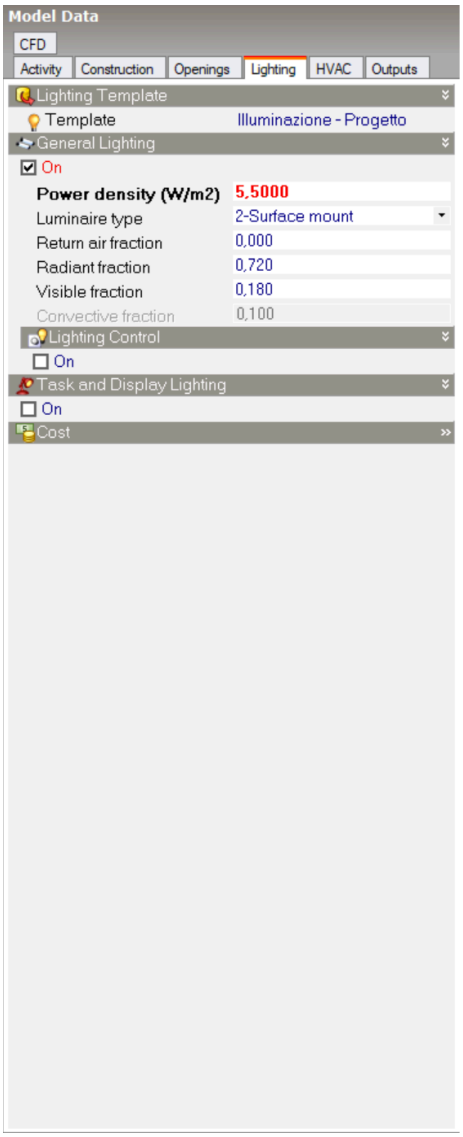


Figura 4.35. Dati Illuminazione – Template di modello – Definizione delle caratteristiche dell'apparecchio luminoso

L'illuminazione generale tiene conto dell'illuminazione principale nella stanza. Essa può essere in grado di sostituire l'illuminazione per luce diurna mediante il controllo dell'illuminamento.

La potenza elettrica assorbita per l'illuminazione artificiale è stata definita secondo la modalità di densità di potenza [W/m^2] nelle Opzioni modello.

Nell'edificio oggetto di studio, l'apparecchio luminoso è montato a soffitto ed è di tipo fluorescente lineare, che utilizza come sorgente luminosa i tubi al neon. Le sorgenti sono caratterizzate generalmente da una potenza assorbita pari a 36 [W], mentre in rari casi sono da 58 [W]. Nella Figura 4.36 viene illustrato il tipo di apparecchio luminoso presente nell'edificio.

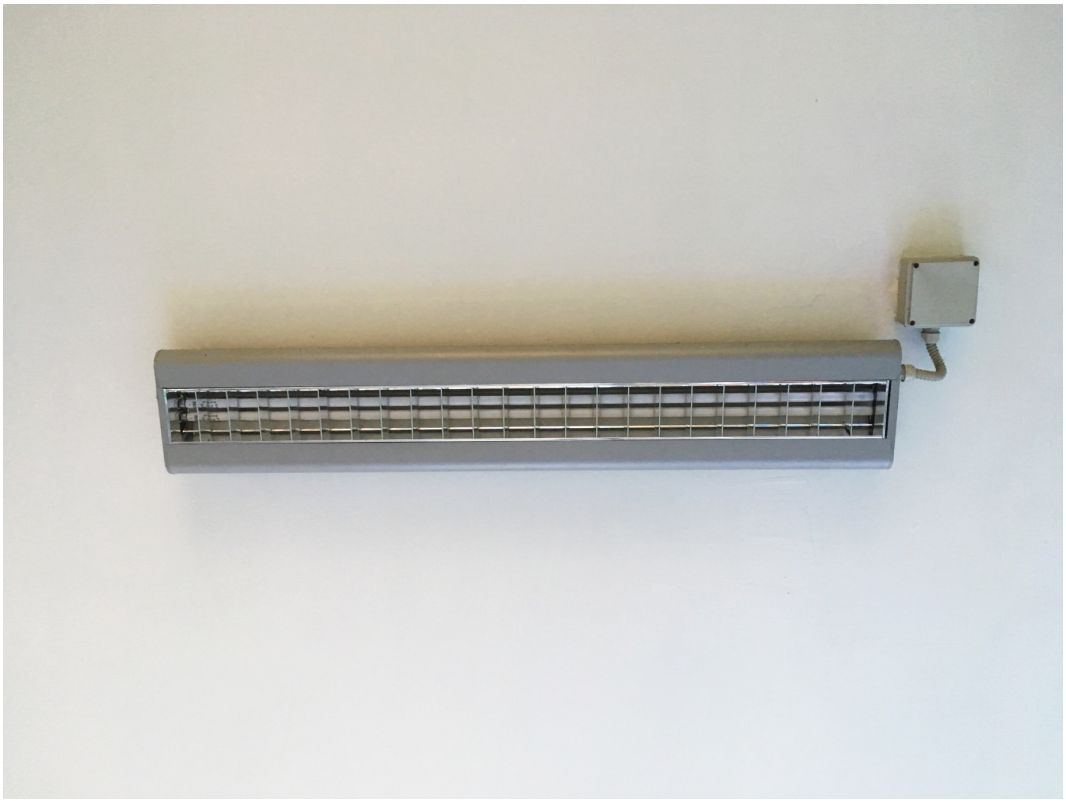


Figura 4.36. Tipologia di apparecchio luminoso presente negli uffici, di tipo lineare fluorescente

Il valore della densità di potenza in W/m^2 viene calcolata per ciascuna zona termica dividendo la potenza assorbita totale per l'area di pavimento. Il risultato che si ottiene è un valore sempre differente da zona a zona, che tuttavia meglio caratterizza l'edificio.

Per la tipologia di apparecchio luminoso selezionata, i valori dei contributi degli apporti termici per illuminazione sono forniti da Design Builder stesso come riassunti nella Tabella 4.24.

La frazione radiante è la parte dell'apporto termico che viene emesso dall'apparecchio verso la zona termica sotto forma di radiazione termica. Il software calcola la quantità di questa

radiazione che viene assorbita dalle superfici dell'ambiente in relazione al tempo impiegato da queste superfici per assorbire il calore.

La frazione visibile è la parte della radiazione che si trova nell'intervallo "visibile" dell'onda. Design Builder calcola quanta di questa radiazione viene assorbita dalle superfici interne dell'ambiente in relazione al tempo impiegato dalle superfici per assorbire l'irraggiamento solare.

La frazione convettiva, invece, viene calcolata per differenza.

Tabella 4.24. Definizione dei valori dei contributi degli apporti per illuminazione in relazione a ciascuna tipologia di apparecchio luminoso

Dati	Sospeso	A soffitto	A incasso	A contro-soffitto	Condotta dell'aria
Frazione dell'aria di ritorno	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54
Frazione radiante	0,42	0,72	0,37	0,37	0,18
Frazione visibile	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Frazione convettiva	0,40	0,10	0,45	0,45	0,10

Per quanto riguarda l'illuminazione del compito, questa opzione viene utilizzata solamente nel caso di specifici compiti visivi, come può essere ad esempio l'uso di lampade da scrivania che illumina una porzione circoscritta del compito, oppure si usano apparecchi luminosi per illuminare oggetti specifici. Nel caso specifico non sono presenti elementi tali da giustificare l'uso di questa opzione.

Infine, il controllo dell'illuminazione modula l'uso dell'illuminazione artificiale in base alla disponibilità di luce diurna. Il livello di illuminamento (del compito visivo) viene calcolato in ogni step (orario) durante la simulazione e successivamente utilizzato per determinare di quanto l'illuminazione artificiale può essere ridotta. Il livello di illuminamento grazie alla luce diurna in un ambiente dipende da vari fattori che includono le condizioni del cielo, la posizione del solo, la posizione dei sensori della fotocellula, l'ubicazione dell'edificio e la sua dimensione, nonché la trasmissione solare del vetro, le schermature e la riflettenza delle superfici interne.

Il caso specifico non è dotato di una simile tecnologia pertanto non verrà considerato nella simulazione. Il controllo dell'illuminazione tuttavia può essere un argomento interessante per quanto riguarda il progetto.

HVAC

Poiché i requisiti della simulazione del modello dell'edificio non prevedono la definizione di un sistema impiantistico di riscaldamento, e poiché non vi è un sistema univoco di raffrescamento (ad eccetto di qualche ufficio) e/o di ventilazione meccanica, nella scheda HVAC è stato definito un Template che disinserisce questi servizi. Tuttavia, in assenza di un impianto di ventilazione meccanica, la ventilazione è garantita dalla sola aerazione naturale, la quale avviene grazie all'apertura delle finestre e alle infiltrazioni.

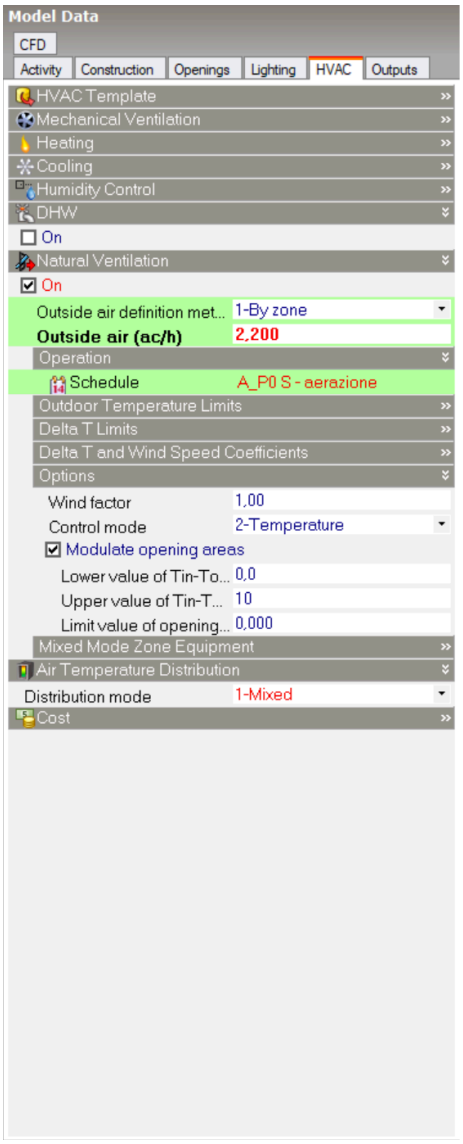


Figura 4.37. Dati HVAC – Template di modello – Ulteriore definizione della ventilazione naturale

Ventilazione naturale

Così come riportato nel Capitolo 4.5, la portata di ventilazione, espressa in numero di ricambi orari dell'aria interna, è stato calcolato secondo il metodo descritto nella norma tecnica UNI EN15251, al punto B.1 dell'Appendice B, relativo agli edifici non residenziali, così come previsto anche dalla norma FprEN 16798-1.

La procedura segue l'equazione illustrata nell'Appendice, ma anche nel Capitolo 1, come segue:

$$q_{\mathrm{tot}} = n \bullet q_{\mathrm{p}} + A_{\mathrm{R}} \bullet q_{\mathrm{B}}$$

dove:

q_{tot} è il tasso totale di ventilazione per la zona di respirazione, in [l/s]
n è il valore di progetto per il numero di persone presenti nell'ambiente, [-]
q_p è il tasso di ventilazione per l'occupazione per persona, in [l/s•persona]
A_R è l'area di pavimento, in [m^2]
q_B è il tasso di ventilazione per le emissioni dall'edificio, in [l/s•m^2]

Si calcolano dunque:

1. le portate di ventilazione in funzione degli occupanti, in [m^3/h];
2. le portate di ventilazione in funzione dell'area di pavimento, in [m^3/h];
3. la portata di ventilazione totale, in [m^3/h];
4. il numero di ricambi orari, in [h^{-1}], dividendo la portata di ventilazione totale per il volume dell'ambiente.

I tassi di ventilazione fanno riferimento alla Tabella B.3 nell'Appendice B della norma UNI EN 15251 e alla Tabella B.2 relativa all'ufficio singolo, in relazione alla Categoria II di qualità dell'ambiente interno. I dati selezionati sono illustrati nella Tabella 4.25.

Tabella 4.25. Tassi di ventilazione per uffici non residenziali

Categoria	Tasso di ventilazione per persona [l/s•pers]	Tasso di ventilazione per edifici *non low polluting* [l/s•m^2]
II	7	1,4

In Design Builder, la ventilazione naturale "calcolata", i tassi di ventilazione sono calcolati sulla base della velocità del vento e della differenza di pressione tra interno ed esterno, dalle dimensioni delle aperture e delle fessurazioni, utilizzando l'*Airflow Network* di EnergyPlus. In particolare, il modello della ventilazione "calcolata" fa riferimento alla dimensione delle aperture, alla percentuale di apertura e all'utilizzo delle stesse. Il software prevede inoltre la possibilità di modulare l'apertura delle finestre in relazione alle zone climatiche al contorno.

Nel modello è stata utilizzata una percentuale di apertura pari al 62%, valore calcolato secondo quanto specificato dalla norma UNI EN 16798-7.

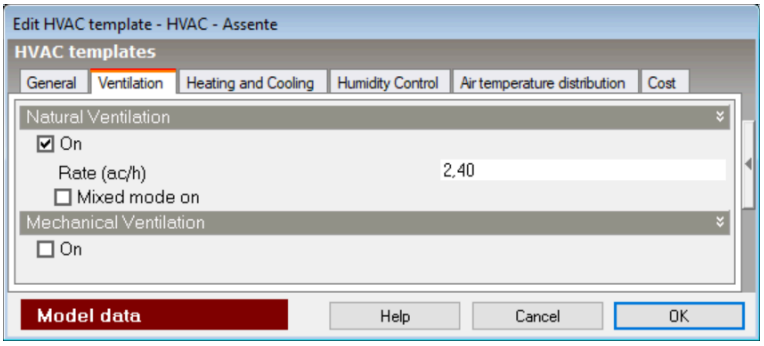


Figura 4.38. Dati HVAC – Definizione del tasso di ventilazione naturale per l'intero edificio

Si definisce, inoltre, la modalità di controllo della ventilazione naturale. Le opzioni proposte da Design Builder sono incentrate sulla differenza di temperatura (interna > esterna), di entalpia (interna > esterna), di temperatura delle zone adiacenti durante il riscaldamento o raffrescamento (zona > zona adiacente, zona > setpoint), oppure sull'assenza di finestre e porte apribili. Tutte le opzioni sono supportate da un programma operativo.

L'opzione selezionata è quella relativa alla temperatura, in quanto ritenuta più adeguata al caso specifico. Le condizioni affinché vengano aperte le finestre e di conseguenza innescare la ventilazione naturale si hanno quando:

- $T_{zona} > T_{esterna}$
- $T_{zona} > T_{setpoint}$
- il programma operativo permette la ventilazione.

Più precisamente, quando il programma operativo (basato sul profilo di apertura delle finestre specifico di ciascuna zona termica) permette la ventilazione, tutte le finestre e le porte apribili della zona termica vengono aperte, in relazione alle condizioni dell'ambiente interno o esterno.

5. SIMULAZIONE E INDICI DI COMFORT

5.1. Parametri di simulazione

Le opzioni necessarie per l'avvio della simulazione dinamica riguardano il periodo di simulazione e gli intervalli da computare. Più precisamente, è necessario definire il giorno ed il mese di inizio della simulazione e quelli di fine simulazione. Gli intervalli, invece, definiscono un livello di accuratezza dei risultati che si ottengono sempre maggiore, e sono di tipo mensile/annuale, giornaliero e/o orario (oppure anche sub-orario).

Le impostazioni utilizzate riguardano il periodo di free-floating (in assenza dell'impianto), utilizzando un livello di accuratezza di tipo orario, così come illustrato in Tabella 5.1 e in Figura 5.1. Le date di inizio e di fine del periodo di simulazione coincidono rispettivamente con il momento di spegnimento e di accensione dell'impianto di riscaldamento.

Tabella 5.1. Periodo dell'anno utilizzato per la simulazione dinamica

Periodo di simulazione

	Giorno	Mese
Inizio	16	Aprile
Fine	14	Ottobre

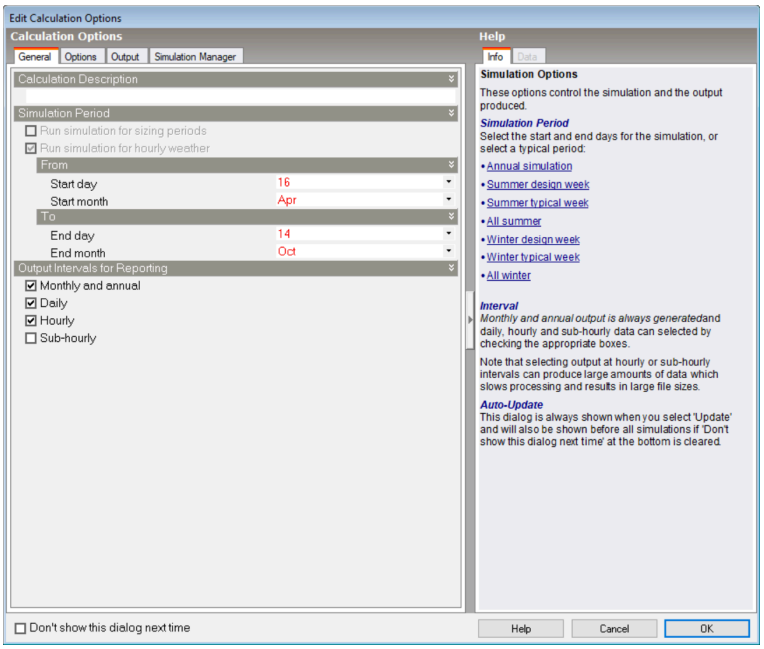


Figura 5.1. Parametri generali delle opzioni di calcolo per la simulazione dinamica

Zone termiche

Prima dell'avvio della simulazione dinamica è necessario fare alcune considerazioni. L'edificio modellato, come descritto nel Capitolo 4 (dalla modellazione geometrica fino a quella parametrica), è molto complesso e le tempistiche del processo di simulazione, in regime giornaliero, si sono rilevate essere piuttosto lunghe.

Inoltre, come riportato nella norma FprCEN/TR 16798-2, i carichi energetici degli edifici possono variare da luogo a luogo e anche nel tempo, e il sistema progettato non sempre adempie agli scopi progettuali in tutti gli ambienti durante tutte le ore. Perciò è necessario valutare le prestazioni energetiche dell'edificio a lungo termine in rispetto dell'ambiente interno. La valutazione dell'ambiente interno di un edificio si esegue valutando l'ambiente interno di ambienti tipici, che caratterizzano diverse zone dell'edificio stesso.

A tale scopo, sono state selezionate delle zone termiche a campione, disposte su diversi piani e con diversi orientamenti. Le zone termiche selezionate fanno parte di piani dell'edificio aventi caratteristiche diverse tra loro:

- Piano 1: rappresenta il generico piano tipo, in una posizione più ravvicinata al terreno;
- Piano 3: presenta delle differenze di distribuzione dei locali in pianta rispetto al piano tipo, ma soprattutto un ufficio di dimensioni significative sul lato est della pianta;
- Piano 5: è il piano tipo posto più in alto ed è caratterizzato in parte dalla copertura piana dell'edificio (terrazza per il sesto piano);
- Piano 6: presenta dimensioni inferiori rispetto a tutti gli altri piani dell'edificio, e insieme al Piano 5 sono i più esposti all'irraggiamento solare e all'azione del vento.

Le zone termiche selezionate sono illustrate nella Tabella 5.2:

Tabella 5.2. Selezione delle zone termiche a campione, in funzione del piano e dell'orientamento

Zona termica	Orientamento
1.01	S/O
1.05	S
1.10	N/E
3.05	S
3.08	N/S
3.09	N
5.05	S
5.09	S/E
5.14	N/O
6.01	S/O
6.03	S
6.07	N/O

Figura 5.2. Indicazione delle zone termiche selezionate per ciascuno dei piani di riferimento

Per poter eseguire la simulazione dinamica di ciascuna delle zone termiche selezionate, in regime orario, è stato necessario scomporre il modello di partenza. In questa procedura, i nuovi modelli sono composti dal piano di riferimento (ad esempio dal Piano 1), caratterizzato dal Blocco edificio corrispondente, e dai piani posti al di sotto e al di sopra. Mentre per il piano di riferimento le impostazioni di adiacenza del Blocco edificio rimangono di default (Automatica), per gli altri si utilizza l'impostazione Adiabatica. In questo modo, il piano di riferimento mantiene intatte le geometrie interne, le caratteristiche dell'involucro esterno e di quello interno (i solai interpiano) dell'edificio: pertanto, il fabbisogno energetico del piano rimane pressoché invariato, rispetto a quello che si otterrebbe dalla simulazione dell'intero edificio. Per quanto riguarda gli altri due piani, la funzione adiabatica impedisce gli scambi di energia e di massa con l'ambiente esterno, ma non con gli ambienti interni. Utilizzando questa funzione inoltre, Design builder assegna automaticamente agli elementi dell'involucro esterno quelli interni: ad esempio, le pareti esterne assumono la stratigrafia di quelle interne, mentre i solai, invece delle strutture della copertura nella parte superiore e del pavimento sull'ambiente esterno nella parte inferiore, assumono la stratigrafia del solaio interpiano; in questo modo si modificano le aree di pavimento ed i volumi interni. Tale scelta è motivata dal fatto che utilizzando l'opzione Automatica anche sui piani "esterni" a quello di riferimento, il fabbisogno energetico di questo si modifica in maniera sensibile; inoltre, vengono assegnate le strutture di copertura e pavimento verso l'esterno, modificando in ogni caso i volumi interni.

Le zone termiche mantengono tutte le caratteristiche indicate nel Capitolo precedente. Vengono pertanto simulate tutte le zone.

In seguito, selezionando solamente le zone termiche indicate in Tabella 5.2, si esportano i dati così calcolati per poterli elaborare successivamente per mezzo di fogli di calcolo in Excel.

5.2. Indici di comfort termico

La norma oggetto di studio (FprEN 16798-1 e prCEN/TR 16798-2) non fornisce indicazioni specifiche circa la costruzione degli indici di comfort, siano essi relativi al comfort termico, visivo, acustico o alla qualità dell'aria, ma piuttosto delle indicazioni generiche che possono essere utilizzate dal progettista per la costruzione di questi.

Per quanto riguarda il comfort termico, si adotta la metodologia relativa alla *Percentuale dei valori all'esterno dell'intervallo* proposto dalla normativa, per la valutazione del comfort a lungo termine.

Operando in condizioni di assenza di impianto, secondo le specifiche della norma è necessario utilizzare un grafico, come illustrato in Figura 1.2, che mette in relazione la temperatura operativa dell'ambiente interno e la temperatura esterna media corrente ponderata sulle temperature dell'aria esterna dei giorni precedenti a quello di riferimento. Per fare ciò, dai file esportati dal software in formato CSV[33] sono stati estratti i dati utili ai fini del calcolo, che risultano essere:

- le date e gli orari;
- la temperatura dell'aria esterna di bulbo asciutto.
- la temperatura operativa interna.

Per le operazioni successive, nella definizione dell'indice di comfort termico si procede con il calcolo manuale, mediante l'uso di fogli di calcolo, della temperatura esterna media corrente ponderata sulle temperature esterne dei giorni precedenti. Per fare ciò si fa ricorso all'equazione di seguito illustrata:

$$\theta_{\mathrm{rm}} = \frac{\theta_{\mathrm{ed-1}}+\alpha\bullet\theta_{\mathrm{ed-2}}+\alpha^2\bullet\theta_{\mathrm{ed-3}}+\alpha^3\bullet\theta_{\mathrm{ed-4}}+\alpha^4\bullet\theta_{\mathrm{ed-5}}+\alpha^5\bullet\theta_{\mathrm{ed-6}}+\alpha^6\bullet\theta_{\mathrm{ed-7}}}{1+\alpha+\alpha^2+\alpha^3+\alpha^4+\alpha^5+\alpha^6}$$

dove

θ_{rm}	è la temperatura media esterna per il giorno considerato, in [°C]
$\theta_{\mathrm{ed-j}}$	è la temperatura media dell'aria esterna per il *j-esimo* giorno precedente, in [°C]
$\theta_{\mathrm{ed-1}}$	è la temperatura media dell'aria esterna per il giorno precedente, in [°C]
α	è una costante compresa tra 0 e 1 (il valore consigliato è pari a 0,8), [-]

Mentre all'interno della norma tecnica la temperatura esterna media corrente ponderata ("*outdoor running mean temperature*" – θ_{rm}) viene calcolata in funzione della temperatura media giornaliera, nel presente caso è necessario relazionarla al regime orario. In questo caso, per ciascuna ora del giorno di riferimento è stata applicata la relazione considerando come valore di temperatura dell'aria esterna dei giorni precedenti ($\theta_{\mathrm{ed-j}}$) la media delle temperature

[33] Il formato CSV, ovvero *comma separated values* (*dati separati da virgole*), si basa su file di testo che viene utilizzato per l'importazione e l'esportazione di una tabella di dati. Nel formato, le righe della tabella sono rappresentate da linee di testo, mentre le colonne da campi, che dividono la linea di testa con appositi caratteri separatori; ogni campo rappresenta un valore (o una cella). Esso viene gestito generalmente da fogli di calcolo (Microsoft Excel, Numbers, ecc.) o da database.

sulle 24 ore precedenti all'ora di riferimento, poi sulle 48 ore, e così via fino al settimo giorno precedente a quello di riferimento.

Nella Figura 5.3 viene illustrata come la temperatura "*outdoor running mean*" si relaziona alla temperatura esterna di bulbo asciutto.

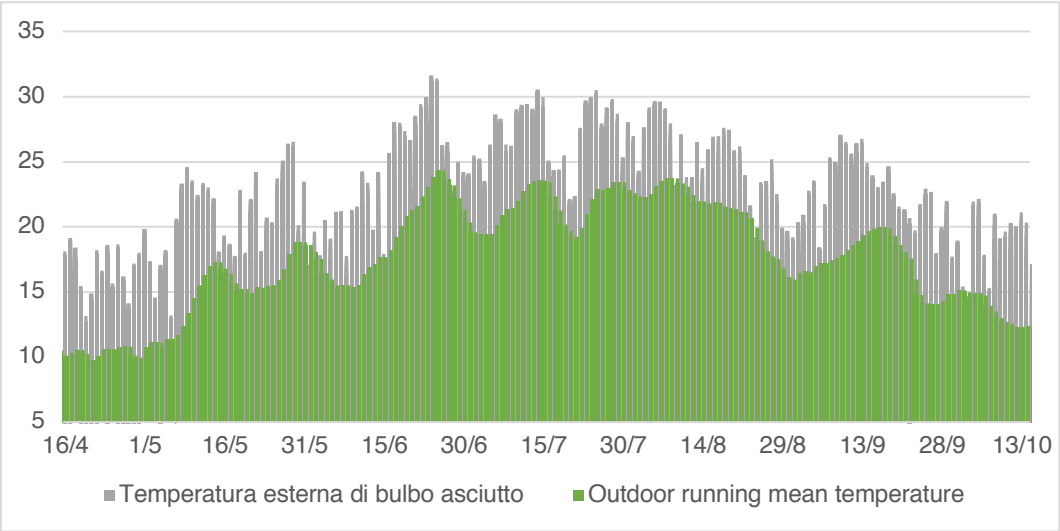


Figura 5.3. Andamento delle temperature esterne di bulbo asciutto e "outdoor running mean"

Successivamente, sono stati calcolati i valori della temperatura operativa che rappresentano il limite superiore ($\theta_{o,sup.}$), quello inferiore ($\theta_{o,inf.}$) ed il valore ottimale (θ_c) per poter definire (graficamente e analiticamente) una zona di comfort termico. A tale scopo sono state applicate le seguenti relazioni:

$$\theta_{o,sup.} = 0{,}33\ \theta_{rm} + 18{,}8 + 3$$

$$\theta_{o,inf.} = 0{,}33\ \theta_{rm} + 18{,}8 - 4$$

$$\theta_c = 0{,}33\ \theta_{rm} + 18{,}8$$

I limiti entro cui viene calcolata la temperatura operante rispetta una temperatura media esterna corrente ponderata minima pari a 10 °C e una massima pari a 30 °C.

Le figure di seguito, la Figura 5.4 e la Figura 5.5, illustrano rispettivamente la zona di comfort termico, rappresentata dai limiti della temperatura operativa interna, e le fasce di comfort termico aventi diverse caratteristiche.

Le fasce di comfort termico che così sono state individuate hanno lo scopo di indicare in quale area del grafico si inseriscono i punti caratterizzati dalla relazione fra la temperatura operativa interna calcolata (grazie alla simulazione dinamica con Design Builder) e la temperatura esterna media corrente ponderata. In questo modo è possibile constatare sia graficamente

che numericamente la distribuzione dei valori per una attenta valutazione delle condizioni esistenti dell'edificio oggetto di studio. Di seguito, le caratteristiche delle diverse fasce di comfort termico:

- Fascia A: valori maggiori di $\theta_{o,sup}$;
- Fascia B: valori compresi fra $\theta_{o,sup}$ e θ_c;
- Fascia C: valori compresi fra θ_c e $\theta_{o,inf}$;
- Fascia D: valori minori di $\theta_{o,inf}$.

La quantità di dati posta al di fuori dell'intervallo costituito dalle temperature operative limite indica se c'è o meno necessità di predisporre un intervento di miglioramento dal punto di vista del benessere termico dell'edificio, e in quale misura.

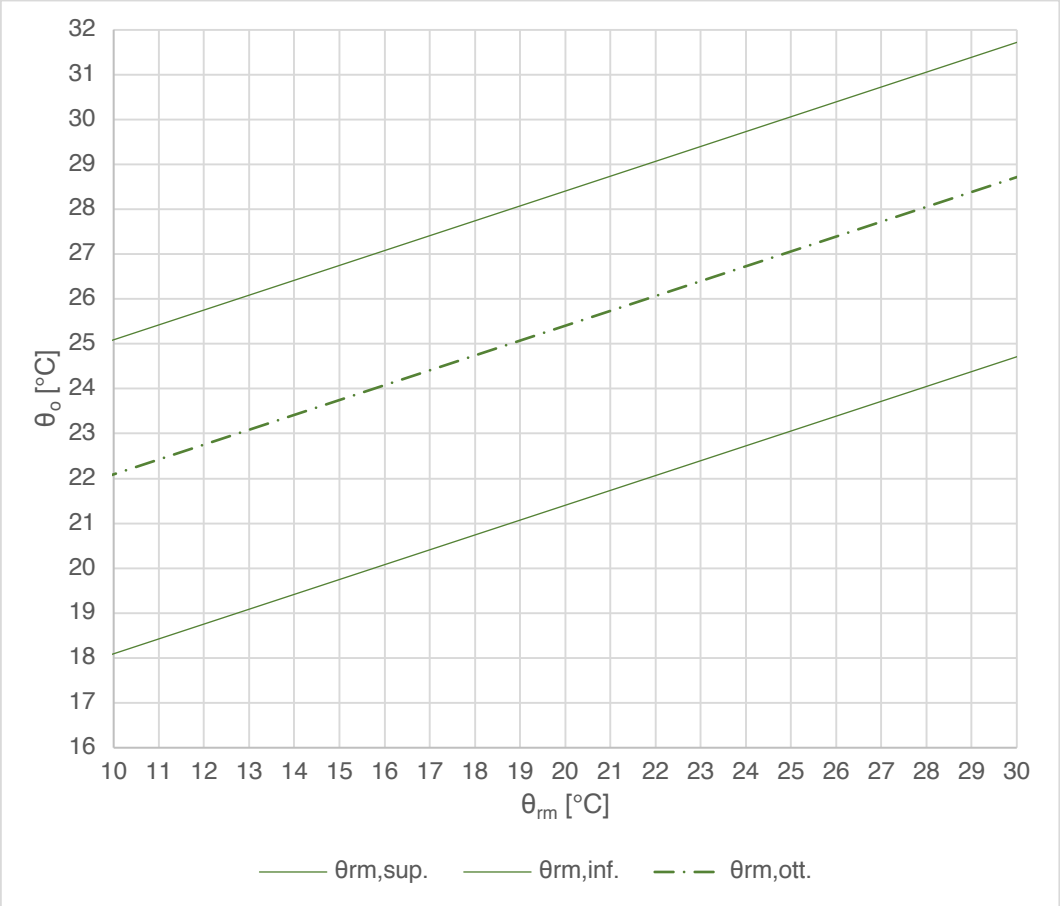


Figura 5.4. Valori reali di temperatura operativa interna di riferimento per la determinazione del comfort termico nell'edificio oggetto di studio (senza sistemi di ventilazione meccanica)

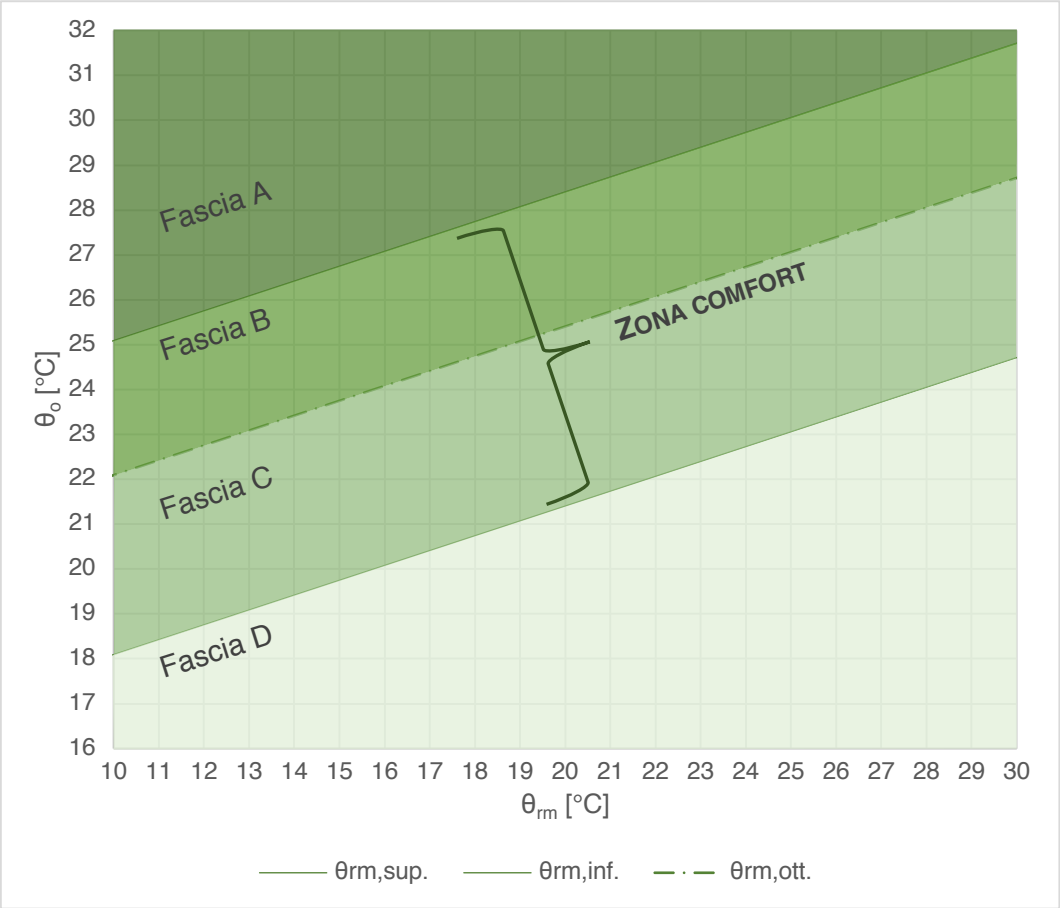


Figura 5.5. Suddivisione dell'area di comfort termico in fasce, relative a specifiche condizioni

Metodo della Percentuale all'esterno dell'intervallo

Secondo le specifiche della normativa, questo metodo prevede il calcolo del numero o della percentuale delle ore di occupazione (ovvero quando l'edificio è occupato) quando il PMV o le temperature operative (nel presente caso) si trovano al di fuori di un determinato intervallo.

In questa fase, in funzione dei dati acquisiti come output dalle simulazioni di Design Builder, sono stati costruiti i grafici che riportano la distribuzione dei valori di temperatura operativa interna, relazionata alla temperatura esterna media corrente ponderata, per ciascuna delle zone termiche precedentemente identificate.

Per una migliore comprensione, i dati delle zone termiche sono stati raggruppati in modo da rappresentare il piano di ubicazione, come illustrato nelle figure:

- Figura 5.6 – piano primo;
- Figura 5.7 – piano terzo;
- Figura 5.8 – piano quinto;
- Figura 5.9 – piano sesto.

Come si può osservare, generalmente la distribuzione dei valori delle zone termiche esposte a Sud è situata nella parte relativamente alta del grafico, mentre quelle esposte a Nord si trovano invece nella parte relativamente più bassa del grafico. La causa di questa diversificazione è naturalmente dovuta principalmente alla diversa esposizione all'irraggiamento solare. Inoltre, la scarsa tenuta dell'involucro edilizio opaco e trasparente incide significativamente sul comfort termico dell'ambiente interno.

I valori di temperatura operativa interna rappresentati nelle figure sono stati selezionati per rappresentare solamente le ore di occupazione (l'orario lavorativo considerato va dalle ore 8.00 alle ore 18.00) ed i giorni lavorativi (dal lunedì al venerdì) per tutto il periodo di free-floating che, si ricorda, è compreso fra il 16 aprile ed il 14 ottobre.

Successivamente sono state calcolate le percentuali dei valori di temperatura operativa interna contenute nelle diverse fasce di comfort termico, come indicato nella Figura 5.10, a cui è allegata la Tabella 5.3.

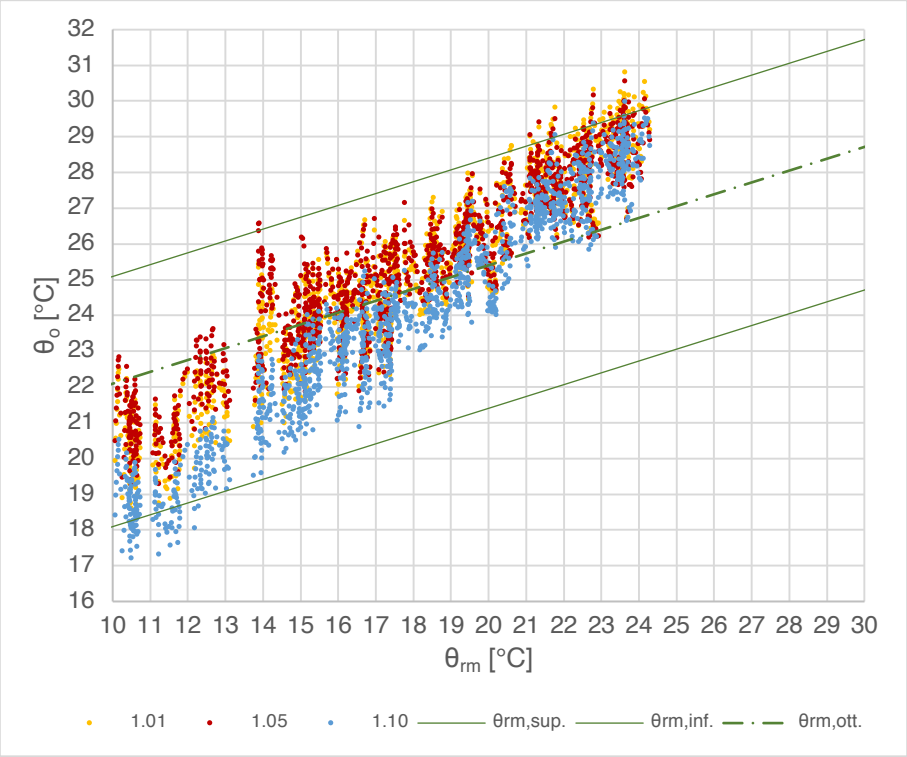


Figura 5.6. Distribuzione della temperatura operativa interna simulata – Piano primo

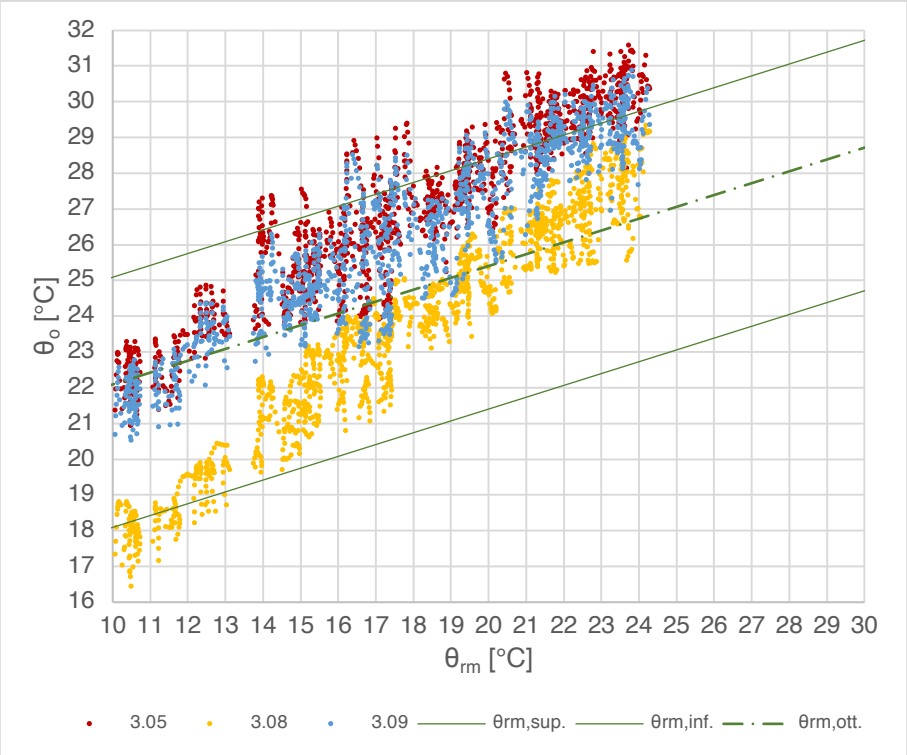


Figura 5.7. Distribuzione della temperatura operativa interna simulata – Piano terzo

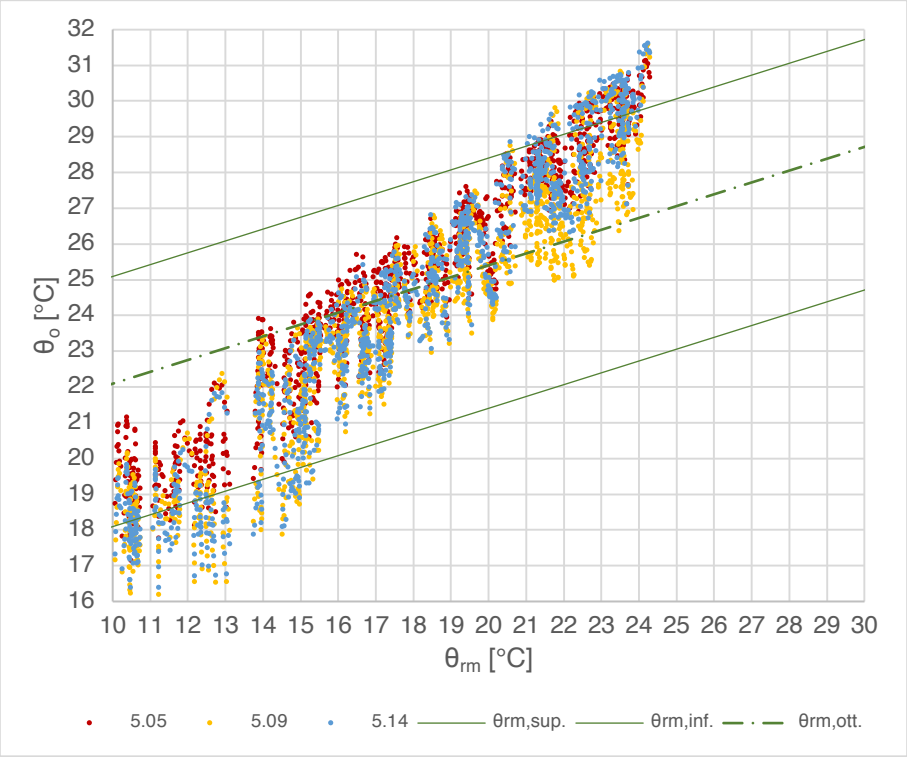


Figura 5.8. Distribuzione della temperatura operativa interna simulata – Piano quinto

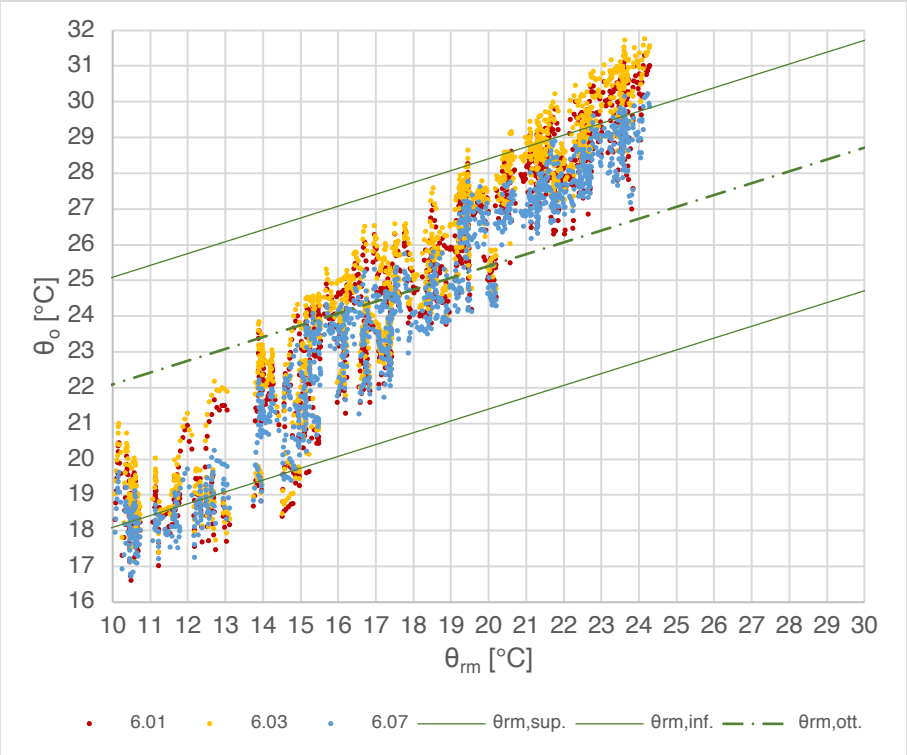


Figura 5.9. Distribuzione della temperatura operativa interna simulata – Piano sesto

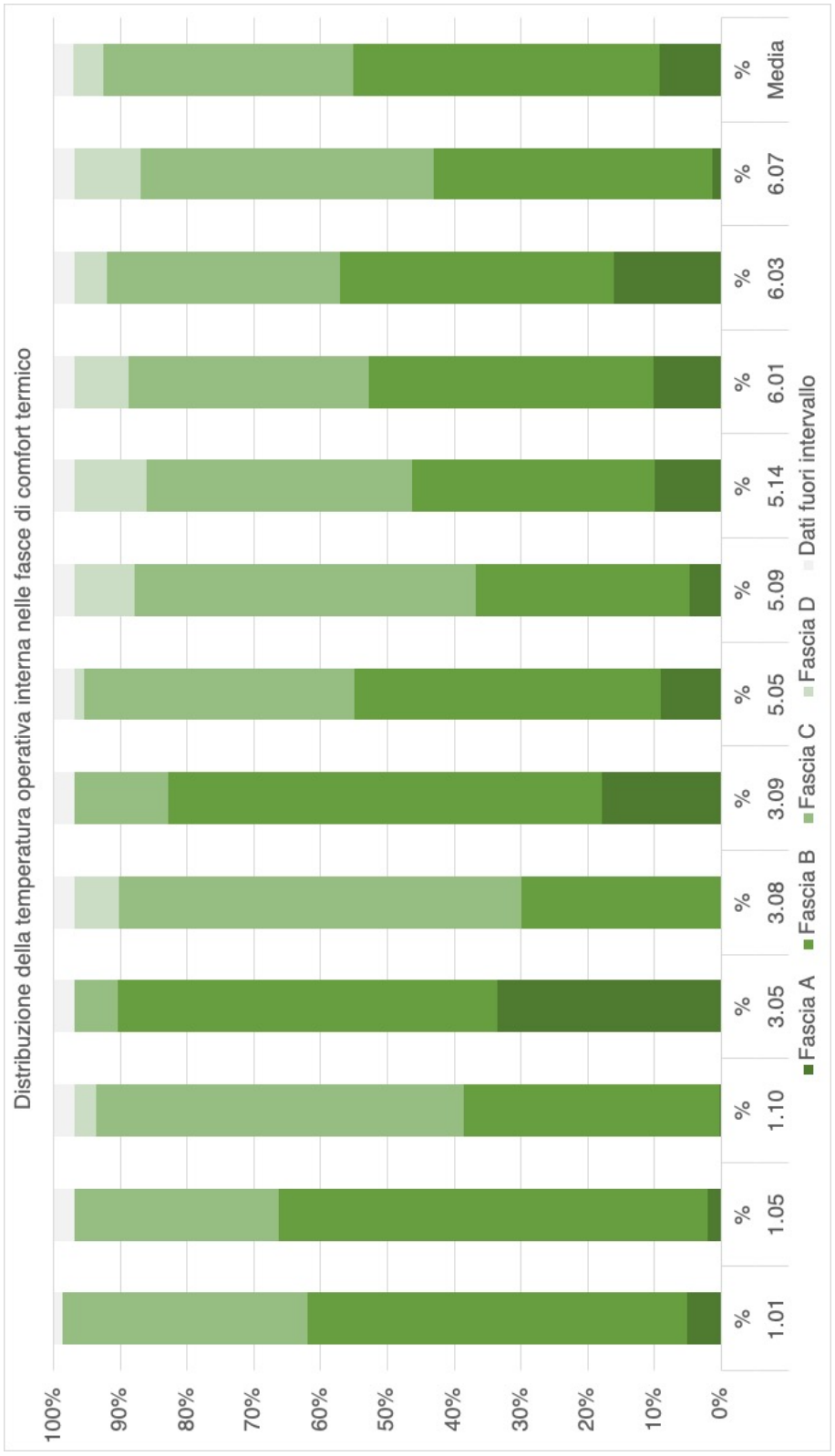


Figura 5.10. Distribuzione del numero di ore del periodo di occupazione in cui la temperatura operativa interna si trova all'interno o all'esterno delle fasce di comfort termico

Tabella 5.3. Percentuale del numero di ore del periodo di occupazione in cui la temperatura operativa interna si trova all'interno o all'esterno delle fasce di comfort termico

	1.01 [%]	1.05 [%]	1.10 [%]	3.05 [%]	3.08 [%]	3.09 [%]	5.05 [%]	5.09 [%]	5.14 [%]	6.01 [%]	6.03 [%]	6.07 [%]	Media [%]
Fascia A	5,18	2,10	0,21	33,57	0,00	17,83	9,02	4,69	10,00	10,14	16,08	1,33	9,18
Fascia B	56,78	64,13	38,46	56,85	29,93	65,10	45,94	32,03	36,29	42,73	41,05	41,75	45,92
Fascia C	36,64	30,70	55,03	6,50	60,35	13,99	40,49	51,12	39,79	35,87	34,97	43,85	37,44
Fascia D	0,00	0,00	3,22	0,00	6,64	0,00	1,47	9,09	10,84	8,18	4,83	10,00	4,52
Dati fuori intervallo	1,39	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	2,94
Trm >10°C	98,61	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	97,06

Come si osserva in figura, ci sono dei picchi dei valori presenti nella Fascia A (al di sopra del limite superiore di temperatura operativa) relativi alle zone termiche esposte a Sud e una percentuale dei valori più bassa per le zone esposte a Nord. In tutti casi c'è una prevalenza di presenza dei dati nelle Fasce B e C: insieme formano l'intervallo di comfort termico (limite superiore ed inferiore di temperatura operativa), entro cui sono presenti la maggior parte dei dati. Una percentuale irrisoria dei dati è presente nella Fascia D (al di sotto del limite inferiore di temperatura operativa), che si verifica specialmente al quinto e sesto piano.

È stato infine possibile la predisposizione di una grafica, illustrata in Figura 5.11, sulla base dei risultati calcolati e rispettando le indicazioni riportate nell'Appendice G del Rapporto Tecnico della norma FprEN 16798. I valori sono stati ponderati sulla base dei dati compresi nell'intervallo di θ_{rm} specificato, ed è basato sul valore medio dei dati di ciascuna zona termica selezionata.

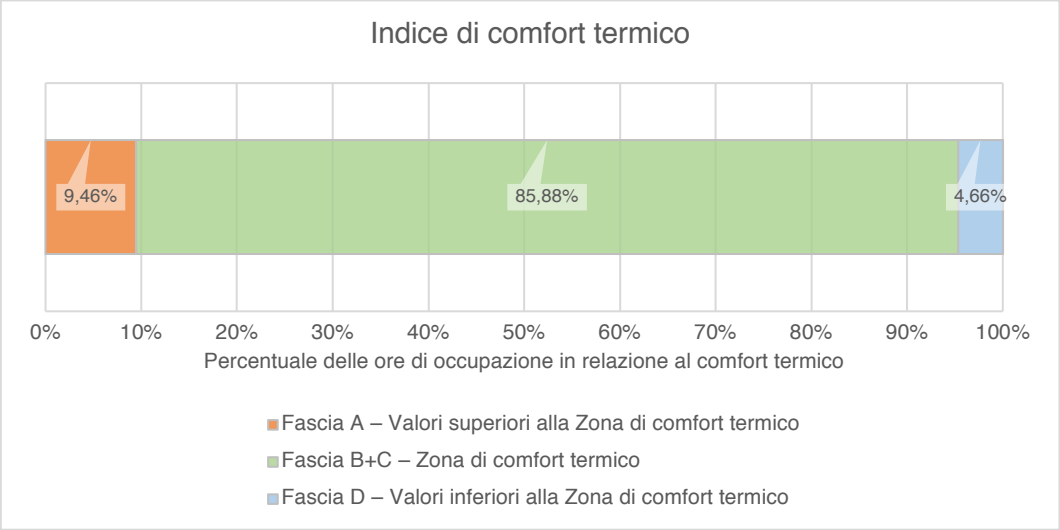


Figura 5.11. Indice di comfort termico medio

L'intervento migliorativo che seguirà dovrà essere in grado di ridurre le divergenze fra le diverse zone, portandole il più possibile nella zona di comfort termico

5.3. Indici di qualità dell'aria

In questa fase è necessario determinare se la concentrazione degli agenti inquinanti dell'aria rimane entro la soglia stabilita dalla norma tecnica (FprEN 16798-1) per la relativa categoria di qualità dell'ambiente indoor, e se la ventilazione naturale (infiltrazioni e apertura delle finestre) riesce a diluire efficacemente l'aria interna, portando i livelli di inquinanti eventualmente al di sotto del limite imposto.

A differenza del comfort termico, in questo caso si è ritenuto necessario valutare i dati ottenuti con la simulazione dinamica non più riferiti solamente al periodo di occupazione, ma anche a quello in cui l'edificio non viene occupato. Dall'osservazione dei dati è emerso che anche nelle ore di inoccupazione dell'edificio vi è un andamento discontinuo, dovuto alla ventilazione naturale, in questo caso alla ventilazione per infiltrazione.

Per quanto riguarda le concentrazioni di inquinanti dell'ambiente indoor si è fatto riferimento al biossido di carbonio (CO_2). Questo perché rappresenta, a differenza degli altri contaminanti, si presenta in quantità maggiori e direttamente correlato agli occupanti dell'edificio in quanto viene generato dalla respirazione, e in parte dall'edificio stesso; tutte le altre tipologie, illustrati in maniera approfondita nel Capitolo 1.4, risultano essere in concentrazioni troppo basse ai fini del calcolo.

La simulazione della concentrazione di CO_2 presente nell'ambiente interno è possibile definirla in Design Builder utilizzando un programma operativo (già predisposto di default) definito al livello del Sito; essa è infatti strettamente legata alla concentrazione di CO_2 presente nell'ambiente esterno. Normalmente quest'ultima varia tra i 350 ed i 500 ppm[34], tuttavia nella simulazione è stato utilizzato un valore medio pari a 400 ppm. Anche in questo caso i risultati ottenuti sono in regime orario.

Per quanto riguarda la soglia di accettabilità, nella Tabella 1.10 vengono illustrati i limiti della concentrazione di CO_2 al di sopra di quella dell'ambiente esterno. Avendo assunto come categoria della qualità dell'ambiente interno la categoria II, si ha dunque un valore pari a 800 ppm. Inoltre, operando solamente nelle condizioni della ventilazione naturale, la concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno non potrà mai scendere al di sotto della soglia dell'ambiente esterno. Pertanto, il livello massimo di concentrazione da non superare è pari a 1200 ppm.

Nelle figure di seguito, dalla Figura 5.12 alla Figura 5.18, viene illustrata la concentrazione del biossido di carbonio (CO_2) nell'ambiente interno: essa rappresenta la media della concentrazione di ciascuna zona termica orientate rispettivamente a Nord e a Sud, ottenuta con la simulazione, e viene riportata graficamente per ciascun mese del periodo indicato. I grafici delle figure di seguito sono costituiti dalla concentrazione di CO_2 presente nella zona e dalla concentrazione limite; l'asse delle ascisse riporta le indicazioni giornaliere, riferite all'ora 00:00.

---

[34] Il ppm, o parti per milione, è un'unità di misura adimensionale ed è un metodo che viene utilizzato in campo scientifico per esprimere la concentrazione di una sostanza, quando i livelli sono estremamente bassi. Nelle soluzioni di fluidi i ppm si esprimono come 10^6 $vol_{(CO2)}/vol_{aria}$, e si ha:

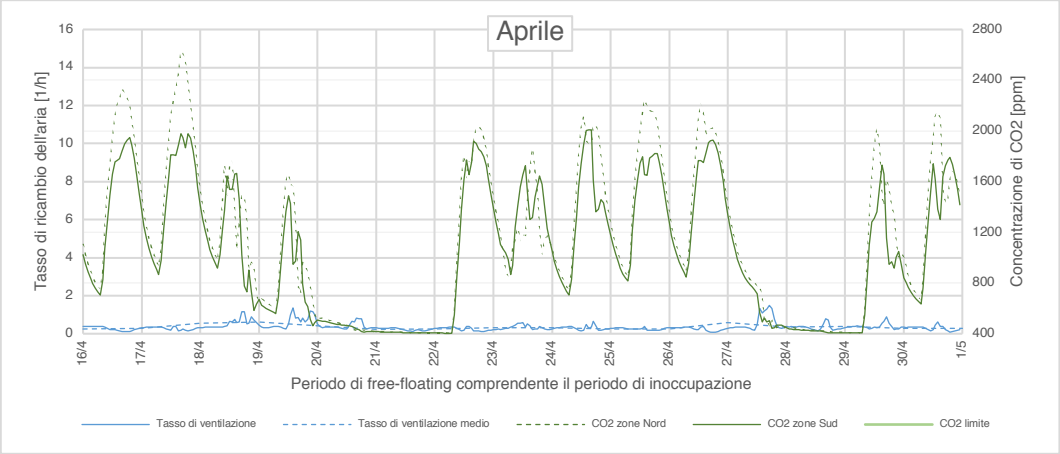


Figura 5.12. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Aprile

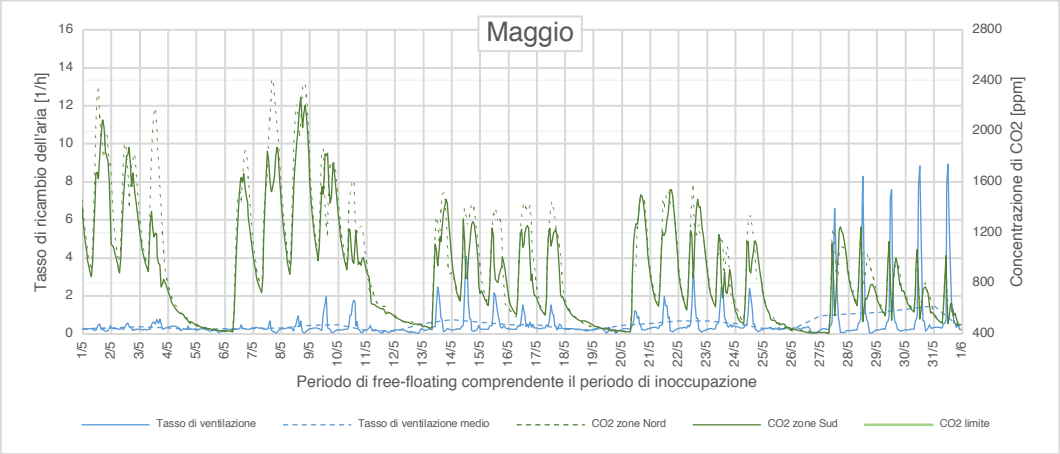


Figura 5.13. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Maggio

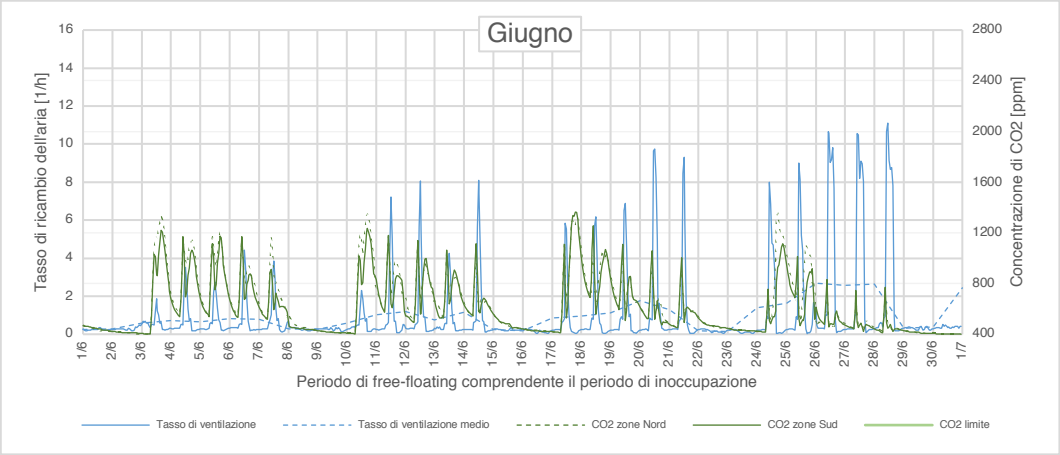


Figura 5.14. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Giugno

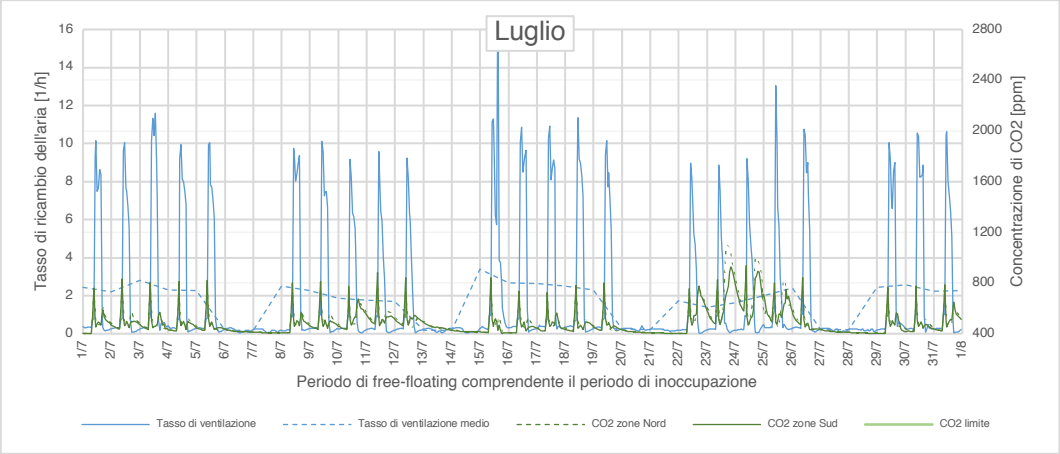


Figura 5.15.Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Luglio

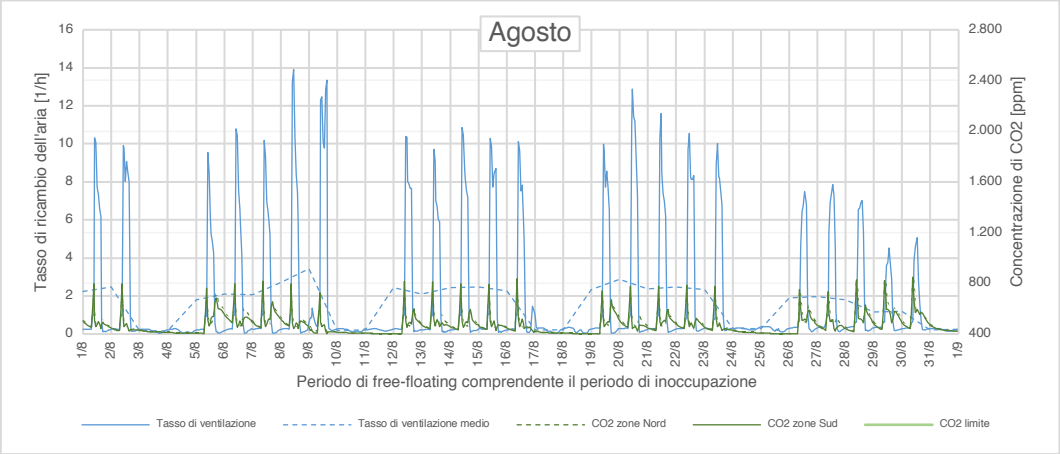


Figura 5.16. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Agosto

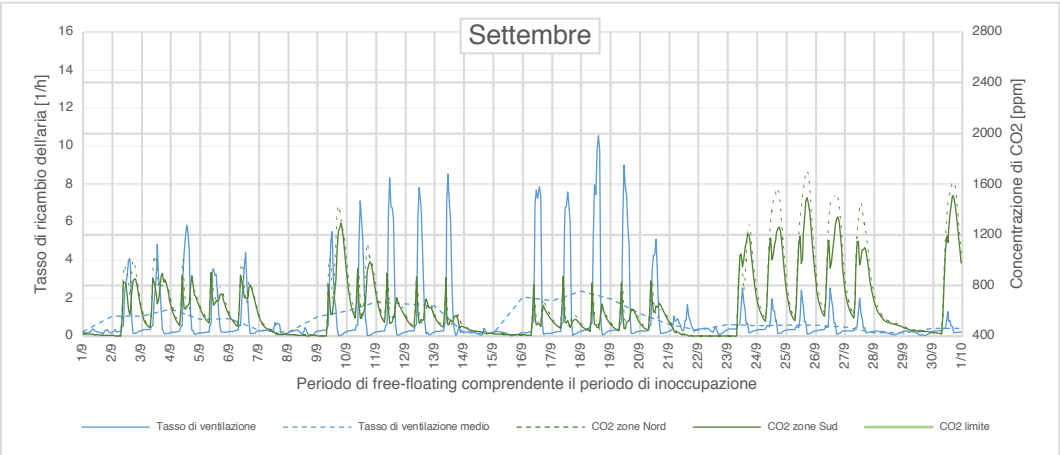


Figura 5.17. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Settembre

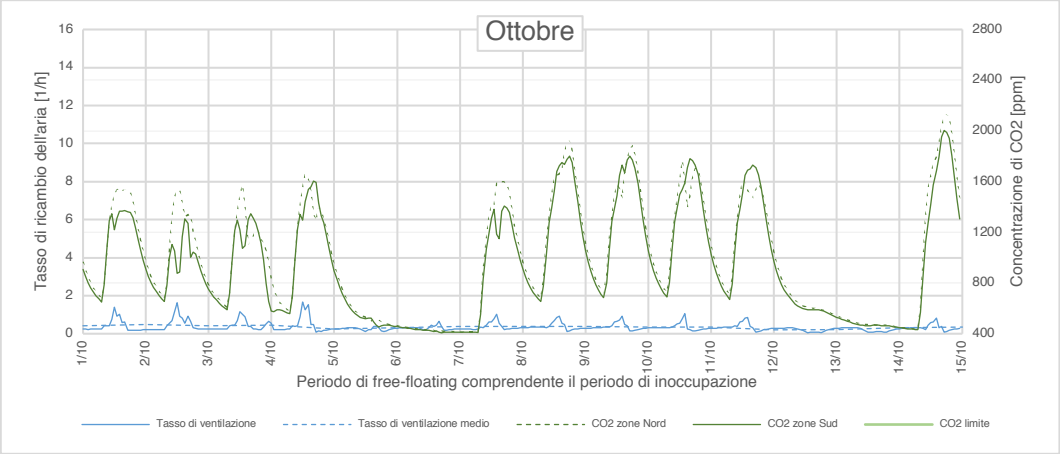


Figura 5.18. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Ottobre

Nella Tabella 5.4 sono indicati i valori di concentrazione media settimanale e mensile di CO_2 presente nell'ambiente interno, che dà il supporto analitico ai grafici nelle figure precedenti.

Tabella 5.4. Concentrazione di CO_2 media settimanale e mensile, in supporto ai grafici nelle figure

Mese	Settimana	Concentrazione media settimanale		Concentrazione media mensile	
		Nord [ppm]	Sud [ppm]	Nord [ppm]	Sud [ppm]
Aprile	16/04 – 19/04	1658	1426	1345	1200
	22/04 – 26/04	1650	1523		
Maggio	29/04 – 03/05	1646	1486	1075	978
	06/05 – 10/05	1680	1550		
	13/05 – 17/05	1245	1051		
	20/05 – 24/05	1171	1124		
	27/05 – 31/05	878	829		
Giugno	03/06 – 07/06	1017	932	689	657
	10/06 – 14/06	922	864		
	17/06 – 21/06	814	515		
	24/06 – 28/06	665	591		
Luglio	01/07 – 05/07	533	526	515	510
	08/07 – 12/07	544	546		
	15/07 – 19/07	517	509		
	22/07 – 26/07	663	618		
	29/07 – 02/08	525	529		
Agosto	05/08 – 09/08	544	548	503	499
	12/08 – 16/08	527	529		
	19/08 – 23/08	533	531		
	26/08 – 30/08	595	561		
Settembre	02/09 – 06/09	790	729	732	678
	09/09 – 13/09	763	690		
	16/09 – 20/09	585	566		
	23/09 – 27/09	1250	1089		
Ottobre	30/09 – 04/10	1309	1169	1154	1098
	07/10 – 11/10	1463	1406		

La concentrazione di CO_2 presente nell'ambiente tende ad assumere valori oltre la soglia nei mesi delle stagioni intermedie (primavera e autunno), mentre rimane entro la soglia per tutto il periodo estivo. Vi sono inoltre alcuni picchi che toccano o superano la concentrazione di 2000 ppm, specialmente nel mese di aprile, inizio maggio e metà ottobre. La differenza di concentrazione è, generalmente, inversamente proporzionale alla ventilazione naturale: infatti, si hanno basse concentrazioni di CO_2 nei mesi estivi in quanto le finestre vengono aperte per un maggiore arco temporale rispetto alle stagioni intermedie. Vi è un'ulteriore differenza, seppure in misura molto modesta, fra le zone esposte a Nord e quelle a Sud: nella modellazione dei profili di utilizzo si è tenuto conto dell'orientamento delle zone termiche, come richiesto dal questionario stesso, in quanto l'utente agisce in maniera differente; un ulteriore conferma si ha con la Tabella 5.4.

Nei grafici si osserva che i valori relativamente più alti dell'andamento della concentrazione si ha durante i periodi di occupazione, mentre quelli relativamente più bassi nei periodi in cui l'edificio non viene occupato. Gli occupanti in questo caso sono la principale fonte di inquinamento.

Con la Tabella 5.5 si vuole indicare il valore in percentuale della concentrazione media relativa agli orari di riferimento rispetto alla totalità dei valori, in relazione a ciascun mese del periodo; si vuole conoscere, inoltre, in quale misura i dati ottenuti dalla simulazione rientrano nel limite normativo oppure lo superano in relazione sia all'orario di occupazione (08:00 – 18:00) sia a quello precedente all'occupazione (06:00 – 08:00), al fine di verificare lo stato della qualità dell'aria al momento dell'inizio dell'occupazione dell'edificio, e di una eventuale necessità di ventilazione dei locali per rientrare nei limiti stabiliti, così come richiesto dalla norma tecnica. In questo caso i limiti vengono rispettati, pertanto non vi è necessità di predisporre alcun programma di ventilazione nei momenti antecedenti all'occupazione dei locali. Nella Figura 5.19 vengono rappresentati i risultati in maniera grafica.

Tabella 5.5. Caratteristiche della concentrazione di CO2 nell'ambiente interno per ciascun mese del periodo di free-floating

Mese	Soglia di concentrazione [ppm]	Orario di riferimento[1] 06:00 – 08:00	08:00 – 18:00
Aprile	< 1200	8,31%	15,51%
	> 1200	0,00%	2,77%
Maggio	< 1200	8,32%	23,09%
	> 1200	0,00%	6,31%
Giugno	< 1200	8,32%	39,81%
	> 1200	0,00%	0,83%
Luglio	< 1200	8,32%	41,61%
	> 1200	0,00%	0,00%
Agosto	< 1200	8,32%	41,61%
	> 1200	0,00%	0,00%
Settembre	< 1200	8,32%	36,20%
	> 1200	0,00%	3,19%
Ottobre	< 1200	8,31%	18,10%
	> 1200	0,00%	3,56%

[1] È riferito all'orario di occupazione dell'edificio e a quello precedente all'occupazione, trascurando tutti i dati relativi al periodo di inoccupazione dello stabile.

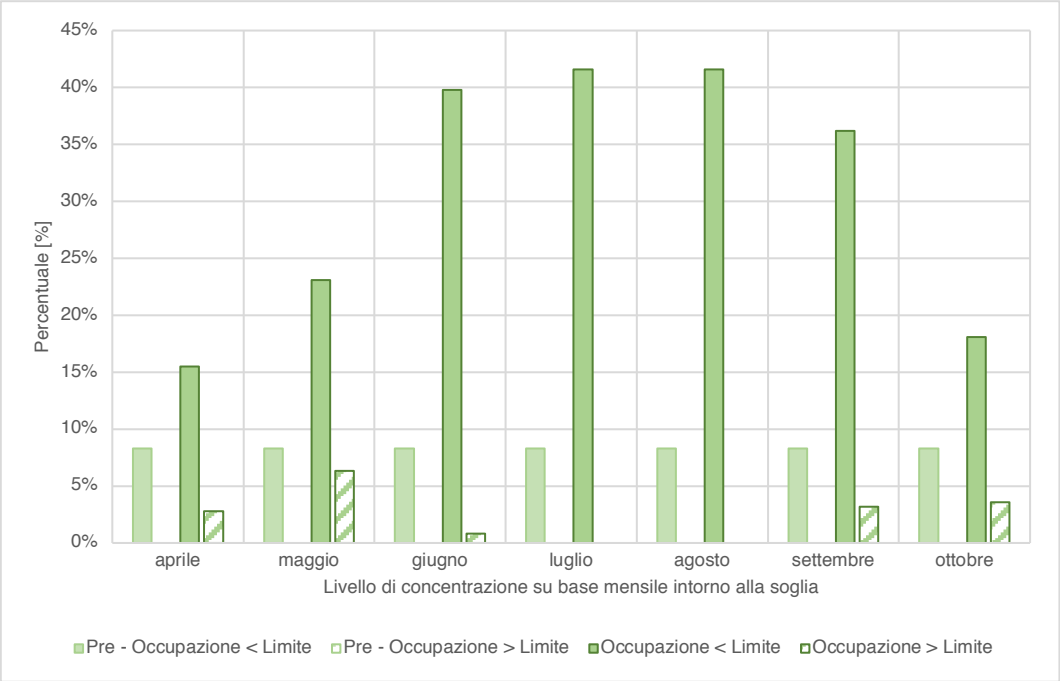


Figura 5.19. Caratteristiche della concentrazione di CO2 nell'ambiente interno per ciascun mese del periodo di free-floating

Nella Figura 5.20 vi è invece la distribuzione della concentrazione di CO_2 correlata al tasso di ricambio d'aria medio per tutte le zone termiche, per tutto il periodo considerato, al fine di avere una visione d'insieme.

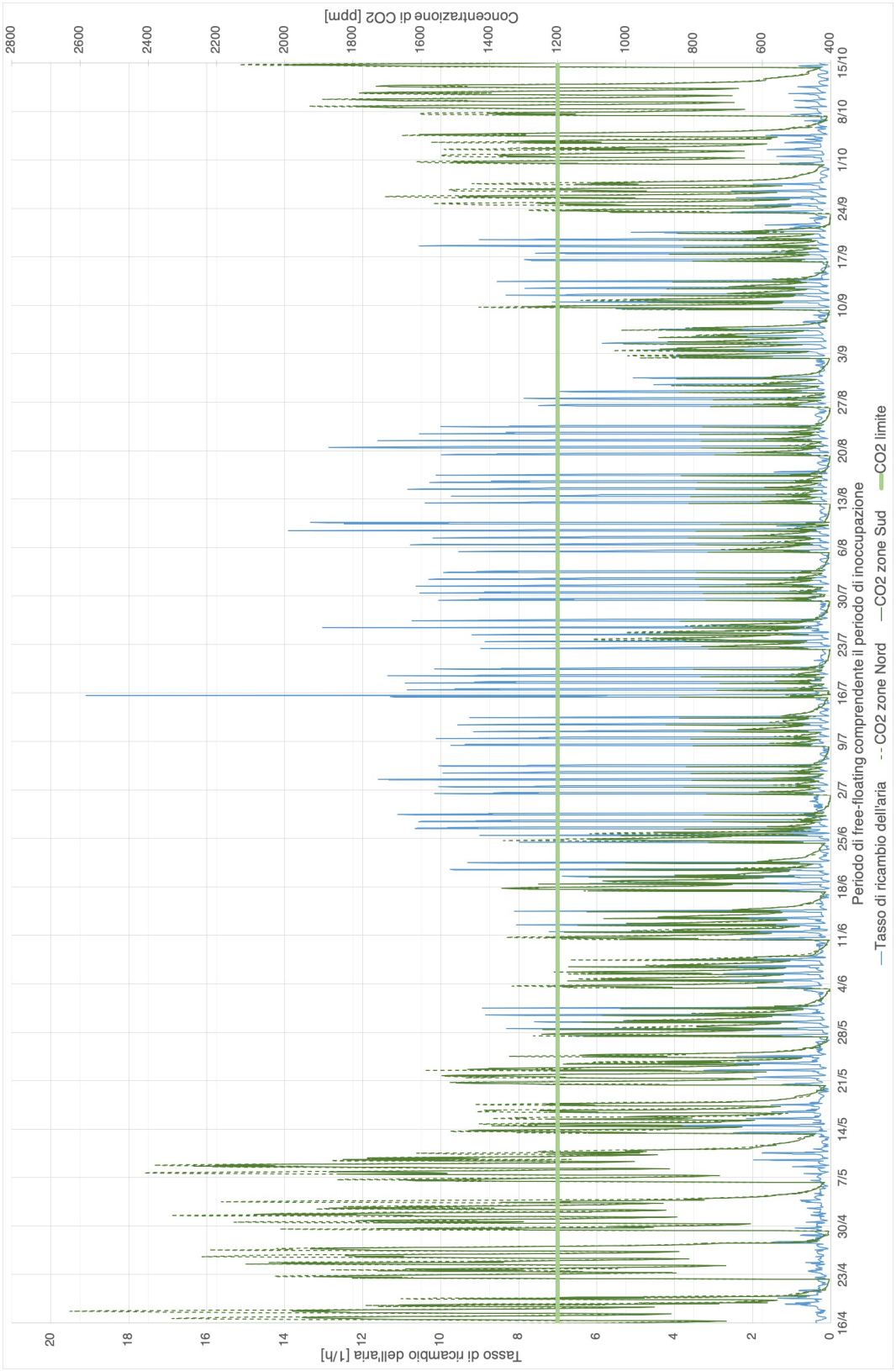


Figura 5.20. Andamento della concentrazione della CO_2 nell'ambiente indoor nel periodo free-floating

La norma FprEN 16798-1 contiene un'equazione che permette di calcolare la portata di aria esterna necessaria affinché si mantenga una concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno non superiore a quanto specificato nella norma stessa: in questo caso, però, la relazione verrà utilizzata per calcolare la portata di aria esterna necessaria a portare entro il limite soglia la concentrazione di inquinanti.

$$Q_{\mathrm{h}} = \frac{G_{\mathrm{h}}}{C_{\mathrm{h,i}} - C_{\mathrm{h,o}}} \bullet \frac{1}{\varepsilon_v}$$

dove

Q_h è il tasso di ventilazione richiesto per la diluizione, in [m³/s]
G_h è il tasso di generazione di CO_2 per persona, in [l/s]
$C_{h,i}$ è la concentrazione di CO_2 presente nell'ambiente interno, in [ppm], [l_{CO2}/l_{aria}]
$C_{h,o}$ è la concentrazione di CO_2 presente nell'ambiente esterno, in [ppm], [l_{CO2}/l_{aria}]
ε_v è l'efficienza della ventilazione; vale 1 nel caso della distribuzione mista dell'aria

Questo un è metodo semplificato che si può applicare alla ventilazione naturale, tuttavia è utile a comprendere il meccanismo del rapporto fra il tasso di ventilazione e la concentrazione di inquinanti. Infatti, è possibile determinare la differenza di concentrazione conoscendo i tassi di ricambio dell'aria: a un basso valore di Q_h corrisponde un alto valore della concentrazione di CO_2 nell'ambiente, e viceversa. Il tasso di generazione di CO_2 dipende dal tipo di attività svolta (nel presente caso si ha un'attività sedentaria, pari 1,2 [met]), ed è possibile definirlo per via analitica, utilizzando i prospetti della norma di riferimento per la presente.

Nella Figura 5.21 vengono illustrati i tassi di ventilazione aggiuntivi necessari per la diluizione dei contaminanti dell'aria e portare in questo modo la concentrazione al di sotto del valore soglia.

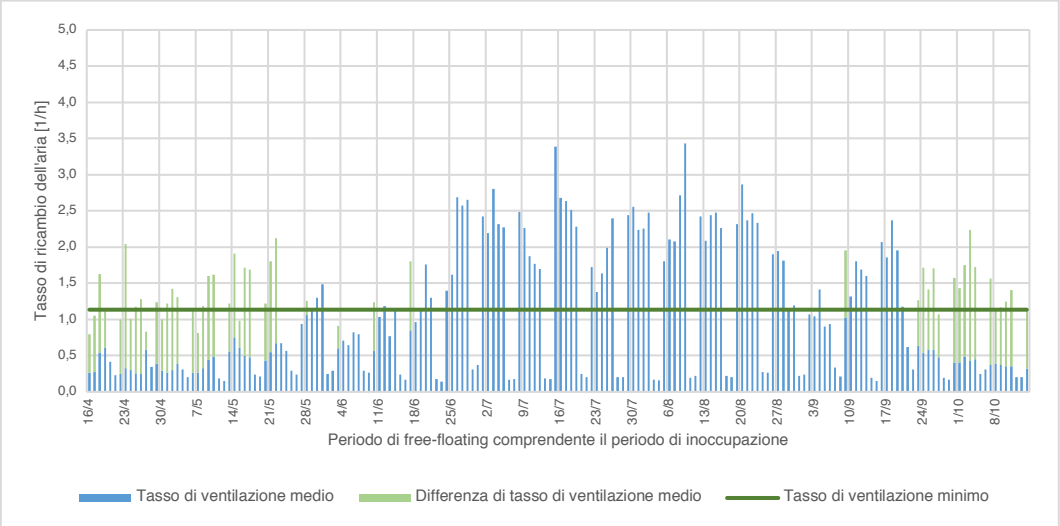


Figura 5.21. Tassi di ventilazione medi e minimi, e differenza necessaria per la diluizione della concentrazione di CO_2 entro il limite stabilito dalla norma

Si nota, inoltre, che in alcuni casi, incluso il tasso di ventilazione aggiuntivo, non viene rispettato il requisito minimo di ventilazione.

Prendendo in esame uno dei giorni più critici del periodo di free-floating, come ad esempio il giorno 21 maggio, si possono verificare in maniera dettagliata le caratteristiche della ventilazione. La criticità riguarda, come accennato in precedenza, l'aerazione dei locali tramite apertura delle finestre non adeguata, come accade generalmente nelle stagioni intermedie. Vengono quindi riportati i dati relativi all'occupazione, di cui si considera il numero di occupanti come la media degli stessi presenti nelle zone selezionate a campione, il tasso di ventilazione derivante dalla simulazione e la concentrazione di CO_2, e infine il tasso di ventilazione aggiuntivo per la diluizione. I dati sono riferiti a ciascuna delle 24 ore del giorno esaminato.

Tabella 5.6. Caratteristiche della ventilazione media delle zone di riferimento nel giorno 21 maggio

Ora	Numero occupanti[1] [–]	Tasso di ventilazione [h^{-1}]	Concentrazione CO_2 [ppm]	Tasso di ventilazione aggiuntivo per la diluizione [h^{-1}]
00:00	0	0,28	416	0,00
01:00	0	0,30	416	0,00
02:00	0	0,31	415	0,00
03:00	0	0,32	414	0,00
04:00	0	0,32	414	0,00
05:00	0	0,33	413	0,00
06:00	0	0,34	412	0,00
07:00	0	0,35	412	0,00
08:00	1,75	0,34	411	0,00
09:00	1,75	0,29	410	0,00
10:00	1,75	0,20	410	0,00
11:00	1,75	0,14	410	0,00
12:00	1,75	0,18	409	0,00
13:00	1,75	0,39	409	0,00
14:00	1,10	0,38	409	0,00
15:00	0,84	0,29	409	0,00
16:00	0,84	0,14	408	0,00
17:00	0	0,15	408	0,00
18:00	0	0,13	407	0,00
19:00	0	0,11	407	0,00
20:00	0	0,11	407	0,00
21:00	0	0,13	406	0,00
22:00	0	0,17	406	0,00
23:00	0	0,19	406	0,00

[1] Viene calcolato come la media del numero degli occupanti presenti nelle zone termiche selezionate, moltiplicato per il fattore di occupazione, come indicato in Tabella 4.12

Successivamente si passa al calcolo del tasso di ventilazione medio nelle ore di occupazione e in quelle di non occupazione. In questo caso non è necessario un tasso di ventilazione aggiuntivo per diluire i contaminanti dell'ambiente interno, pertanto non verrà considerato in questo ragionamento.

Il tasso di ventilazione ottenuto con la simulazione dovrà essere confrontato con il requisito minimo, calcolato in funzione del numero di occupanti e dell'area dei locali (se considera anche in questo caso un valore medio delle zone considerate), come illustrato nella relazione:

$$q_{\mathrm{tot}} = n \bullet q_{\mathrm{p}} + A_{\mathrm{R}} \bullet q_{\mathrm{B}}$$

dove

q_{tot} è il tasso di ventilazione totale, in [l/s]
n è il numero di persone presenti nella zona, in [–]
q_p è il tasso di ventilazione per l'occupazione, in [l/s,persona]
A_R è l'area di pavimento, in [m^2]
q_B è il tasso di ventilazione per le emissioni dovute all'edificio, in [l/s,m^2]

Nella Tabella 5.7 vengono illustrati i risultati così ottenuti.

Tabella 5.7. Verifica del tasso di ventilazione nel giorno 21 maggio

Periodo	Numero occupanti[1] [–]	Tasso di ventilazione [h^{-1}]	Tasso di ventilazione minimo[1] [h^{-1}]	Verifica
Occupazione 08:00 – 17:00	1,47	0,26	1,37	NON Verificato
Non-Occupazione 17:00 – 08:00	0,00	0,24	0,18	Verificato
Media giornaliera	0,55	0,25	0,71	NON Verificato

[1] $q_{p,cat.II}$ = 7 [l/s,persona]
$q_{B,cat.\ II,occ.}$ = 0,7 [l/s,m^2]
$q_{B,cat.\ II,N.occ.}$ = 0,15 [l/s,m^2]

Nel caso specifico, nelle ore di occupazione il tasso di ventilazione non rientra nei criteri minimi imposti dalla norma, tuttavia nelle ore in cui l'edificio non è occupato il requisito viene rispettato. In questi casi aumentare la frequenza di apertura delle finestre nei mesi delle stagioni intermedie, dove le temperature dell'aria esterna non sono generalmente molto alte, può portare sì a una qualità dell'aria migliore, a discapito tuttavia del comfort termico. Una soluzione in grado di soddisfare entrambi i requisiti potrebbe essere l'introduzione di un sistema di ventilazione meccanica.

5.4. Indici di comfort visivo

Nella definizione dell'indice di comfort visivo si fa riferimento alle due distinte tipologie di illuminazione: naturale e artificiale. Nel caso dell'illuminazione naturale, si procede con la determinazione del fattore di luce diurna seguendo le procedure indicate nella norma tecnica e nel rapporto tecnico UNI EN 15193[35], rispettivamente Parti 1 e 2. Per quanto riguarda l'illuminazione artificiale, si procede con la verifica del livello di illuminamento medio mantenuto così come specificato nella norma europea UNI EN 12464-1; per ciò verrà utilizzato Dialux. Le aree di valutazione (zone termiche) di riferimento su cui vengono eseguiti i calcoli sono indicate in Tabella 5.2.

Illuminazione naturale

Il calcolo del fattore di luce diurna permette di calcolare l'effetto della luce diurna sull'energia di illuminazione della domanda di energia su base mensile e annuale; in questo caso i dati che si ottengono non saranno più calcolati in regime orario ma mensile e/o annuale; non vi è disponibilità di dati orari attendibili. In particolare, tale procedura viene descritta in maniera approfondita nell'appendice F della norma tecnica.

Le parti illuminate dalla luce diurna sono determinate in funzione dei parametri pertinenti del locale e della facciata. Le aree di valutazione, illuminate dalla luce diurna, devono essere suddivise nell'area illuminata a giorno ($A_{D,j}$) e quella non illuminata a giorno ($A_{ND,j}$). L'area illuminata dalla luce diurna è data dal prodotto fra la profondità dell'area della luce diurna a_D, che deriva dalla differenza di altezza dell'architrave h_{LI} e l'area del compito h_{Ta}, e la larghezza dell'area omonima b_D, come nelle seguenti relazioni:

$$A_{D,j} = a_{D,max} \bullet b_D, \qquad a_{D,max} = 2{,}5 \bullet (h_{Li} \bullet h_{Ta})$$

dove

$A_{D,j}$ è l'area illuminata dalla luce diurna che entra attraverso una facciata, in [m²]

$a_{D,max}$ è la profondità dell'area della luce diurna, in [m]

b_D è la larghezza dell'area della luce diurna (larghezza della sezione della facciata che contiene le finestre sommata alla metà della profondità massima dell'area della luce diurna), in [m]

h_{Li} è l'altezza dell'architrave della finestra dal pavimento, in [m]

h_{Ta} è l'altezza dell'area del compito dal pavimento, in [m]

Nella procedura semplificata, la larghezza dell'area illuminata dalla luce diurna b_D viene considerata come la somma della larghezza della finestra e una striscia marginale ai lati della finestra stessa pari ad un quarto della profondità dell'area della luce diurna per ciascun lato. Tuttavia, in generale come valore della larghezza dell'area della luce diurna è stata

[35] La norma specifica la metodologia per la valutazione della prestazione energetica dei sistemi di illuminazione per l'illuminazione generale in edifici residenziali e non residenziali e per il calcolo o la misurazione della quantità di energia richiesta o utilizzata per l'illuminazione negli edifici.

considerata la larghezza della facciata sulla superficie interna dell'area in esame (relativa alla singola area di valutazione) in quanto minore della larghezza dell'area della luce diurna calcolata secondo la procedura semplificata.

Nel Rapporto Tecnico viene introdotta una regola di inclusione, al fine di evitare aree sproporzionatamente piccole senza disponibilità della luce diurna: se la restante parte dell'area di valutazione ha una profondità fino al 25% della profondità dell'area della luce diurna a_D essa verrà aggiunta all'area che riceve la luce diurna. Ad esempio, se un locale ha una profondità pari a 5 metri e una profondità dell'area della luce diurna calcolata pari a 4 metri, l'area della luce diurna può essere estesa fino alla parete posteriore.

Definendo la profondità e la larghezza dell'area della luce diurna in questo modo, le disposizioni degli spazi possono essere considerate come completamente fornite di luce diurna. Nella Tabella 5.8 vengono indicati calcolati.

Tabella 5.8. Segmentazione dell'edificio – spazi che beneficiano dalla luce diurna

Zona	Orient.[1]	Area pav. [m²]	$a_{D,max}$ [m]	b_D [m]	A_D [m²]	A_{ND} [m²]
1.01	S	16,58	4,00	3,93	16,58	0,00
1.05	S	17,20	4,00	4,07	17,20	0,00
1.10	N	16,18	4,00	3,88	16,18	0,00
3.05	S	15,99	4,00	3,79	15,99	0,00
3.08[2]	S	84,90	4,00	7,83	74,00	10,90
	E		4,00	3,10		
	N		4,00	7,83		
3.09	N	17,65	4,00	3,78	17,65	0,00
5.05	S	17,20	4,00	4,07	17,20	0,00
5.09	S	16,37	4,00	3,88	16,37	0,00
5.14	N	15,13	4,00	3,63	15,13	0,00
6.01[2]	O	39,30	4,00	8,07	39,30	0,00
	S		4,00	3,10		
6.03	S	12,82	4,00	4,05	12,82	0,00
6.07	N	11,66	4,00	3,28	11,66	0,00

[1] In senso antiorario

[2] Nel calcolo dell'area della luce diurna totale si considera il valore netto delle aree sovrapposte

Successivamente si procede con la classificazione del fattore di luce diurna $D_{Ca,j}$, utilizzando un approccio analitico semplificato. La quantità di luce diurna disponibile in un'area in corso di valutazione dipende dall'indice di trasparenza ($I_{Tr,j}$), dall'indice di profondità dello spazio ($I_{RD,j}$) e dall'indice di schermatura ($I_{Sh,j}$). l'indice di trasparenza descrive la relazione tra l'area dell'apertura senza telaio della finestra dell'edificio e la rispettiva area della luce diurna. L'indice di profondità del locale correla la profondità dell'area con la differenza tra l'altezza dell'architrave e l'altezza del piano di lavoro; essendo abbinato alla creazione di aree che

ricevono la luce diurna, i suoi valori non possono essere maggiori di 2,5: valori più elevati producono fattori di luce diurna più piccoli in confronto a bassi indici di profondità, in quanto l'asse di controllo (metà della profondità dell'area) si allontana ulteriormente dalla facciata. L'indice di schermatura tiene conto della riduzione del flusso luminoso che entra attraverso la facciata a causa di: ostruzioni lineari, sporgenze orizzontali e verticali, cortili e atri interni e doppie facciate in vetratura. Di seguito vi sono le equazioni dei tre indici:

$$I_{\mathrm{Tr,j}} = \frac{A_{\mathrm{Ca}}}{A_{\mathrm{D}}}, \qquad I_{\mathrm{RD,j}} = \frac{a_{\mathrm{D}}}{h_{\mathrm{LI}} - h_{\mathrm{Ta}}}, \qquad I_{\mathrm{Sh,j}} = I_{\mathrm{Sh,lsh}} \bullet I_{\mathrm{Sh,hA}} \bullet I_{\mathrm{Sh,vA}} \bullet I_{\mathrm{Sh,In,At}} \bullet I_{\mathrm{Sh,GDF}}$$

dove:

A_{Ca} è l'area del foro grezzo dell'apertura della finestra senza telaio in corso di valutazione, in [m²]

A_{D} è l'area parziale che è illuminata dalla luce diurna, in [m²]

$I_{\mathrm{Sh,lsh}}$ è il fattore di correzione per l'ostruzione lineare dell'area in esame, in [–]

$I_{\mathrm{Sh,hA}}$ è il fattore di correzione per una schermatura sporgente dell'area in esame, in [–]

$I_{\mathrm{Sh,vA}}$ è il fattore di correzione per una schermatura laterale dell'area in esame, in [–]

$I_{\mathrm{Sh,In,At}}$ è il fattore di correzione per la schermatura del cortile interno e dall'atrio dell'area in esame, in [–]

$I_{\mathrm{Sh,GDF}}$ è il fattore di correzione per la doppia facciata in vetratura dell'area in esame, in [–]

Nella figura di seguito, la Figura 5.22 viene illustrato il disegno in forma schematica del serramento tipo presente nell'edificio, sia in pianta che in sezione.

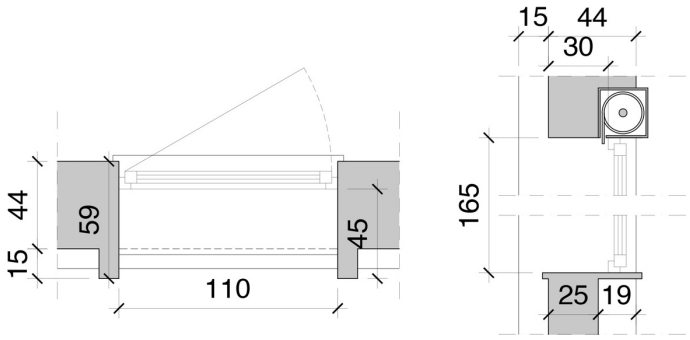


Figura 5.22. Rappresentazione schematica del serramento tipo (esistente) in pianta (a sinistra) e in sezione (a destra) – Fuori scala

Noti gli indici, si procede con il calcolo del valore approssimativo per il fattore di luce diurna dell'area valutata sulla base delle dimensioni dell'apertura grezza, secondo la relazione:

$$D_{\mathrm{Ca,j}} = \left(4{,}13 + 20 \bullet I_{\mathrm{Tr,j}} - 1{,}36 \bullet I_{\mathrm{RD,j}}\right) \bullet I_{\mathrm{Sh,j}} \ [\%]$$

Il metodo del fattore di luce diurna D_{Ca} è stato sviluppato prendendo in considerazione il modello di cielo coperto o uniforme CIE, a luminanza uniforme. Ciò significa che il fattore di luce diurna non è legata al tempo (ora del giorno, periodo dell'anno, ecc.), e che il rapporto tra illuminamento interno ed esterno è costante.

I valori degli indici e dei relativi parametri di calcolo sono illustrati nelle seguenti tabelle.

Tabella 5.9. Elementi per la classificazione della luce diurna

Zona	A_{ca} [m²]	A_D [m²]	a_D [m]	h_L [m]	h_{Ta} [m]	$I_{Sh,Ish}$ [–]	$I_{Sh,hA}$ [–]	$I_{Sh,vA}$ [–]	$I_{Sh,In,At}$ [–]	$I_{Sh,GDF}$ [–]
1.01	1,82	16,58	4,00	2,40	0,80	0,16	0,88	0,82	1,00	1,00
1.05	1,82	17,20	4,00	2,40	0,80	0,98	0,88	0,82	1,00	1,00
1.10	1,82	16,18	4,00	2,40	0,80	1,00	0,88	0,82	1,00	1,00
3.05	1,82	15,99	4,00	2,40	0,80	1,00	0,88	0,82	1,00	1,00
3.08	1,82	74,00	4,00	2,40	0,80	0,59	0,88	0,82	1,00	1,00
3.09	1,82	17,65	4,00	2,40	0,80	1,00	0,88	0,82	1,00	1,00
5.05	1,82	17,20	4,00	2,40	0,80	1,00	0,88	0,82	1,00	1,00
5.09	1,82	16,37	4,00	2,40	0,80	0,85	0,88	0,82	1,00	1,00
5.14	1,82	15,13	4,00	2,40	0,80	1,00	0,88	0,82	1,00	1,00
6.01	1,82	39,30	4,00	2,40	0,80	1,00	0,88	0,82	1,00	1,00
6.03	1,82	12,82	4,00	2,40	0,80	1,00	0,88	0,82	1,00	1,00
6.07	1,82	11,66	4,00	2,40	0,80	1,00	0,88	0,82	1,00	1,00

Tabella 5.10. Classificazione della disponibilità di luce diurna in funzione del fattore di luce diurna $D_{Ca,j}$

Zona	I_{tr} [–]	I_{RD} [–]	I_{Sh} [–]	D_{Ca} [%]	
1.01	0,22	2,50	0,10	0,60	
1.05	0,21	2,50	0,59	3,49	
1.10	0,22	2,50	0,60	3,75	
3.05	0,23	2,50	0,60	3,79	
3.08	0,22	2,50	0,36	2,19	
3.09	0,21	2,50	0,60	3,48	
5.05	0,21	2,50	0,60	3,56	
5.09	0,22	2,50	0,51	3,14	
5.14	0,24	2,50	0,60	3,97	
6.01	0,23	2,50	0,60	3,84	
6.03	0,28	2,50	0,60	4,60	
6.07	0,31	2,50	0,60	5,00	
$D_{Ca,j} \geq 6\%$		Forte			
$6\% > D_{Ca,j} \geq 4\%$		Medio			
$4\% > D_{Ca,j} \geq 2\%$		Basso			
$D_{Ca,j} < 2\%$		Nessuno			

Si può dunque affermare che le zone selezionate godono di un basso fattore di luce diurna, con qualche eccezione negativa. È necessario tenere presente che questo fattore tiene conto solamente delle caratteristiche geometriche dell'area di valutazione, e che comunque è stato un metodo semplificato. Tuttavia, ciò presuppone che gli utenti saranno più predisposti all'utilizzo dell'illuminazione artificiale.

Illuminazione artificiale

Il comfort visivo nei momenti in cui viene utilizzata l'illuminazione artificiale si verifica utilizzando come parametro l'illuminamento medio mantenuto ($\bar{E}_{\mathrm{m}}$) sul piano di lavoro, o compito visivo[36], e l'uniformità dell'illuminamento. Il risultato di questo di calcolo si può raggiungere mediante un calcolo manuale oppure utilizzando software di modellazione, quale Dialux [60].

Dialux è un software di calcolo e visualizzazione dei sistemi di illuminazione dell'ambiente interno, esterno e stradale; inoltre, è software è gratuito. In Dialux è possibile modellare l'edificio oggetto di studio, mediante una semplificazione della geometria del progetto, in modo da rappresentare al meglio il caso reale. La geometria dell'edificio si ottiene mediante il disegno del contorno/perimetro esterno (del piano), mentre gli ambienti interni si "ricavano" disegnandone in perimetro interno; in genere vengono modellati solamente gli elementi utili al calcolo illuminotecnico, comprese le aperture.

L'aspetto più importante del software è l'utilizzo di lampade e apparecchi luminosi, e dei vari accessori, forniti direttamente dal produttore: infatti è presente un diretto collegamento all'interno del programma con i cataloghi (siti online) dei principali produttori. Vi è dunque la possibilità di selezionare l'apparecchio luminoso più appropriato e importarne il modello fotometrico. Diversi produttori mettono a disposizione del progettista applicazioni plug-in da inserire nel software e avere dunque un collegamento diretto ai cataloghi della rispettiva casa produttrice.

Al termine della modellazione, geometrica ed illuminotecnica, il software è in grado di calcolare l'illuminamento, medio, minimo e massimo, sul piano considerato (area compito visivo, area di pavimento, punti specifici, ecc.) così come l'uniformità ed anche la luminanza. Il calcolo viene eseguito in regime stazionario, e l'output dei risultati viene sia in forma tabellare, sia in forma grafica. In quest'ultimo caso, l'area di calcolo viene rappresentata mediante isolinee, colori sfalsati (con l'uso di una scala dell'illuminamento) e/o sotto forma di griglia[37] numerica. Vi è inoltre la possibilità di rappresentazione dei risultati sia in forma bidimensionale che tridimensionale. I risultati vengono confrontati direttamente con la normativa in vigore, già presente all'interno del software: in questo modo è possibile intervenire sulle scelte progettuali in maniera tempestiva.

Nella procedura del calcolo dell'illuminamento medio mantenuto e dell'uniformità nelle zone selezionate, l'area del compito visivo è stata considerata posta ad un'altezza pari ad 80 cm e con una superficie pari all'area di pavimento a cui viene sottratta una fascia perimetrale larga 50 cm. Questa è una procedura convenzionale che viene normalmente impiegata quando non si conosce l'esatta posizione degli arredi (e quindi del compito visivo specifico); inoltre, in

---

[36] Come precisato all'inizio del Capitolo 1.4, per compito visivo si intende l'osservazione di dettagli e oggetti in relazione allo svolgimento di una determinata attività.

[37] La griglia deve seguire le indicazioni riportate nella UNI EN 12464-1.

questo modo con la progettazione dell'illuminazione si garantiscono i criteri stabiliti dalla norma in tutta la zona.

I risultati ottenuti sono da considerare molto attinenti alla realtà: durante la fase del rilievo non è stato possibile ottenere informazioni precise circa gli apparecchi luminosi, ma quelli utilizzati nella modellazione sono stati selezionati e rielaborati all'interno del software in modo da rappresentare al meglio il caso reale. I dati fotometrici della lampada sono stati ottenuti individuando il produttore, la potenza nominale e la temperatura di colore: dal catalogo online è stata selezionata la lampada più appropriata (del tipo fluorescente lineare), come indicato nella Tabella 5.11.

Nella Tabella 5.12 sono indicati i valori minimi, massimi e medi dell'illuminamento e dell'uniformità calcolati sul piano del compito visivo con il software Dialux.

Tabella 5.11. Caratteristiche della lampada utilizzata per rappresentare il caso esistente

Lampada tipo	OSRAM L36W/840				
P_n [W]	Φ_L [lm]	Tonalità [–]	Tcc [K]	Ra [%]	η_L [lm/W]
18	1350	840	4000	≥80	75

Tabella 5.12. Valori di illuminamento e uniformità sul piano del compito visivo

Zona	Illuminamento			Uniformità
	Minimo [lx]	Massimo [lx]	Medio [lx]	Min/medio [–]
1.01	344	558	461	0,75
1.05	333	543	450	0,74
1.10	352	569	471	0,75
3.05	355	574	477	0,74
3.08	97,2	434	317	0,31
3.09	330	539	437	0,76
5.05	334	540	449	0,74
5.09	349	563	466	0,75
5.14	367	588	489	0,75
6.01	222	425	331	0,67
6.03	221	385	311	0,71
6.07	48,5	417	341	0,14

I valori normativi di riferimento sono indicati nel Prospetto 5.26 della UNI EN 12464-1 (N° riferimento 5.26.2):
– $\bar{E}_m$: 500 [lx] – U_o: 0,60 [–]

Dai risultati ottenuti è evidente come i requisiti di illuminamento medio mantenuto sul piano di lavoro non sono raggiunti. La causa principale è legata al basso flusso luminoso della lampada, e di conseguenza del basso valore di rendimento luminoso. Per poter rientrare nei requisiti specificati dalla norma sarebbe necessario dotare gli apparecchi luminosi di lampade che abbiano un valore di flusso luminoso almeno il doppio di quello attualmente disponibile.

Nella Figura 5.23 sono indicati i risultati ottenuti con Dialux in forma grafica, con la relativa scala di illuminamento; le immagini sono fuori scala.

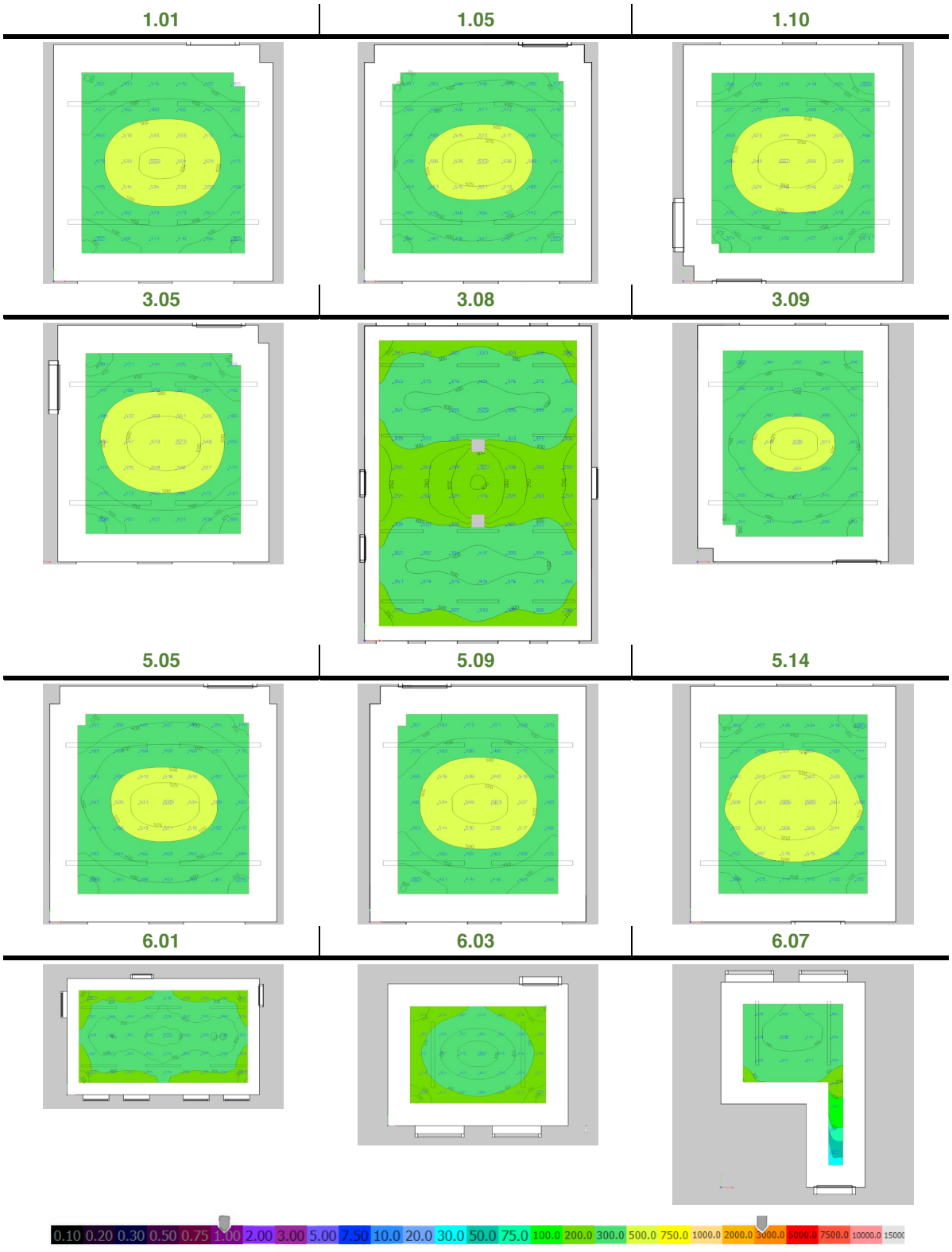


Figura 5.23. Risultati dei calcoli illuminotecnici in forma grafica – Fuori scala

PARTE 3 - PROGETTO

6. PROGETTO DI MIGLIORAMENTO DEL COMFORT

Informazioni generali

Il presente capitolo è dedicato alle scelte progettuali che possano migliorare il comfort dell'ambiente interno. Nelle pagine seguenti verranno individuati una serie di interventi necessari al raggiungimento dell'obiettivo prefissato. Per ciascun intervento viene indicata una soluzione: il criterio secondo cui sono selezionate rispetta appieno i requisiti minimi richiesti dal D.M. 26 giugno 2015[38]. Il Decreto, infatti, definisce "*le prescrizioni e i requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici e unità immobiliari*", e "*si applicano agli edifici pubblici e privati, siano essi di nuova costruzione o edifici esistenti sottoposti a ristrutturazione*" (Art. 1 e 2, [85]); pertanto esso, essendo riferimento normativo a livello nazionale, viene utilizzato come linea guida nella definizione delle soluzioni progettuali.

Prima di proseguire oltre, è necessario fare alcune considerazioni. Gli interventi progettuali che verranno individuati hanno come unico scopo il raggiungimento degli obiettivi della presente tesi, ovvero il comfort termico, la qualità dell'aria interna ed il comfort visivo. Essi sono del tutto svincolati da scelte di carattere compositivo-architettonico: data la natura ed il carattere architettonico dell'edificio oggetto di studio, esso meriterebbe uno studio più approfondito riguardo all'aspetto formale. Questa considerazione deriva dal fatto che l'entità degli interventi da attuare è tale da trasformare l'edificio in maniera considerevole: per esempio, solamente applicando un cappotto esterno all'involucro dell'edificio sarebbe necessario demolire tutti gli elementi della facciata in rilievo, quali le "lesene", gli elementi laterali delle finestre, nonché eventualmente la superficie in paramano, e così via; la fase successiva richiederebbe uno studio molto approfondito sull'aspetto formale che l'edificio dovrà assumere. Tutto ciò non rientra negli obiettivi della tesi.

Le ipotesi di intervento vengono effettuate in rispetto della normativa vigente: al netto delle tecnologie selezionate, è necessario garantire la conformità legislativa.

Gli ambiti su cui è incentrata la valutazione progettuale sono i seguenti:

- involucro opaco;
- involucro trasparente;
- schermature solari;
- impianto di ventilazione meccanica;
- impianto di illuminazione e regolazione.

---

[38] I parametri da rispettare sono quelli relativi all'edificio di riferimento, come riportato nell'Appendice A del Decreto. I valori di trasmittanza termica delle strutture opache verso l'esterno verticali, orizzontali o inclinate, delle strutture trasparenti e delle schermature da raggiungere sono riferiti alla fase temporale 2019/2021.

Come accennato, gli interventi dovranno rispettare i valori limite di ciascuna categoria contenuti nel D.M. 26 giugno 2015 "Requisiti minimi", come illustrato nella Tabella 6.1. I valori indicati sono relativi all'edificio di riferimento, con cui "*si intende un edificio identico in termini di geometria [...], orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso e situazione al contorno e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati [...]*" (Appendice A, [85]).

Tabella 6.1. Parametri dell'edificio di riferimento

Zona climatica	E	**Riferimento**	2019/2021[1]
Tipologia		Valore	Unità di misura
Strutture opache verticali verso l'esterno		0,26	[W/m²K]
Strutture opache orizzontali verso l'esterno		0,22	[W/m²K]
Chiusure tecniche trasparenti verso l'esterno		1,40	[W/m²K]
Cassonetti verso l'esterno		1,40	[W/m²K]
Fattore di trasmissione solare totale g_{gl+sh} per componenti finestrati con orientamento da Est a Ovest passando per Sud		0,35	[–]

[1] Dal 1° gennaio 2019 per tutti gli edifici pubblici e a uso pubblico e dal 1° gennaio 2021 per tutti gli altri edifici

6.1. Definizione degli interventi

Le analisi degli interventi per il miglioramento del comfort vengono effettuate mantenendo il profilo di utenza esistente. Ciò è motivato dal fatto che non è possibile conoscere come il comportamento dell'utente possa cambiare, ma si suppone che tendenzialmente possa rimanere in linea con quello reale [29].

Per poter raggiungere un livello di comfort termico più elevato, rispetto a quello calcolato per la situazione esistente, è necessario intervenire sull'involucro dell'edificio. I componenti opachi (le pareti verso l'ambiente esterno e la copertura piana) presentano una trasmittanza termica dell'intero pacchetto molto al di sopra del limite legislativo. Agendo sulla diminuzione della trasmittanza, e in questo modo rientrare nei parametri normativi, si aumenta il livello di isolamento globale dell'edificio e di conseguenza si avrà un minore scambio di energia tra l'ambiente interno e quello esterno. Le stesse considerazioni valgono per i componenti trasparenti: seppure i serramenti esistenti (per i piani fuori terra) presentino già la tecnologia a doppiovetro, oggigiorno la tecnologia dei serramenti si è evoluta mettendo alla disposizione del mercato soluzioni più prestazionali; altrettanto importante è l'isolamento dei cassonetti. Inoltre, per poter ridurre gli apporti termici dovuti all'irraggiamento solare, specialmente nei mesi estivi, è necessario dotare le aperture orientate ad Est, Sud ed Ovest di schermature solari, preferibilmente mobili.

Per quanto riguarda la qualità dell'aria è necessario ridurre le concentrazioni di CO_2, specialmente nelle stagioni intermedie. In questo caso modificare il profilo di utilizzo delle aperture non è fattibile: nelle suddette stagioni la temperatura dell'ambiente esterno non è particolarmente alta per cui aumentare la ventilazione mediante l'apertura delle finestre può portare sì a una riduzione della concentrazione di inquinanti, tuttavia genera un discomfort termico in quanto viene introdotta dell'aria esterna a temperatura più bassa di quella dell'ambiente interno per un periodo più lungo rispetto alla situazione reale. Pertanto, l'installazione di un impianto di ventilazione meccanica controllata (VMC) è una buona soluzione per garantire la qualità dell'aria e mantenere così il comfort termico.

Infine, il comfort visivo sul piano di lavoro può essere raggiunto mediante l'installazione di apparecchi luminosi in grado di generare un flusso luminoso maggiore rispetto a quelle già installate, e garantire così l'illuminamento medio. Inoltre, cambiare tipologia di apparecchi luminosi, ovvero passando dalla tipologia fluorescente (lineare) a quella a LED, comporta anche una riduzione dei consumi di energia elettrica grazie al maggiore rendimento luminoso, e quindi anche una riduzione degli apporti termici dovuti proprio all'illuminazione artificiale. Aggiungendo un sistema di controllo e di gestione automatizzato in funzione della presenza degli occupanti all'interno dell'ambiente e della luce diurna, si avrà una notevole riduzione dell'uso dell'illuminazione artificiale.

Gli interventi previsti sono illustrati nella Tabella 6.2. In particolare, le soluzioni:

- 1 e 2 riguardano l'involucro opaco;
- da 3 a 5 riguardano l'involucro trasparente;
- 6 riguarda l'impianto di ventilazione meccanica controllata;
- 7 e 8 riguardano l'impianto di illuminazione artificiale.

Tabella 6.2. Interventi per il miglioramento del comfort

N°	Intervento	Parametro	U.M.
1	Isolamento termico delle pareti verso l'esterno	U_p	[W/m²K]
2	Isolamento termico della copertura	U_r	[W/m²K]
3	Sostituzione dei serramenti esterni	U_w	[W/m²K]
4	Isolamento termico dei cassonetti	U_c	[W/m²K]
5	Installazione delle schermature solari	g_{gl+sh}	[–]
6	Installazione dell'impianto di ventilazione meccanica	η_{ve}	[–]
7	Sostituzione degli apparecchi luminosi	P_n	[W/m²]
8	Installazione del sistema di regolazione dell'illuminazione artificiale	F_D, F_C, F_O	[–]

Per ciascuno degli interventi la soluzione progettuale individuata rispetta i parametri (dell'edificio di riferimento) riportati nella Tabella 6.1. Le soluzioni mirano unicamente a rientrare nei valori normativi ed al raggiungimento del comfort dell'ambiente interno, quindi non vengono selezionate allo scopo dell'efficientamento energetico dell'edificio: a questo scopo in bibliografia è riportata l'indicazione per lo studio sulla riqualificazione energetica [11] del Provveditorato agli Studi di Torino redatto dal DENERG ed ENEA. Nella Tabella 6.3 vengono illustrate le soluzioni adottate.

Tabella 6.3. Individuazione delle soluzioni per ciascuno degli interventi previsti

N°	Intervento	Soluzione
1	Isolamento termico delle pareti verso l'esterno	insufflaggio di cellulosa in intercapedine
2	Isolamento termico della copertura	tetto rovescio con isolante in lana di roccia (16 cm)
3	Sostituzione dei serramenti esterni	doppiovetro basso emissivo 4+16+4, argon, PVC
4	Isolamento termico dei cassonetti	pacchetto tapparelle pre-isolato termicamente
5	Installazione delle schermature solari	tende tecniche a braccio estensibile motorizzate
5	Installazione dell'impianto di ventilazione meccanica	ventilatore con recupero di calore integrato nel serramento
7	Sostituzione degli apparecchi luminosi	apparecchi luminosi a LED
8	Installazione del sistema di regolazione dell'illuminazione artificiale	sistema di controllo DALI

6.2. Analisi delle soluzioni progettuali

Involucro opaco

Per l'isolamento delle pareti verso l'esterno è stato realizzato il cappotto termico sul lato esterno della parete. Il materiale isolante selezionato è a base di lana di roccia di tipo "*Rockwool Frontrock Max Plus*" [34] (Figura 6.1). Il pacchetto aggiuntivo alla parete esistente è costituito, dunque, da una barriera al vapore di tipo "*Riwega DS 46 PE retinato*" [32] in polietilene retinato (posizionata sul lato caldo dello strato isolante), dal pannello isolante e da due strati di intonaco, rispettivamente di rasatura (compresa l'armatura di fissaggio dell'intonaco sullo strato isolante) e di finitura.

Nella tabella seguente (Tabella 6.4) viene calcolato il nuovo valore della trasmittanza termica. Il risultato ottenuto è inferiore al valore limite pari a 0,26 [W/m²K].

Tabella 6.4. Involucro opaco – M3: parete esterna – isolamento a cappotto esterno

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Intonaco	0,015	1400	0,700	840	11,1	0,021
2	Mattone forato	0,060	1200	0,430	840	7,4	0,140
3	Intercapedine	0,125	1,3	–	1000	1	0,180
4	Mattone forato	0,120	1000	0,360	840	7,4	0,333
5	Mattone pieno	0,120	2000	0,900	840	7,4	0,133
6	Barriera al vapore	0,002	500	0,400	1800	181818	0,050
7	Pannello lana di roccia	0,120	78	0,035	1030	1	3,429
8	Intonaco – rasatura	0,010	1800	0,900	840	23,5	0,011
9	Intonaco – finitura	0,010	1800	0,900	840	23,6	0,011
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,580	**0,226**	500	50	32,8	0,010	14,81

Figura 6.1. Pannello isolante in lana di roccia di tipo "*Rockwool Frontrock Max Plus*" (Immagine tratta da [34])

Per quanto riguarda la copertura è stato aggiunto uno strato isolante al di sopra della soletta esistente, assumendo la tipologia di tetto rovescio. Al pacchetto del solaio si aggiunge uno strato di lana di roccia, di tipo "*Rockwool Rockacier C Soudable*" [33] (Figura 6.2), rivestita su entrambe le superfici da uno strato bitumato. Successivamente viene posato uno strato calpestabile, che può essere costituito da piastrelle o quadrotti.

Nella Tabella 6.5 viene illustrato il nuovo pacchetto tecnologico del solaio così costituito, ottenendo un valore inferiore a quello limite, pari a 0,22 [W/m²K].

Tabella 6.5. Involucro opaco – S2: copertura piana – isolamento a tetto rovescio

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	Intonaco	0,010	1400	0,700	840	11,1	0,014
2	Pignatte	0,180	1600	0,590	840	7,4	0,305
3	Calcestruzzo	0,040	1000	0,310	880	69	0,129
4	Calcestruzzo	0,070	2000	1,160	880	69	0,060
5	Rivestimento in bitume	0,001	1200	0,230	920	2666,7	0,004
6	Pannello lana di roccia	0,160	145	0,040	1030	1	4,000
7	Rivestimento in bitume	0,001	1200	0,230	920	2666,7	0,004
8	Malta in calcestruzzo	0,030	2000	1,160	880	69	0,026
9	Piastrelle	0,020	2300	1,000	840	213	0,020
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,300	**0,212**	615	64,3	88,9	0,011	17,76

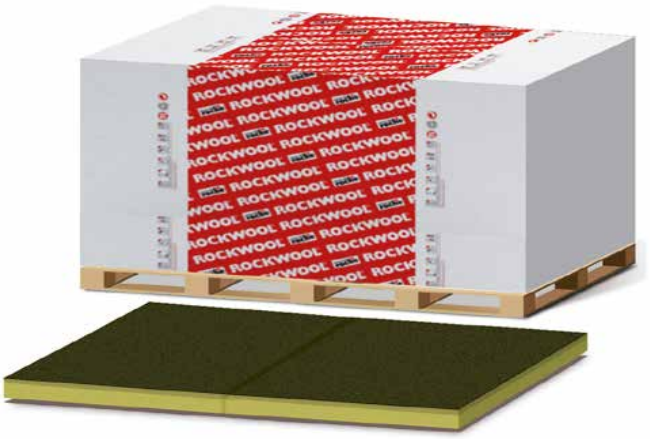
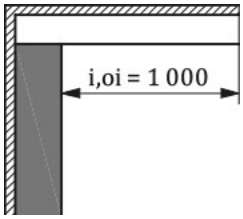
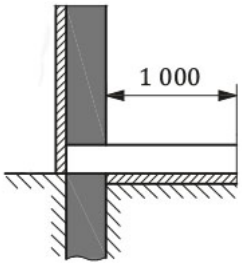
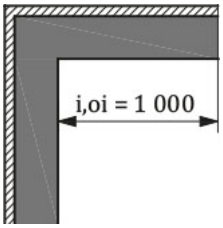
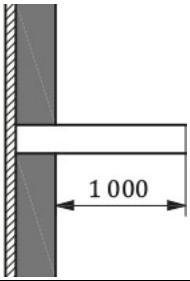
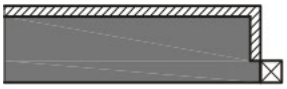


Figura 6.2. Pannello isolante in lana di roccia di tipo "*Rockwool Rockacier C Soudable*" (Immagine tratta da [33])

Nella Tabella 6.6 sono illustrati i valori della trasmittanza termica lineica (ponti termici) [8], che sono cambiati in seguito all'intervento di isolamento delle pareti esterni mediante cappotto esterno.

Tabella 6.6. Ponti termici in seguito all'isolamento a cappotto esterno

Categoria	Immagine	Ψ [W/mK]
R9 (parete – copertura)		-0,13
GF1 (parete – terreno)		0,04
C1 – C5 (angolo tra pareti sporgente e rientrante)		-0,38 0,10
IF1 (parete – pavimento interpiano)		0,18
W18 (serramento)		0,18

Involucro trasparente

Per quanto riguarda l'involucro trasparente, costituito dal serramento, il cassonetto per le tapparelle avvolgibili e le schermature solari, si fa riferimento ai prodotti promossi dall'azienda Weru [41]. In particolare, per i serramenti verranno utilizzati le caratteristiche del prodotto tipo "*Sereno*" [42], in quanto ha un buon rapporto qualità-prezzo ed è idoneo per le ristrutturazioni, mentre per le tapparelle avvolgibili su utilizza il prodotto di tipo "*Soluzione compatta FE 99 Plus*" [43]; per le schermature solari si utilizza il sistema a frangisole automatico di tipo "*FE 2 – Frangisole*" [44], ideale per gli interventi di ristrutturazione.

Il serramento è costituito da un sistema a doppiovetro a due lastre suddivise da una canalina in alluminio, riempito all'interno con gas argon; il sistema ha una configurazione di tipo 4+16+4. Il telaio e l'anta sono caratterizzati da un profilo in PVC a 5 camere, avente una profondità di 70 mm, e dotato di armatura in acciaio (che fornisce una maggiore stabilità del serramento) in conformità al RAL; di base, il telaio è dotato di due guarnizioni EPDM retratte (migliora l'isolamento acustico).

Nella Figura 6.3 viene illustrata la configurazione (base) del serramento tipo selezionato. Ciascuno dei prodotti si può configurare con ulteriori "optional" in modo da ottenere le caratteristiche necessarie al caso studio.

Il serramento ha le seguenti caratteristiche, secondo le indicazioni del produttore:

- trasmittanza termica del vetro: U_g = 1,10 [W/m²K]
- trasmittanza termica del telaio: U_f = 0,90 [W/m²K]
- trasmittanza termica lineica del vetro: Ψ_g = 0,051 [W/mK]

Con la sostituzione di tutti i serramenti, i nuovi valori di trasmittanza termica sono indicati nella Tabella 6.7.

Tabella 6.7. Caratteristiche dei componenti trasparenti

Codice[1]	Descrizione					Area	Fattore di forma telaio	Trasmittanza termica (finestra)
	Posizione – piano	Telaio	Vetro	Chiusura oscurante[2]	Schermatura mobile[2]	A [m²]	F_F [–]	U_w [W/m²K]
F.L_1	0	PVC	D	Sì	Sì	2,04	0,33	1,16
F.L_2	1-6	PVC	D	Sì	Sì	1,82	0,35	1,16
F.A_1	0	PVC	D	No	Sì	5,76	0,29	1,10
F.A_2	-1, -2	PVC	D	No	Sì	3,55	0,34	1,08
F.A_3	-1, -2	PVC	D	No	Sì	1,82	0,35	1,16

[1] Il codice di riferimento è rimasto invariato rispetto a quanto indicizzato nella Tabella 3.4, anche se di fatto, oltre alle diverse misure dei serramenti, la tecnologia è la medesima

[2] Viene mantenuta la stessa configurazione della struttura esistente in quanto, essendo i serramenti dei piani interrati prospicienti verso l'intercapedine di sicurezza non godono dell'irraggiamento solare diretto, e quindi non vi è necessità dell'inserimento della chiusura oscurante e/o della schermatura (mobile)

Figura 6.3. Serramento di tipo "*Weru Sereno*" (Immagine tratta da [42])

Per quanto riguarda il cassonetto delle tapparelle avvolgibili, Weru propone un prodotto compreso dello strato isolante, sia dal punto di vista termico che acustico (Figura 6.4). Le lamelle possono essere di plastica o alluminio (in vari colori) e sono dotate di asole di ventilazione. Il cuneo di isolamento termico produce:

- una trasmittanza termica: U_{sb} = 0,75÷0,83 [W/m²K]
- un isolamento acustico standard: R_{WP} = 37 dB.

Nella Tabella 6.8 viene calcolata la trasmittanza termica dell'intero pacchetto murario in corrispondenza del cassonetto delle tapparelle avvolgibili; il risultato sia dell'intero pacchetto murario è inferiore 0,26 [W/m²K].

Tabella 6.8. Involucro opaco – M6: cassonetti – isolamento del pacchetto murario in corrispondenza del cassonetto

Interno	Materiale	s [m]	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c [J/kgK]	μ [-]	R_T [m²K/W]
1	PVC	0,010	40	0,041	1300	133,3	0,233
2	Intercapedine isolata[1]	0,230	–	–	–	–	1,205
3	PVC	0,010	40	0,041	1300	133,3	0,233
4	Mattone pieno	0,120	2000	0,900	840	7,4	0,133
5	Barriera al vapore	0,002	500	0,400	1800	181818	0,050
6	Pannello lana di roccia	0,120	78	0,035	1030	1	3,429
7	Intonaco – rasatura	0,010	1800	0,900	840	23,5	0,011
8	Intonaco – finitura	0,010	1800	0,900	840	23,6	0,011
Esterno							

s [m]	U [W/m²K]	MF [kg/m²]	κ_i [kJ/m²K]	κ_e [kJ/m²K]	Y_{ie} [W/m²K]	φ [h]
0,510	0,183	292	8,0	33,0	0,009	9,71

[1] In assenza di dati tecnici più dettagliati è stato considerato il valore di resistenza termica, in quanto da scheda tecnica il valore di trasmittanza termica della struttura del cassonetto era univoco

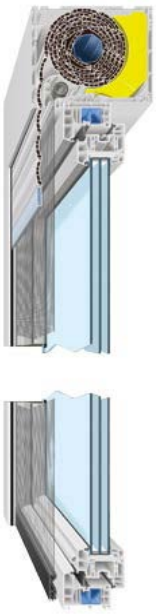


Figura 6.4. Tapparelle avvolgibili di tipo "*Soluzione compatta FE 99 Plus*" per ristrutturazioni (e nuove costruzioni) (Immagine tratta da [43])

Le tapparelle avvolgibili si possono dotare di un sistema meccanizzato. Inoltre, oltre ad un comando di tipo manuale (per alzare e abbassare le tapparelle) è possibile dotare il sistema di tapparelle di un controllo a distanza di tipo *wireless* (controllo tramite l'impiego di Smartphone, Tablet o Laptop) e/o di un controllo con orologio programmabile.

Le schermature solari saranno caratterizzate da frangisole motorizzati con un controllo di tipo automatico o mediante telecomando, come illustrato nella Figura 6.5. La particolarità del prodotto è che a schermatura attivata ha un funzionamento di tipo a *veneziana*, mentre quando è disattivata si "ritira" entro un apposito alloggiamento tecnico, lasciando libera la facciata. La soluzione è stata considerata idonea in quanto viene installata sulla superficie esterna dell'involucro dell'edificio in corrispondenza del singolo serramento oppure a costituire un sistema di facciata, che in questo caso caratterizza l'edificio oggetto di studio.

Per poter calcolare il fattore solare g_{gl+sh} del serramento nel momento in cui la schermatura solare è attivata, è necessario innanzitutto calcolare il fattore solare g_{gl} del serramento stesso. Questo dato non viene fornito dal catalogo del produttore, tuttavia può essere determinato utilizzando strumenti online, come per esempio il *Glass Configurator* di AGC Glass [81]. Questo Configuratore permette di comporre diversi sistemi vetrati (vetro singolo, doppio o triplo) utilizzando diverse tecnologie del vetro: in questo caso si precisa che le possibilità di scelta sono limitate ai prodotti promossi da AGC Glass, ma che si possono scegliere in modo da ottenere caratteristiche della configurazione alla composizione che si sta utilizzando. Si considerano le indicazioni fornite dal produttore [44], considerando una riduzione dell'irraggiamento solare fino al 75% a schermatura completamente aperta.

Il fattore solare g_{gl+sh} quando la schermatura è attivata si determina mediante una procedura di calcolo utilizzando la relazione seguente, con riferimento alla UNI EN ISO 52022-1 [130].

Nella Tabella 6.9 viene dunque calcolato il valore del fattore solare in presenza della schermatura solare g_{gl+sh}, il cui valore è inferiore a quello limite, pari a 0,35 [–], mentre nella Tabella 6.10 vengono indicati i coefficienti solari, assunti con riferimento a materiali simili [28].

$$g_{\text{tot}} = \tau_{e,B,corr.} \bullet g_{\text{gl}} + \alpha_{\text{e,B,corr.}} \bullet G_{\text{ext}}/G_2 + \tau_{\text{e,B,corr.}} \bullet (1 - g_{\text{gl}}) \bullet G_{\text{ext}}/G_1$$

dove

g_{tot} è il fattore solare per le finestre con schermatura esterna, in [–]

$\tau_{e,B,corr.}$ è il coefficiente di trasmissione solare corretto per l'inclinazione a 45°, in [–]

g_{gl} è il fattore solare del vetro, in [–]

$\alpha_{e,B,corr.}$ è il coefficiente di assorbimento solare corretto per l'inclinazione a 45°, in [–]

G_{ext} è la conduttanza termica, in [W/m²K], calcolata come:

$$G_{\text{ext}} = (1/U_g + 1/G_1 + 1/G_2)^{-1}$$

G_1 = 5 [W/m²K]

G_2 = 10 [W/m²K]

Tabella 6.9. Caratteristiche del serramento in presenza di schermature solari mobili

Codice	g_{gl}[1]	g_{gl+sh}[2]
F.L_1	0,75	0,14
F.L_2	0,75	0,14
F.A_1	0,75	0,14
F.A_2	0,75	0,14
F.A_3	0,75	0,14

[1] Il valore del fattore solare *g* è stato calcolato utilizzando il configuratore online di AGC Glass [81]

[2] È il valore del fattore solare *g* quando la schermatura è attivata, calcolato secondo le indicazioni fornite dal produttore [44]

Tabella 6.10. Coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione solare delle lamelle del frangisole in condizioni completamente chiuse e orientate a 45°

Coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione solare					
$\alpha_{e,B}$	$\rho_{e,B}$	$\tau_{e,B}$	$\alpha_{e,B,corr.}$	$\rho_{e,B,corr.}$	$\tau_{e,B,corr.}$
0,5	0,4	0,1	0,55	0,33	0,13

Figura 6.5. Frangisole motorizzati con funzionamento automatico di tipo "*FE 2*" (Immagine tratta da [44])

Figura 6.6. Esempio di sistema facciata in seguito all'applicazione del sistema di frangisole di tipo "*FE 2*" (Immagine tratta da [44])

Ventilazione meccanica

Dalle analisi svolte per la situazione esistente si evince che la ventilazione naturale degli ambienti interni mediante la sola apertura delle finestre non sempre è sufficiente a garantire la qualità dell'aria, pertanto è necessario ricorrere alla ventilazione meccanica, la quale compensa il deficit di portata di aria esterna.

In questo caso si può nuovamente usufruire della tecnologia messa a disposizione da Weru: al serramento si possono aggiungere tutta una serie di "optional", tra cui un sistema di ventilazione integrato con recuperatore di calore, di tipo "*Aeratore Weru-AeroTherm*" [45], come illustrato nella Figura 6.7. Il ventilatore lavora secondo il principio dello scambio rigenerativo di calore: al centro della corrente d'aria di un motore EC con ventilatore assiale si trova un materiale ceramico all'interno del profilo (del telaio), la quale, con una corrente d'aria inversa, assorbe l'energia termica dell'aria della stanza in uscita e la rilascia nell'aria esterna immessa, raggiungendo un'efficienza di circa il 90%: per esempio, immettendo l'aria esterna ad una temperatura pari a -10°C, e avendo una temperatura interna di 20°C, la temperatura dell'aria effettivamente immessa nell'ambiente interno è pari a circa 17°C. Inoltre, il ventilatore raggiunge una portata volumetrica di aria esterna pari a 15 m^3/h a 4 Pa; è dotato di un filtro a carboni attivi integrato. Il funzionamento avviene mediante interruttore a levetta oppure può essere comandato con il telecomando.

La soluzione è stata scelta in quanto è relativamente economica e funzionale, e, nell'ipotesi che venga presa considerazione in un eventuale reale intervento, riduce la quantità di lavori edili rispetto all'impiego di un impianto di ventilazione meccanica controllata.

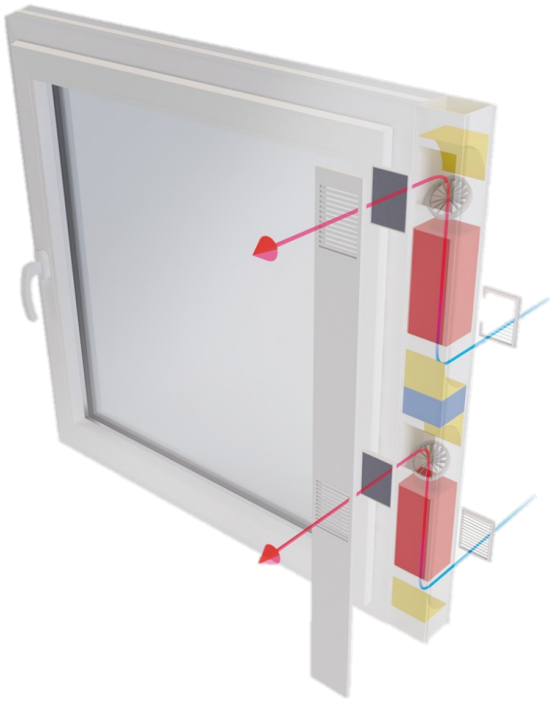


Figura 6.7. Schema di funzionamento del ventilatore tipo "*Weru AeroTherm*" (Immagine tratta da [45])

Illuminazione artificiale

Oggigiorno il sistema di illuminazione artificiale più diffuso è quello al LED in quanto, rispetto a sistemi più tradizionali, è caratterizzato generalmente da una efficienza luminosa maggiore: il maggiore flusso luminoso generato ed il minore consumo di energia elettrica generano un rendimento maggiore ed un apporto termico sensibile minore; questa tecnologia è comunque in continua evoluzione.

Gli apparecchi luminosi esistenti verranno sostituiti da altri di tipo "*OSRAM Taris – quadrato*" [27]. Il prodotto tipo è stato selezionato per via della caratteristica del sensore di presenza e di luce diurna, nonché del sistema DALI[39]. Esso è dotato di un diffusore illuminotecnico primario in PMMA ed ha un'uscita della luce diretta ed una distribuzione luminosa simmetrica; l'alimentatore è di tipo EVG-DALI.

L'apparecchio luminoso viene montato a soffitto, come lo sono già quelli esistenti.

Nella Figura 6.8 viene illustrato il prodotto tipo selezionato, mentre nella Figura 6.9 la curva fotometrica dell'apparecchio luminoso su entrambi gli assi (0–180°, 90°–270°).

Le caratteristiche dell'apparecchio luminoso sono:

- flusso luminoso: Φ_L = 4340 [lm]
- potenza assorbita: P_n = 28 [W]
- efficienza luminosa: η_L = 153 [lm/W]
- temperatura di colore: Tcc = 4000 K
- colore della luce: 840
- indice di resa cromatica: Ra > 80
- indice di abbagliamento: UGR ≤ 19

L'alimentatore DALI viene integrato direttamente sull'apparecchio luminoso. I diversi accessori, quali i sensori di luminosità (luce diurna) e di presenza, comunicano con la centralina di comando tramite radiofrequenza, permettendo all'impianto eventuali modifiche.

Nella Figura 6.10 viene illustrato un esempio di funzionamento del sistema DALI, con l'ausilio dei sensori di presenza e di target di illuminamento del compito visivo.

[39] Il sistema DALI (Digital Addressable Lighting Interface) è uno standard internazionale (IEC 62386) di interfaccia digitale per sistemi elettronici di gestione dell'illuminazione d'interni, creato dai principali produttori di reattori elettronici. Consente di controllare i singoli apparecchi luminosi associando un indirizzo per ciascun alimentatore, che permette di configurare diversi scenari illuminotecnici (ed eventualmente cambiarli) mediante raggruppamento delle sorgenti luminose. Si possono pertanto gestire tutte le sorgenti luminose regolate in potenza.

Figura 6.8. Apparecchio luminoso di tipo "*OSRAM Taris – quadrato*"

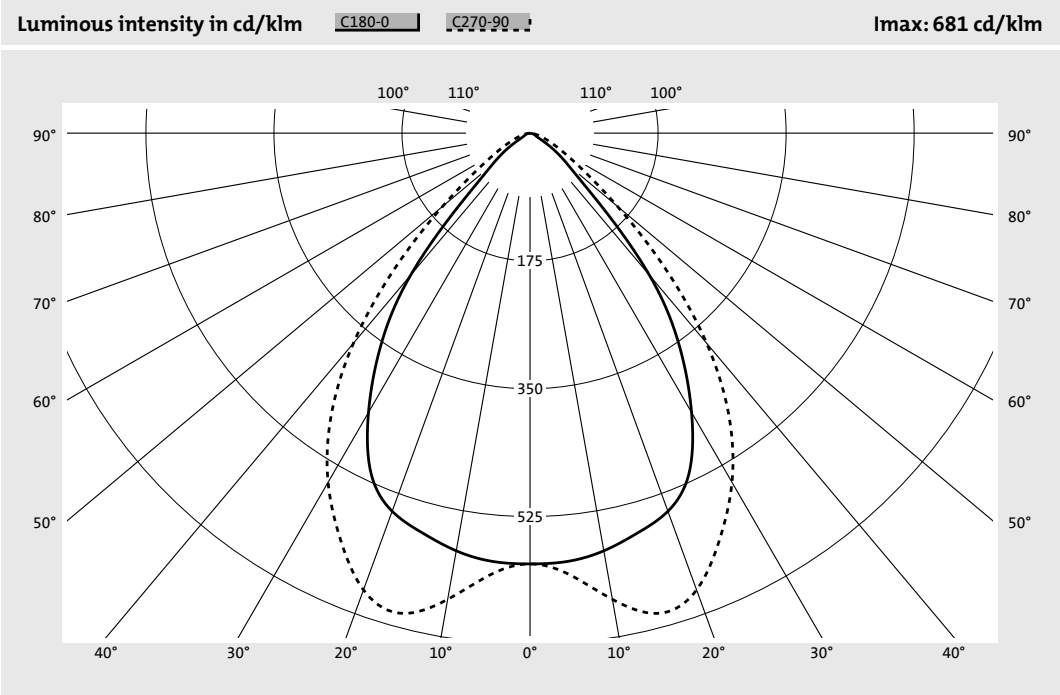


Figura 6.9. Curva fotometrica dell'apparecchio luminoso di tipo "*OSRAM Taris – quadrato*"

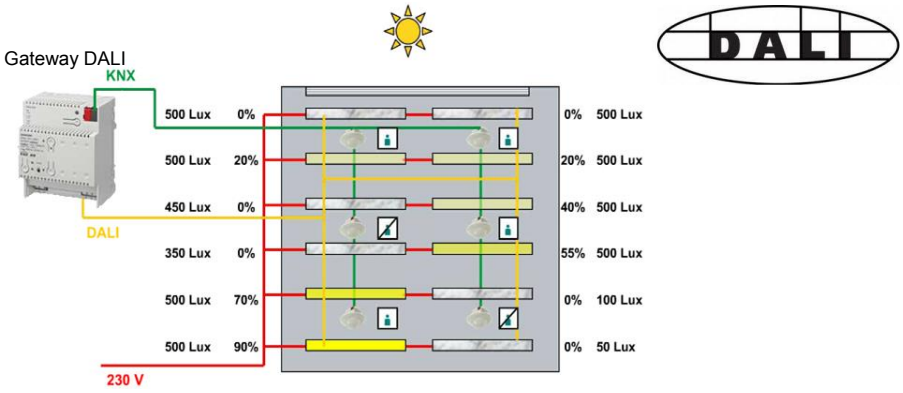


Figura 6.10. Esempio di funzionamento del sistema DALI (Immagine tratta da [31])

6.3. Indice di comfort termico

Dalle figure illustrate nelle pagine successive si evince che gli interventi selezionati per il miglioramento della qualità dell'ambiente interno hanno portato ai risultati attesi: infatti, come si vedrà nella Figura 6.16, le condizioni di comfort termico vengono raggiunte quasi al 99% durante il periodo considerato, il periodo di free-floating.

Il procedimento illustrato ripercorre quello adottato per l'analisi della situazione esistente. Nella fase della modellazione sono stati modificati i componenti edilizi in modo da assumere le caratteristiche termo-fisiche della soluzione progettuale, in particolare la stratigrafia della parete esterna verticale (M3), della parete esterna al di sotto delle finestre (M4), i cassonetti delle tapparelle avvolgibili (M6), nonché del solaio di copertura (S2). Di conseguenza sono stati modificati i valori dei ponti termici ed anche della permeabilità dell'involucro edilizio (portata d'aria esterna dovuta alle infiltrazioni e la qualità delle fessure dell'involucro (*cracks*)).

Alle aperture è stato applicato il nuovo template dei serramenti, i quali si compongono di un nuovo sistema a doppio-vetro più prestazionale ed un telaio in PVC. A causa della modifica dell'involucro, il nuovo serramento assume una posizione più in avanti rispetto a quello esistente: in questo modo tuttavia esso è meno soggetto agli ombreggiamenti dovuti all'invaso del serramento stesso, e quindi vi sarà una lieve maggiorazione nella disponibilità di luce diurna. Viene inoltre modellata la schermatura solare, la cui gestione viene determinata da Design Builder (assumendo un funzionamento di tipo automatico) in quanto viene imposto un controllo di tipo "*solare*" utilizzando come parametro di riferimento il valore di irradianza solare pari a 300 [W/m^2], come indicato al punto 14.3.4 nella UNI/TS 11300-1 [107]: quando il valore dell'irradianza solare è maggiore del valore soglia la schermatura solare viene attivata, in caso contrario non viene utilizzata.

Per quanto riguarda l'illuminazione viene modificata la densità di illuminazione (che assume un valore più basso) mentre rimane invariato il sistema di montaggio (a soffitto). Viene poi attivato il controllo dell'illuminazione, assumendo come tipo di controllo quello "*lineare*", in quanto il valore di flusso luminoso può essere variato in maniera progressiva in funzione della presenza degli occupanti all'interno dell'ambiente e della luce diurna, mantenendo l'illuminamento medio sul piano di lavoro.

Infine, viene aggiunta la ventilazione meccanica il cui valore di portata d'aria è impostato secondo le specifiche della FprEN 16798-1 e delle indicazioni del produttore; viene definito il recuperatore di calore. Il profilo di utilizzo assunto è quello relativo all'occupazione.

Nella fase di analisi dei dati viene dapprima analizzata la distribuzione dei valori di temperatura operativa nell'intervallo di comfort termico, secondo le indicazioni della FprEN16798-1, come illustrato in Figura 6.11, Figura 6.12, Figura 6.13, Figura 6.14; i dati ottenuti dalla simulazione dinamica, relativi alle zone termiche selezionate in precedenza, vengono analizzati per ciascun piano. Successivamente si verifica la distribuzione nelle quattro fasce di comfort termico, come illustrato nella Figura 6.15 (in forma grafica); nella Tabella 6.11 vengono illustrati i dati in forma numerica (nella parte alta della tabella) e viene fatto un confronto, mediante differenza di percentuale, fra i risultati ottenuti in seguito agli interventi di miglioramento della qualità dell'ambiente interno e quelli ottenuti per l'edificio in condizioni reali: da ciò si evince l'efficacia delle misure adottate.

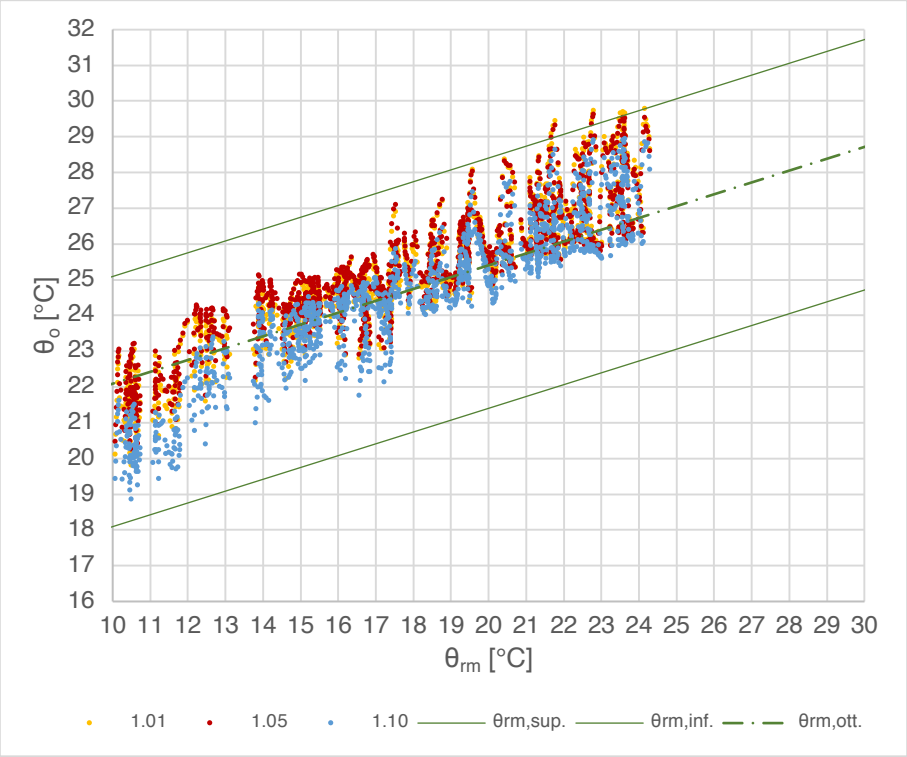


Figura 6.11. Distribuzione della temperatura operativa post intervento– Piano primo

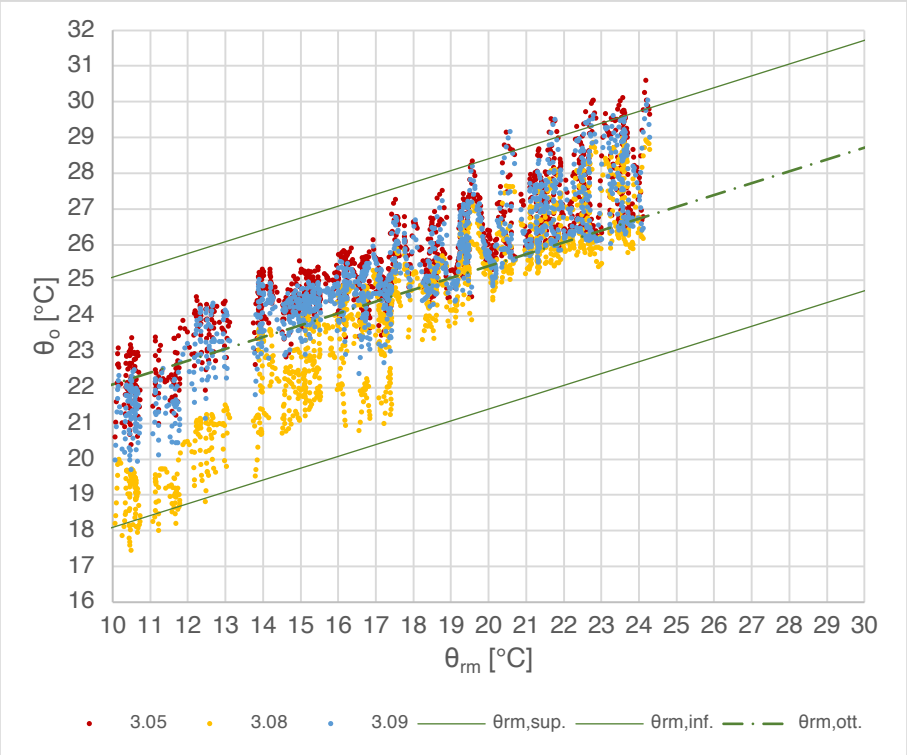


Figura 6.12. Distribuzione della temperatura operativa post intervento – Piano terzo

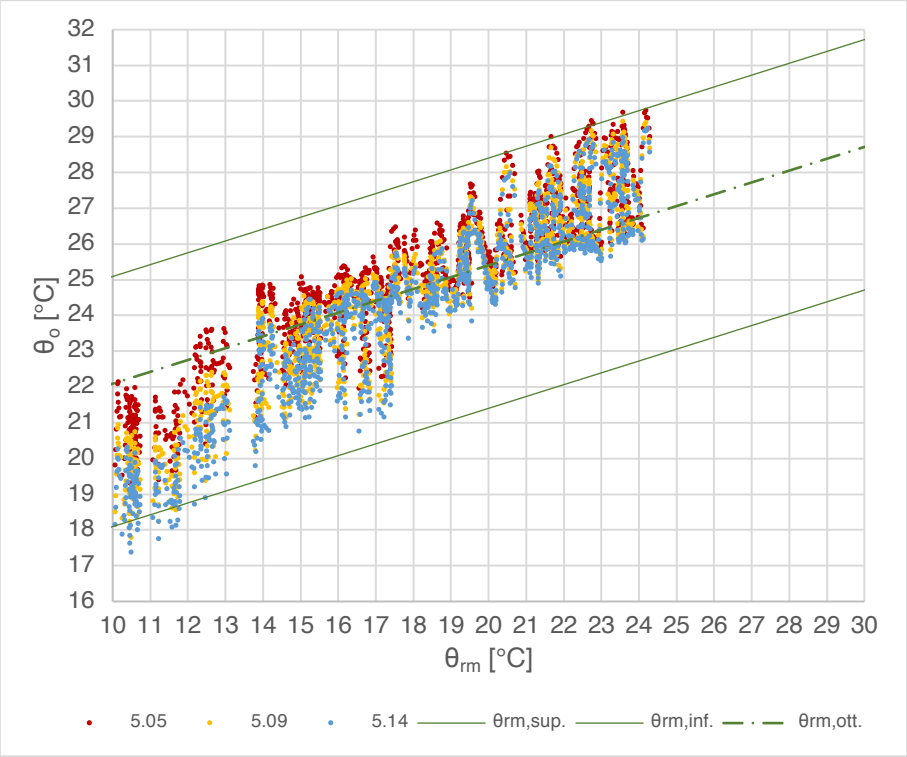


Figura 6.13. Distribuzione della temperatura operativa post intervento – Piano quinto

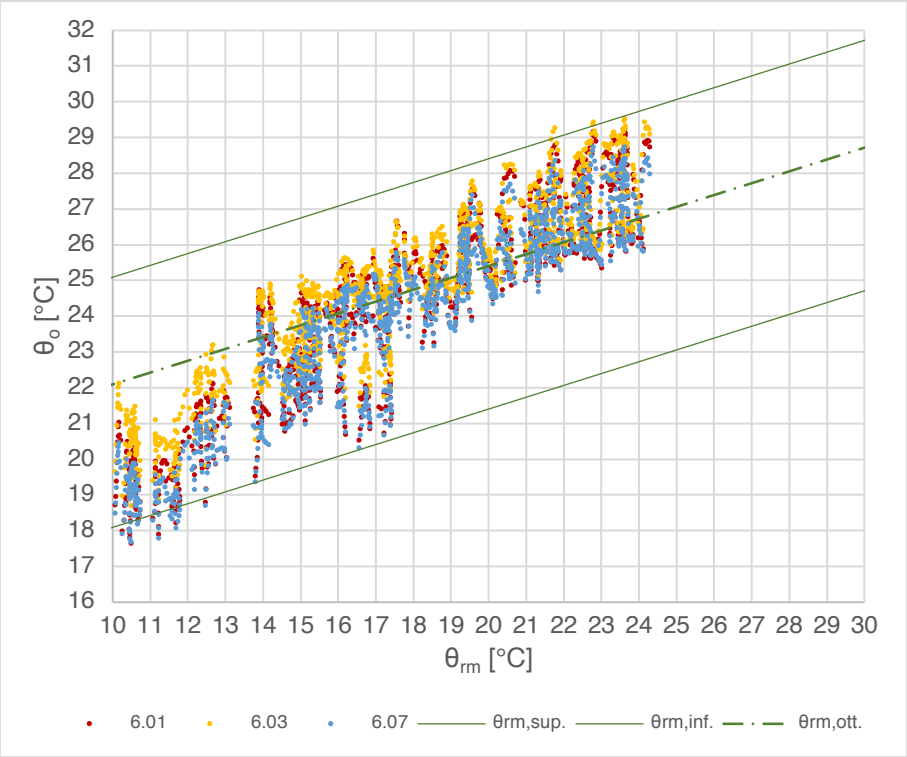


Figura 6.14. Distribuzione della temperatura operativa post intervento – Piano quinto

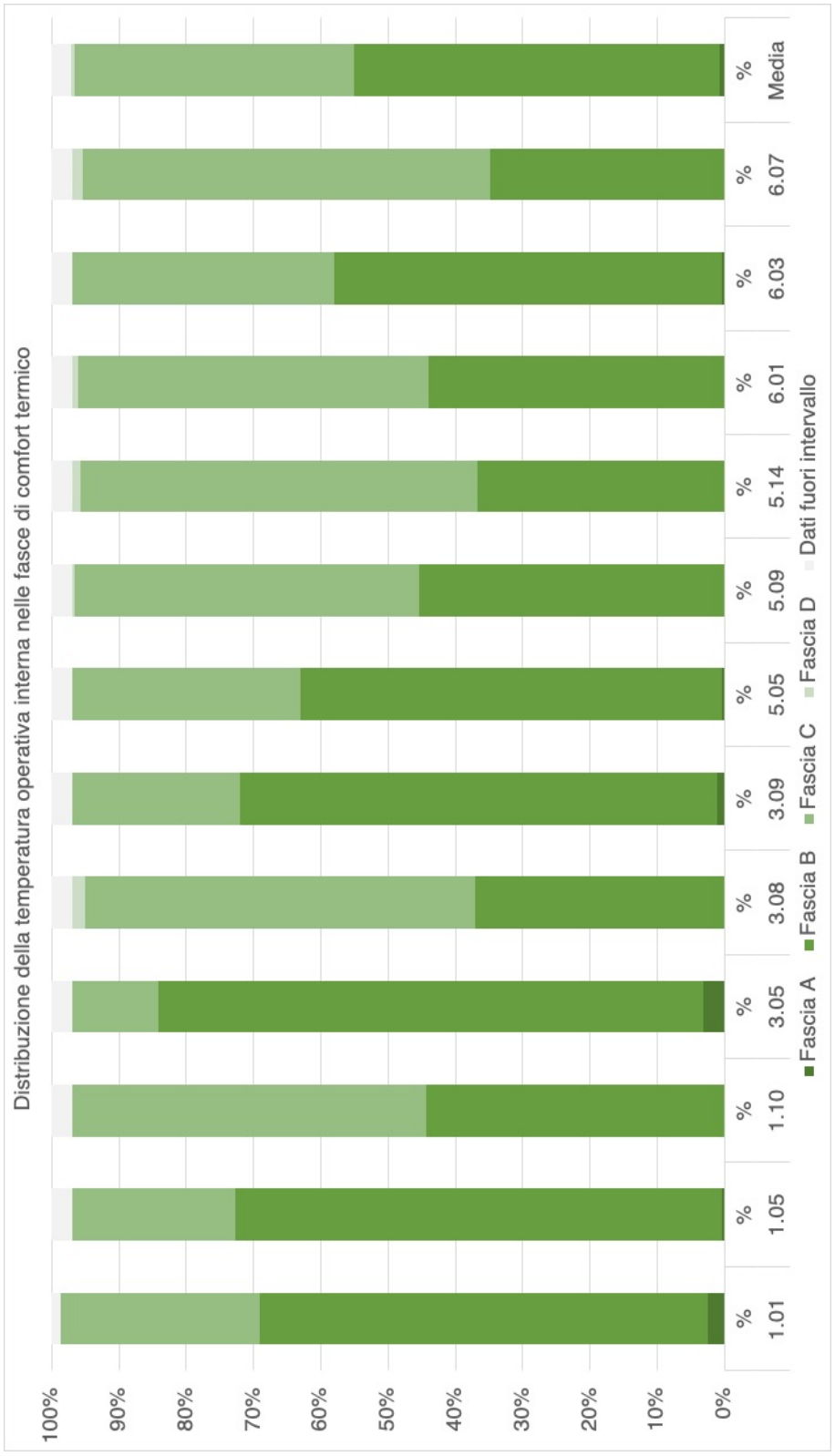


Figura 6.15. Distribuzione del numero di ore del periodo di occupazione in cui la temperatura operativa interna si trova all'interno o all'esterno delle fasce di comfort termico

Tabella 6.11. Percentuale del numero di ore del periodo di occupazione in cui la temperatura operativa interna si trova all'interno o all'esterno delle fasce di comfort termico (sopra), e differenza di percentuale rispetto alla situazione esistente (sotto)

	1.01 [%]	1.05 [%]	1.10 [%]	3.05 [%]	3.08 [%]	3.09 [%]	5.05 [%]	5.09 [%]	5.14 [%]	6.01 [%]	6.03 [%]	6.07 [%]	Media [%]
Fascia A	2,52	0,42	0,00	3,15	0,00	1,05	0,42	0,00	0,00	0,00	0,35	0,00	0,66
Fascia B	66,57	72,24	44,34	80,98	37,13	71,05	62,59	45,31	36,78	43,99	57,69	34,90	54,32
Fascia C	29,51	24,27	52,59	12,80	57,97	24,83	33,92	51,26	58,95	52,03	38,88	60,56	41,60
Fascia D	0,00	0,00	0,00	0,00	1,82	0,00	0,00	0,35	1,19	0,91	0,99	1,47	0,48
Dati fuori intervallo	1,39	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	2,94
Trm >10°C	98,61	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	96,92	97,06
Fascia A	**–2,66**	**–1,68**	**–0,21**	**–30,42**	**0,00**	**–16,78**	**–8,60**	**–4,69**	**–10,00**	**–10,14**	**–15,73**	**–1,33**	**–8,52**
Fascia B+C	**+2,66**	**+1,68**	**+3,43**	**+30,42**	**+4,83**	**+16,78**	**+10,07**	**+13,43**	**+19,65**	**+17,41**	**+20,56**	**+9,86**	**+12,56**
Fascia D	0,00	0,00	**–3,22**	0,00	**–4,83**	0,00	**–1,47**	**–8,74**	**–9,65**	**–7,27**	**–4,83**	**–8,53**	**–4,04**

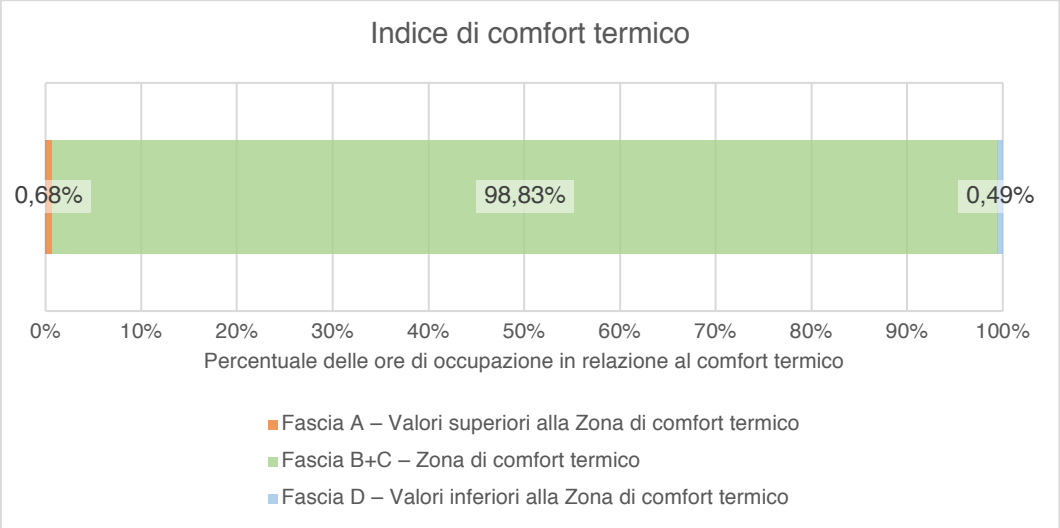


Figura 6.16. Indice di comfort termico medio, ottenuto in seguito agli interventi di miglioramento della qualità dell'ambiente interno

6.4. Indice di qualità dell'aria

Come anticipato, il profilo di utenza delle aperture per l'aerazione dei locali utilizzato è quello modellato per la situazione esistente, con il comportamento degli utenti reale (come da questionario). Nelle analisi precedenti solamente nelle stagioni intermedie la concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno superava il valore di soglia, definito dalla norma FprEN 16798-1. Con l'intervento sull'involucro edilizio le infiltrazioni si riducono drasticamente, il che porterebbe, in caso di sola ventilazione naturale, ad un ulteriore aumento delle concentrazioni. L'impiego del ventilatore di tipo "*Weru AeroTherm*" montato sul telaio del serramento può ridurre l'accumulo di concentrazione di inquinanti nell'ambiente mediante una ventilazione meccanica continua, limitato al solo periodo di occupazione, senza generare un discomfort termico grazie alla presenza del recuperatore di calore.

Come in precedenza, anche in questo caso i risultati ottenuti dalla simulazione dinamica sono stati analizzati per ciascun mese del periodo considerato, mettendo in evidenza il tasso di ventilazione (compreso sia della quota di ventilazione naturale che di quella meccanica) e le concentrazioni di CO_2 distinte per l'orientamento della zona termica (Nord o Sud), nonché il valore soglia della concentrazione, come illustrato nei grafici che vanno dalla Figura 6.17 alla Figura 6.23.

Successivamente vengono analizzati i dati della concentrazione di CO_2 entro oppure oltre alla soglia fissata, nelle fasce orarie di pre-occupazione dell'edificio (dalle ore 06.00 alle 08.00) e di occupazione dell'edificio (dalle ore 08.00 alle 18.00); il valore in percentuale visualizzato è parte delle 24 ore della giornata. Come illustrato nella Tabella 6.12 e nella Figura 6.24 i valori della concentrazione si trovano tutti entro la soglia, a riprova di quanto riportato nelle analisi mensili. Un'ulteriore verifica dell'efficacia dell'intervento per il miglioramento della qualità dell'aria interna si ha nella Figura 6.25, dove, come calcolato per la situazione esistente, non vi è necessità di una portata di ventilazione aggiuntiva al fine della diluizione dei contaminanti presenti nell'aria interna.

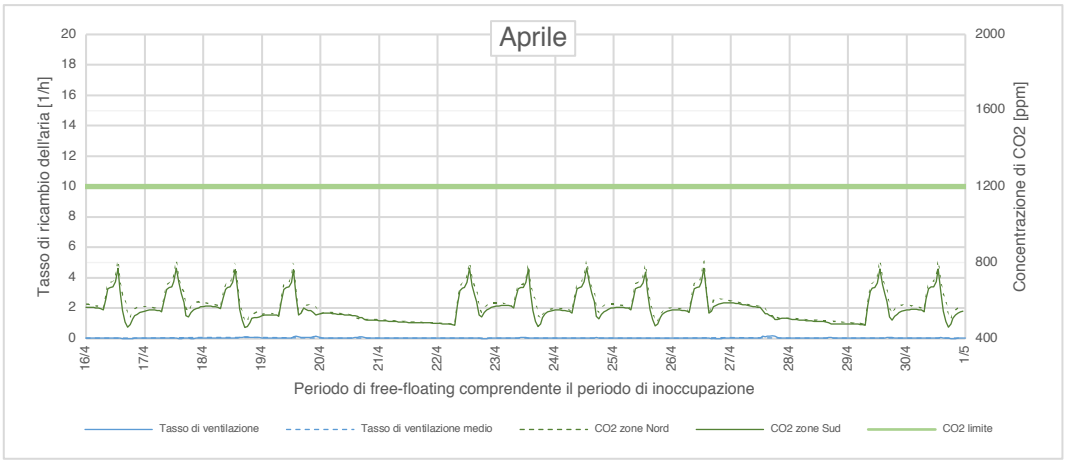


Figura 6.17. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Aprile

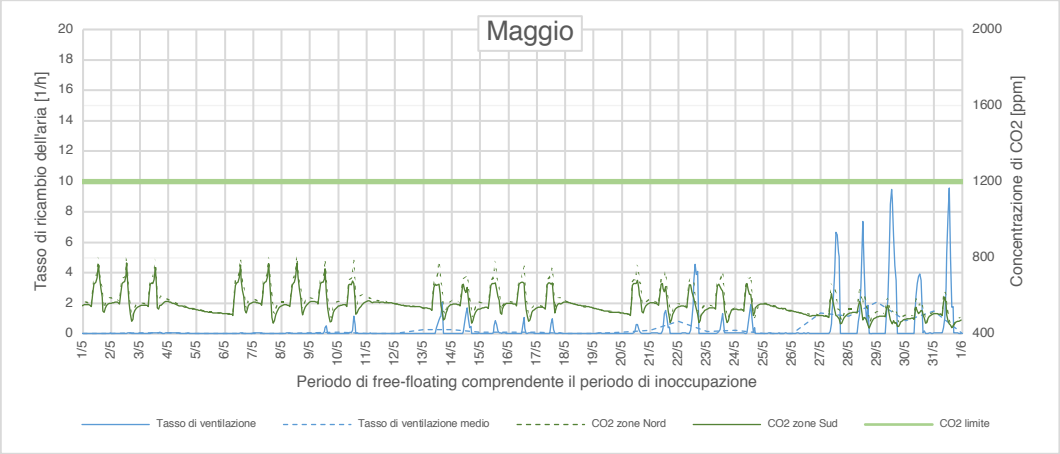


Figura 6.18. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Maggio

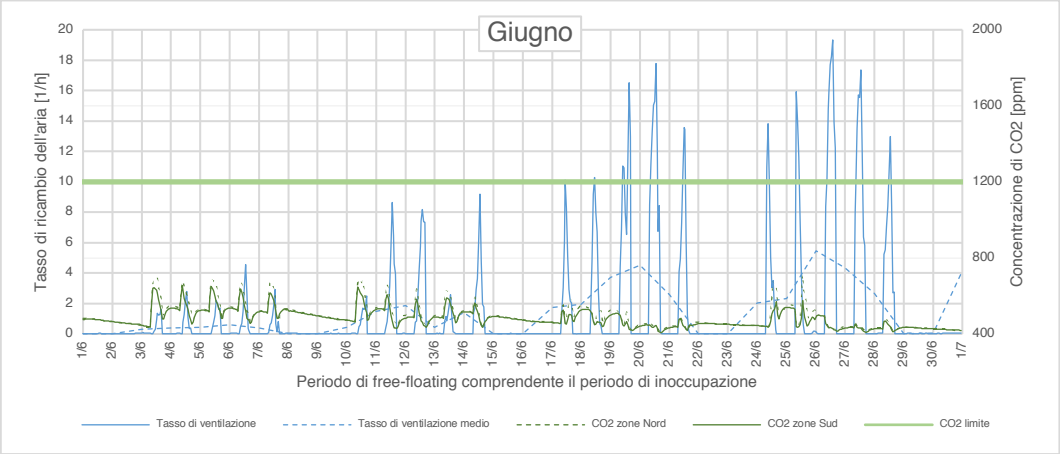


Figura 6.19. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Giugno

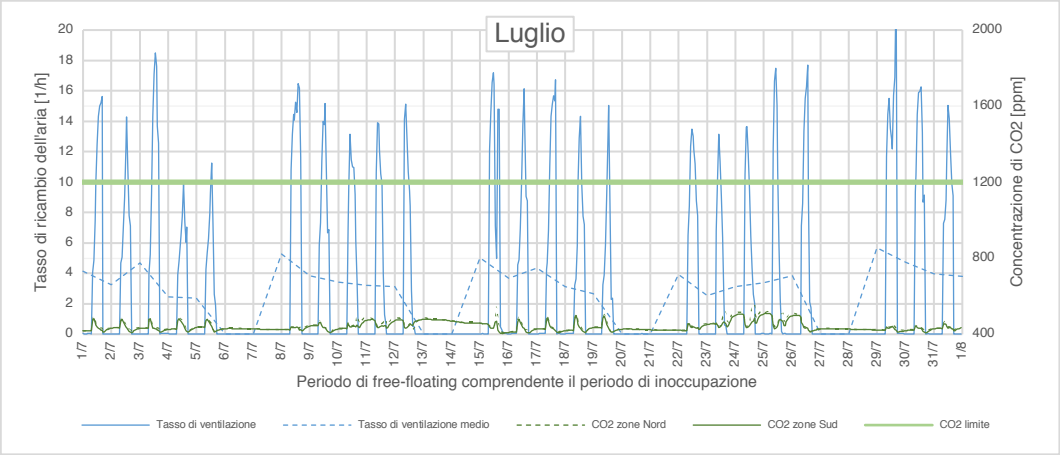


Figura 6.20. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Luglio

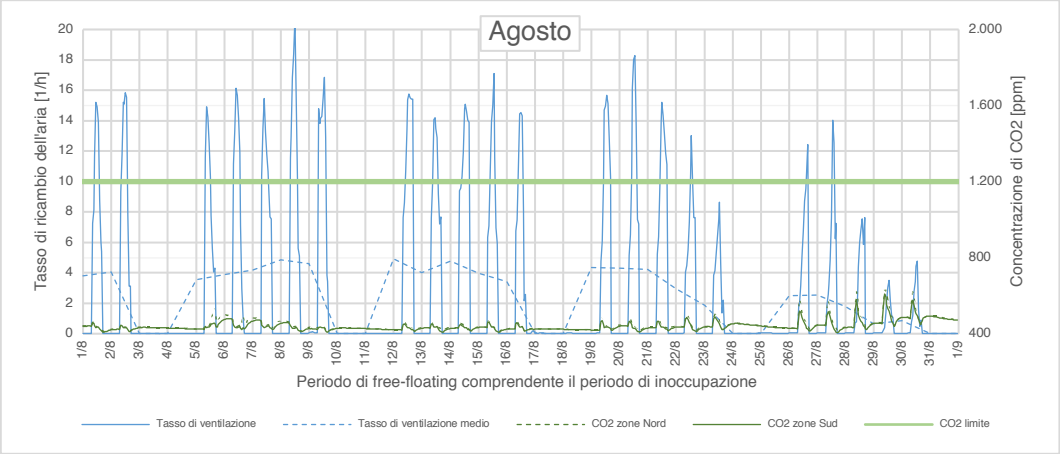


Figura 6.21. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Agosto

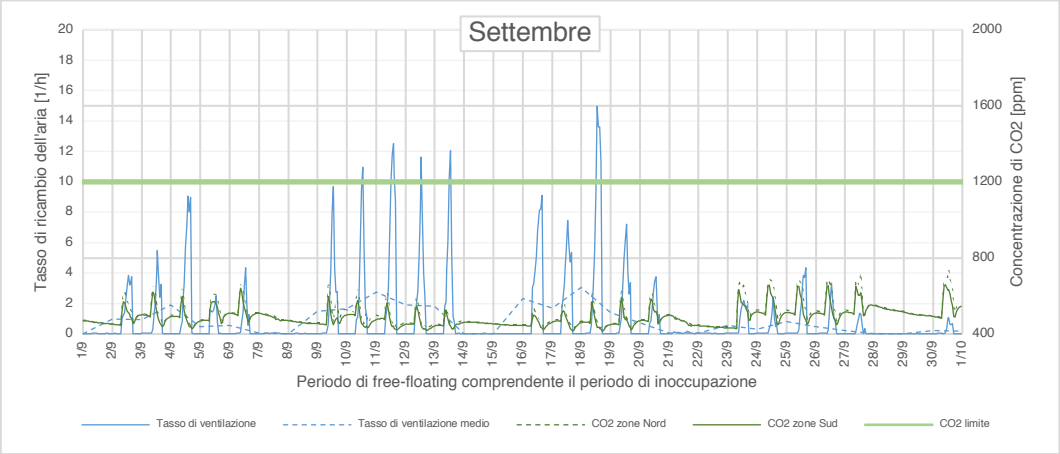


Figura 6.22. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Settembre

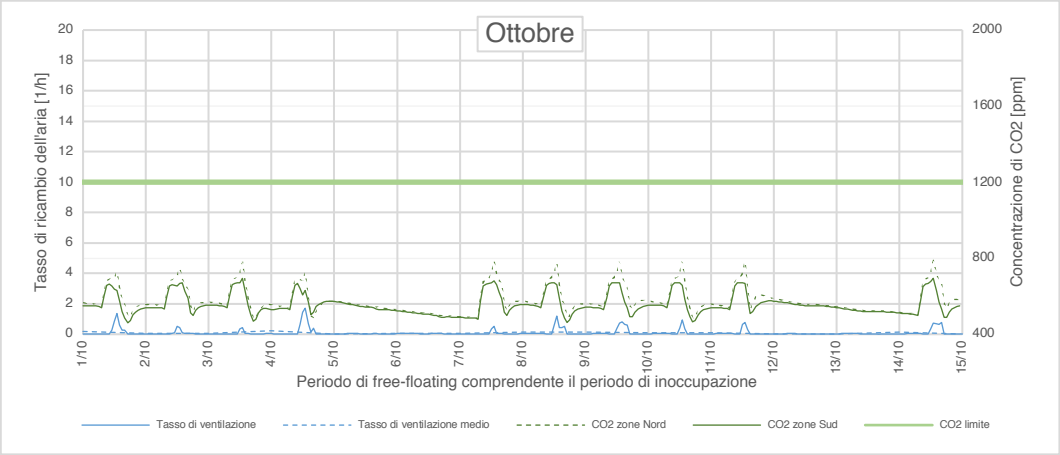


Figura 6.23. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Ottobre

Tabella 6.12. Caratteristiche della concentrazione di CO2 nell'ambiente interno per ciascun mese del periodo di free-floating

Mese	Soglia di concentrazione [ppm]	Orario di riferimento[1] 06:00 – 08:00	08:00 – 18:00
Aprile	< 1200	8,31%	41,55%
	> 1200	0,00%	0,00%
Maggio	< 1200	8,32%	41,61%
	> 1200	0,00%	0,00%
Giugno	< 1200	8,32%	41,61%
	> 1200	0,00%	0,00%
Luglio	< 1200	8,32%	41,61%
	> 1200	0,00%	0,00%
Agosto	< 1200	8,32%	41,61%
	> 1200	0,00%	0,00%
Settembre	< 1200	8,32%	41,61%
	> 1200	0,00%	0,00%
Ottobre	< 1200	8,31%	41,54%
	> 1200	0,00%	0,00%

[1] È riferito all'orario di occupazione dell'edificio e a quello precedente all'occupazione, trascurando tutti i dati relativi al periodo di inoccupazione dello stabile.

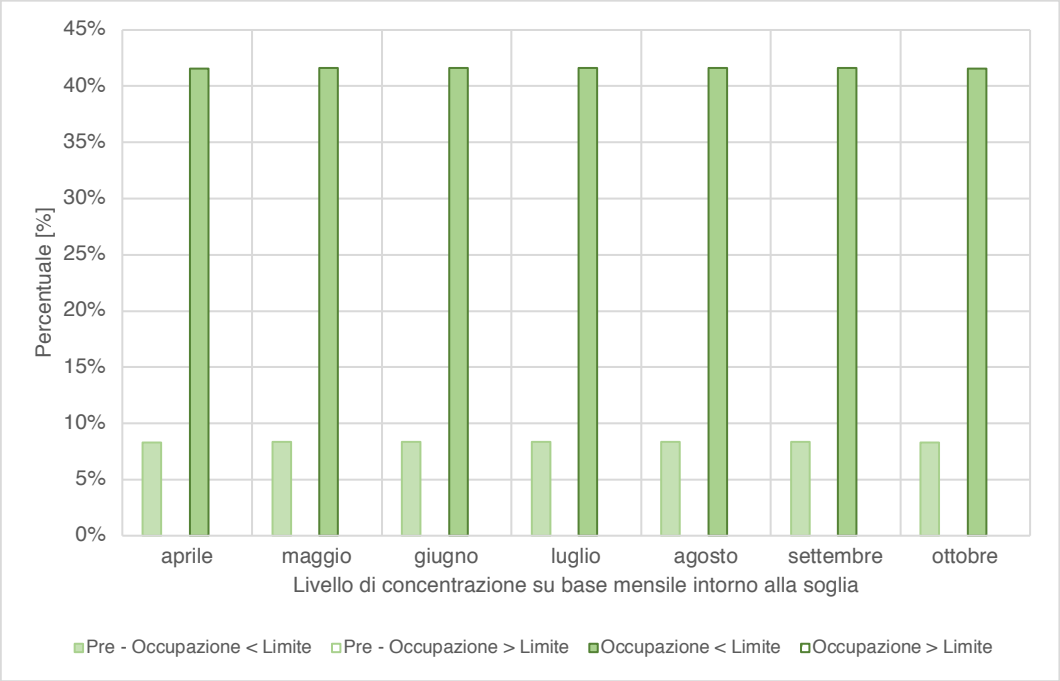


Figura 6.24. Caratteristiche della concentrazione di CO2 nell'ambiente interno per ciascun mese del periodo di free-floating

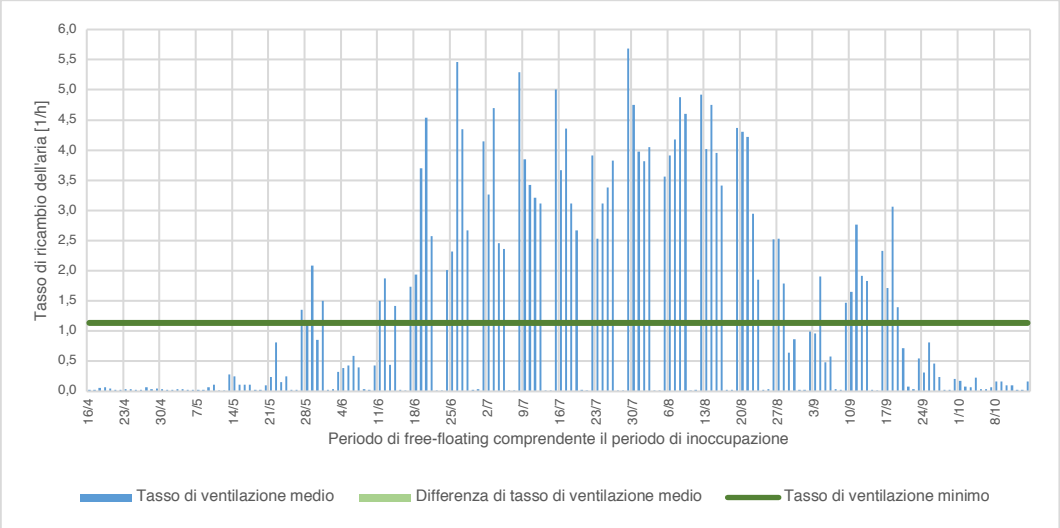


Figura 6.25. Tassi di ventilazione medi e minimi, e differenza necessaria per la diluizione della concentrazione di CO_2 entro il limite stabilito dalla norma

6.5. Indice di comfort visivo

Illuminazione naturale

Con la modifica dell'involucro edilizio si modificano anche le componenti geometriche con cui si determina il fattore di luce diurna $D_{Ca,j}$. L'aggiunta del cappotto esterno porta dunque ad una maggiorazione dell'ombreggiamento sul serramento, tuttavia se il pacchetto del serramento di tipo "*Weru*" si montasse appena prima del cappotto, al netto della fattibilità tecnica (bisognerebbe conoscere la posizione dell'architrave della finestra), si potrebbe avere dei guadagni in termini di luce diurna. La rappresentazione schematica della nuova configurazione dell'apertura tipo viene illustrata nella figura di seguito (Figura 6.26).

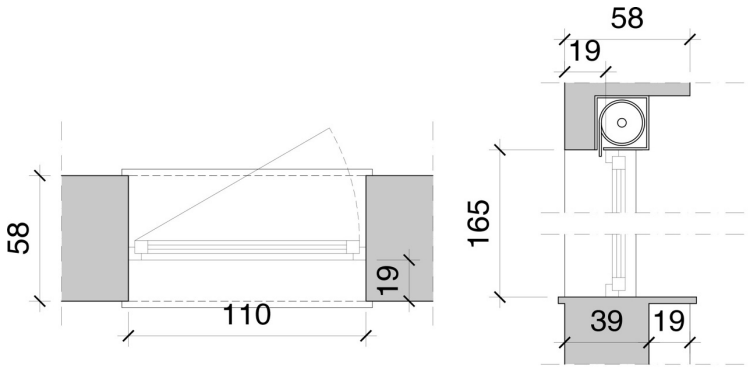


Figura 6.26. Rappresentazione schematica del serramento tipo (in seguito all'intervento progettuale) in pianta (a sinistra) e in sezione (a destra) – Fuori scala

Nella Tabella 6.13 vengono dunque ricalcolati gli elementi necessari per la determinazione del degli indici di trasparenza ($I_{Tr,j}$), di profondità dello spazio ($I_{RD,j}$) e di schermatura ($I_{Sh,j}$), mentre nella Tabella 6.14 viene ricalcolato il fattore di luce diurna $D_{Ca,j}$.

Tabella 6.13. Elementi per la classificazione della luce diurna

Zona	A_{ca} [m²]	A_D [m²]	a_D [m]	h_L [m]	h_{Ta} [m]	$I_{Sh,Ish}$ [–]	$I_{Sh,hA}$ [–]	$I_{Sh,vA}$ [–]	$I_{Sh,In,At}$ [–]	$I_{Sh,GDF}$ [–]
1.01	1,82	16,58	4,00	2,40	0,80	0,16	0,95	0,93	1,00	1,00
1.05	1,82	17,20	4,00	2,40	0,80	0,98	0,95	0,93	1,00	1,00
1.10	1,82	16,18	4,00	2,40	0,80	1,00	0,95	0,93	1,00	1,00
3.05	1,82	15,99	4,00	2,40	0,80	1,00	0,95	0,93	1,00	1,00
3.08	1,82	74,00	4,00	2,40	0,80	0,59	0,95	0,93	1,00	1,00
3.09	1,82	17,65	4,00	2,40	0,80	1,00	0,95	0,93	1,00	1,00
5.05	1,82	17,20	4,00	2,40	0,80	1,00	0,95	0,93	1,00	1,00
5.09	1,82	16,37	4,00	2,40	0,80	0,85	0,95	0,93	1,00	1,00
5.14	1,82	15,13	4,00	2,40	0,80	1,00	0,95	0,93	1,00	1,00
6.01	1,82	39,30	4,00	2,40	0,80	1,00	0,95	0,93	1,00	1,00
6.03	1,82	12,82	4,00	2,40	0,80	1,00	0,95	0,93	1,00	1,00
6.07	1,82	11,66	4,00	2,40	0,80	1,00	0,95	0,93	1,00	1,00

Tabella 6.14. Classificazione della disponibilità di luce diurna in funzione del fattore di luce diurna $D_{Ca,j}$

Zona	I_{tr} [–]	I_{RD} [–]	I_{Sh} [–]	D_{Ca} [%]	
1.01	0,22	2,50	0,10	0,74	
1.05	0,21	2,50	0,59	4,31	
1.10	0,22	2,50	0,60	4,64	
3.05	0,23	2,50	0,60	4,68	
3.08	0,22	2,50	0,36	2,71	
3.09	0,21	2,50	0,60	4,30	
5.05	0,21	2,50	0,60	4,40	
5.09	0,22	2,50	0,51	3,89	
5.14	0,24	2,50	0,60	4,91	
6.01	0,23	2,50	0,60	4,75	
6.03	0,28	2,50	0,60	5,68	
6.07	0,31	2,50	0,60	6,18	
$D_{Ca,j} \geq 6\%$		Forte			
$6\% > D_{Ca,j} \geq 4\%$		Medio			
$4\% > D_{Ca,j} \geq 2\%$		Basso			
$D_{Ca,j} < 2\%$		Nessuno			

Anche se le differenze sono lievi, in quanto le uniche variabili riguardano gli indici di schermatura relativi alle sporgenze orizzontali e verticali delle aperture grezze, si ha comunque un salto di livello, in linea generale, da quello *Basso* a quello *Medio*.

Illuminazione artificiale

Nonostante l'impiego di apparecchi luminosi più prestazionali, dal punto di vista delle prestazioni illuminotecniche e di efficienza, è necessario determinarne la corretta posizione al fine del raggiungimento dell'obiettivo del comfort visivo.

Generalmente il numero di apparecchi luminosi è rimasto invariato rispetto a quelli esistenti, anche se in alcuni casi, come per esempio nella zona termica 3.08 ed il piano sesto, è stato necessario aumentarne il numero per poter raggiungere i requisiti minimi. Anche se ciò di fatto non ha portato a risparmi nominali evidenti, tuttavia con l'integrazione del sistema di controllo, in funzione della luce diurna, si è tradotto in realtà in una riduzione dell'uso dell'illuminazione artificiale.

Nella Tabella 6.15 vengono dunque illustrati i valori di illuminamento, minimo, massimo e medio, e dell'uniformità calcolati sul piano del compito visivo. I risultati ottenuti rispettano pienamente il valore soglia, secondo le indicazioni contenute nella UNI EN 12464-1. Essi si considerano conformi alla normativa nonostante si abbia un valore di illuminamento medio mantenuto generalmente superiore di circa 100 [lx] oltre il valore soglia: dalle prove effettuate diminuire il numero di apparecchi luminoso comportava il non raggiungimento del valore minimo di illuminamento, mentre per quanto riguarda la distribuzione degli apparecchi luminosi quella adottata ha portato ai risultati migliori.

Nella Figura 6.27 vengono invece illustrati i risultati del calcolo illuminotecnico, mediante l'uso di Dialux, in forma grafica rappresentati per mezzo di isolinee e colori sfalsati. Dalle immagini si evince in generale un'uniformità del colore, il che convalida la soluzione adottata.

Tabella 6.15. Valori di illuminamento e uniformità sul piano del compito visivo

Zona	Illuminamento			Uniformità
	Minimo [lx]	Massimo [lx]	Medio [lx]	Min/medio [–]
1.01	502	708	601	0,84
1.05	484	693	582	0,83
1.10	529	728	625	0,85
3.05	514	759	631	0,81
3.08	491	799	642	0,76
3.09	483	731	612	0,79
5.05	485	686	581	0,83
5.09	505	731	612	0,83
5.14	541	803	670	0,81
6.01	508	767	654	0,78
6.03	533	721	638	0,84
6.07	518	834	692	0,75

I valori normativi di riferimento sono indicati nel Prospetto 5.26 della UNI EN 12464-1 (N° riferimento 5.26.2):
– $\bar{E}_m$: 500 [lx] – U_o: 0,60 [–]

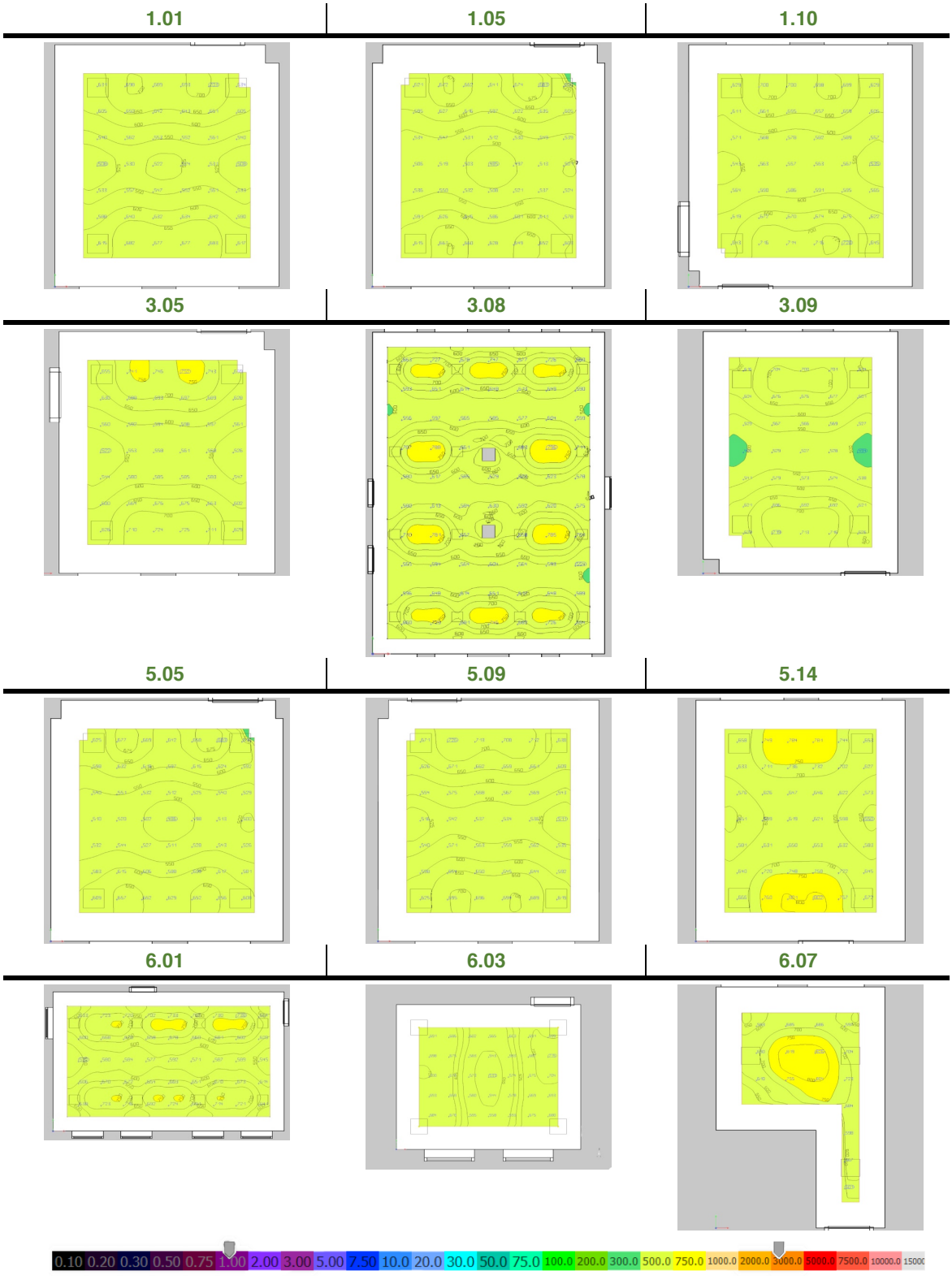


Figura 6.27. Risultati dei calcoli illuminotecnici in forma grafica – Fuori scala

Nonostante ai fini della tesi i consumi di energia non siano necessari, in questo caso è utile fare un confronto del consumo di energia elettrica fra le due tipologie di sorgenti, fluorescenti (lineare) e LED.

Nella Figura 6.28 vengono rappresentati i consumi elettrici delle rispettive sorgenti luminose. Come si osserva nel grafico, gli apparecchi a sorgente fluorescente hanno un andamento costante nel tempo, dovuto al profilo di utenza relativo all'illuminazione artificiale. Nel caso, invece, degli apparecchi a sorgente a LED, con controllo di luce diurna, si ha un andamento del consumo di energia elettrica discontinuo, dovuto alla diversa richiesta di illuminazione artificiale in funzione della presenza di luce diurna nell'ambiente, al fine di garantire l'illuminamento minimo sul compito visivo: nonostante il profilo di utenza sia invariato l'illuminazione artificiale viene comunque gestita in maniera automatica. Si nota inoltre una sensibile riduzione dei consumi di energia elettrica, come illustrato nella Tabella 6.16, che di conseguenza comporta un minore apporto termico.

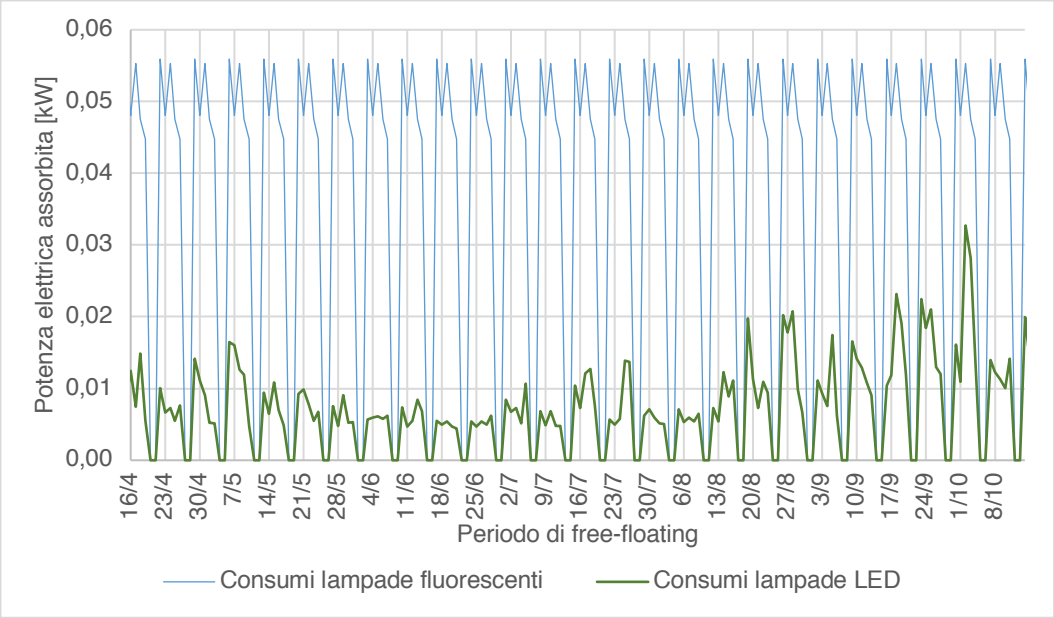


Figura 6.28. Potenza elettrica assorbita delle due tipologie di sorgenti: fluorescente lineare (in blu) e LED (in verde)

Tabella 6.16. Potenza elettrica assorbita degli apparecchi luminosi a sorgente fluorescente e LED, e differenza in percentuale

	Apr. [kW]	Mag. [kW]	Giu. [kW]	Lug. [kW]	Ago. [kW]	Set. [kW]	Ott. [kW]
Sorgente fluorescente	0,55	1,15	1,01	1,17	1,10	1,06	0,50
Sorgente LED	0,10	0,19	0,11	0,18	0,22	0,29	0,17
Differenza dei consumi	-81,35%	-83,44%	-88,64%	-84,57%	-80,03%	-72,25%	-66,59%

I risultati relativi all'illuminazione artificiale illustrati confermano la scelta progettuale adottata. Seppure non vi sia stato fatto un progetto illuminotecnico molto dettagliato, in quanto non inerente con gli obiettivi della tesi, quanto fatto finora ha comunque portato ottimi risultati, sia in termini di comfort visivo, sia in termini di consumi energetici. L'analisi dei consumi elettrici, si sottolinea, ha come unico scopo quello di verificare, e in questo caso confermare, la scelta progettuale relativa all'impiego di strumenti di controllo dell'illuminazione artificiale.

7. CONCLUSIONI

La finalità di questa Tesi di Laurea Magistrale è quella di analizzare la qualità dell'ambiente interno, dal punto di vista del comfort termico, della qualità dell'aria e del comfort visivo, di un edificio adibito ad uffici, in condizioni di utenza reale e durante il periodo di free-floating, secondo le specifiche presenti all'interno della norma tecnica di riferimento FprEN 16798-1.

Nella fase iniziale del lavoro sono stati analizzati gli strumenti utili al raggiungimento degli obiettivi prefissati, quali la norma tecnica ed il software di simulazione dinamica Design Builder. Tali strumenti hanno rappresentato rispettivamente la guida per la definizione delle condizioni di comfort ed il mezzo di analisi (dell'edificio oggetto di studio) di tali condizioni. In seguito, è stato modellato l'edificio dal punto di vista geometrico, nei "limiti" di Design Builder, e parametrico: nonostante il numero di dati di input sia notevole, l'output finale risulta molto dettagliato, restituendo come risultati dati molto affini alla realtà. Infatti, lo scopo della simulazione dinamica è quella di simulare, per l'appunto, le condizioni reali di un caso studio, in modo da poterne analizzare il comportamento energetico nelle condizioni in cui effettivamente si trova, piuttosto che analizzare gli eventuali cambiamenti a seconda dell'adozione di diverse strategie progettuali.

Dalle simulazioni effettuate sull'edificio esistente, utilizzando il profilo di utenza modellato secondo le informazioni acquisite mediante il questionario sottoposto ai lavoratori del Provveditorato agli Studi di Torino, è stato osservato come il comportamento dei singoli utenti possa influenzare il comportamento energetico dell'edificio. Sono stati dunque analizzati il comfort termico, la qualità dell'aria ed il comfort visivo, e i risultati ottenuti in alcune condizioni non rientravano nei parametri di qualità dell'ambiente interno definiti mediante l'uso della norma tecnica. Sono stati, inoltre, definiti gli indicatori delle diverse tipologie di comfort.

Tuttavia, per le caratteristiche intrinseche dell'edificio oggetto di studio, esso è un caso rappresentativo del patrimonio edilizio pubblico esistente, risalente allo stesso periodo di costruzione. Questo elaborato di tesi fornisce un modello di analisi della qualità dell'ambiente, che può essere eventualmente integrato negli interventi di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio pubblico, ottenendo dunque sia una riduzione dei consumi energetici che una migliore qualità dell'ambiente.

Nella fase finale sono stati individuati alcuni interventi ritenuti fondamentali per il raggiungimento degli obiettivi prefissati. Tali interventi riguardano l'involucro edilizio (opaco e trasparente) ed i sistemi di ventilazione meccanica e di illuminazione artificiale. Per ciascuno di questi interventi sono stati selezionati dei prodotti tipo di alcune aziende produttrici di rilievo, al fine di avere un riferimento chiaro riguardo alle scelte progettuali e che possono essere eventualmente verificate. Tutte le scelte progettuali sono state selezionate in modo da rientrare nei parametri richiesti dal D.M. 26 giugno 2015 "Requisiti minimi".

Al fine del raggiungimento dell'obiettivo del comfort termico, l'intervento di isolamento dell'involucro dell'edificio (opaco – pareti esterne e solaio di copertura –, e trasparente) ha migliorato le prestazioni termiche delle componenti edilizie, ottenendo la riduzione degli scambi di energia (e di massa) tra l'ambiente interno e quello esterno. Nonostante le infiltrazioni d'aria attraverso i serramenti siano prossimi allo 0, il sistema di ventilazione meccanica, integrato nel telaio del serramento, garantisce la diluizione della concentrazione

di CO_2 nell'ambiente interno, e grazie al recuperatore di calore l'aria esterna immessa viene portata vicino alle condizioni di temperatura dell'ambiente interno (viene pre-riscaldata se la temperatura dell'aria esterna è inferiore a quella interna oppure pre-"raffrescata" se la temperatura dell'aria esterna è maggiore di quella interna). Il sistema di gestione della ventilazione meccanica può essere manuale o definito automaticamente mediante predisposizione di un programma di operazione; in questo modo si ha un ricambio d'aria continuo mantenendo il livello della concentrazione di inquinanti al di sotto della soglia limite (il sistema di ventilazione non rileva le concentrazioni mediante sensori, tuttavia, come dimostrato con le simulazioni, un ricambio d'aria continuo mantiene i livelli entro il limite soglia).

Il contributo del sistema di schermatura solare è molto importante in quanto riduce gli apporti termici dovuti all'irraggiamento solare nelle ore centrali della giornata. Ciò avviene mediante un controllo di tipo automatico in funzione dell'irradianza solare: superato il valore soglia preimpostato, la schermatura viene attivata.

Una attenta selezione dell'impianto di illuminazione artificiale permette un'ulteriore diminuzione degli apporti termici dovuti: infatti, grazie all'uso di apparecchi luminosi con sorgente luminosa a LED (avendo un'efficienza luminosa più elevata e consumi di energia più bassi) ed al controllo sulla base della presenza e soprattutto della luce diurna è possibile diminuire automaticamente l'uso dell'illuminazione artificiale, garantendo allo stesso tempo i requisiti minimi sul piano di lavoro. Si è inoltre dimostrato come ciò possa portare anche ad un risparmio in termini di consumi di energia elettrica.

Gli interventi e le soluzioni progettuali adottati sono solamente un esempio fra molti altri, in quanto il mercato mette a disposizione tantissime possibilità. Quelle adottate hanno lo scopo di verificare il raggiungimento del comfort dell'ambiente interno, e infatti non vi è stato alcuno studio di tipo compositivo e formale dell'edificio oggetto di studio, in quanto non rientrava nei fini della presente tesi.

Riferimenti bibliografici

Bibliografia

[1] ALFANO G., D'AMBROSIO F. R., RICCIO G., 1998, *Disagio e stress termico: effetti, normative, valutazione e controllo*. Atti del Convegno DBA "Dal rumore ai rischi fisici", Modena, 17-19 settembre 1998, 531-533

[2] ANIT – Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e acustico, *UNI EN ISO 52016-1 per l'analisi dinamica*, in ANIT [www.anit.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.anit.it/uni-en-iso-52016-1-lanalisi-dinamica/.
Consultato il 11 gennaio 2019.

[3] ARPA Piemonte, 16 aprile 2015, *Radon*. Disponibile all'indirizzo: http://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/radioattivita/radon/radon.
Consultato il 23 dicembre 2015.

[4] ASHRAE, 62-1999, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*, America Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA

[5] ASHRAE, 2001, *Physiological Principles for Comfort and Health*, America Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, Capitolo 8

[6] BATTISTI A., 12 settembre 2012, *Ventilazione naturale*, in Wikitecnica [www.wikitecnica.com]. Disponibile all'indirizzo: http://www.wikitecnica.com/ventilazione-naturale/.
Consultato il 7 gennaio 2019.

[7] C2R ENERGY CONSULTING S.R.L, 3 aprile 2018, *La simulazione dinamica nella progettazione: strumento di nicchia o reale passo verso l'efficienza energetica?* in inGENIO [www.ingenio-web.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.ingenio-web.it/19514-la-simulazione-dinamica-nella-progettazione-strumento-di-nicchia-o-reale-passo-verso-lefficienza-energetica.
Consultato il 13 agosto 2018

[8] CAPOZZOLI, V. CORRADO, A. GORRINO, P. SOMA, 2011, *Atlante nazionale dei ponti termici – conforme alle norme UNI EN ISO 14683 e UNI EN ISO 10211*, Edizioni Edilclima

[9] CAPPELLETTI F. (ricercatrice FTA, Università IUAV), PENNA P. (assegnista ricerca, Libera Università di Bolzano-Bozen), GASPARELLA A. (Prof. FTA, Libera Università di Bolzano-Bozen), 11 aprile 2018, *La calibrazione della simulazione dinamica degli edifici esistenti*, in inGENIO [www.ingenio-web.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.ingenio-web.it/5536-la-calibrazione-della-simulazione-dinamica-degli-edifici-esistenti.
Consultato il 13 agosto 2018

[10] CORRADO V. (DENERG Politecnico di Torino), BALLARINI I. (DENERG), PADUOS S. (DENERG), PRIMO E. (DENERG), MADONNA F. (MSE, Milano), *Application of Dynamic Numerical Simulation to Investigate the Effects of Occupant Behaviour Changes in Retrofitted Buildings*, in IBPSA [www.ibpsa.org]. Disponibile all'indirizzo: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2017/BS2017_499.pdf.
Consultato il 16 agosto 2018

[11] CORRADO V., BALLARINI I., DE LUCA G., PRIMO E., IATAURO D., Riqualificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione nZEB – Studio dell'edificio di riferimento uso uffici della PA nella zona climatica Nord Italia (zone E: 2.100 < GG ≤ 3.000), in ENEA [www.enea.it]. Disponibile all'indirizzo: http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-

enea-2015-2017/edifici-nzeb/rds_par2016_252.pdf.
Consultato il:10 aprile 2019.

[12] DE SANTOLI L., MARIOTTI M., 2011, *La ventilazione naturale – Il moto naturale dell'aria per il controllo delle condizioni ambientali*, in Dario Flaccovio Editore [www.darioflaccovio.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.darioflaccovio.it/abstracts/9788857900780/ventilazione-naturale-edifici-benessere-termoigrometrico_9788857900780.pdf.
Consultato il 9 gennaio 2019.

[13] Design Builder Italia, 1° dicembre 2015, *La simulazione dinamica per consulenze con Design Builder in ambito professionale*. Disponibile all'indirizzo: http://www.designbuilderitalia.it/simulazione-dinamica-per-consulenze-professionali/.
Consultato il 13 agosto 2018

[14] Design Builder Italia, *Design Builder EnergyPlus Simulation Documentation – for Design Builder v3.0*. Disponibile all'indirizzo: http://www.designbuilderitalia.it/download/1825/.
Consultato il 5 luglio 2018.

[15] Designing Buildings, 26 agosto 2018, *Building Automation and Control Systems BACS*, in Designing Buildings Wiki [www.designingbuildings.co.uk]. Disponibile all'indirizzo: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Building_Automation_and_Control_System_BACS.
Consultato il 10 gennaio 2019.

[16] DESOGUS G., 2015-16, *Lezioni del laboratorio di progettazione tecnica e strutturale 2015-16 – La ventilazione naturale e il raffrescamento passivo*, Università degli studi di Cagliari, Facoltà di Architettura. Disponibile all'indirizzo: http://people.unica.it/giuseppedesogus/files/2016/05/Lezione-Ventilazione-naturale-e-raffrescamento-passivo.pdf.
Consultato il 7 gennaio 2019.

[17] Edilportale, *Neopor – Pannello isolante in EPS con grafite*, in Edilportale [www.edilportale.com]. Disponibile all'indirizzo: https://www.edilportale.com/prodotti/neopor-by-basf/pannello-isolante-in-eps-con-grafite/neopor_5636.html.
Consultato il 2 luglio 2019.

[18] EnergyPlus, 10 ottobre 2018, *Energy Plus*, in [www.energyplus.net]. Disponibile all'indirizzo: https://energyplus.net.
Consultato il 11 gennaio 2019.

[19] FABRIZIO E. (DENERG Politecnico di Torino), BECCHIO C. (DENERG), CANTAMESSA P. (DENERG), FLORIO P. (DENERG), MONETTI V. (DENERG), 21 febbraio 2018, *Simulazione dinamica e BACS applicati ad un edificio scolastico*, in inGENIO [www.ingenio-web.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.ingenio-web.it/19026-simulazione-dinamica-e-bacs-applicati-ad-un-edificio-scolastico.
Consultato il 13 agosto 2018

[20] GIACHETTA A., Corso di progettazione bioclimatica – modulo: tecnologie bioclimatiche – Raffrescamento passivo e controllo della ventilazione in ambienti confinati, Università degli studi di Genova, Facoltà di Architettura. Disponibile all'indirizzo: https://architettura.unige.it/did/l2/architettura/quarto0506/progettbioclimatica/matdid/32.pdf.
Consultato il 8 gennaio 2019.

[21] LUCCHI E. (a cura di), 15 ottobre 2013, *Vantaggi della ventilazione naturale per garantire il raffrescamento passivo degli edifici*, in Infobuildenergia [www.infobuildenergia.it].

Disponibile all'indirizzo: https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/la-ventilazione-naturale-in-edilizia-158.html.
Consultato il 8 gennaio 2019.

[22] MAICO ITALIA, CRESCINI G. (a cura di), 14 marzo 2016, *Teoria e pratica della ventilazione meccanica controllata*, in inGenio [www.ingenio-web.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.ingenio-web.it/13653-ecco-la-guida-completa-teoria-e-pratica-della-ventilazione-meccanica-controllata.
Consultato il 8 gennaio 2019.

[23] Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare, 22 novembre 2018, *I criteri ambientali minimi*. Disponibile all'indirizzo: http://www.minambiente.it/pagina/i-criteri-ambientali-minimi.
Consultato il 11 gennaio 2019.

[24] Ministero della Salute, *Aria indoor*. Disponibile all'indirizzo: http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_4.jsp?lingua=italiano&tema=Ambiente%20e%20salute&area=indor.
Consultato il 22 dicembre 2018.

[25] Ministero della Salute, 16 dicembre 2015, *Qualità dell'aria indoor*. Disponibile all'indirizzo: http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4384&area=indor&menu=vuoto.
Consultato il 22 dicembre 2018.

[26] Ministero della Salute, 16 dicembre 2015, *Inquinamento dell'aria indoor*. Disponibile all'indirizzo: http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4385&area=indor&menu=vuoto.
Consultato il 22 dicembre 2018.

[27] OSRAM Lighting solutions, *Taris l quadrato – con sensore di presenza e luce diurna l con sistema ottico ibrido*, in Osram [www.osram.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.osram.it/ls/ecat/con%20sensore%20di%20presenza%20e%20di%20luce%20diurna%20-%20con%20sistema%20ottico%20ibrido-Taris%20-%20quadrato-apparecchi%20per%20ampie%20superfici%20per%20montaggio%20a%20plafone-Apparecchi%20per%20interni/it/it/GPS01_2958341/PP_EUROPE_IT_eCat/ZMP_3000359/.
Consultato il 4 luglio 2019.

[28] Pasini, *Foglio tecnico – Coefficiente di trasmissione energetica totale*, in Pasini S.p.A. [www.pasinispa.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.pasinispa.it/wp-content/uploads/2019/02/DOC-2-GTOT.pdf.
Cosultato il 3 luglio 2019.

[29] PADUOS S. (C2R), 22 febbraio 2018, *L'effetto degli occupanti analizzato attraverso la simulazione dinamica*, in inGENIO [www.ingenio-web.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.ingenio-web.it/19035-leffetto-degli-occupanti-analizzato-attraverso-la-simulazione-dinamica.
Consultato il 13 agosto 2018

[30] PETRUCCI F., 24 giugno 2010, *Edifici efficienti, cosa cambia con le nuove regole europee*, in Nextville. Energie Rinnovabili ed Efficienza energetica [www.nextville.it]. Disponibile all'indirizzo: http://www.nextville.it/approfondimenti/31.
Consultato il 19 dicembre 2018.

[31] RICCI R., 22 novembre 2013, *KNX e DALI, la soluzione intelligente*, KNX Day 2013 – Il mondo a portata di mano, Milano. Disponibile all'indirizzo: http://www.knx.it/download/Workshops/KNX_DAY_2013_KNX_DALI_La_soluzione_vincente.pdf.
Consultato il 4 luglio 2019.

[32] Riwega, *Barriere al vapore sintetiche*, in Riwega [www.riwega.com]. Disponibile all'indirizzo: https://www.riwega.com/barriere-al-vapore-sintetiche/#1501150514710-4bccc656-9745a167-caebb21d-f2820f5c-90c5.
Consultato il 2 luglio 2019.

[33] Rockwool, *Coperture piane – Rockacier C Soudable*, in Rockwool [www.rockwool.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.rockwool.it/prodotti/coperture/coperture-piane/rockacier-c-soudable-rockacier-c-soudable-energy/?selectedCat=documentazione%20tecnica.
Consultato il 2 luglio 2019.

[34] Rockwool, *Isolamento a cappotto – Sistema REDArl*, in Rockwool [www.rockwool.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.rockwool.it/prodotti/facciate/isolamento-a-cappotto/frontrock-max-plus/
Consultato il 2 luglio 2019.

[35] ROLLINO L. (A.D. C2R), TULIPANO L. (Consultant C2R), FOTACHE G. (C2R), OLIVOTTO C. (C2R), VANACORE L. (C2R), 22 febbraio 2018, *La simulazione dinamica e i vantaggi nell'applicazione impiantistica per la riqualificazione energetica*, in inGENIO [www.ingenio-web.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.ingenio-web.it/19038-la-simulazione-dinamica-e-i-vantaggi-nellapplicazione-impiantistica-per-la-riqualificazione-energetica.
Consultato il 13 agosto 2018

[36] SASSI G., PAGLIOLICO S., 2017, *Seminario tematico. VOCs e Rischio*, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura per il Progetto sostenibile

[37] SCIURPI F. (PhD Università degli Studi di Firenze), CARLETTI C. (PhD), CELLAI G. (Prof. Ass.) 22 febbraio 2018, *Controllo microclimatico negli ambienti museali attraverso la simulazione dinamica*, in inGENIO [www.ingenio-web.it]. Disponibile all'indirizzo: https://www.ingenio-web.it/19034-controllo-microclimatico-negli-ambienti-museali-attraverso-la-simulazione-dinamica.
Consultato il 13 agosto 2018

[38] SURRA M., SIMONETTI M., 30 novembre 2001, *Integrazione dei sistemi di ventilazione ibrida negli edifici*, in Studio Surra [www.surra.it]. Disponibile all'indirizzo: http://www.surra.it/files/011018_Progettare_involucro_edilizio_RI_19-1--SOSTITUISCE-Integrazione-dei-sistemi-di-ventilazione-ibrida-negli-edifici.pdf.
Consultato il 8 gennaio 2019.

[39] UNI, Ente Italiano di Normazione, 2 agosto 2011. *Prestazione energetica nell'edilizia: la nuova direttiva 2010/31/UE*. Disponibile all'indirizzo: http://www.uni.com/index.php?option=com_content&view=article&id=1037%3Aprestazione-energetica-nelledilizia-la-nuova-direttiva-201031ue&catid=111%3Agenerale&Itemid=546#,
Consultato il 20 dicembre 2018.

[40] VIVONA A., PERON F., 2015-16, *Illuminazione naturale e fattore di luce diurna*, Università IUAV di Venezia. Disponibile all'indirizzo: http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architettu/docenti-st/Fabio-Pero/materiali-/elementi-

d/scheda-01-fmld.pdf.
Consultato il 10 gennaio 2019.

[41] Weru Group, *Finestre in PVC – durature e stabili nella forma*, in Weru [www.weru.it]. Disponibile all'indirizzo: http://www.weru.it/it/clienti-privati/prodotti/finestre/finestre-in-pvc.html.
Consultato il 3 luglio 2019.

[42] Weru Group, *Sereno – la finestra di qualità affidabile*, in Weru [www.weru.it]. Disponibile all'indirizzo: http://www.weru.it/it/clienti-privati/sistemi-weru/sistemi-di-finestre/finestre-sereno.html.
Consultato il 3 luglio 2019.

[43] Weru Group, *La soluzione compatta per tapparelle – per ambienti rischiarati e luminosi*, in Weru [www.weru.it]. Disponibile all'indirizzo: http://www.weru.it/it/clienti-privati/sistemi-weru/sistemi-di-tapparelle-e-frangisole/tapparelle-per-nuove-costruzioni-e-ristrutturazioni/soluzione-compatta.html.
Consultato il 3 luglio 2019.

[44] Weru Group, *Frangisole per ristrutturazioni e nuove costruzioni – il vostro sistema di comando della luce diurna personalizzato*, in Weru [www.weru.it]. Disponibile all'indirizzo: http://www.weru.it/it/clienti-privati/sistemi-weru/sistemi-di-tapparelle-e-frangisole/frangisole-per-ristrutturazioni-e-nuove-costruzioni.html.
Consultato il 3 luglio 2019.

[45] Weru Group, *Ventilazione con recupero del calore – lo straordinario ventilatore AerotTherm di Weru*, in Weru [www.weru.it]. Disponibile all'indirizzo: http://www.weru.it/it/clienti-privati/prodotti/finestre/ventilazione-finestre/ventilazione-con-recupero-del-calore.html.
Consultato il 3 luglio 2019.

[46] WHO – World Health Organization, Iris. Institutional Repository for Information Sharing. Disponibile all'indirizzo: http://apps.who.int/iris/
Consultato il 30 dicembre 2018.

[47] WHO, 1958, World Health Organization, *Air pollution: fifth report of the Expert Committee on Environmental Sanitation*. Geneva. WHO Technical Report Series, No. 157. Disponibile all'indirizzo: http://apps.who.int/iris/handle/10665/40416
Consultato il 30 dicembre 2018.

[48] WHO, 1972, World Health Organization, *Air quality criteria and guides for urban air pollutants*. Geneva. WHO Technical Report Series, No. 506. Disponibile all'indirizzo: http://apps.who.int/iris/handle/10665/40989
Consultato il 30 dicembre 2018.

[49] WHO, 1987, World Health Organization Regional Office for Europe, *Air quality guidelines for Europe*, Copenhagen, WHO Regional Publications, European Series, No. 23. Disponibile all'indirizzo: http://apps.who.int/iris/handle/10665/107364
Consultato il 30 dicembre 2018.

[50] WHO, 2005, World Health Organization Regional Office for Europe, *Air quality guidelines: global update 2005 – particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*, Copenhagen, WHO Regional Office for Europe. Disponibile all'indirizzo: http://apps.who.int/iris/handle/10665/107823
Consultato il 30 dicembre 2018.

[51] WHO, 2017, *Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future*, Copenhagen, WHO Regional Office for Europe. Disponibile all'indirizzo: http://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/evolution-of-who-air-quality-

guidelines-past,-present-and-future-2017
Consultato il 30 dicembre 2018

Sitografia

[52] https://www.anit.it
[53] http://apps.who.int/iris
[54] https://architettura.unige.it
[55] http://www.arpa.piemonte.it
[56] https://www.darioflaccovio.it
[57] https://www.designbuilder.co.uk
[58] http://www.designbuilderitalia.it
[59] https://www.designingbuildings.co.uk
[60] https://www.dial.de/en/dialux/
[61] https://www.edilportale.com
[62] http://www.enea.it
[63] https://energyplus.net
[64] http://www.ibpsa.org
[65] https://www.infobuildenergia.it
[66] https://www.ingenio-web.it
[67] http://www.istruzionepiemonte.it/torino/
[68] http://www.iuav.it/
[69] http://www.knx.it
[70] https://midcdmz.nrel.gov/solpos/solpos.htm
[71] http://www.minambiente.it
[72] http://www.nextville.it
[73] https://www.osram.it
[74] https://www.pasinispa.it
[75] https://www.rockwool.it
[76] http://people.unica.it
[77] http://www.salute.gov.it
[78] http://www.surra.it
[79] http://www.uni.com
[80] http://www.weru.it
[81] https://www.yourglass.com/configurator/it/it/toolbox/configurator/main.html

Normativa tecnica

[82] Decreto Legislativo del 26 maggio 2000, n. 241, *Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti*

[83] Decreto Legislativo del 27 marzo 2006, n. 161, *Attuazione della Direttiva 2004/42/CE, per la limitazione delle emissioni di composti organici volatili conseguenti all'uso di solventi in talune pitture e vernici, nonché in prodotti per la carrozzeria*

[84] Decreto Ministeriale del 3 ottobre 2012, *Modifica dell'allegato III del Decreto legislativo 27 marzo 2006, n. 161, in materia di composti organici volatili*

[85] Decreto Ministeriale del 26 giugno 2015 – *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*

[86] Decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50, *Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture*

[87] Decreto Ministeriale dell'11 gennaio 2017, *Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi, per l'edilizia e per i prodotti tessili*

[88] Legge n. 10 del 1991, *Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso nazionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia*, modificata successivamente dai Decreti legislativi 192 del 2005 e 311 del 2007

[89] Legge 29 dicembre 2015, n. 221, *Disposizioni in materia ambientale per promuovere misure di green economy e per il contenimento dell'uso eccessivo di risorse naturali*

[90] Direttiva Europea 1996/29/EURATOM, 13 maggio 1996, del Consiglio, *che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti*

[91] Direttiva Europea 2002/91/CE, 16 dicembre 2002, del Parlamento Europeo e del Consiglio, *sul rendimento energetico nell'edilizia*

[92] Direttiva Europea 2004/42/CE, 21 aprile 2004, del Parlamento Europeo e del Consiglio, *relativa alla limitazione delle emissioni di composti organici volatili dovute all'uso di solventi organici in talune pitture e vernici e in taluni prodotti per carrozzeria recante modifica della Direttiva 1999/13/CE*

[93] Direttiva Europea 2010/31/UE, 19 maggio 2010, del Parlamento Europeo e del Consiglio, *sulla prestazione energetica nell'edilizia*

[94] Direttiva Europea 2010/79/UE, 19 novembre 2010, del Parlamento Europeo e del Consiglio, *sull'adeguamento al processo tecnico dell'allegato III della Direttiva 2004/42/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio relativa alla limitazione delle emissioni di composti organici volatili*

[95] D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412 – *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10*

[96] D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59 – *Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n.192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*

[97] FprEN 16798-1:2018 – *Energy performance of buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Module M1-6*

[98] FprCEN/TR 16798-2:2018 – *Energy performance of buildings – Part 2: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Module M1-6 – Technical report – Interpretation of the requirements in EN 16798-1*

[99] UNI EN ISO 7726:2002 – *Ergonomia degli ambienti termici – Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*

[100] UNI EN ISO 7730:2006 – *Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*

[101] UNI EN ISO 8996:2005 – *Ergonomia dell'ambiente termico – determinazione del metabolismo energetico*

[102] UNI EN ISO 9920:2009 – *Ergonomia dell'ambiente termico – Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento*

[103] UNI EN ISO 10211:2018 – *Ponti termici in edilizia – Flussi termici e temperature superficiali – Calcoli dettagliati*

[104] UNI 10339:1995 – *Impianti aeraulici a fini di benessere – Generalità, classificazione e requisiti – Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*

[105] UNI EN ISO 10551:2002 – *Ergonomia degli ambienti termici – Valutazione dell'influenza dell'ambiente termico mediante scale di giudizio soggettivo*

[106] UNI 10840:2007 – *Luce e illuminazione – Locali scolastici – Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale*

[107] UNI/TS 11300-1:2014 – *Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*

[108] UNI EN ISO 11399:2001 – *Ergonomia degli ambienti termici – Principi e applicazione delle relative norme internazionali*

[109] UNI 11630:2016 – *Luce e illuminazione – Criteri per la stesura del progetto illuminotecnico*

[110] UNI EN 12464-1:2011 – *Luce e illuminazione – Illuminazione dei posti di lavoro – Parte 1: Posti di lavoro in interni*

[111] UNI EN 12665:2018 – *Luce e illuminazione – Termini fondamentali e criteri per i requisiti illuminotecnici*

[112] UNI EN 12792:2005 – *Ventilazione degli edifici – Simboli, terminologia e simboli grafici*

[113] UNI EN 12831:2006 – *Impianti di riscaldamento negli edifici – Metodo di calcolo del carico termico di progetto*

[114] ISO 13731:2001 – *Ergonomics of the thermal environment – Vocabulary and symbols*

[115] UNI EN ISO 14683:2018 – *Ponti termici in edilizia – Coefficiente di trasmissione termica lineica – Metodi semplificati e valori di riferimento*

[116] UNI EN 15193-1:2017 – *Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione – Parte 1: Specificazioni, Modulo M9*

[117] UNI CEN/TR 15193-2:2017 – *Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione – Parte 2: Spiegazione e giustificazione della EN 15193-1, Modulo M9*

[118] UNI EN 15251:2008 – *Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica*

[119] UNI EN ISO 15265:2005 – *Ergonomia dell'ambiente termico – Strategia di valutazione del rischio per la prevenzione dello stress o del disagio termico in condizioni di lavoro*

[120] UNI EN ISO 16484-1:2010 – *Automazione degli edifici e sistemi di controllo (BACS) – Parte 1: Specifiche e attuazione del progetto*

[121] UNI EN ISO 16484-2:2004 – *Automazione degli edifici e sistemi di controllo (BACS) – Parte 2: Hardware*

[122] UNI CEN/TS 16628:2014 – *Prestazione energetica degli edifici – Principi base per la serie di norme EPB*

[123] UNI CEN/TS 16629:2014 – *Prestazione energetica degli edifici – Regole tecniche dettagliate per la serie di norme EPB*

[124] UNI EN 16798-3:2018 – *Prestazione energetica degli edifici – Parte 3: Per gli edifici non residenziali – Requisiti prestazionali per i sistemi di ventilazione e di condizionamento degli ambienti (Moduli M5-1, M5-4)*

[125] UNI EN 16798-7:2018 – *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici – Parte 7: Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici compresa l'infiltrazione (Moduli M5-5)*

[126] ISO/DIS 18523-1:2016 – *Energy performance of buildings – Schedule and condition of building, zone and room usage for energy calculation – Part 1: Non-residential buildings*

[127] UNI EN ISO 52000-1:2018 – *Prestazione energetica degli edifici – Valutazione globale EPB – Parte 1: Struttura generale e procedure*

[128] UNI EN ISO 52016-1:2018 – *Prestazione energetica degli edifici – Fabbisogni energetici per riscaldamento e raffrescamento, temperature interne e carichi termici sensibili e latenti – Parte 1: Procedure di calcolo*

[129] UNI EN ISO 52017-1:2018 – *Prestazione energetica degli edifici – Carichi termici sensibili e latenti e temperature interne – Parte 1: Procedure generali di calcolo*

[130] UNI EN ISO 52022-1:2018 – *Prestazione energetica degli edifici – Proprietà termiche, solari e luminose di componenti ed elementi edilizi – Parte 1: Metodo di calcolo semplificato delle caratteristiche luminose e solari per dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate*

Indice delle figure

Figura 1.1. Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto medio previsto (PMV) 10
Figura 1.2. Valori di progetto per la temperatura operativa interna per edifici senza sistemi di raffrescamento meccanico in funzione della temperatura media esterna 12
Figura 1.3. Ventilazione per effetto camino - schema di funzionamento generale (Immagine tratta da [16]) 26
Figura 1.4. Ventilazione per effetto camino - particolare del sistema del camino solare (Immagine tratta da [16]) 26
Figura 1.5. Ventilazione indotta dal vento - particolari schematici di funzionamento (Immagine tratta da [16]) 27
Figura 1.6. Ventilazione combinata orizzontale/verticale – le bocchette possono essere posizionate in diverse posizioni, al fine di garantire un flusso d'aria utile al completo ricambio dell'aria (Immagine tratta da [16]) 27
Figura 1.7. Ventilazione per mezzo di bocchetta di immissione, posizionata sulla sommità del serramento (Immagine tratta da [16]) 28
Figura 1.8. Ventilazione meccanica controllata (VMC) con recupero di calore - schema generale di funzionamento (Immagine tratta da: http://www.aeraulica.genova.it/impianti-climatizzazione-genova/ventilazione-meccanica-controllata-vmc-genova/) 29
Figura 1.9. Schema rappresentativo dell'illuminamento 38
Figura 1.10. Definizione del fattore di luce diurna 41
Figura 2.1. Struttura gerarchica del modello in Design Builder (Immagine tratta da [14]) 59
Figura 2.2. Esempio di inserimento dati da parte dell'utente: in rosso vi sono i dati modificati, in blu quelli di default per il rispettivo livello nella struttura gerarchica (Immagine tratta da [14]) 59
Figura 2.3. Interfaccia grafica di Design Builder 62
Figura 2.4. Rappresentazione di un programma operativo generico (ufficio) di tipo 7/12 (Immagine tratta da [14]) 71
Figura 2.5. Rappresentazione di un programma operativo generico di tipo compatto (Immagine tratta da [14]) 72
Figura 2.6. Rappresentazione di un profilo giornaliero (illuminazione per uffici) (Immagine tratta da [14]) 73
Figura 2.7. Esempio di risultato di un'analisi CFD delle condizioni esterne - studio della pressione del vento (Immagine tratta da [14]) 74
Figura 2.8. Esempio di risultato di un'analisi CFD delle condizioni interne - comfort degli occupanti (Immagine tratta da [14]) 74
Figura 2.9. Esempio di analisi della luce diurna sotto forma di mappa a scala di colori (Immagine tratta da [14]) 75
Figura 3.1. Inquadramento territoriale (da *Google Maps*) 79
Figura 3.2. Planimetria con indicazione del numero di piani degli edifici adiacenti (elaborazione da *Geoportale del Comune di Torino*) 80

Figura 3.3. Vista dall'alto dell'isolato con individuazione dell'edificio e dell'area adibita a parcheggio (elaborazione da *Google Maps*) 80
Figura 3.4. Inquadramento dell'edificio del Provveditorato agli Studi di Torino 81
Figura 3.5. Viste 3D dell'inserimento dell'edificio nel contesto (da *Google Maps*) 82
Figura 3.6. Dettaglio di facciata (lato Sud) 85
Figura 3.7. Particolare infisso (piano terreno) 85
Figura 3.8. Infissi (a sinistra il tipo 1, a destra il tipo 2) 86
Figura 3.9. Pianta piano terreno – Fuori scala 88
Figura 3.10. Pianta piano tipo - Piano primo, secondo, quarto, quinto – Fuori scala 89
Figura 3.11. Pianta piano terzo – Fuori scala 90
Figura 3.12. Pianta piano sesto - copertura/terrazza – Fuori scala 91
Figura 3.13. Prospetto Nord – Fuori scala 92
Figura 3.14. Prospetto Sud – Fuori scala 93
Figura 3.15. Prospetto Est – Fuori scala 94
Figura 3.16. Prospetto Ovest – Fuori scala 95
Figura 3.17. Questionario di valutazione dell'utilizzo degli spazi lavorativi per audit energetico – Parte 1 98
Figura 3.18. Questionario di valutazione dell'utilizzo degli spazi lavorativi per audit energetico – Parte 2 99
Figura 3.19. Questionario di valutazione dell'utilizzo degli spazi lavorativi per audit energetico – Parte 3 100
Figura 4.1. Schema di pianta da utilizzare come base per la modellazione in Design Builder – Piano tipo – Fuori scala 108
Figura 4.2. Schema di pianta da utilizzare come base per la modellazione in Design Builder – Piano sesto – Fuori scala 109
Figura 4.3. Nuovo progetto: definizione dei sistemi di analisi, ubicazione e template del file modello 110
Figura 4.4. Dati Sito – Template – Ubicazione del progetto e relativi dati climatici reali e di progetto 111
Figura 4.5. Modellazione – Punto 1: posizionamento del disegno in pianta in formato DXF 114
Figura 4.6. Modellazione – Punto 2: tracciamento del perimetro esterno 114
Figura 4.7. Modellazione – Punto 3-4: disegno dei serramenti esterno e degli elementi particolari 115
Figura 4.8. Modellazione – Punto 5: disegno delle partizioni interne 115
Figura 4.9. Modellazione – Punto 6: definizione delle singole zone termiche (template) e correzione dello spessore delle partizioni dove necessario 116
Figura 4.10. Modellazione – Punto 7: disegno dei serramenti interni 116
Figura 4.11. Modellazione – Punto 9: costruzione dell'edificio mediante l'unione dei diversi piani che lo compongono 117
Figura 4.12. Modellazione – Punto 10: costruzione dell'area di progetto mediante il disegno degli edifici circostanti 117
Figura 4.13. Opzioni modello – definizione dei Dati generali del modello 119
Figura 4.14. Raffigurazione schematica della ventilazione naturale (Immagine tratta da [14]) 121

Figura 4.15. Opzioni modello – definizione dei Dati Avanzati del modello 123
Figura 4.16. Opzioni modello – modulazione delle aperture in funzione della differenza di temperatura tra l'ambiente interno ed esterno (Immagine tratta da [14]) 124
Figura 4.17. Opzioni modello – definizione delle opzioni per la simulazione – dati generali 125
Figura 4.18. Opzioni modello – definizione delle opzioni per la simulazione – output (produzione dei risultati) 127
Figura 4.19. Dati Costruzione – Template del modello – Assegnazione delle stratigrafie per ciascun tipo di struttura presente nel modello 129
Figura 4.20. Dati Costruzione – Illustrazione schematica della combinazione delle strutture in Design Builder (Immagine tratta da [14]) 130
Figura 4.21. Dati Aperture – Template del modello – Definizione delle caratteristiche geometriche delle aperture, dei sistemi di schermatura e del loro programma di utilizzo 136
Figura 4.22. Dati Aperture – Illustrazione schematica delle componenti delle aperture 138
Figura 4.23. Foto di un serramento esistente, caratteristico dei piani fuori terra, con telaio in legno e doppio-vetro 138
Figura 4.24. Dati Aperture – Modellazione del sistema di schermatura interno (veneziana) 139
Figura 4.25. Dati Aperture – Illustrazione schematica degli elementi che compongono il sistema di schermatura (a lamelle) (Immagine tratta da [14]) 140
Figura 4.26. Fattore di occupazione orario medio giornaliero – Giorni feriali 142
Figura 4.27. Profilo orario medio di apertura delle finestre (zona tipo) per stagione 144
Figura 4.28. Profilo orario medio di gestione delle chiusure oscuranti (zona tipo) per stagione 146
Figura 4.29. Profilo orario medio di utilizzo dell'illuminazione artificiale (zona tipo) per stagione (frazione della potenza elettrica installata utilizzata ora per ora) 148
Figura 4.30. Dati Attività – Template di modello – Definizione dell'attività svolta dagli occupanti, dei tassi metabolici, controllo ambientale e degli apporti termici 154
Figura 4.31. Dati Attività – Occupazione: definizione della densità di occupazione, tasso metabolico e programma operativo 155
Figura 4.32. Dati Attività – Controllo ambientale: definizione del setpoint di temperatura (di raffrescamento) della ventilazione naturale e rispettivo programma operativa, dei valori di illuminamento (livello e densità) e della portata minima di ventilazione 159
Figura 4.33. Profilo orario medio di utilizzo dei dispositivi da ufficio (PC e stampanti) 161
Figura 4.34. Dati Attività – Apporti termici dovuti ai computer ed ai dispositivi da ufficio 161
Figura 4.35. Dati Illuminazione – Template di modello – Definizione delle caratteristiche dell'apparecchio luminoso 163
Figura 4.36. Tipologia di apparecchio luminoso presente negli uffici, di tipo lineare fluorescente 164

Figura 4.37. Dati HVAC – Template di modello – Ulteriore definizione della ventilazione naturale 166
Figura 4.38. Dati HVAC – Definizione del tasso di ventilazione naturale per l'intero edificio 168
Figura 5.1. Parametri generali delle opzioni di calcolo per la simulazione dinamica 169
Figura 5.2. Indicazione delle zone termiche selezionate per ciascuno dei piani di riferimento 171
Figura 5.3. Andamento delle temperature esterne di bulbo asciutto e "outdoor running mean" 174
Figura 5.4. Valori reali di temperatura operativa interna di riferimento per la determinazione del comfort termico nell'edificio oggetto di studio (senza sistemi di ventilazione meccanica) 175
Figura 5.5. Suddivisione dell'area di comfort termico in fasce, relative a specifiche condizioni 176
Figura 5.6. Distribuzione della temperatura operativa interna simulata – Piano primo 178
Figura 5.7. Distribuzione della temperatura operativa interna simulata – Piano terzo 178
Figura 5.8. Distribuzione della temperatura operativa interna simulata – Piano quinto 179
Figura 5.9. Distribuzione della temperatura operativa interna simulata – Piano sesto 179
Figura 5.10. Distribuzione del numero di ore del periodo di occupazione in cui la temperatura operativa interna si trova all'interno o all'esterno delle fasce di comfort termico 180
Figura 5.11. Indice di comfort termico medio 182
Figura 5.12. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Aprile 184
Figura 5.13. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Maggio 184
Figura 5.14. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Giugno 184
Figura 5.15.Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Luglio 185
Figura 5.16. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Agosto 185
Figura 5.17. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Settembre 185
Figura 5.18. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Ottobre 186
Figura 5.19. Caratteristiche della concentrazione di CO2 nell'ambiente interno per ciascun mese del periodo di free-floating 188
Figura 5.20. Andamento della concentrazione della CO_2 nell'ambiente indoor nel periodo free-floating 189
Figura 5.21. Tassi di ventilazione medi e minimi, e differenza necessaria per la diluizione della concentrazione di CO_2 entro il limite stabilito dalla norma 190
Figura 5.22. Rappresentazione schematica del serramento tipo (esistente) in pianta (a sinistra) e in sezione (a destra) – Fuori scala 195
Figura 5.23. Risultati dei calcoli illuminotecnici in forma grafica – Fuori scala 199
Figura 6.1. Pannello isolante in lana di roccia di tipo "*Rockwool Frontrock Max Plus*" (Immagine tratta da [34]) 207
Figura 6.2. Pannello isolante in lana di roccia di tipo "*Rockwool Rockacier C Soudable*" (Immagine tratta da [33]) 208

Figura 6.3. Serramento di tipo "*Weru Sereno*" (Immagine tratta da [42]) 211
Figura 6.4. Tapparelle avvolgibili di tipo "*Soluzione compatta FE 99 Plus*" per ristrutturazioni (e nuove costruzioni) (Immagine tratta da [43]) 212
Figura 6.5. Frangisole motorizzati con funzionamento automatico di tipo "*FE 2*" (Immagine tratta da [44]) 214
Figura 6.6. Esempio di sistema facciata in seguito all'applicazione del sistema di frangisole di tipo "*FE 2*" (Immagine tratta da [44]) 214
Figura 6.7. Schema di funzionamento del ventilatore tipo "*Weru AeroTherm*" (Immagine tratta da [45]) 215
Figura 6.8. Apparecchio luminoso di tipo "*OSRAM Taris – quadrato*" 217
Figura 6.9. Curva fotometrica dell'apparecchio luminoso di tipo "*OSRAM Taris – quadrato*" 217
Figura 6.10. Esempio di funzionamento del sistema DALI (Immagine tratta da [31]) 217
Figura 6.11. Distribuzione della temperatura operativa post intervento– Piano primo 220
Figura 6.12. Distribuzione della temperatura operativa post intervento – Piano terzo 220
Figura 6.13. Distribuzione della temperatura operativa post intervento – Piano quinto 221
Figura 6.14. Distribuzione della temperatura operativa post intervento – Piano quinto 221
Figura 6.15. Distribuzione del numero di ore del periodo di occupazione in cui la temperatura operativa interna si trova all'interno o all'esterno delle fasce di comfort termico 222
Figura 6.16. Indice di comfort termico medio, ottenuto in seguito agli interventi di miglioramento della qualità dell'ambiente interno 224
Figura 6.17. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Aprile 225
Figura 6.18. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Maggio 226
Figura 6.19. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Giugno 226
Figura 6.20. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Luglio 226
Figura 6.21. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Agosto 227
Figura 6.22. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Settembre 227
Figura 6.23. Concentrazione di CO_2 nell'ambiente interno nel mese di Ottobre 227
Figura 6.24. Caratteristiche della concentrazione di CO2 nell'ambiente interno per ciascun mese del periodo di free-floating 228
Figura 6.25. Tassi di ventilazione medi e minimi, e differenza necessaria per la diluizione della concentrazione di CO_2 entro il limite stabilito dalla norma 229
Figura 6.26. Rappresentazione schematica del serramento tipo (in seguito all'intervento progettuale) in pianta (a sinistra) e in sezione (a destra) – Fuori scala 231
Figura 6.27. Risultati dei calcoli illuminotecnici in forma grafica – Fuori scala 234
Figura 6.28. Potenza elettrica assorbita delle due tipologie di sorgenti: fluorescente lineare (in blu) e LED (in verde) 235

Indice delle tabelle

Tabella 1.1. Categorie di qualità dell'ambiente interno....5
Tabella 1.2. Sensazione termica a sette punti....9
Tabella 1.3. Valori di riferimento per gli indici di benessere termo-igrometrico per gli edifici serviti da impianti meccanizzati....10
Tabella 1.4. Valori di progetto per la temperatura operativa interna in inverno ed estate per edifici sprovvisti di sistemi di ventilazione meccanica....12
Tabella 1.5. Intervallo di temperature per il calcolo orario dell'energia di riscaldamento e raffrescamento in funzione delle quattro categorie di ambiente indoor....15
Tabella 1.6. Correzione della temperatura operativa interna, applicabile ad edifici muniti di ventole o sistemi con cui gli occupanti possono agire sulla velocità dell'aria....15
Tabella 1.7. Principali agenti indoor e potenziali fonti interne....21
Tabella 1.8. Tassi di ventilazione per adulti sedentari, persone non adattabili, per la diluizione delle emissioni (bio-effluenti) delle persone per le differenti categorie....32
Tabella 1.9. Tassi di ventilazione per diluire le emissioni dalle differenti tipologie di edificio....32
Tabella 1.10. Concentrazioni di anidride carbonica CO_2 superiori alla concentrazione esterna assumendo come emissione standard di CO_2 pari a 20 [l/h•persona]....33
Tabella 1.11. Tasso predefinito di ventilazione dell'aria per ufficio (persone non adattabili)....33
Tabella 1.12. Criteri di emissioni inquinanti dei prodotti per le differenti tipologie di edifici....35
Tabella 1.13. Esempio di criteri illuminotecnici per un edificio adibito ad uffici in riferimento alla norma europea UNI EN 12464-1:2011....40
Tabella 1.14. Programma di occupazione di un ufficio singolo....47
Tabella 3.1. Dati generali del fabbricato....83
Tabella 3.2. Caratteristiche degli elementi edilizi opachi verticali....84
Tabella 3.3. Caratteristiche degli elementi opachi orizzontali....86
Tabella 3.4. Caratteristiche dei componenti trasparenti....87
Tabella 3.5. Orario di occupazione dell'edificio....101
Tabella 3.6. Tempi di apertura delle finestre nelle ore di occupazione....101
Tabella 3.7. Tempi di utilizzo delle chiusure oscuranti nelle ore di occupazione....102
Tabella 3.8. Tempi di utilizzo delle schermature solari....102
Tabella 3.9. Tempi di utilizzo dell'illuminazione artificiale....103
Tabella 4.1. Involucro opaco – M1: parete esterna del basamento (piani interrati)....131
Tabella 4.2. Involucro opaco – M2: sotto-finestra della parete esterna del basamento (piani interrati)....131
Tabella 4.3. Involucro opaco – M3: parete esterna....132
Tabella 4.4. Involucro opaco – M4: sotto-finestra della parete esterna (M3)....132
Tabella 4.5. Involucro opaco – M5: parete interna....132

Tabella 4.6. Involucro opaco – M6: cassonetti 133
Tabella 4.7. Involucro opaco – P1: pavimento controterra 133
Tabella 4.8. Involucro opaco – P2: pavimento interno (solaio interpiano) 133
Tabella 4.9. Involucro opaco – S1: copertura piana sul parcheggio 134
Tabella 4.10. Involucro opaco – S2: copertura piana 134
Tabella 4.11 Ponti termici 135
Tabella 4.12. Fattore di occupazione orario 142
Tabella 4.13. Durata e periodo prevalente di apertura delle finestre 143
Tabella 4.14. Profilo orario medio di apertura delle finestre (zona tipo) per stagione 144
Tabella 4.15. Durata e periodo prevalente di gestione delle chiusure oscuranti 145
Tabella 4.16. Profilo orario medio di gestione delle chiusure oscuranti (zona tipo) per stagione 146
Tabella 4.17. Durata e periodo prevalente di utilizzo dell'illuminazione artificiale 147
Tabella 4.18. Profilo orario medio di utilizzo dell'illuminazione artificiale (zona tipo) per stagione (frazione della potenza elettrica installata utilizzata ora per ora) 148
Tabella 4.19. Proprietà delle zone termiche 149
Tabella 4.20. Livelli di illuminamento medio utilizzati per i Template di Attività, secondo i Prospetti 5.1, 5.5 e 5.26 della UNI EN 12464-1 158
Tabella 4.21. Calcolo delle densità di illuminamento per ciascuna tipologia di ambiente 159
Tabella 4.22. Potenza elettrica assorbita da personal computer e dispositivi d'ufficio 160
Tabella 4.23. Profilo orario medio di utilizzo dei dispositivi da ufficio (PC e stampanti) 160
Tabella 4.24. Definizione dei valori dei contributi degli apporti per illuminazione in relazione a ciascuna tipologia di apparecchio luminoso 165
Tabella 4.25. Tassi di ventilazione per uffici non residenziali 167
Tabella 5.1. Periodo dell'anno utilizzato per la simulazione dinamica 169
Tabella 5.2. Selezione delle zone termiche a campione, in funzione del piano e dell'orientamento 170
Tabella 5.3. Percentuale del numero di ore del periodo di occupazione in cui la temperatura operativa interna si trova all'interno o all'esterno delle fasce di comfort termico 181
Tabella 5.4. Concentrazione di CO_2 media settimanale e mensile, in supporto ai grafici nelle figure 186
Tabella 5.5. Caratteristiche della concentrazione di CO2 nell'ambiente interno per ciascun mese del periodo di free-floating 187
Tabella 5.6. Caratteristiche della ventilazione media delle zone di riferimento nel giorno 21 maggio 191
Tabella 5.7. Verifica del tasso di ventilazione nel giorno 21 maggio 192
Tabella 5.8. Segmentazione dell'edificio – spazi che beneficiano dalla luce diurna 194
Tabella 5.9. Elementi per la classificazione della luce diurna 196

Indice delle tabelle

Tabella 5.10. Classificazione della disponibilità di luce diurna in funzione del fattore di luce diurna $D_{Ca,j}$ 196
Tabella 5.11. Caratteristiche della lampada utilizzata per rappresentare il caso esistente 198
Tabella 5.12. Valori di illuminamento e uniformità sul piano del compito visivo 198
Tabella 6.1. Parametri dell'edificio di riferimento 204
Tabella 6.2. Interventi per il miglioramento del comfort 206
Tabella 6.3. Individuazione delle soluzioni per ciascuno degli interventi previsti 206
Tabella 6.4. Involucro opaco – M3: parete esterna – isolamento a cappotto esterno 207
Tabella 6.5. Involucro opaco – S2: copertura piana – isolamento a tetto rovescio 208
Tabella 6.6. Ponti termici in seguito all'isolamento a cappotto esterno 209
Tabella 6.7. Caratteristiche dei componenti trasparenti 210
Tabella 6.8. Involucro opaco – M6: cassonetti – isolamento del pacchetto murario in corrispondenza del cassonetto 211
Tabella 6.9. Caratteristiche del serramento in presenza di schermature solari mobili 213
Tabella 6.10. Coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione solare delle lamelle del frangisole in condizioni completamente chiuse e orientate a 45° 213
Tabella 6.11. Percentuale del numero di ore del periodo di occupazione in cui la temperatura operativa interna si trova all'interno o all'esterno delle fasce di comfort termico (sopra), e differenza di percentuale rispetto alla situazione esistente (sotto) 223
Tabella 6.12. Caratteristiche della concentrazione di CO2 nell'ambiente interno per ciascun mese del periodo di free-floating 228
Tabella 6.13. Elementi per la classificazione della luce diurna 231
Tabella 6.14. Classificazione della disponibilità di luce diurna in funzione del fattore di luce diurna $D_{Ca,j}$ 232
Tabella 6.15. Valori di illuminamento e uniformità sul piano del compito visivo 233
Tabella 6.16. Potenza elettrica assorbita degli apparecchi luminosi a sorgente fluorescente e LED, e differenza in percentuale 235