



Ricerca di Sistema elettrico

Riqualificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione nZEB

Analisi del thermal comfort per l'edificio residenziale pubblico
oggetto di diagnosi energetica nella zona climatica nord Italia
(zona e: $2.100 < \text{gg} \leq 3.000$)

V. Corrado, I. Ballarini, A. Lorenzati, D. Iatauro



RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI PUBBLICI ESISTENTI: DIREZIONE NZEB

Analisi del thermal comfort per l'edificio residenziale pubblico oggetto di diagnosi energetica nella zona climatica Nord Italia (zona E: $2.100 < GG \leq 3.000$)

V. Corrado, I. Ballarini, A. Lorenzati Politecnico di Torino
D. Iatauro ENEA

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Tema di ricerca: Edifici a energia quasi zero (nZEB)

Progetto: Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della pa centrale e locale)
mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nzeb)"

Obiettivo: a.1 "Riqualificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione nzeb

Responsabile del Progetto: ing. Domenico Iatauro, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi del thermal comfort per l'edificio residenziale pubblico oggetto di diagnosi energetica nella zona climatica Nord Italia (zona E: $2.100 < GG \leq 3.000$)

Responsabile scientifico ENEA: ing. Domenico Iatauro.

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: prof. ing. Vincenzo Corrado

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	6
1.1 INQUADRAMENTO DELL'ATTIVITÀ	6
1.2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	7
2 ANALISI DEL CASO STUDIO.....	8
2.1 CARATTERIZZAZIONE DELL'EDIFICIO	8
2.1.1 <i>Informazioni generali e contesto esterno</i>	8
2.1.2 <i>Fabbricato</i>	9
2.1.3 <i>Impianti</i>	11
2.1.4 <i>Utenza</i>	12
2.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO	12
2.2.1 <i>Definizione delle zone termiche</i>	13
2.3 CARATTERISTICHE DI INVOLUCRO ED IMPIANTISTICHE (SdF E NZEB)	14
2.4 VALUTAZIONI ENERGETICHE DELL'EDIFICIO (SdF E NZEB)	15
3 DESCRIZIONE DELLA PROCEDURA DI CALCOLO	17
3.1 IMPIANTO SPENTO - COMFORT ADATTIVO	17
3.2 IMPIANTO ACCESO - METODO DI FANGER: PMV E PPD	19
3.2.1 <i>Potenza metabolica</i>	22
3.2.2 <i>Resistenza termica del vestiario</i>	23
3.3 INDICI DI DISCOMFORT A LUNGO TERMINE	23
3.3.1 <i>Metodo A: percentuale ore di discomfort</i>	23
3.3.2 <i>Metodo B: criterio pesato sulle temperature</i>	23
3.3.3 <i>Metodo C: criterio pesato sui PPD</i>	24
4 ANALISI DI COMFORT ADATTIVO (IMPIANTO SPENTO)	25
5 ANALISI DI COMFORT CON IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE ACCESO	31
5.1 ANALISI DI SENSIBILITÀ	32
6 CONCLUSIONI.....	38
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	39
ALLEGATO A. ELABORATI PROGETTUALI – EDIFICIO A.....	42

Sommario

In una politica europea fortemente incentrata sul risparmio energetico e sulla riduzione dei consumi attuali, il ruolo del patrimonio edilizio esistente sta, di anno in anno, acquistando sempre più importanza. In questo contesto, ENEA e Politecnico di Torino hanno avviato una serie di progetti in collaborazione, relativi alla riqualificazione energetica del parco edilizio pubblico (inteso come scuole, ospedali, uffici della PA ed edilizia residenziale pubblica), aventi come obiettivo finale il soddisfacimento dei requisiti degli edifici a energia quasi zero (nZEB). Oltre al soddisfacimento dei requisiti minimi, è importante analizzare anche la qualità dell'ambiente interno degli oggetti di intervento di riqualificazione, verificando il rispetto dei requisiti di comfort termogrometrico. In particolare, questa specifica ricerca è incentrata sull'analisi di un edificio-tipo di edilizia residenziale pubblica nella zona climatica Nord Italia (zona E: $2100 < GG \leq 3000$). Le metodologie adottate in questa ricerca consentono la valutazione, da un lato, del comfort ad impianti spenti durante le stagioni intermedie ed estiva (connessa all'individuazione delle ore in *free-floating*), dall'altro del comfort che si riesce ad ottenere tramite l'utilizzo di impianti di riscaldamento e raffrescamento (connesso all'analisi dei consumi conseguenti). Lo studio si basa sull'esecuzione di simulazioni dinamiche dettagliate, finalizzate alla valutazione di consumi e condizioni climatiche interne, utilizzati poi come dati di input per le verifiche di comfort necessarie (**Sezione 1**).

Il caso studio da analizzare è stato scelto in modo da essere rappresentativo della tipologia edilizia in cui si colloca (**Sezione 2**). Nello specifico, è stato individuato un condominio di edilizia popolare nella periferia Nord di Torino, facente parte di un lotto di due condomini gemelli. Tale condominio, essendo stato costruito nei primi anni '90, è già provvisto allo stato di fatto di un livello minimo di isolamento termico. L'edificio è servito da impianti di riscaldamento autonomi a radiatori con caldaie a metano. Una volta individuato il caso studio, si è proceduto alla sua modellazione per poterne eseguire le simulazioni dinamiche allo stato di fatto e *post-retrofit* nZEB. Il modello dell'edificio è stato preventivamente calibrato [32] sulla base di dati di consumi ed utenza reali, relativi ad uno specifico appartamento-tipo. La configurazione nZEB è stata ottenuta ipotizzando come sistema di generazione (sia riscaldamento, sia integrazione ACS da solare termico) una pompa di calore invertibile, e conseguente sostituzione dei terminali di emissione. La classe energetica dell'appartamento-tipo nZEB è la A2, mentre allo stato di fatto è la D.

Le due analisi di comfort (orarie) effettuate differiscono non solo per le finalità, ma anche per la metodologia seguita (**Sezione 3**). Innanzitutto sono state effettuate valutazioni di tipo adattivo ad impianti spenti nel periodo dalla seconda metà di aprile alla prima metà di ottobre (EN 16798-1 [6] e CEN/TR 16798-2 [7]). Nel caso dell'edificio nZEB, si è ipotizzato di non utilizzare l'impianto di raffrescamento durante questi mesi, in modo tale da evidenziarne l'eventuale necessità in caso di condizioni di discomfort. La configurazione nZEB è stata pertanto denominata nZEB*, per evidenziare l'assenza degli impianti di climatizzazione (si considerano quindi solo gli interventi relativi all'involucro e al fabbricato). In un secondo tempo si è investigato il comfort ad impianti accesi, tramite il metodo stazionario di Fanger (UNI EN ISO 7730 [5]), durante la stagione di riscaldamento nel caso dello SdF (zona climatica E, dal 15 aprile al 15 ottobre) e durante tutto l'anno nel caso di edificio nZEB (essendo quest'ultimo provvisto di impianto di climatizzazione sia invernale che estiva). In questo secondo caso è stata effettuata un'analisi di sensibilità, facendo variare la temperatura di *set-point* degli impianti. Scopo dell'indagine è l'individuazione della temperatura di *set-point* ottimale, che permetta di massimizzare il comfort e ridurre il fabbisogno energetico della singola zona termica. Entrambe le analisi sono state condotte su quattro zone termiche diverse, coincidenti con quattro appartamenti, selezionate in maniera tale da caratterizzare l'intero edificio nel modo più completo possibile (diverse esposizioni e superfici disperdenti).

Oltre alla valutazione del benessere termico su base oraria, sono stati valutati gli indici di discomfort a lungo termine, secondo quanto previsto dalle norme UNI EN ISO 7730 [5] e CEN/TR 16798-2 [7], differenziati in discomfort complessivo, discomfort freddo e discomfort caldo.

Le analisi di comfort di tipo adattivo [6] (**Sezione 4**) hanno dimostrato l'efficacia della strategia nZEB* nella riduzione del discomfort freddo, mentre in caso di discomfort caldo l'effetto è minimo, se non controproducente (nel caso delle zone termiche orientate a nord ovest). A seconda della zona termica

considerata, la percentuale di ore in discomfort caldo (sulla stagione analizzata) varia da un minimo di 8% ad un massimo di 23%. Si è quindi dimostrata la necessità dell'utilizzo di sistemi di condizionamento estivo.

A questo punto è stata effettuata la verifica del comfort stazionario orario ad impianti accesi (**Sezione 5**): per lo stato di fatto si è considerata la stagione di riscaldamento (15/10 - 15/04), mentre per l'edificio nZEB, l'intero anno (stagione di riscaldamento 15/10 - 15/04 + raffrescamento 16/04 - 14/10) [5]. Tale procedura richiede l'assunzione di alcune variabili (attività metabolica, resistenza termica del vestiario e velocità dell'aria interna) e per tale motivo i risultati ottenuti non sono generalizzabili. Sono comunque estremamente utili per capire le potenzialità di variazione del livello di comfort e la sua relazione con i fabbisogni energetici conseguenti. L'analisi di sensibilità è stata effettuata variando la temperatura di *set-point* di riscaldamento tra 19 °C e 22 °C, e quella di raffrescamento tra 24 °C e 27 °C. I livelli di comfort ottenuti sono stati confrontati con i corrispondenti fabbisogni di energia termica, in modo tale da individuare la temperatura di *set-point* ottimale anche in funzione dei consumi energetici. Tale temperatura varia in funzione della zona termica, e tende ad essere di un grado più elevata nel caso di edificio allo stato di fatto. In ogni caso, non assume mai il valore di 22 °C (caldo eccessivo).

La configurazione nZEB ha l'effetto costante di ridurre i consumi (tra il 30% e il 60% a seconda della zona termica), il discomfort totale e il discomfort freddo, mentre il discomfort caldo tende ad aumentare per appartamenti orientati a nord - ovest e a diminuire per quelli orientati a sud - est.

Per quanto riguarda il periodo di raffrescamento, si è osservato come, in caso di livelli di isolamento molto elevati (target nZEB), sia necessario utilizzare una temperatura di *set-point* di 25 °C (un grado in meno rispetto a quella comunemente utilizzata per la progettazione estiva).

1 Introduzione

1.1 Inquadramento dell'attività

L'attività descritta nel presente rapporto si riferisce all'Accordo di Programma stipulato fra il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, riguardante il Piano Annuale di Realizzazione 2017, all'Area D "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici", tema di ricerca "D.2 Edifici a energia quasi zero (nZEB)", progetto D.2.1 "Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici (scuole, ospedali, uffici della PA centrale e locale) mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)", obiettivo a.1 "Studio di un edificio di edilizia residenziale pubblica di riferimento nella zona climatica Nord Italia (zona E: $2100 < GG \leq 3000$)". Il tema sviluppato nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento Energia (DENERG) del Politecnico di Torino ha riguardato la riqualificazione energetica di edifici di edilizia residenziale pubblica, in applicazione del DM 26 giugno 2015 sulla definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici [1]. Nello specifico, le attività di seguito presentate sono specificate all'interno dell'allegato tecnico (che si configura come *addendum*) dell'attività di ricerca dal titolo "Studio di un edificio di edilizia residenziale pubblica di riferimento nella zona climatica Nord Italia (zona E: $2100 < GG \leq 3000$)" di cui sopra [26].

L'attività è consistita in una serie di analisi di comfort, secondo quanto indicato nella norma UNI EN 15251 [4], effettuate sul caso studio individuato in precedenza per la connessa analisi di interventi di retrofit. Nello specifico, sono stati individuati quattro appartamenti rappresentativi dell'edificio, sulla base del loro orientamento principale della loro posizione all'interno del condominio, le cui condizioni di comfort sono state determinate sia sullo stato di fatto, sia in seguito all'applicazione degli interventi di riqualificazione (nZEB).

La valutazione è stata condotta sia nel periodo di funzionamento dell'impianto di riscaldamento (come già effettuato in letteratura, ad esempio in [26][27][28][29]), sia in condizioni di non funzionamento, ossia al di fuori della stagione di riscaldamento (*free-floating period*).

Nel primo caso, un'analisi di sensibilità relativa alla variazione del consumo energetico per il riscaldamento in funzione della temperatura dell'ambiente interno ha permesso di ricercare le condizioni che consentono di migliorare la prestazione energetica dell'edificio (riduzione del fabbisogno di energia termica) e nel contempo mantenere la temperatura interna in un intervallo accettabile per il benessere degli occupanti (secondo la teoria di Fanger e la norma UNI EN ISO 7730 [5]). In particolare, per la soluzione nZEB questa indagine ha riguardato sia il periodo di riscaldamento sia quello di raffrescamento.

Nel secondo caso, seguendo l'approccio del comfort adattivo (EN 16798-1 [6] e CEN/TR 16798-2 [7], con alcune applicazioni riportate in [30],[31]), il benessere termico è stato valutato sulla base del profilo orario della temperatura operativa interna in condizioni di non funzionamento dell'impianto. La temperatura operativa è stata quindi confrontata con il suo valore ottimale, determinato in funzione della media mobile ponderata della temperatura esterna attraverso la relazione empirica specificata dalla norma EN 16798-1 [6].

Lo svolgimento dell'attività ha comportato l'utilizzo di fogli in formato Excel per calcolare il livello ed i rispettivi indici di discomfort delle diverse zone termiche analizzate, come previsto dalle norme EN 16798-1 [6], CEN/TR 16798-2 [7] e UNI EN ISO 7730 [5].

Il calcolo energetico è stato altresì svolto mediante il software di simulazione dinamica *DesignBuilder 5.0.3* [41], che adotta il motore di calcolo *Energy Plus 8.5.0* [42].

1.2 Descrizione delle attività svolte

Il lavoro è strutturato nelle seguenti fasi:

- A. Definizione degli indici di discomfort termico e parametri di calcolo
- B. Valutazione del comfort termico nella stagione di riscaldamento (e raffrescamento, nel caso della soluzione nZEB)
 - a. Sviluppo dell'analisi di sensibilità
- C. Valutazione del comfort termico fuori dalla stagione di riscaldamento
 - a. Calcolo della temperatura operativa e confronto con l'intervallo ottimale

In seguito vengono illustrate le sezioni in cui si è articolata l'attività svolta.

A. Definizione degli indici di discomfort termico e parametri di calcolo

Gli indici di discomfort sono stati definiti sulla base della norma CEN/TR 16798-2 [7], la quale identifica tre diversi criteri: uno specifico per le analisi di comfort ad impianto acceso (Metodo C [7]), uno utilizzabile in condizioni di impianto spento (Metodo B [7]), mentre l'ultimo è adatto ad entrambe le analisi (Metodo A, percentuale di ore di discomfort [7]). Oltre agli indici di comfort, si sono individuati gli appartamenti (zone termiche) più significativi dell'edificio, oggetto delle successive analisi.

B. Valutazione del comfort termico nella stagione di riscaldamento (e raffrescamento, nel caso della soluzione nZEB)

Il comfort termico orario è stato analizzato secondo la teoria di Fanger (*Predicted Mean Vote* - PMV e *Predicted Percentage Dissatisfied* - PPD) e la norma UNI EN ISO 7730 [5], sulla base dei valori dei parametri ambientali forniti dal software *DesignBuilder*, come *output* di simulazione.

B.a Sviluppo dell'analisi di sensibilità

L'analisi di sensibilità è stata condotta facendo variare la temperatura di *set-point* degli impianti di riscaldamento e raffrescamento (quest'ultimo nel caso dell'edificio nZEB), rispettivamente tra 19 e 22 °C e tra 24 e 27 °C. Per le varie configurazioni analizzate si sono definiti gli indici di discomfort stagionali, i cui valori sono stati confrontati con i rispettivi valori di fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento (rispettivamente $Q_{H,nd}$ e $Q_{C,nd}$).

C. Valutazione del comfort termico fuori dalla stagione di riscaldamento

L'analisi del comfort termico durante il periodo di *free-floating*, utile per la valutazione dell'eventuale necessità di un impianto di raffrescamento estivo, è stata condotta secondo il metodo del comfort adattivo, descritto nelle norme EN 16798-1 [6] e CEN/TR 16798-2 [7].

C.a Calcolo della temperatura operativa e confronto con l'intervallo ottimale

La metodologia prevede il calcolo di due diverse grandezze: la temperatura operativa ottimale oraria della singola zona termica, la quale richiede la preventiva definizione della temperatura esterna media oraria mobile ponderata, attraverso la relazione empirica specificata dalla norma EN 16798-1 [6]. La temperatura operativa ottimale è stata successivamente confrontata con l'effettiva temperatura operativa oraria di ogni zona termica, fornita dal software di simulazione *DesignBuilder*. Anche in questo caso sono stati definiti gli indici di discomfort, secondo quanto indicato nella norma CEN/TR 16798-2 [7].

2 Analisi del caso studio

Nei successivi paragrafi vengono sinteticamente illustrati le informazioni e i dati relativi al contesto in cui sorge l'edificio, alle caratteristiche del fabbricato e degli impianti presenti, all'utenza e ai consumi energetici misurati negli anni solari analizzati (2017 e 2018), in relazione ai rispettivi dati climatici. L'edificio è parte del parco immobiliare di edilizia residenziale pubblica gestito dall'Agenzia Territoriale per la Casa del Piemonte Centrale (di seguito ATC), la quale ha fornito la documentazione utilizzata come riferimento per la caratterizzazione dell'edificio, verificata ed implementata tramite diversi sopralluoghi. Informazioni più dettagliate sono riportate nel report relativo alla diagnosi energetica [32].

2.1 Caratterizzazione dell'edificio

L'edificio oggetto del presente studio è un edificio di edilizia popolare localizzato nella periferia di Torino, in zona climatica E ($2100 < GG \leq 3000$), costruito tra la fine degli anni Ottanta e l'inizio degli anni Novanta.

Tale edificio è stato selezionato in quanto emblematico di un gran numero di edifici che, per quanto costruiti dopo le prime leggi sul risparmio energetico (Legge 373/1976, Legge 10/1991), presentano criticità dal punto di vista termo-igrometrico (non uniformità e discontinuità dello strato isolante, ad esempio in corrispondenza di solai, setti e pilastri, problemi di muffe in corrispondenza dei ponti termici, ecc.). Oltre a questi aspetti, l'edificio rappresenta più del 60% delle abitazioni nazionali in zona climatica E per quanto riguarda l'utilizzo dell'impianto termico autonomo ([26],[34]), ed essendo gestito da ATC e caratterizzato da appartamenti di superficie compresa tra i 45 e i 95 m², rappresenta circa il 70% del patrimonio di edilizia residenziale pubblica [29].

2.1.1 Informazioni generali e contesto esterno

L'edificio scelto come caso studio è sito nella periferia nord di Pianezza (a nord-ovest di Torino), in prossimità del comune di Sangano (Figura 2.1).



Figura 2.1. Inquadramento territoriale (elaborazione da Google Maps).

L'edificio è composto da due corpi di fabbrica, identici e speculari, costituiti ciascuno da 6 piani fuori terra. L'edificio è orientato sull'asse nord-sud, con un'inclinazione di 13° verso sud - ovest. Il lotto su cui sorgono gli edifici è rivolto verso nord e verso est su due ampie vie, mentre a sud e ovest è circondato da giardini (Figura 2.2). Siccome i due edifici sono uguali, si è deciso di analizzare solo il lotto A, ovvero quello esposto a ovest (Figura 2.2).



Figura 2.2. Vista dall'alto dell'isolato con individuazione degli edifici (elaborazione da Google Maps).

Il contesto in cui è inserito l'edificio è caratterizzato dalla presenza di prati e bassi fabbricati prevalentemente a destinazione residenziale o misto terziario/residenziale. Di conseguenza, l'edificio oggetto di studio risulta generalmente poco ombreggiato, se non per l'effetto del lotto B del caso studio.

2.1.2 Fabbricato

L'edificio, costruito nei primi anni '90, è caratterizzato da una struttura portante in pilastri in calcestruzzo armato e tamponamenti in cassavuota, nella quale è stato inserito uno strato di 4 cm isolamento termico, e con strato esterno di mattoni rifiniti a faccia vista (Figura 2.3).



Figura 2.3. Facciate dell’edificio. a) Lotto A - Est; b) Lotto A - Nord; c) Lotto A - Ovest; d) Lotto A - Sud.

L’edificio è costituito da sei piani fuori terra, dei quali il primo non è abitato ed è adibito ad ingresso, più un piano sottotetto non abitabile. Non esiste piano interrato, in quanto le cantine sono collocate al piano terreno. Il solaio inferiore dell’edificio è controterra, mentre parte del solaio tra primo e secondo piano fuori terra è esposto all’ambiente esterno (solaio a sbalzo).

La Tabella 2.1 mostra i dati generali sul fabbricato e le caratteristiche geometriche.

Tabella 2.1. Dati generali sul fabbricato (caratteristiche geometriche).

Caratteristica	Simbolo	Unità di misura	Valore
Volume lordo riscaldato	V_l	m^3	5'967
Superficie netta di pavimento	A_r	m^2	2'166
Superficie dell’involucro disperdente	A_e	m^2	1'966
Superficie dell’involucro finestrato	A_w	m^2	247
Rapporto di forma	S/V	m^{-1}	0,33

Le pareti perimetrali esterne del piano tipo, di spessore complessivo pari a 30 cm, sono costituite da muratura a cassa vuota in laterizio, intonacate internamente, con intercapedine d’aria parzialmente isolata tramite polistirene espanso - EPS, con strato esterno di mattoni rifiniti a faccia vista. Le pareti perimetrali del piano terra sono invece realizzati tramite blocchi di calcestruzzo intonacati da entrambi i lati interno ed esterno,

per uno spessore totale di 22 cm. Le pareti che ospitano i cassonetti delle persiane avvolgibili hanno uno spessore ridotto al solo strato di mattoni esterno (al quale si aggiunge il contributo del cassonetto). Le pareti verticali interne verso il vano scala non isolato prevedono la presenza di uno strato isolante al loro interno, di spessore 4 cm.

Poiché il software di simulazione non permette di modellare i ponti termici, i pilastri presenti nei muri perimetrali, nonché i setti del vano scala sporgenti in facciata, sono stati modellati separatamente, con proprie caratteristiche termo-igrometriche, in modo tale da valutare le discontinuità presenti in facciata.

Gli ulteriori ponti termici presenti (finestre, solai e copertura) sono stati stimati tramite l'ausilio di un abaco dei ponti termici [36].

Per quanto riguarda i componenti opachi orizzontali, i solai disperdenti (superiore verso il sottotetto e inferiore verso il piano terra) sono tutti in laterocemento coibentati. La copertura è costituita anch'essa da una struttura in laterocemento (opportunamente impermeabilizzata), sulla quale è posato un manto di rivestimento in tegole. Il solaio contro terra è invece un solaio in calcestruzzo.

I serramenti presenti nel fabbricato sono composti da telaio in legno e doppio vetro (con aria all'interno), e sono classificabili nelle seguenti sei tipologie:

1. porta-finestra ad anta singola su balcone;
2. porta-finestra ad anta singola apribile solo nella metà superiore;
3. finestra a doppia anta;
4. finestra ad anta singola;
5. porta-finestra a doppia anta su balcone;
6. porta-finestra a doppia anta apribile solo nella metà superiore.

È inoltre presente una vetrata a tutta altezza, che rappresenta l'involucro edilizio del vano scala verso l'esterno. Essa è composta da un vetro singolo sorretto da sottili montanti metallici.

Le chiusure oscuranti sono costituite da tapparelle avvolgibili. Sono inoltre presenti schermature solari, quali tende parasole, sulla maggior parte dei balconi. La gestione degli elementi oscuranti (chiusure e schermature) è stata valutata tramite questionari sottoposti agli occupanti per individuare comportamenti ricorrenti.

Per maggiori dettagli ed informazioni, fare riferimento a [32].

2.1.3 Impianti

Impianto di riscaldamento + Acqua Calda Sanitaria

Ogni appartamento è servito da un impianto di tipo autonomo, per la produzione combinata di riscaldamento e ACS. L'attuale impianto di riscaldamento è stato rinnovato tra il 2007 e il 2008, a seguito di un'ampia sostituzione delle caldaie a livello di condominio. Le caldaie installate sono, per la maggior parte, caldaie murali istantanee a camera aperta, tipo B11bs, con tiraggio naturale, potenza termica utile pari a 23 kW (modello ARISTON T2 23 MI [43]), ed alimentate a gas metano.

Le caldaie sono installate sui balconi (installazione a muro esterno), dotate di bruciatore atmosferico e tiraggio naturale. L'evacuazione dei prodotti di combustione avviene tramite una canna fumaria collettiva posta in facciata davanti al vano scala o attraverso i balconi.

Alla prima verifica dell'impianto è stato calcolato un rendimento di combustione pari a circa 95%, mentre il rendimento dichiarato da scheda tecnica è pari al 91,4% alla potenza termica nominale, e al 89,3% quando la potenza termica è pari al 30% di quella nominale [43].

Attualmente la regolazione dell'impianto di riscaldamento è gestita tramite termostato ambiente. La valutazione della gestione dell'impianto (impostazione della temperatura di *set-point* in ambiente) da parte dell'utente è stata condotta sulla base di questionari sottoposti ai residenti.

I terminali di emissione sono costituiti da radiatori in ghisa, installati in ogni ambiente degli appartamenti (eccetto nei disimpegni), su pareti interne, quindi non in posizione sottofinestra.

L'impianto di riscaldamento ha funzionamento continuo, con temperatura di *set-back* impostabile dall'utenza.

Impianto di ventilazione

In assenza di un impianto di ventilazione meccanica, la ventilazione è garantita dalla sola aerazione naturale. I ricambi d'aria avvengono grazie all'apertura delle finestre ed alle infiltrazioni. La frequenza generale di apertura delle finestre è stata valutata sulla base dei questionari sottoposti ai residenti.

Per maggiori dettagli ed informazioni, fare riferimento a [32].

2.1.4 Utenza

Al fine di effettuare la diagnosi energetica e quindi creare un modello dell'edificio aderente alla realtà, è stato necessario stabilire dei 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 [32]. Per ricavare il comportamento degli occupanti sono stati forniti questionari all'utenza, in cui sono state richieste informazioni generali sull'appartamento, sulla composizione del nucleo familiare e informazioni riguardanti i giorni e gli orari di occupazione, l'apertura delle finestre, la gestione delle tapparelle avvolgibili, la gestione delle schermature solari e la gestione del riscaldamento. Sulla base dei dati raccolti nei condomini analizzati, si è definito un profilo di occupazione tipo relativo al nucleo familiare medio: famiglia tipo composta da due genitori adulti e una figlia giovane. Si è quindi individuata, all'interno del caso studio, una famiglia reale corrispondente a tali requisiti, della quale si sono poi andate a reperire tutte le informazioni necessarie per lo svolgimento della ricerca. Conseguentemente, il relativo appartamento (terzo piano fuori terra, esposizione nord - ovest) è stato definito appartamento-tipo.

Per maggiori dettagli ed informazioni, fare riferimento a [32].

2.2 Costruzione del modello

I dati di ingresso necessari per lo sviluppo del modello di simulazione dinamica dettagliata in *DesignBuilder* sono relativi alle condizioni climatiche al contorno, alle caratteristiche geometriche e fisico-tecniche dell'edificio e alle modalità di utilizzo (funzionamento dell'impianto, occupazione, etc.).

Il modello geometrico dell'edificio (Figura 2.4) è stato costruito sulla base della documentazione progettuale fornita da ATC (Allegato A). I componenti di involucro opaco e trasparente del fabbricato sono stati modellati sulla base della descrizione dei materiali costituenti, riportata nel capitolato di progetto. Per la configurazione degli strati dei componenti edilizi sono stati creati *template* personalizzati nel software *DesignBuilder* a partire dalle proprietà termofisiche dei materiali ricavate da normativa tecnica (UNI 10351 [19], UNI 10355 [20], UNI EN ISO 10456 [21], UNI EN ISO 13786 [22] e UNI EN ISO 6946 [23]). Le caratteristiche termofisiche dei componenti edilizi sono riportate nelle tabelle della Sezione 2.3.

La modellazione dei ponti termici in facciata, costituiti da parte della struttura portante in calcestruzzo armato, è avvenuta mediante l'inserimento di sottosuperfici sulle facciate. I restanti ponti termici sono stati valutati attraverso le indicazioni fornite dall'abaco dei ponti termici [36].

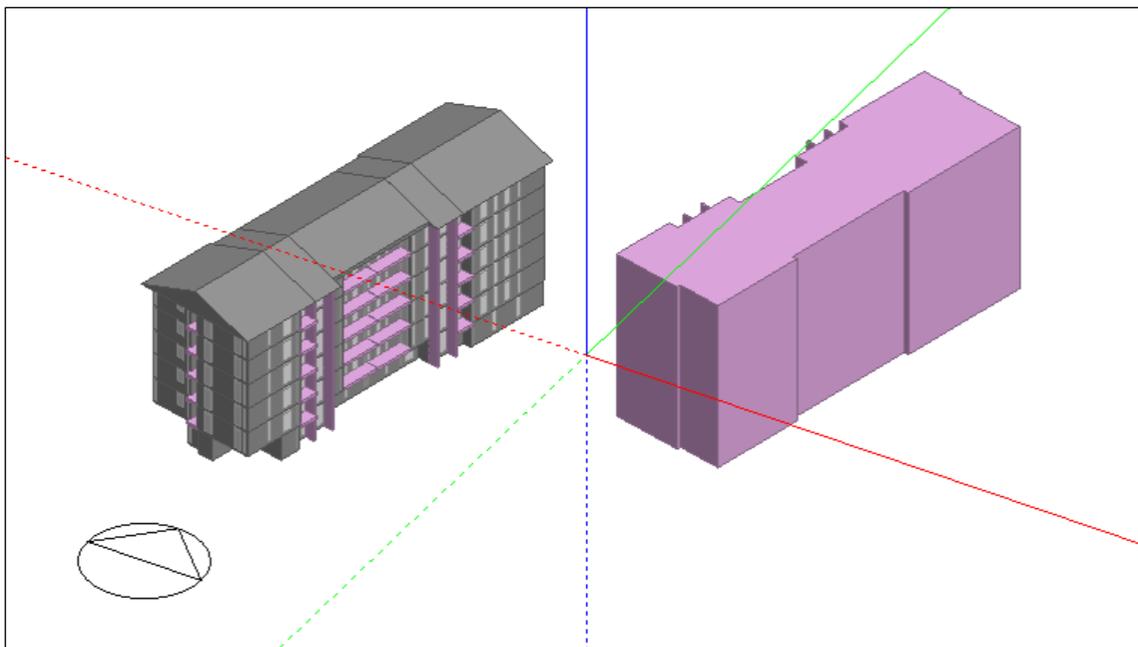


Figura 2.4. Modello dell'edificio in DesignBuilder.

Per sviluppare una corretta modellazione termo-energetica dell'edificio, è necessario suddividere l'edificio in zone termiche nel rispetto di specifici requisiti. Essendo l'impianto di tipo autonomo per ogni appartamento, ogni appartamento rappresenta una singola zona termica (per un totale di trenta zone termiche).

Successivamente all'individuazione delle zone termiche sono stati determinati tutti i parametri energetici ad esse correlati (profili di occupazione, profili di utilizzo e parametri impiantistici, i cui dettagli sono riportati in [32]).

2.2.1 Definizione delle zone termiche

Come già più volte menzionato, l'intero condominio è servito da impianti di riscaldamento e produzione di ACS autonomi per ogni appartamento. Per tale motivo, ad ogni tipologia di appartamento presente è stata assegnata una diversa zona termica, le cui superfici interne nette sono riportate in Tabella 2.2.

Tabella 2.2. Superficie netta di pavimento delle zone termiche.

	A_{netta} [m ²]
Zona 1	96,6
Zona 2	67,0
Zona 3	75,6
Zona 4	75,3
Zona 5	62,0
Zona 6	56,6

La distribuzione delle sei zone termiche nel piano tipo è riportata in Figura 2.5.

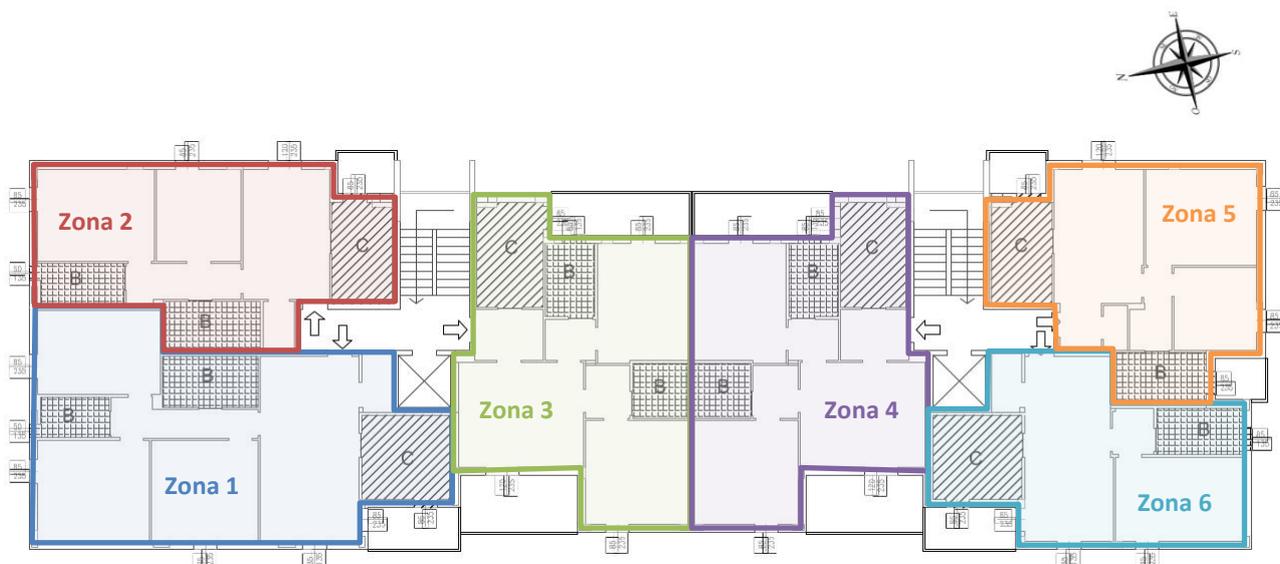


Figura 2.5. Individuazione delle zone termiche.

Le analisi di comfort sono state effettuate su quattro diversi appartamenti (zone termiche), individuati secondo i seguenti criteri:

- diverse esposizioni → zona 1 (orientata a Nord-Ovest) e zona 5 (esposta a Sud-Est);
- diversa superficie disperdente → secondo piano (due pareti confinanti con l'esterno, soffitto e pavimento adiabatici) e quinto piano (due pareti confinanti con l'esterno, soffitto disperdente verso il locale sottotetto non riscaldato e pavimento adiabatico).

In particolare, la zona termica 1 al secondo piano costituisce l'appartamento di riferimento utilizzato per la calibrazione del modello in fase di diagnosi energetica [26] dell'edificio.

2.3 Caratteristiche di involucro ed impiantistiche (SdF e nZEB)

In Tabella 2.3 sono riportate le principali prestazioni termiche dei componenti dell'edificio (involucro e impianti), allo stato di fatto ed in configurazione nZEB (in questo secondo caso i valori di prestazione riportati in tabella consentono il rispetto dei valori limite degli indici di prestazione energetica determinati con i parametri dell'edificio di riferimento vigenti dal 1° gennaio 2021 [1]).

In particolare, per quanto riguarda il livello dell'isolamento dell'involucro opaco verticale, si è deciso di utilizzare il valore limite al 2015 invece che al 2021 [1]. Tale decisione è stata presa a seguito dei risultati ottenuti in [38], in cui si è osservato che le soluzioni ottimali in termini di costi (per edifici simili al caso studio) prevedono l'uso di pompe di calore come sistema di generazione, ma abbinate ad un livello di isolamento termico meno performante. La trasmittanza termica dei serramenti è stata invece scelta nel rispetto dei requisiti minimi al 2021, così come la profondità degli aggetti orizzontali di ombreggiamento del vano scala è stata scelta pari a 70 cm, in modo da favorire il raggiungimento dei requisiti minimi in condizioni estive. In ultimo, gli impianti per lo sfruttamento delle fonti rinnovabili (fotovoltaico e solare termico) sono stati considerati al livello di prestazione massimo per garantire la copertura di fabbisogno richiesta (aumentando del 20% il livello di prestazione ottimale ottenuto in [38]). Da dati di letteratura [39] è possibile osservare che l'utilizzo di pompe di calore abbinate a pannelli fotovoltaici consente il rispetto dei requisiti di copertura da fonti rinnovabili, secondo il D. Lgs.28/2011 [2].

Tabella 2.3. Principali parametri prestazionali dell'edificio (SdF e nZEB).

Componente	Parametro	Simbolo	SdF	nZEB
			Valore	Valore
Involucro opaco verticale (piano tipo)	Trasmittanza termica	U_p [W/m ² K]	0,45	0,29
Involucro opaco verticale (piano terra)	Trasmittanza termica	$U_{p,t}$ [W/m ² K]	1,70	0,29
Involucro trasparente (valore medio)	Trasmittanza termica	U_w [W/m ² K]	3,17	1,4
Involucro trasparente vano scala	Trasmittanza termica	$U_{w,s}$ [W/m ² K]	5,06	2,8
Ultimo solaio	Trasmittanza termica	$U_{r,u}$ [W/m ² K]	0,80	0,24
Solaio inferiore	Trasmittanza termica	$U_{f,u}$ [W/m ² K]	0,71	0,26
Solaio interpiano	Trasmittanza termica	U_u [W/m ² K]	1,47	1,47
Copertura tetto a falde	Trasmittanza termica	U_t [W/m ² K]	1,93	1,93
Sistemi ombreggianti solari fissi (vano scala)	Fattore di ombreggiamento	$F_{sh,ob}$ [-]	1	0,89
Generazione di calore	η caldaia, COP pompa di calore	η [%], COP [-]	91,4	4,1
Collettori solari termici	Superficie dei collettori solari	A_{coll} [m ²]	0	36
Pannelli fotovoltaici	Potenza di picco	W_p [kW]	0	14

2.4 Valutazioni energetiche dell'edificio (SdF e nZEB)

L'edificio oggetto di indagine è stato in precedenza sottoposto ad un'accurata diagnosi energetica, volta a individuare gli interventi di riqualificazione applicabili per ridurre i consumi e migliorare l'efficienza energetica dell'edificio. La diagnosi energetica è stata realizzata secondo la metodologia prevista dalla principale norma tecnica di riferimento – UNI CEI EN 16247 parti 1-3 ([15],[16],[17]) – e ha previsto la costruzione di un modello energetico calibrato, vale a dire un modello i cui risultati coincidono con i dati di consumo effettivo, ottenuti sulla base dei consumi e dei dati climatici reali (stazione climatica Alenia - Torino [26],[44]).

Successivamente, il modello calibrato è stato oggetto di simulazioni dinamiche con l'adozione dei dati climatici standard di Torino, costituiti dai dati orari dell'anno tipo climatico sviluppato dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) [45]. Questo tipo di valutazione è necessaria per ottenere un modello che consideri un uso reale, ma non sia dipendente da un anno specifico. Partendo da tale modello sono state quindi ipotizzate alcune soluzioni di riqualificazione e, tramite analisi di ottimizzazione costi-benefici (analisi *cost-optimal* [18], [37]), si è individuata la soluzione *cost-optimal* e conseguentemente la soluzione nZEB [26].

In una seconda fase, ai fini della classificazione energetica dell'appartamento di riferimento simulato, secondo quanto richiesto dal D.M. 26 giugno 2015 Requisiti Minimi [1], sono state effettuate valutazioni energetiche di tipo standard, mediante l'applicazione delle specifiche tecniche della serie UNI/TS 11300 ([4],[11],[12],[13],[14]). La valutazione standard considera, oltre ai dati climatici standard, anche un uso standard dell'edificio e quindi non legato all'utenza specifica considerata nelle valutazioni adattate all'utenza (tipo *tailored*). Tale analisi ha previsto l'uso di fogli di calcolo in formato Excel che applicano le UNI/TS 11300. I dati relativi all'utenza standard sono stati ricavati dalla UNI/TS 11300-1 [4] mentre i dati climatici mensili dalla UNI 10349-1 [24].

Le valutazioni energetiche sono state effettuate sia a livello di zona termica, in modo tale da ottenerne la classificazione energetica [3] (ZT 1 secondo piano - appartamento tipo), sia a livello di intero edificio. Di seguito (Tabella 2.4 e Tabella 2.5) si riportano i principali risultati ottenuti, considerando l'edificio sia in condizioni SdF che nZEB.

Tabella 2.4. Prestazione energetica dell'edificio (SdF).

Prestazione energetica edificio	Simbolo	Fabbisogno netto di energia termica (Valutazione adattata all'utenza calibrata con dati climatici standard)	Fabbisogno netto di energia termica (Valutazione standard UNI/TS 11300)	Classe energetica appartamento di riferimento (Valutazione standard UNI/TS 11300)
		[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[-]
Riscaldamento	<i>EP_{H,nd}</i>	57,6	82,1	D
ACS	<i>EP_{w,nd}</i>	18,1	18,1	

Tabella 2.5. Prestazione energetica dell'edificio (nZEB).

Prestazione energetica edificio	Simbolo	Fabbisogno netto di energia termica (Valutazione adattata all'utenza calibrata con dati climatici standard)	Fabbisogno netto di energia termica (Valutazione standard UNI/TS 11300)	Classe energetica appartamento di riferimento (Valutazione standard UNI/TS 11300)
		[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[-]
Riscaldamento	<i>EP_{H,nd}</i>	32,7	21,2	A2
Raffrescamento	<i>EP_{C,nd}</i>	14,3	22,2	
ACS	<i>EP_{w,nd}</i>	18,1	18,1	

3 Descrizione della procedura di calcolo

Le analisi di comfort in oggetto della presente relazione sono state condotte sull'edificio allo stato di fatto (SdF) e sulla soluzione nZEB, tramite due diversi approcci, differenti per metodologia e finalità.

Innanzitutto sono state effettuate delle valutazioni di tipo adattivo [6] nei mesi esclusi dal periodo di riscaldamento (quindi dalla seconda metà di aprile alla prima metà di ottobre). Nel caso di edificio nZEB, si è ipotizzato di non utilizzare l'impianto di raffrescamento durante questi mesi, in modo tale da evidenziarne l'eventuale necessità in caso di condizioni di discomfort. La configurazione nZEB è stata pertanto denominata nZEB*, per evidenziare l'assenza degli impianti di climatizzazione (si considerano quindi solo gli interventi relativi all'involucro e al fabbricato).

Successivamente sono state eseguite le verifiche di comfort ad impianti accesi, tramite il metodo di Fanger [5], durante la stagione di riscaldamento nel caso dello SdF (zona climatica E, dal 15 aprile al 15 ottobre) e durante tutto l'anno nel caso di edificio nZEB (essendo quest'ultimo provvisto di impianto di climatizzazione sia invernale che estiva). Scopo dell'indagine è l'individuazione della temperatura di *set-point* degli impianti, per massimizzare il comfort e ridurre il fabbisogno termico della singola zona termica (analisi di sensibilità).

Il funzionamento degli impianti è stato ipotizzato continuo in *ideal load*¹ (sia per lo stato di fatto sia per la configurazione nZEB), con temperature di set-point variabili in funzione del tipo di analisi (i valori di riferimento utilizzati nel precedente studio [32] sono pari a 21 °C per il riscaldamento e 26 °C per il condizionamento estivo), mentre la temperatura di set-back per il riscaldamento è stata fissata pari a 18,5 °C (a seguito della calibrazione del modello in [32]).

Entrambe le analisi sono state condotte su quattro zone termiche diverse (coincidenti con quattro appartamenti), selezionate in maniera tale da caratterizzare l'intero edificio nel modo più completo possibile.

Di seguito vengono descritte in dettaglio le due procedure seguite.

3.1 Impianto spento - Comfort adattivo

Il modello di comfort adattivo [6] è applicabile per edifici che non siano condizionati meccanicamente o tramite ventilazione naturale. Tale modello tiene in considerazione la capacità degli individui di adattarsi al clima prevalente di un determinato ambiente (adattamento inteso come graduale riduzione delle reazioni individuali agli stimoli climatici esterni). Si possono individuare tre diversi processi di adattamento:

- psicologico, in cui le esperienze pregresse influenzano la percezione e la risposta agli stimoli sensoriali esterni;
- fisiologico, che avviene in caso di permanenza prolungata in una particolare condizione climatica;
- comportamentale, in cui l'individuo agisce attivamente (consapevolmente o meno) per andare a modificare il bilancio termico del corpo umano (come ad esempio aumentare il vestiario o il consumo energetico dell'attività svolta).

La procedura si basa su una correlazione tra la temperatura operativa di comfort all'interno dell'ambiente analizzato e la media della temperatura dell'aria esterna durante i giorni precedenti il giorno in esame [4],[6] (Eq. (1)):

$$\theta_c = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 \quad (1)$$

¹ Per *ideal load* si intende il carico termico di un impianto di riscaldamento ideale (caratterizzato da un'efficienza del 100% e da potenza termica infinita) in grado di soddisfare i fabbisogni termici netti di ciascuna zona termica (così come le potenze e l'energia dei terminali di emissione), in modo tale da garantirne le condizioni termiche interne impostate.

Dove:

- θ_c = Temperatura operativa di comfort [°C];
- θ_{rm} = Temperatura esterna media ponderata dei giorni precedenti (*running mean temperature*) [°C].

La temperatura esterna media può essere calcolata tramite l'Eq. (2) (EN 16798-1 Appendice B [6]):

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \sum_{j=1}^{\infty} (\alpha^{j-1} \cdot \theta_{ed,j}) \quad (2)$$

Dove:

- α = Valore costante tra 0 e 1 (0,8 valore raccomandato);
- $\theta_{ed,j}$ = Temperatura esterna media giornaliera del *j-esimo* giorno precedente [°C].

Riferendo la precedente equazione ad un periodo di 7 giorni si ottiene:

$$\theta_{rm} = \frac{\sum_{j=1}^7 (\alpha^{j-1} \cdot \theta_{ed,j})}{\sum_{j=1}^7 \alpha^{j-1}} \quad (3)$$

La quale può ulteriormente essere semplificata, tramite approssimazione alla prima cifra decimale, nell' Eq. (4), la quale è stata utilizzata nella presente ricerca:

$$\theta_{rm} = \frac{\theta_{ed,1} + 0,8 \cdot \theta_{ed,2} + 0,6 \cdot \theta_{ed,3} + 0,5 \cdot \theta_{ed,4} + 0,4 \cdot \theta_{ed,5} + 0,3 \cdot \theta_{ed,6} + 0,2 \cdot \theta_{ed,7}}{3,8} \quad (4)$$

Oltre alla valutazione della temperatura operativa di comfort, il metodo prevede la definizione di una fascia di comfort, aggiungendo e sottraendo alcuni gradi alla θ_c . L'ampiezza di tale fascia è funzione della categoria di comfort perseguita (per gli edifici residenziali si fa riferimento alla Categoria II), ed è individuabile dalle Eq. (5), (6) e (7) di seguito riportate:

Categoria I $\theta_{c-lim.sup} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 2$ (5)

$\theta_{c-lim.inf} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 3$

Categoria II $\theta_{c-lim.sup} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 3$ (6)

$\theta_{c-lim.inf} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 4$

Categoria III $\theta_{c-lim.sup} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 4$ (7)

$\theta_{c-lim.inf} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 5$

Si può immediatamente notare come la differenza tra la temperatura operativa di comfort ed il suo valore limite inferiore sia maggiore rispetto alla differenza con il limite superiore: questo significa che il corpo umano si adatta meglio in condizioni di leggero freddo piuttosto che di leggero caldo.

Le temperature operative interne, sia quelle effettive ottenute dalla simulazione energetica, sia i tre valori relativi alle temperature operative di comfort, sono a questo punto rappresentate graficamente in funzione della temperatura media mobile ponderata esterna θ_{rm} , ottenendo una rappresentazione analoga a quella riportata in Figura 3.1.

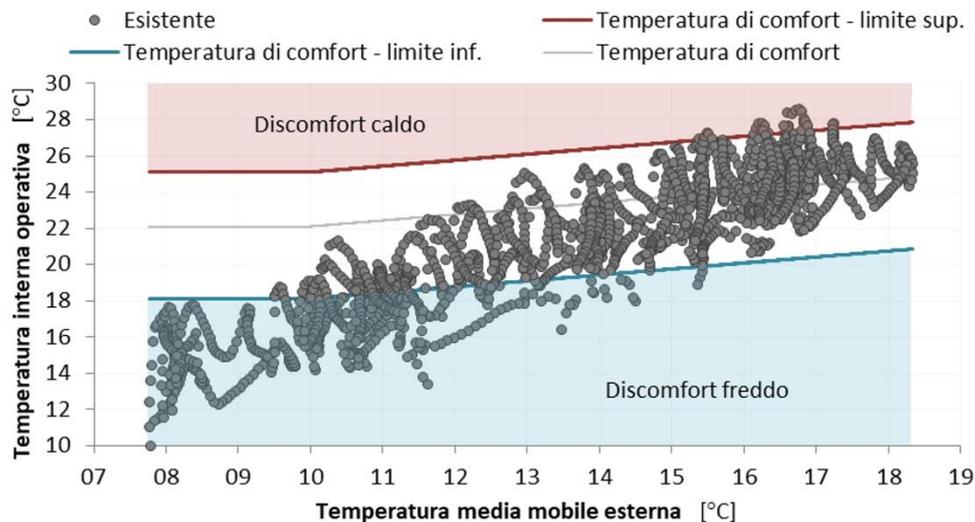


Figura 3.1. Esempio di rappresentazione comfort adattivo (Rielaborazione da [33]).

I punti situati sotto il limite inferiore della temperatura di comfort rappresentano situazioni di discomfort freddo e, analogamente, quelli oltre il valore limite superiore corrispondono a discomfort caldo. Il livello di discomfort è stato valutato secondo gli indici definiti dalla norma CEN/TR 16798-2 [7], descritti nella seguente Sezione 3.3.

L'applicabilità delle equazioni illustrate finora è però limitata all'intervallo di temperatura (θ_{rm}) compreso tra 10 e 30 °C. Per tale motivo, in caso di temperature esterne medie oltre tale intervallo, si è ritenuto opportuno mantenere i valori delle temperature di comfort costanti ed uguali ai valori ottenuti per $\theta_{rm} = 10$ °C e $\theta_{rm} = 30$ °C (come si può notare da Figura 3.1., in cui per valori di $\theta_{rm} < 10$ °C le linee rappresentanti le temperature di comfort diventano orizzontali).

Generalmente il modello adattivo fornisce temperature di comfort meno stringenti che il metodo di Fanger, il quale verrà di seguito illustrato.

3.2 Impianto acceso - Metodo di Fanger: PMV e PPD

Il modello di comfort stazionario secondo Fanger (o modello del *Predicted Mean Vote* - PMV [5]) è applicabile nel caso di edifici condizionati meccanicamente, e mette in relazione la condizione interna ottimale di un ambiente esclusivamente con le condizioni climatiche interne dell'ambiente stesso (temperatura e velocità dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa), con il grado di isolamento del vestiario e con il tasso metabolico degli occupanti. Esclude quindi dall'analisi l'ambiente esterno. Inoltre, spesso è necessario utilizzare dei valori standard per vestiario e tassi metabolici (raramente infatti è possibile definire esattamente abbigliamento ed attività svolta), causando quindi un'approssimazione dei risultati.

Il metodo di Fanger esprime il livello di comfort tramite due indicatori: il PMV (*Predicted Mean Vote* - voto medio previsto) e il PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied* - percentuale prevista di insoddisfatti).

Il PMV indica la sensazione termica definita su una scala di sette livelli, da -3 (molto freddo) a +3 (molto caldo), in cui lo 0 indica la neutralità termica (comfort ideale). Il valore del PMV è ottenibile tramite l' Eq. (8), la quale

fornisce un valore medio (la dispersione dei dati attorno a tale valore è molto ampia a causa della soggettività del comfort):

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot L \tag{8}$$

Ed è proprio per tenere conto di questa variabilità dei risultati, che Fanger ha introdotto il PPD, che esprime la percentuale di persone che si considerano insoddisfatte, ovvero con sensazione termica pari a ± 2 e ± 3 .

PMV e PPD sono correlati dalla seguente relazione:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \tag{9}$$

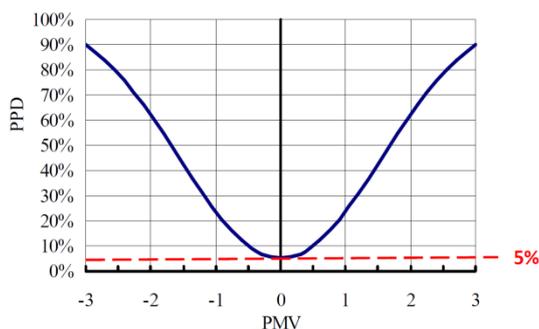


Figura 3.2. Relazione tra PMV e PPD.

Dalla Figura 3.2 si nota come, anche in caso di $PMV = 0$ (condizione di comfort ideale), si avrebbe comunque un 5% di persone insoddisfatte, a causa della dispersione dei dati.

Di seguito si riporta una rapida spiegazione del metodo del PMV. Ulteriori dettagli per il calcolo di PMV e PPD sono presenti nelle norme UNI EN ISO 7730 [5] e UNI EN 15251 [4], le quali definiscono inoltre tre possibili categorie di comfort (Tabella 3.1):

Tabella 3.1. Categorie di comfort [5].

Categoria	PMV	PPD %
A	$-0,2 < PMV < +0,2$	< 6%
B	$-0,5 < PMV < +0,5$	< 10%
C	$-0,7 < PMV < +0,7$	< 15%

In caso di edilizia residenziale si fa in genere riferimento alla categoria B (come nel caso in esame).

L' Eq. (8) mette in correlazione il PMV con la sensazione termica (caldo/freddo), la quale è proporzionale al carico termico L [W]. Esso è definito come la differenza tra la potenza termica generata all'interno del corpo umano, e l'energia termica che il corpo disperderebbe, in condizioni di comfort, a parità di attività svolta:

$$L = (M - W) - (C^* + R^* + C_{k}^* + R_{res}^* + E_{sk}^*) \tag{10}$$

Dove:

- $(M - W)$ = Potenza termica generata all'interno del corpo umano [W];
- $(C^* + R^* + C_k^* + R_{res}^* + E_{sk}^*)$ = Energia termica che il corpo disperderebbe, in condizioni di comfort, a parità di attività svolta [W].

Più in dettaglio:

- M = Potenza metabolica [W], che serve per mantenere attivi gli organi e costante la temperatura del corpo, dissipando un po' di calore all'esterno:

$$M = C + R + C_k + C_{ve} + E_d + E_{sw} + E_{ve} \quad (11)$$

- $(C + R + C_k)$ = Potenza termica secca [W];
- C = Potenza termica dispersa per convezione [W];
- R = Potenza termica dispersa per irraggiamento [W];
- C_k = Potenza termica dispersa per conduzione [W];
- $(E_d + E_{sw} + E_{ve})$ = Potenza termica evaporativa [W];
- E_d = Potenza dispersa attraverso la traspirazione della pelle (diffusione del vapore) [W];
- E_{sw} = Potenza dispersa per sudorazione [W];
- E_{ve} = Potenza dispersa con la respirazione (calore latente) [W];
- C_{ve} = Potenza dispersa con la respirazione (calore sensibile) [W];
- R_{res} = Potenza termica complessivamente dispersa con la respirazione [W];
- E_{sk} = Potenza termica latente scambiata dalla pelle [W];
- W = Potenza meccanica scambiata con l'esterno [W] (poiché il rendimento meccanico del corpo umano è molto basso, il contributo di W è quasi sempre trascurabile);
- $(M - W)$ = Quota del carico metabolico che non si trasforma in lavoro e che deve essere scambiata in forma di energia termica, o che va ad aumentare l'energia interna S del corpo;
- S = Variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo [W].

Nell'Eq. (10), le quantità con apice * sono valutate in condizioni di comfort e non in condizioni reali.

Condizione necessaria ma non sufficiente per garantire il comfort è il soddisfacimento della condizione di omotermia (ovvero soluzione dell'Eq. (11)), la quale implica che:

$$S = f(M; I_{cl}; \theta_a; \theta_{mr}; v_a; \varphi; \theta_{sk}; E_{sw}) = 0 \quad (12)$$

$(M; I_{cl})$ = Parametri individuali

$(\theta_a; \theta_{mr}; v_a; \varphi)$ = Parametri ambientali

$(\theta_{sk}; E_{sw})$ = Parametri fisiologici

In cui:

- I_{cl} = Resistenza termica vestiario [clo] (oppure R_{cl} [m^2K/W]);
- θ_a = Temperatura dell'aria dell'ambiente interno [$^{\circ}C$];
- θ_{mr} = Temperatura media radiante delle pareti [$^{\circ}C$];
- v_a = Velocità dell'aria dell'ambiente interno [m/s];

- φ = Umidità relativa dell'ambiente interno [-];
- θ_{sk} = Temperatura della pelle [°C].

Fanger ha osservato che le persone ritengono di essere in comfort termoigrometrico quando i sistemi di termoregolazione sono attivati in minima parte, ed ha individuato sperimentalmente i valori statistici di θ_{sk} ed E_{sw} in condizioni di comfort ($\theta_{sk}^* = 34^\circ C$ ed $E_{sw}^* = 0$, ovvero non si suda).

In caso di attività, gli individui sono in comfort se $\theta_{sk}^* < 34^\circ C$ ed $E_{sw}^* > 0$, e tali parametri possono essere valutati tramite le "Equazioni di Benessere" (funzioni di M , W e della superficie del corpo A_b [m²]):

$$\theta_{sk}^* = 35,7 - 0,0275 \cdot \frac{M - W}{A_b} \quad (13)$$

$$E_{sk}^* = 0,42 \cdot A_b \cdot \left(\frac{M - W}{A_b} - 58,15 \right) \quad (14)$$

Dunque, affinché un individuo si trovi in condizioni di comfort, occorre che tutte le variabili della relazione (12) soddisfino in contemporanea le Eq. (11), (13) e (14).

È di fondamentale importanza ricordare che il metodo di Fanger presenta alcuni limiti di applicabilità, da tenere attentamente in considerazione:

- PMV = -2 ÷ +2 (ovvero è valido in caso di ambienti moderati);
- Metabolismo = 0,8 ÷ 4 Met ([Met] definito nella Sezione 3.2.1);
- Abbigliamento = 0 ÷ 2 clo ([clo] definito nella Sezione 3.2.2);
- Temperatura media radiante = 10 ÷ 40 °C;
- Temperatura aria = 10 ÷ 30 °C;
- Umidità relativa aria = 30 ÷ 70%;
- Velocità relativa aria = 0 ÷ 1 m/s.

Va inoltre evidenziato che il PMV è molto sensibile alla variazione della velocità dell'aria nell'ambiente analizzato, mentre è poco influenzato dall'umidità relativa dello stesso (una variazione di UR dal 30% al 70% comporta la stessa variazione del PMV che si osserverebbe nel caso di aumento della temperatura di circa 1 °C). Allo stesso tempo, il PMV tende a sovrastimare il discomfort per umidità relative minori del 20 - 30%, mentre tende a sovrastimarli in caso di UR > 70 - 80%.

Oltre al comfort globale, ci sono fattori di discomfort localizzato (dovuti a disomogeneità dei parametri ambientali) da tenere in considerazione, i quali sono principalmente:

- elevata differenza verticale della temperatura (aria stratificata);
- correnti d'aria (*Draft Risk* - DR);
- pavimento troppo caldo o troppo freddo;
- elevata asimmetria della temperatura piana radiante.

3.2.1 Potenza metabolica

La potenza metabolica definisce la quantità di energia chimica proveniente dal cibo e trasformata in energia meccanica nell'unità di tempo (parametro soggettivo). Generalmente è espressa in funzione dell'unità di superficie corporea A_b . Il valore di riferimento di tale superficie è assunto pari a 1,8 m² (uomo di 70 kg alto 170 cm). La potenza metabolica (M/A_b) è quindi esprimibile in [W/m²] o in [met], in cui:

$$1 \text{ met} = 58,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 50 \frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

corrisponde al calore prodotto da una persona seduta a totale riposo, nell'unità di tempo e di superficie. La potenza metabolica dipende esclusivamente dal tipo di attività svolta (ad esempio, una persona che dorme ha $M = 40 \text{ W/m}^2$, ovvero circa 0,7 met [8]).

Le norme UNI EN ISO 7730 [5] ed UNI EN ISO 8996 [8] contengono rispettivamente tabelle e metodi dettagliati per la definizione della potenza metabolica per diversi tipi di attività

3.2.2 Resistenza termica del vestiario

La resistenza termica di ogni capo di abbigliamento si misura in $[\text{m}^2\text{K/W}]$ (in tal caso si utilizza il simbolo R_{cl}) o in [clo] (I_{cl}), dove:

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

1 clo è pari alla resistenza termica di un abito europeo di mezza stagione, mentre 0 clo coincide con il corpo nudo.

La norma UNI EN ISO 7730 [5] fornisce sia i valori di I_{cl} per alcuni set completi di abbigliamento, sia i valori relativi al singolo capo (la resistenza termica totale si ottiene sommandone i singoli contributi). La norma UNI EN ISO 9920 [9] contiene invece una metodologia dettagliata per la loro definizione.

3.3 Indici di discomfort a lungo termine

Per valutare il comfort nel lungo periodo (mese, stagione, anno...) è necessario definire degli indici di discomfort, che rappresentino una somma pesata delle ore di discomfort individuate nel breve periodo.

Le norme UNI EN ISO 7730 [5] e CEN/TR 16798-2 [7] forniscono a tal proposito cinque diverse metodologie per la definizione di indici di discomfort a lungo termine, tre dei quali sono stati utilizzati nella presente ricerca.

3.3.1 Metodo A: percentuale ore di discomfort

Tale metodo richiede il calcolo del numero o della percentuale di ore in cui l'ambiente/zona termica è occupato, durante le quali il PMV o la temperatura operativa sono fuori dall'intervallo di comfort considerato. Nella presente ricerca, l'indice di tipo A è stato valutato ipotizzando la zona termica come sempre occupata, in modo da considerare il caso più generale possibile.

3.3.2 Metodo B: criterio pesato sulle temperature

Il metodo B proposto dalla UNI EN ISO 7730 [5] è leggermente diverso da quello indicato nella norma CEN/TR 16798-2 [7]: in tale ricerca si è scelto di utilizzare (e quindi illustrare) quello contenuto in [5]. Il numero di ore di occupazione dell'ambiente, in cui la temperatura operativa è fuori dalla fascia di comfort è pesato tramite un fattore orario che dipende dalla differenza tra la temperatura operativa e quella limite per il comfort.

Il fattore di peso (W_f) assume i seguenti valori:

$$W_f = 1 + \frac{|\theta_o - \theta_{c,lim}|}{|\theta_c - \theta_{c,lim}|} \quad \text{Per } |\theta_o| > |\theta_{c,lim}| \quad (15)$$

$$W_f = 1 \quad \text{Per } \theta_o = \theta_{c,lim}$$

Dove $\theta_{c,lim}$ è il limite superiore o inferiore dell'intervallo di comfort selezionato.

Definito il W_f , si può procedere al calcolo dell'indice di discomfort a lungo termine durante tutto il periodo in esame (nel presente caso specifico, o mesi in cui non è attivo l'impianto di riscaldamento), sommando per ogni ora il prodotto tra il singolo W_f e il tempo t per cui esso si verifica:

Discomfort caldo

$$\sum W_f \cdot t \quad \text{Per } \theta_o > \theta_{c,lim,sup} \quad (16)$$

Discomfort freddo

$$\sum W_f \cdot t \quad \text{Per } \theta_o < \theta_{c,lim,inf} \quad (17)$$

Tale metodo è stato utilizzato in merito alle analisi di comfort adattivo in *free-floating*.

3.3.3 Metodo C: criterio pesato sui PPD

Il metodo C è analogo al precedente, ma riferito ai valori di PPD: per tale motivo è stato utilizzato per valutare il comfort a lungo termine relativo alle analisi ad impianto acceso, secondo la teoria di Fanger. In questo caso, il tempo in cui il PMV è al di fuori dei limiti di comfort, è pesato attraverso un fattore funzione del PPD.

Il fattore di peso (W_f) è calcolato come:

$$W_f = \frac{PPD_{reale}}{PPD_{lim}} \quad \text{Per } PMV_{reale} < PMV_{lim,inf} \text{ o } PMV_{reale} > PMV_{lim,sup} \quad (18)$$

$$W_f = 0 \quad \text{Per } PMV_{lim,inf} < PMV_{reale} < PMV_{lim,sup}$$

Anche in questo caso il metodo B proposto dalla CEN/TR 16798-2 [7] è leggermente diverso da quello indicato nella UNI EN ISO 7730 [5]: mentre nel primo caso in condizioni di comfort si ha $W_f = 0$ (metodo sopra spiegato), nel secondo caso questo valore è pari a 1. Ciò però non comporta alcuna differenza nella determinazione degli indici, in quanto questi sono valutati considerando solo le ore di discomfort.

Definito il W_f , si procede quindi alla definizione dell'indice di discomfort a lungo termine durante tutto il periodo in esame (in questa ricerca si fa riferimento alla sola stagione di riscaldamento in condizioni di SdF, e all'anno intero in caso di edificio nZEB), sommando per ogni ora il prodotto tra il singolo W_f e il tempo t per cui esso si verifica:

Discomfort caldo

$$\sum W_f \cdot t \quad \text{Per } PMV_{reale} > PMV_{lim,sup} \quad (19)$$

Discomfort freddo

$$\sum W_f \cdot t \quad \text{Per } PMV_{reale} < PMV_{lim,inf} \quad (20)$$

4 Analisi di comfort adattivo (impianto spento)

La prima tipologia di analisi di comfort effettuata è quella di tipo adattivo, durante i mesi non compresi nel periodo di riscaldamento (impianto spento). In questo modo è anche possibile verificare se durante i mesi estivi sia effettivamente necessario l'utilizzo di impianti di raffrescamento.

L'analisi è stata condotta considerando sia il fabbricato allo stato di fatto (SdF), sia in configurazione nZEB* (l'apice * indica che sono state considerati sono gli interventi nZEB relativi all'involucro del fabbricato, in quanto si è ipotizzato il non funzionamento degli impianti di climatizzazione estiva).

La Tabella 4.1 riporta i criteri seguiti per le analisi di comfort adattivo effettuate.

Tabella 4.1. Criteri analisi di comfort adattivo.

Piano (P)	Zona Termica (ZT)	Periodo	Intervallo temporale
2	1	16/04 - 14/10	Orario
	5		
5	1		
	5		

Per prima cosa, per valutare l'effetto delle componenti di involucro del fabbricato sulle temperature interne delle diverse zone termiche, si sono individuate le ore mensili di *free-floating* (ovvero quelle ore in cui non è richiesto l'utilizzo di nessun tipo di impianto (nel caso in esame, di climatizzazione estiva)). Per effettuare questa analisi, si sono fissati i valori massimi e minimi di temperatura ammissibili all'interno della zona termica, pari a 26 °C e 21 °C rispettivamente. Le ore di *free-floating* (FF) sono quindi quelle ore in cui la temperatura interna della zona termica è compresa tra questi due limiti (21 °C e 26 °C). Il numero di ore di FF ottenuto è stato quindi convertito in percentuale (sulla base del numero totale di ore del singolo mese). In questo modo è possibile capire per quanto tempo non è necessario l'utilizzo di un impianto di climatizzazione.

Dopodiché, sono state effettuate le analisi sul comfort adattivo interno nelle diverse zone termiche analizzate, secondo quanto indicato dalla norma EN 16798-1 [6]. La norma mette in relazione la temperatura operativa interna con la temperatura media mobile ponderata esterna, definendone un intervallo di comfort (come spiegato nella Sezione 3.1). Le simulazioni effettuate con il software DesignBuilder forniscono i valori orari della temperatura operativa all'interno delle singole zone termiche, mentre tramite i dati climatici orari utilizzati è possibile calcolare la temperatura media mobile ponderata (*running mean temperature*) esterna, utilizzando l'Eq. (4). Per ogni coppia di valori, se ne è verificata l'appartenenza all'intervallo di comfort (definito secondo l'Eq. (6), categoria di comfort II), tramite la costruzione di grafici analoghi a quanto riportato in Figura 3.1.

La verifica di comfort, ha inoltre compreso la valutazione degli indici di discomfort (Sezione 3.3). Per una loro più esaustiva comprensione ed interpretazione, si sono utilizzati sia gli indici forniti dal metodo A, sia dal metodo B (UNI EN ISO 7730 [5] e CEN/TR 16798-2 [7]). Questo perché gli indici del metodo B, specifico per questa tipologia di analisi di comfort, tengono in considerazione sia il tempo di discomfort, sia la sua intensità (legata alla differenza tra la temperatura operativa effettiva a quella di comfort). Calcolando anche l'indice ottenuto secondo il metodo A (percentuale di ore di discomfort), è possibile determinare se, a parità di indice tipo B, si è in una situazione di discomfort tenue ma prolungato (elevato valore dell'indice tipo A), o se invece ci si deve confrontare con un discomfort intenso e concentrato (basso valore dell'indice A).

Di seguito si riportano i principali risultati ottenuti.

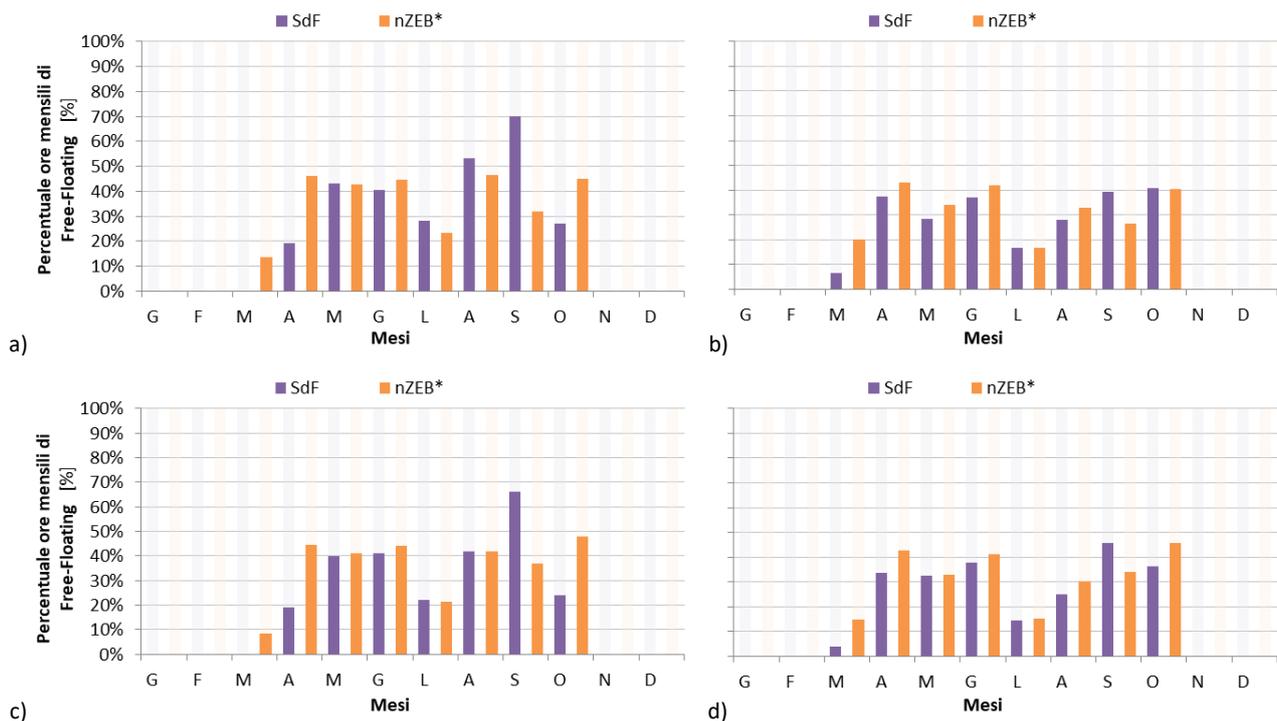


Figura 4.1. Percentuale di ore mensili in free-floating (SdF e nZEB*) a) 2°P - ZT1; b) 2°P - ZT5; c) 5°P - ZT1; d) 5°P - ZT5.

In Figura 4.1, i due grafici riportati sulla stessa colonna rappresentano la stessa zona termica sui due piani diversi, mentre quelli sulla stessa riga si riferiscono alle due zone termiche presenti sullo stesso piano.

Si può innanzitutto osservare, come prevedibile, che il numero di ore in *free-floating* della zona termica ZT1 (orientamento N-O) è mediamente maggiore rispetto a quello della ZT5 (orientamento S-E). Il numero di ore in FF si riduce inoltre leggermente passando dal 2° al 5° piano. La configurazione nZEB* ha in generale l'effetto di aumentare il numero di ore in FF (efficacia dell'isolamento della configurazione nZEB*), anche se questo miglioramento non è equamente distribuito su tutti i mesi, a causa dell'opposto effetto che l'aumento di isolamento ha sui carichi di riscaldamento e di raffrescamento.

Tale aumento lo si può osservare principalmente durante i mesi più freddi (marzo aprile ed ottobre), per merito delle ridotte dispersioni di calore verso l'esterno, ed in particolare negli appartamenti esposti a nord (ZT1). La ZT1 in configurazione nZEB* ha un numero di ore di FF durante il mese di aprile pari a circa il doppio di quello ottenuto in condizione SdF. Durante il resto dell'anno la differenza tra ore di FF allo stato di fatto o con l'edificio nZEB* è quasi trascurabile (< 5%), specialmente per l'appartamento posto al quinto piano. Gli appartamenti esposti a sud sono invece caratterizzati da una differenza tra nZEB* e SdF più omogenea durante tutto l'anno (con picchi durante i mesi più freddi).

Il mese di luglio è il mese più caldo in tutte le configurazioni analizzate, durante il quale le ore di FF sono circa un 20% delle ore totali mensili. Ciò, in altre parole, significa che per circa l'80% del tempo ho delle temperature operative interne maggiori di 26 °C. Ciò è dovuto al fatto che maggiore è il livello di isolamento termico, maggiore è il carico termico richiesto per il raffrescamento, e quindi minore sarà il numero di ore in FF. Per il mese di luglio in particolare, ma anche per gli altri mesi estivi si può già quindi intuire la necessità dell'utilizzo di un impianto di climatizzazione estivo.

Durante il mese di settembre, la configurazione nZEB* risulta essere notevolmente svantaggiosa, in quanto l'eccessivo isolamento riduce notevolmente le ore di FF (fino a dimezzarle nel caso della zona termica 1).

Anche se il calcolo delle ore in *free-floating* è stato effettuato su tutto l'anno, per l'analisi di comfort adattivo si è considerato solo il periodo dal 16/04 al 14/10 (mesi esclusi dalla stagione di riscaldamento, zona climatica E). I risultati delle analisi sono riportati da Figura 4.2 a Figura 4.9, nei quali la temperatura operativa oraria è plottata in funzione della temperatura esterna media mobile (Eq. (4)) e l'intervallo di comfort è indicato

tramite le tre temperatura di riferimento (temperatura di comfort, limite superiore e limite inferiore). I punti all'esterno della fascia di comfort rappresentano le ore di discomfort, le quali sono state differenziate in discomfort caldo (la temperatura operativa eccede il limite superiore dell'intervallo) e discomfort freddo (in cui la θ_o è minore del limite inferiore di comfort). Si sono poi valutati gli indici di discomfort di tipo A e B (considerando separatamente le ore di discomfort caldo e discomfort freddo, la cui somma fornisce l'indice di discomfort totale). L'analisi è stata condotta sulle quattro zone termiche, in configurazione SdF e nZEB*.

I seguenti grafici possono essere interpretati per singola zona termica e configurazione (SdF o nZEB*), o confrontati tra configurazioni, zone termiche e piani (in modo da individuarne gli effetti separatamente).

Per quanto riguarda la ZT1 al secondo piano, da Figura 4.2 si può immediatamente notare come il numero di ore di comfort (pari a circa l'80% delle ore totali stagionali) superi nettamente quelle in discomfort (sia caldo sia freddo). Si osserva inoltre una minima prevalenza di discomfort freddo. L'intervento nZEB* (Figura 4.3) comporta sia un aumento delle ore di comfort (88% circa), sia un aumento delle ore in discomfort caldo (mantenendone comunque più o meno invariata l'intensità, definita dal *weighting factor* W_f). Il discomfort freddo è invece notevolmente ridotto, sia in termini di tempo che di intensità.

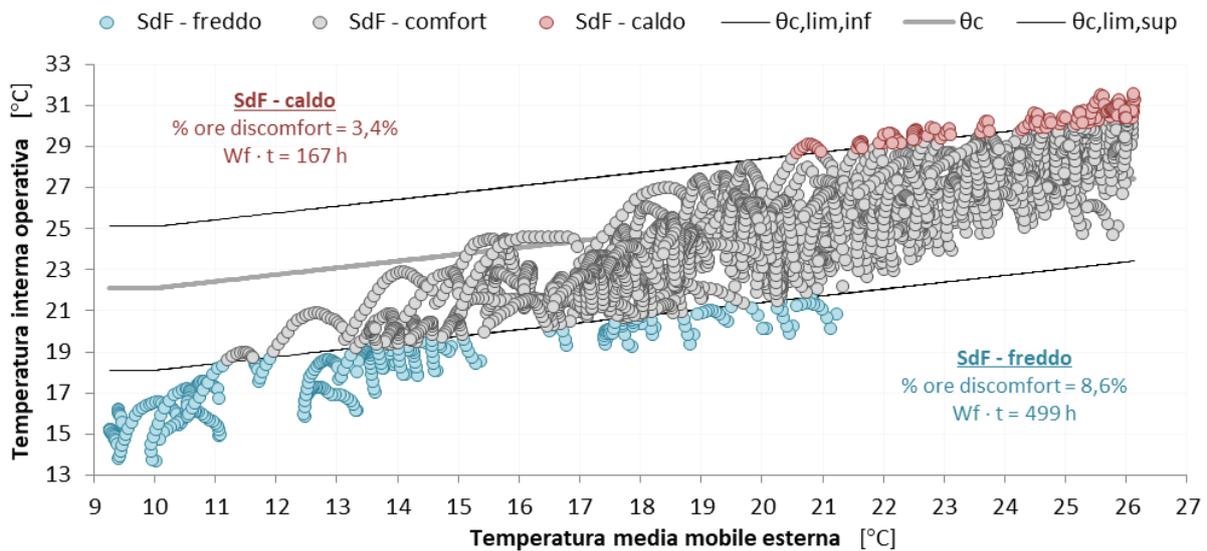


Figura 4.2. 2°P - ZT1: relazione tra θ_o e θ_{rm} , con individuazione degli indici di discomfort (SdF).

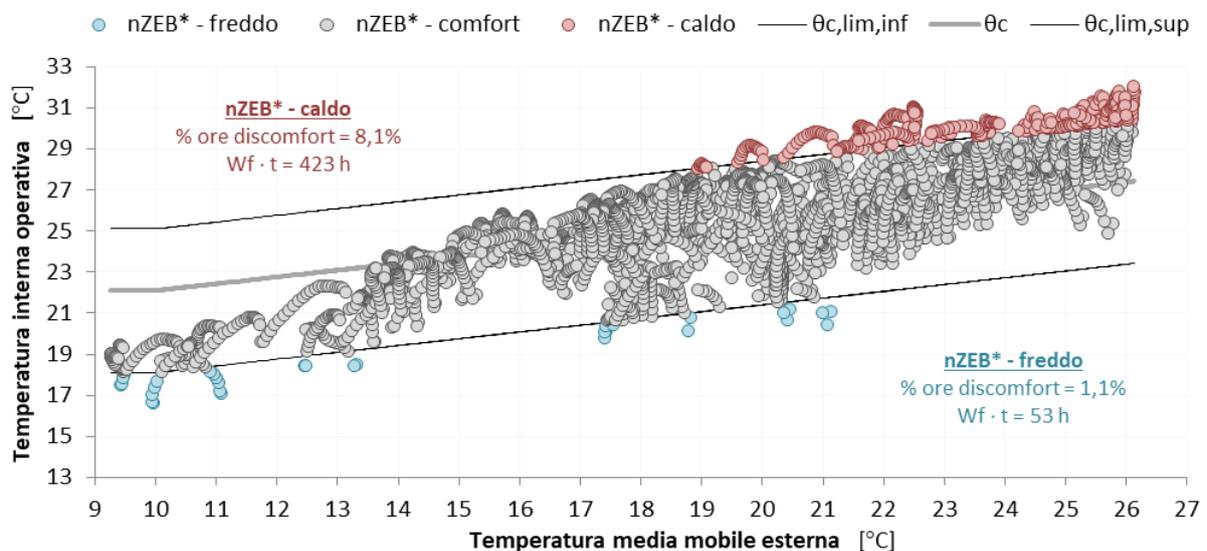


Figura 4.3. 2°P - ZT1: relazione tra θ_o e θ_{rm} , con individuazione degli indici di discomfort (nZEB*).

Sullo stesso piano, la zona termica 5 (esposizione S-E) è caratterizzata da un discomfort totale maggiore (circa il 30% delle ore). Rispetto alla ZT1, si dimezza il numero di ore di discomfort freddo (mantenendone analoga intensità), mentre aumenta notevolmente (poco meno di dieci volte) sia il numero di ore in discomfort caldo che la loro intensità (Figura 4.4). In questo caso, a seguito degli interventi nZEB* (Figura 4.5) si ottiene una riduzione del discomfort totale (il quale diventa pari a circa 22% delle ore stagionali), riducendo sia le dispersioni (minor discomfort freddo), che gli apporti durante i periodi più caldi (minor discomfort caldo).

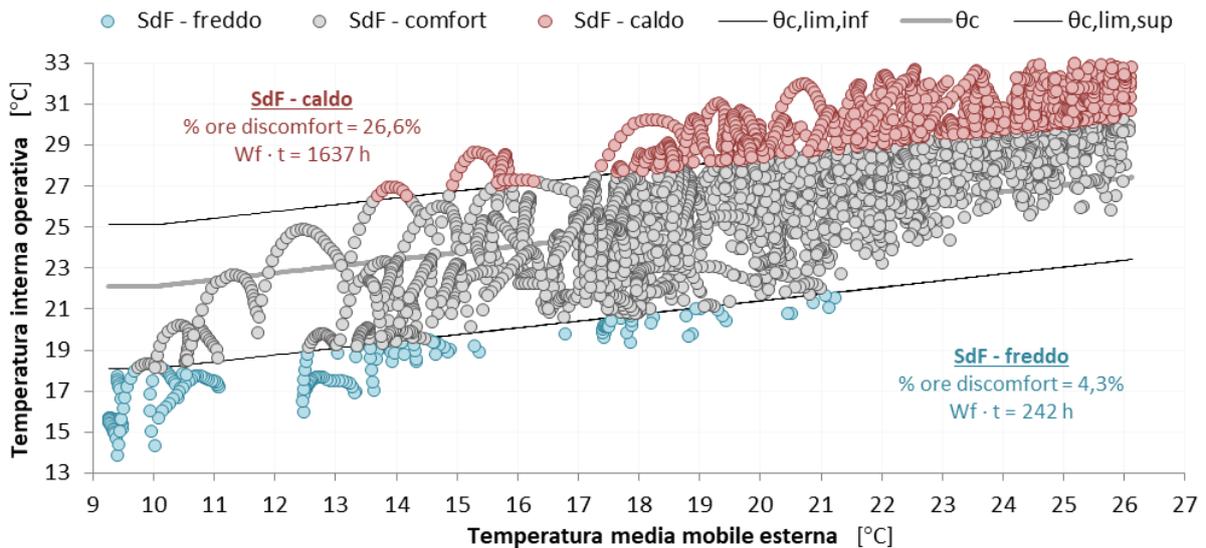


Figura 4.4. 2°P - ZT5: relazione tra θ_o e θ_{m} , con individuazione degli indici di discomfort (SdF).

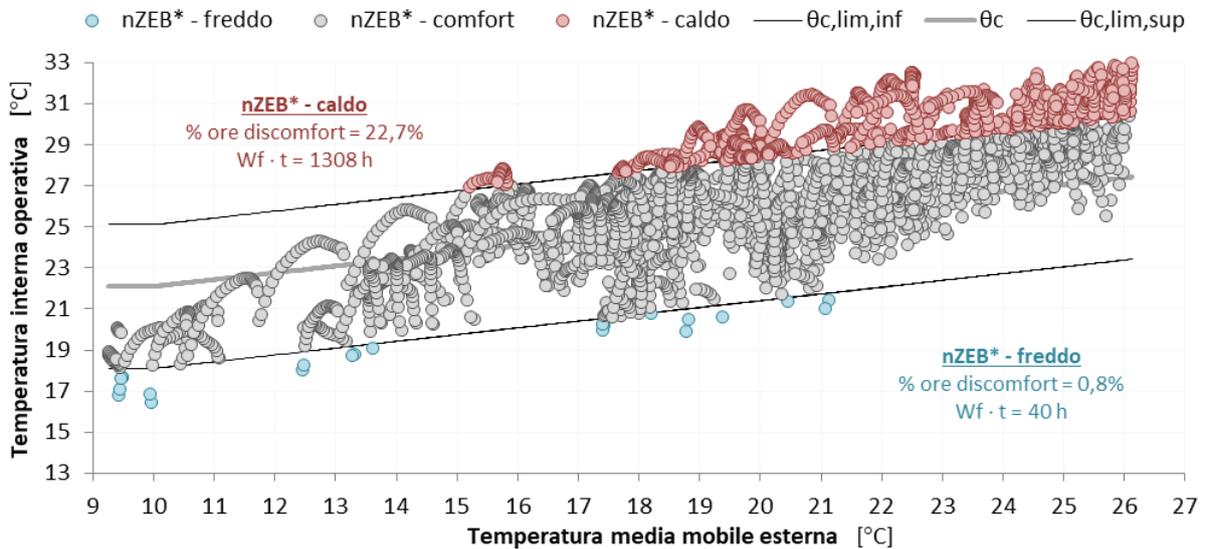


Figura 4.5. 2°P - ZT5: relazione tra θ_o e θ_{m} , con individuazione degli indici di discomfort (nZEB*).

Al quinto piano si osserva un generale aumento del discomfort, ad eccezione del discomfort freddo nella ZT5. L'ultimo piano è infatti più condizionato dalle variazioni climatiche (a causa della maggiore superficie disperdente), e l'orientamento a sud consente un migliore sfruttamento degli apporti solari, riducendo il discomfort da freddo.

In particolare, il discomfort totale della ZT1 al quinto piano aumenta circa del 50% rispetto alla stessa zona termica al secondo piano allo stato di fatto (Figura 4.6), e circa del 30% in configurazione nZEB* (Figura 4.7). In condizioni SdF, il principale aumento è dovuto alla quota di discomfort caldo (il tempo di discomfort è pari

a due volte e mezzo quello al secondo piano, a parti intensità). In configurazione nZEB*, l'aumento del discomfort è pari a circa il 30% per quanto riguarda il discomfort caldo, e 50% per quello freddo (esposizione N-O). Il discomfort totale ottenuto per la ZT1 - 5°P (SdF) è pari a circa il 18% (equamente suddiviso tra caldo e freddo (Figura 4.6), mentre si riduce al 12% (con prevalenza di discomfort caldo, 10% delle ore totali analizzate). Tale riduzione interessa sia il numero di ore, appena riportato, sia, per quanto riguarda il discomfort freddo, l'intensità.

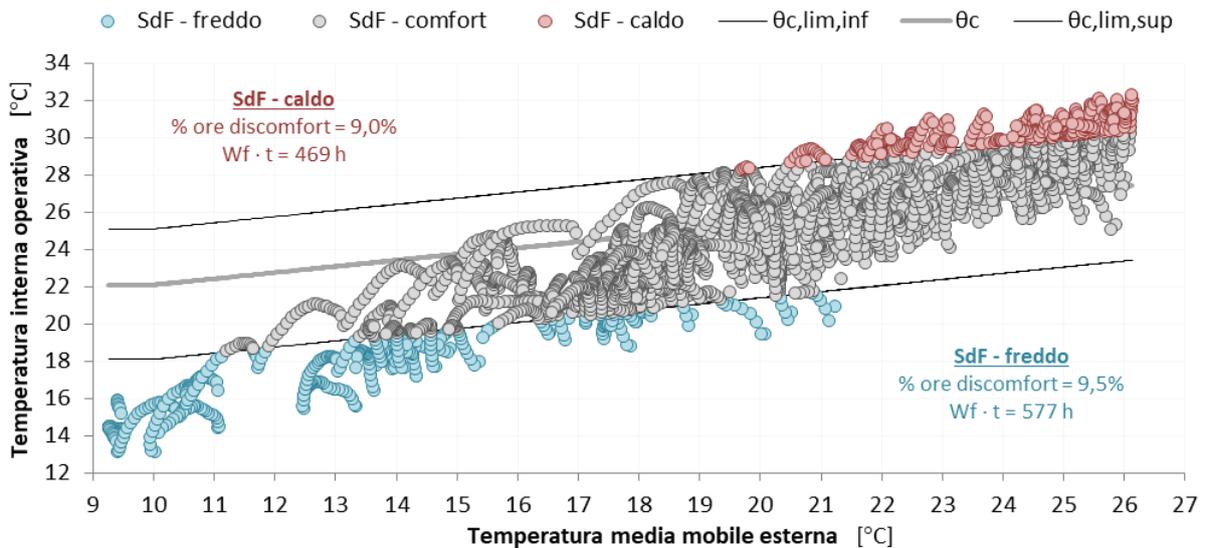


Figura 4.6. 5°P - ZT1: relazione tra θ_o e θ_m , con individuazione degli indici di discomfort (SdF).

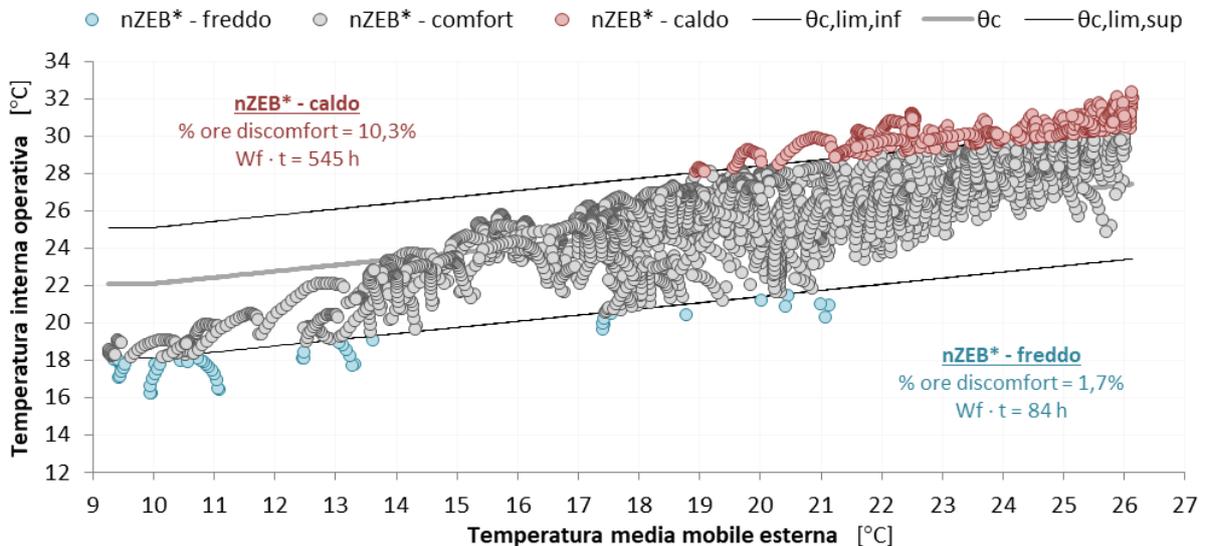


Figura 4.7. 5°P - ZT1: relazione tra θ_o e θ_m , con individuazione degli indici di discomfort (nZEB*).

Passando alla zona termica 5, il discomfort peggiora, superando il 30% delle ore complessive nella configurazione SdF (25% discomfort caldo + 6% discomfort freddo, Figura 4.8), e il 20% in condizioni nZEB* (21% caldo + 1% freddo, Figura 4.9). Rispetto alla ZT1, tale aumento riguarda le ore in discomfort caldo, le quali aumentano sia in numero che in intensità (allo SdF, mentre in condizioni nZEB* l'intensità si riduce). Si riduce sempre inoltre il tempo in cui nella zona termica si registra un discomfort freddo (a pari intensità).

Rispetto al secondo piano, si osserva un leggero aumento del discomfort da caldo, sia in configurazione SdF che nZEB*, mentre il discomfort da freddo aumenta di circa 50% allo SdF, e si riduce del 30% in condizioni nZEB* (l'intensità rimane sempre circa invariata).

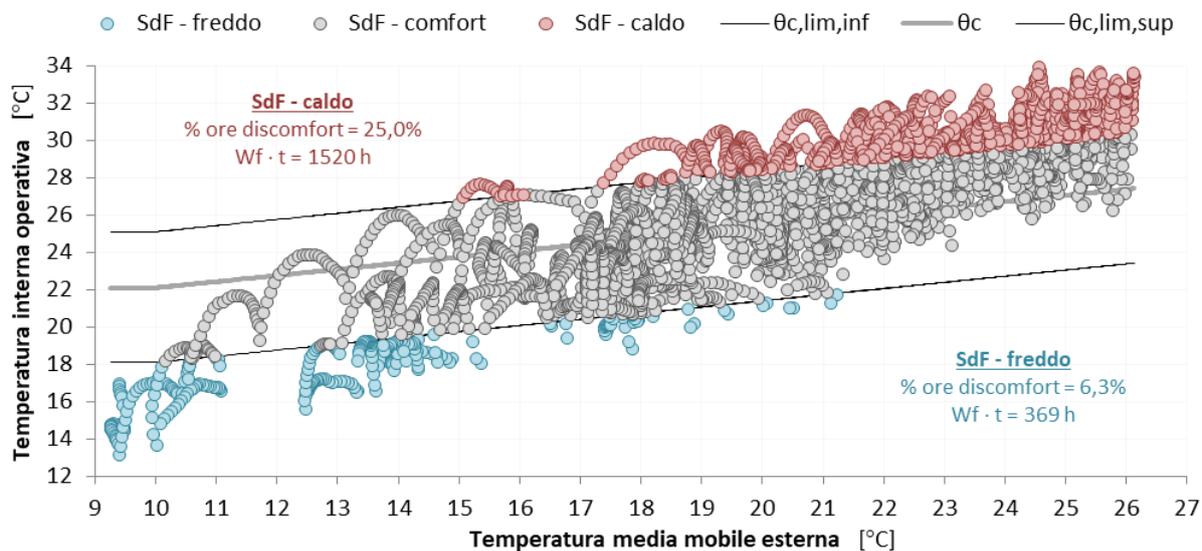


Figura 4.8. 5°P - ZT5: relazione tra θ_o e θ_{rm} , con individuazione degli indici di discomfort (SdF).

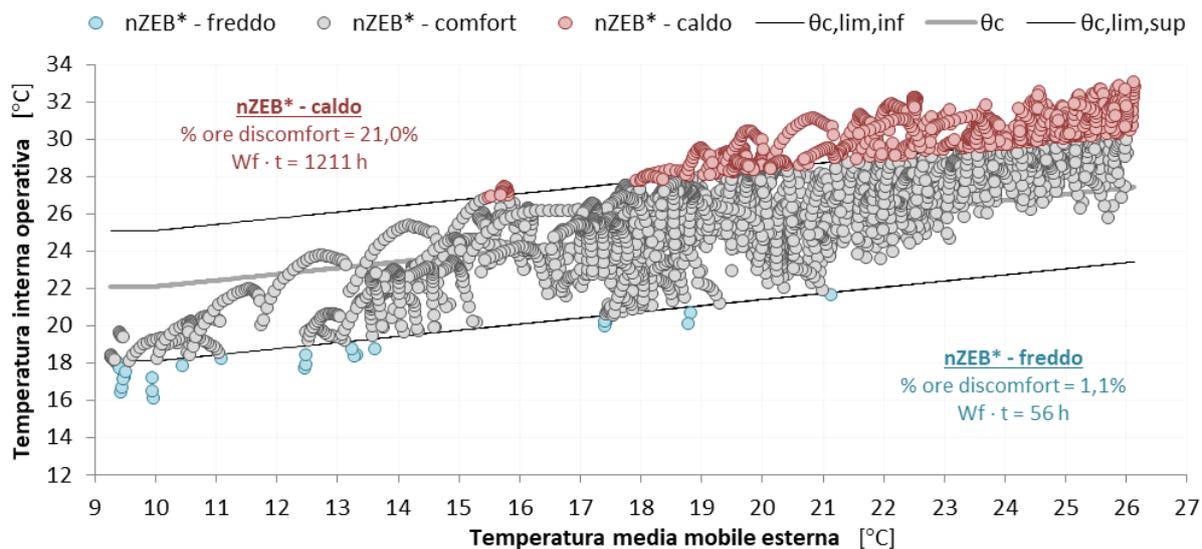


Figura 4.9. 5°P - ZT5: relazione tra θ_o e θ_{rm} , con individuazione degli indici di discomfort (nZEB*).

Gli interventi nZEB relativi al miglioramento delle prestazioni dell'involucro del fabbricato sono quindi estremamente utili per la riduzione del discomfort da freddo (sia tempo che intensità), lasciando un discomfort residuo in termini di tempo (indice di discomfort di tipo A) che varia tra 0,8% (2°P - ZT5) e 1,7% (5°P - ZT1). D'altro canto, l'incremento di isolamento causa un aumento del discomfort da caldo (non tanto in termini di intensità, definita dal fattore W_f , quanto in termini di tempo) nelle zone termiche 1 (esposizione N-O), e una sua leggera riduzione nelle zone termiche 5 (esposizione S-E). Il numero di ore residue di discomfort da caldo rimangono comunque molto elevati, da un minimo di 8% (2°P - ZT1) ad un massimo pari a circa 23% (2°P - ZT5).

Nell'ottica di una riqualificazione energetica dell'edificio, si dimostra quindi la necessità di prevedere degli impianti di climatizzazione estiva.

5 Analisi di comfort con impianto di climatizzazione acceso

A seguito dei risultati ottenuti nella precedente sezione, è stata effettuata una seconda analisi di comfort, ad impianti accesi, finalizzata al calcolo di PMV e PPD (corredati degli opportuni indici di discomfort illustrati nella Sezione 3.3) all'interno delle zone termiche considerate, al variare di alcune variabili di input.

L'analisi è stata condotta su base oraria, considerando le stesse zone termiche delle quali è stato valutato il comfort adattivo, durante il periodo di funzionamento degli impianti di climatizzazione (SdF: stagione di riscaldamento 15/10 - 15/04, nZEB intero anno, ovvero stagione di riscaldamento 15/10 - 15/04 + raffrescamento 16/04 - 14/10).

La seguente Tabella 5.1 riporta i criteri generali seguiti per le analisi di comfort con impianto di climatizzazione acceso.

Tabella 5.1. Criteri analisi di comfort con impianto di climatizzazione acceso.

Piano (P)	Zona Termica (ZT)	Periodo	Intervallo temporale
2	1	SdF / nZEB 15/10 - 15/04	Orario
	5		
5	1	nZEB 16/04 - 14/10	
	5		

La teoria di Fanger si basa sulla conoscenza di alcuni parametri ambientali (quali la velocità dell'aria interna, la temperatura operativa, la temperatura media radiante e l'umidità dell'aria interna) e di altri parametri individuali (attività metabolica e resistenza termica del vestiario). Temperature ed umidità relativa sono fornite dal software di simulazione *DesignBuilder*, le altre quantità sono invece state definite arbitrariamente, secondo quanto indicato nella norma UNI EN ISO 7730 [5].

I valori della velocità dell'aria sono stati assunti considerando un livello medio di *draft risk* [5], la tipologia di impianto in funzione e la probabilità di apertura finestre per il controllo della qualità dell'aria (Tabella 5.2):

Tabella 5.2. Velocità dell'aria.

SdF	nZEB - riscaldamento	nZEB - raffrescamento
$v_a = 0,1$ m/s Radiatori	$v_a = 0,15$ m/s Impianto ad aria	$v_a = 0,2$ m/s Impianto ad aria

L'attività metabolica degli occupanti è stata differenziata tra notte (fascia oraria tra le 23:00 e le 07:00) e giorno, secondo i valori forniti in [5] e [8], come riportato in Tabella 5.3.

Tabella 5.3. Attività metabolica.

Giorno	Notte
$M = 100$ W/m ² Attività casalinga mista	$M = 40$ W/m ² Impianto ad aria

Si è sempre ipotizzata la presenza di una sola persona, in modo da considerare il caso più generico possibile.

Partendo dall'utenza reale è stata definita la resistenza termica del vestiario (invernale diurno), considerando la temperatura di *set-point* dell'impianto di riscaldamento pari a 21 °C (secondo quanto dichiarato dall'utenza). Tale resistenza termica è stata valutata seguendo i valori di resistenza termica forniti nelle norme UNI EN ISO 7730 [5] e UNI EN ISO 9920 [9], per ogni capo di abbigliamento utilizzato, e dovrebbe garantire una discreta situazione di comfort alla temperatura indicata. Successivamente, si sono adattati

mensilmente i valori di resistenza termica, in modo tale da tenere in considerazione il mutare delle temperature esterne. Oltre alla valutazione diurna, è stata effettuata anche una valutazione della resistenza termica notturna, considerando il contributo del materasso e di diverse tipologie di coperte utilizzate durante i diversi mesi (secondo quanto indicato in [40]). La seguente Tabella 5.4 riporta i diversi valori di resistenza termica (in clo) utilizzati:

Tabella 5.4. Resistenza termica del vestiario.

Mese	Giorno (I_{cl}) [clo]	Notte (I_{cl}) [40] [clo]	Percentuale di copertura notturna
Gennaio	0,9	2,9	67%
Febbraio	0,9	2,9	67%
Marzo	0,7	2,4	67%
Aprile (01 - 14)	0,6	2,2	67%
Aprile (15 - 30)	0,5	1,9	59%
Maggio	0,4	1,3	59%
Giugno	0,4	1,3	59%
Luglio	0,3	1,1	48%
Agosto	0,3	1,1	48%
Settembre	0,3	1,4	48%
Ottobre (01 - 14)	0,5	1,9	59%
Ottobre (15 - 31)	0,6	2,2	67%
Novembre	0,7	2,4	67%
Dicembre	0,9	2,9	67%

L'analisi del PMV è stata condotta considerando diverse temperature di *set-point* (sia riscaldamento sia raffrescamento, nella configurazione nZEB). Si è effettuata quindi un'analisi di sensibilità di comfort, nella quale i valori dei parametri ambientali (eccetto la velocità dell'aria) sono variabili in funzione della temperatura, mentre gli altri parametri sono stati mantenuti costanti. Il livello di comfort è stato ulteriormente classificato secondo gli indici A e C, descritti nella Sezione 3.3.

I risultati ottenuti per ogni zona termica, sono stati poi confrontati con i relativi fabbisogni di energia termica utile per unità di superficie di pavimento.

Va evidenziato che, visto il gran numero di assunzioni necessarie per questo tipo di indagine, i risultati ottenuti non sono generalizzabili, ma sono estremamente utili per capire le potenzialità di variazione del livello di comfort e la sua relazione con i fabbisogni energetici conseguenti.

5.1 Analisi di sensibilità

Come appena accennato, l'analisi di comfort con impianto di climatizzazione acceso è stata associata ad un'analisi di sensibilità: variando la temperatura di *set-point* degli impianti si sono valutati gli indici di discomfort ottenibili, confrontandoli con i fabbisogni di energia termica conseguenti (valutati ipotizzando gli impianti in *ideal load*, sempre accesi e con bande di attenuazione). Sono state considerate quattro diverse temperature ($\Delta\theta = 1\text{ }^\circ\text{C}$), sia per il riscaldamento, configurazione sia SdF che nZEB, sia per il raffrescamento in condizioni nZEB, come indicato in Tabella 5.5.

Tabella 5.5. Temperature di *set-point* di riscaldamento e raffrescamento considerate nell'analisi di sensibilità.

Riscaldamento (SdF + nZEB)	Raffrescamento (nZEB)
19 °C	24 °C
20 °C	25 °C
21 °C	26 °C
22 °C	27 °C

Per ogni temperatura sono stati valutati PMV e PPD orari, i cui valori sono stati confrontati con i valori limite definiti dalla norma UNI EN ISO 7730 [5] (categoria di comfort B: $-0,5 < PMV < +0,5$; $PPD < 10\%$).

Le ore in cui questi limiti non sono rispettati rappresentano le ore di discomfort, utilizzate per la valutazione degli indici di discomfort a lungo termine di tipo A (percentuale delle ore di discomfort sul periodo considerato) e di tipo C (somma delle ore in discomfort, pesate in funzione del rapporto tra PPD effettivo e PPD limite).

I risultati ottenuti sono riportati dalla Figura 5.1 alla Figura 5.8, in cui sono rappresentati gli indici di discomfort a lungo termine, per ogni zona termica in entrambe le configurazioni SdF e nZEB, in funzione della temperatura di *set-point*, i quali sono direttamente confrontabili con i fabbisogni termici utili ($EP_{H,nd}$ o $EP_{C,nd}$). Scopo dell'analisi è individuare la temperatura ottimale di *set-point* degli impianti di climatizzazione, considerando sia comfort sia fabbisogno energetico), confrontandole quindi con le attuali temperature di *set-point* reali dichiarate dall'utenza (21 °C per riscaldamento e 26 °C per raffrescamento).

La ZT1 al secondo piano (SdF) è caratterizzata da un discomfort freddo molto elevato per $\theta_{sp} = 19$ °C, il quale si minimizza a 22 °C (Figura 5.1). A questa temperatura però il numero di ore in discomfort caldo (pari al 3%) è molto più alto di quello ottenuto a 21 °C (0,5%). A 21 °C si riduce anche il discomfort totale (caldo + freddo), sia in termini di tempo che di intensità, nonché il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento (riduzione del 10% rispetto quello ottenuto a 22 °C). La configurazione nZEB è invece caratterizzata da un forte discomfort caldo a 22 °C, il quale si minimizza a 19 °C, a discapito però di un aumento del discomfort freddo. La temperatura ottimale che consente di avere indici di discomfort sia caldo sia freddo molto bassi è, in questo caso, 20 °C (ovvero un grado in meno rispetto alla configurazione SdF, con una conseguente riduzione del fabbisogno di energia termica di circa il 56%). La configurazione nZEB comporta, in generale, un dimezzamento del fabbisogno energetico rispetto allo SdF a parità di temperatura (con maggiore riduzione a basse temperature).

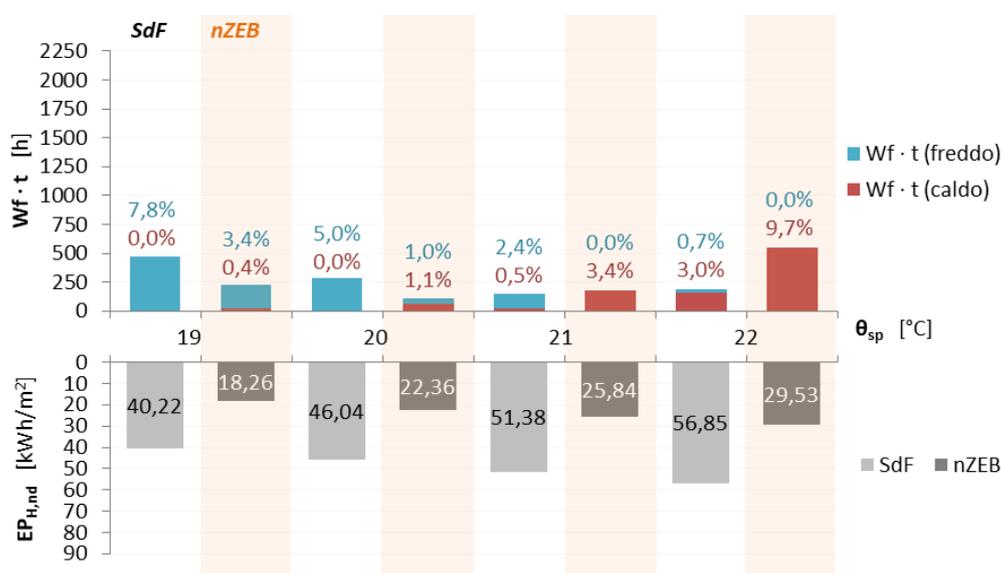


Figura 5.1. 2°P - ZT1: relazione tra discomfort e consumi al variare di θ_{sp} - riscaldamento (SdF e nZEB).

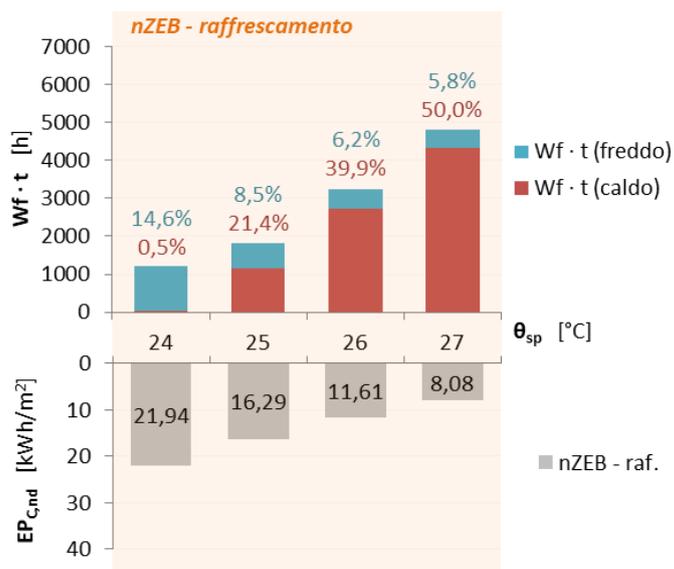


Figura 5.2. 2°P - ZT1: relazione tra discomfort e fabbisogni al variare di θ_{sp} - raffrescamento (nZEB).

Per quanto riguarda la stagione di raffrescamento (Figura 5.2), l'utilizzo di una temperatura di *set-point* pari a 24 °C azzererebbe il discomfort caldo, con conseguente discomfort freddo non accettabile durante la stagione calda. Aumentando la temperatura di un grado centigrado, si ottiene un aumento del discomfort globale (raddoppio delle ore, ma minore intensità), ma più distribuito tra caldo e freddo, ed una conseguente riduzione dei fabbisogni di circa 30%. La temperatura ottimale di raffrescamento della ZT1 al secondo piano può essere quindi ragionevolmente assunta pari a 25 °C, ovvero un grado centigrado in meno rispetto a quella attualmente utilizzata; la temperatura di 26 °C consentirebbe una riduzione dei fabbisogni pari a circa 30%, ma a spese di un raddoppio del discomfort totale, in cui il discomfort da caldo si verificherebbe per il 40% delle ore totali.

La zona termica 5 al secondo piano, essendo parzialmente esposta a sud, è caratterizzata da un maggiore livello di discomfort caldo, sia allo SdF che in configurazione nZEB. Per entrambi infatti risulta essere ottimale la temperatura $\theta_{sp} = 19$ °C. Con tale temperatura si minimizzano infatti discomfort complessivo e fabbisogni (Figura 5.3). L'aumento di discomfort caldo (e conseguentemente anche di quello complessivo) rispetto alla ZT1, è relativo sia al tempo che all'intensità: se per la ZT1 l'indice di discomfort C era compreso tra un minimo di 100 h pesate circa (SdF, 20 °C) ed un massimo di circa 550 h pesate (nZEB, 2 °C), per la zona termica 5, esso varia tra un minimo di 500 h pesate (nZEB, 19 °C) ad un massimo di quasi 2000 h pesate (SdF, 22 °C). A parità di temperatura ottimale, la configurazione nZEB consente inoltre di ridurre i fabbisogni del 36%. Per questa ZT, la riduzione media di $EP_{H,nd}$ ottenibile tramite l'edificio nZEB è pari a circa 35%, contro il 50% della ZT1. Questa riduzione di efficacia può essere dovuta alla sua posizione all'interno dell'edificio. La ZT5 confina direttamente con il vano scala, all'esterno del quale la configurazione nZEB prevede l'utilizzo di aggetti orizzontali fissi per l'ombreggiamento, i quali riducono gli apporti solari entranti in ambiente.

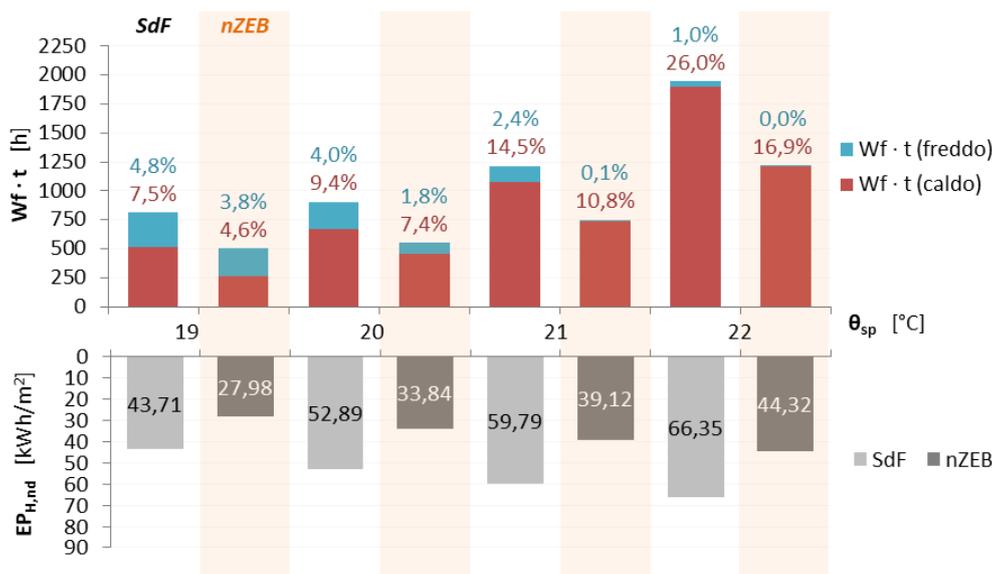


Figura 5.3. 2°P - ZT5: relazione tra discomfort e fabbisogni al variare di θ_{sp} - riscaldamento (SdF e nZEB).

Per quanto riguarda il raffrescamento (Figura 5.4) della ZT5, vale un discorso analogo a quanto osservato per la ZT1: si può assumere come temperatura ottimale il valore di 25 °C. L'utilizzo di tale temperatura (invece di 26 °C) causa un aumento dei consumi paria circa un terzo, dimezzando però l'indice di discomfort C (da 4000 h pesate a 2000 h) e riducendo le ore totali di discomfort circa del 20%.

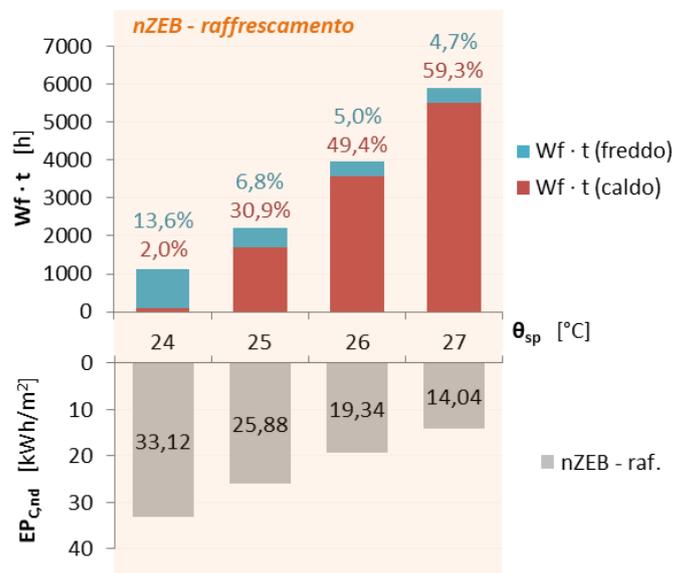


Figura 5.4. 2°P - ZT5: relazione tra discomfort e fabbisogni al variare di θ_{sp} - raffrescamento (nZEB).

Il passaggio al quinto piano causa un generale aumento del discomfort freddo, con conseguente aumento dei consumi, i quali aumentano mediamente del 40% sia in caso di edificio SdF che nZEB, con maggiore variazione in funzione della temperatura in quest'ultimo caso. In configurazione nZEB l'aumento dei consumi varia da un minimo di 31% con $\theta_{sp} = 22$ °C, ad un massimo di 48% con $\theta_{sp} = 19$ °C, contro una variazione compresa tra 36% e 44% (stesse temperature) allo SdF.

In particolare, questo aumento di discomfort freddo genera, per la ZT1 un aumento della temperatura ideale di *set-point* di 1 °C, sia in caso SdF ($\theta_{sp} = 22$ °C) sia in caso nZEB ($\theta_{sp} = 21$ °C). Impostando tali temperature si

ottiene la minimizzazione contemporanea del discomfort sia caldo, sia freddo ed, ovviamente, di quello complessivo (Figura 5.5).

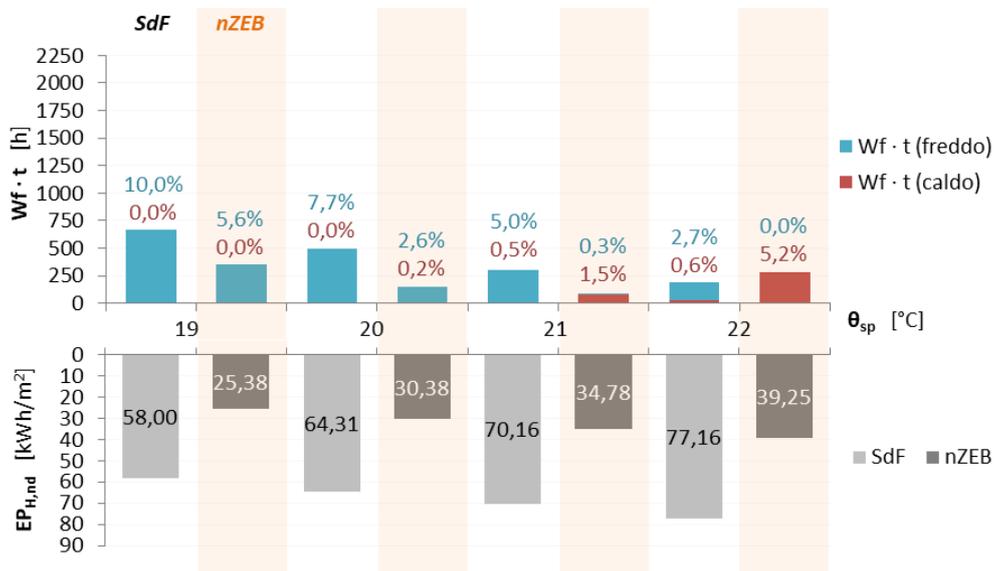


Figura 5.5. 5°P - ZT1: relazione tra discomfort e fabbisogni al variare di θ_{sp} - riscaldamento (SdF e nZEB).

Il risparmio energetico ottenibile, in termini di $EP_{H,nd}$, in configurazione nZEB rispetto allo SdF (considerando la temperatura di *set-point* ottimale specifica) è pari a circa il 55%.

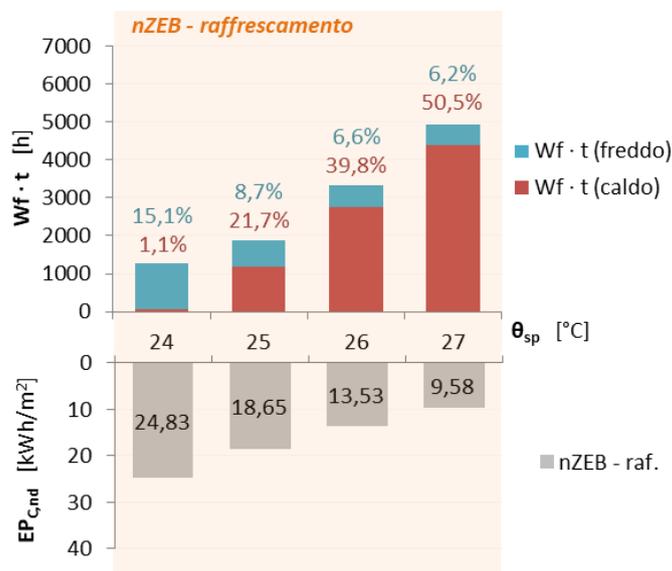


Figura 5.6. 5°P - ZT1: relazione tra discomfort e fabbisogni al variare di θ_{sp} - raffrescamento (nZEB).

Anche in questo caso si consiglia di assumere come temperatura di *set-point* per il raffrescamento 25 °C, la quale consente, a fronte di un aumento dei fabbisogni (rispetto a 26 °C) pari al 38% (pari a circa 5 kWh/m²), di ridurre del 17% del numero di ore in discomfort totale, e di circa un terzo l'indice di discomfort C (passando da poco più di 3000 h pesate a poco meno di 2000 h pesate), come osservabile in Figura 5.6.

La zona termica 5 al quinto piano è caratterizzata da una buona riduzione del discomfort caldo rispetto a quanto osservato al secondo piano (sia in termini di tempo che di intensità), accompagnato però da un

fortissimo incremento del discomfort freddo (il valore massimo dell'indice C di comfort freddo al secondo piano era pari a circa 250 h pesate a 19 °C, mentre al quinto piano si raggiungono le 500 h pesate). Per tale motivo le temperature di *set-point* ottimali aumentano: 20 °C per la configurazione nZEB e 21 °C allo SdF. La configurazione nZEB consente inoltre di dimezzare il fabbisogno di energia termica alle temperature ottimali, rispetto allo stato di fatto (Figura 5.7).

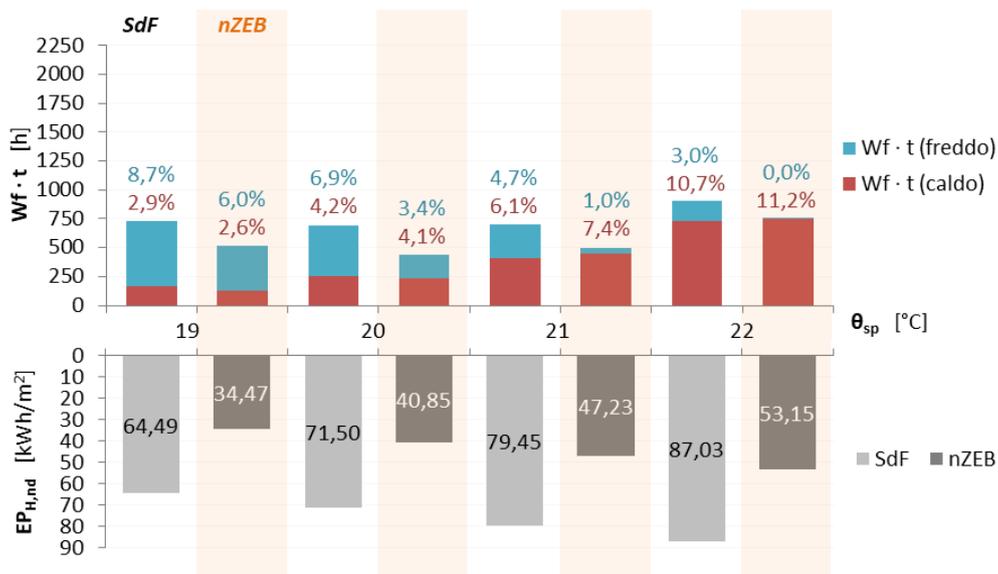


Figura 5.7. 5°P - ZT5: relazione tra discomfort e fabbisogni al variare di θ_{sp} - riscaldamento (SdF e nZEB).

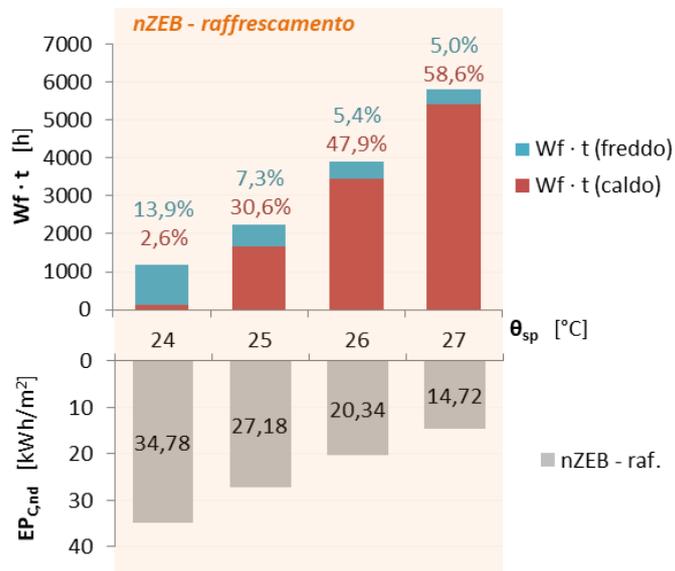


Figura 5.8. 5°P - ZT5: relazione tra discomfort e fabbisogni al variare di θ_{sp} - raffrescamento (nZEB).

Per quanto riguarda il periodo di climatizzazione estiva (Figura 5.8), si conferma ancora una volta la necessità di ridurre la temperatura di *set-point* a 25 °C (invece di 26 °C), aumentando il fabbisogno energetico del 34%, ma dimezzando quasi il livello di discomfort residuo.

6 Conclusioni

L'attività svolta ha riguardato la valutazione del comfort termo-igrometrico all'interno di un edificio situato in provincia di Torino rappresentativo del parco edilizio residenziale in zona climatica E, allo stato di fatto e a seguito di interventi di ristrutturazione per il raggiungimento del target nZEB.

Lo scopo dell'attività è stato valutare le condizioni di comfort interno (di quattro zone termiche selezionate in modo tale da rappresentare in maniera esaustiva l'intero edificio, considerando quindi diverse esposizioni e superfici disperdenti) sia ad impianti di climatizzazione spenti (comfort adattivo, EN 16798-1 [6] e CEN/TR 16798-2 [7]) sia accesi (comfort stazionario di Fanger, UNI EN ISO 7730 [5]). Oltre al calcolo del comfort orario, sono stati valutati degli indici di discomfort a lungo termine, secondo quanto previsto dalle norme UNI EN ISO 7730 [5] e CEN/TR 16798-2 [7], differenziati in discomfort complessivo, discomfort freddo e discomfort caldo.

Nel caso di comfort adattivo, le analisi sono state condotte dalla seconda metà di aprile alla prima metà di ottobre, ipotizzando di non utilizzare l'impianto di climatizzazione estivo nel caso di configurazione nZEB (la configurazione nZEB è stata pertanto denominata nZEB*, per evidenziare l'assenza degli impianti). In seguito ai risultati ottenuti, si è dimostrata l'efficacia della strategia nZEB* nella riduzione del discomfort freddo, mentre in caso di discomfort caldo l'effetto è minimo, se non controproducente (nel caso della ZT1). A seconda della zona termica considerata, la percentuale di ore in discomfort caldo (sulla stagione analizzata) varia da un minimo di 8% ad un massimo di 23%. Si è quindi dimostrata la necessità dell'utilizzo di sistemi di condizionamento estivo.

Successivamente è stato valutato il comfort termico ad impianti accesi, tramite il metodo stazionario di Fanger (UNI EN ISO 7730 [5]). I periodi di riferimento sono: la stagione di riscaldamento nel caso dello SdF (zona climatica E, dal 15 aprile al 15 ottobre) e l'anno intero nel caso di edificio nZEB (stagione di riscaldamento 15/10 - 15/04 + raffrescamento 16/04 - 14/10). Tale procedura richiede l'assunzione di alcune variabili (attività metabolica, resistenza termica del vestiario e velocità dell'aria), e per tale motivo è fondamentale evidenziare che i risultati ottenuti non sono generalizzabili. Sono comunque estremamente utili per capire le potenzialità di variazione del livello di comfort e la sua relazione con i fabbisogni energetici conseguenti.

Alla valutazione del comfort ad impianto acceso è stata associata un'analisi di sensibilità, facendo variare la temperatura di *set-point* degli impianti di riscaldamento (tra 19 °C e 22 °C), e di raffrescamento (tra 24 °C e 27 °C). I valori di comfort ottenuti sono stati confrontati con i fabbisogni di energia termica utile conseguenti all'applicazione delle diverse temperature di regolazione, in modo tale da individuare la temperatura di *set-point* ottimale per minimizzare i consumi energetici e massimizzare il comfort termico. Tale temperatura varia in funzione della zona termica, e tende ad essere di un grado più elevata nel caso di edificio allo stato di fatto. In ogni caso, non assume mai il valore di 22 °C (caldo eccessivo).

Si è osservato che la configurazione nZEB ha l'effetto costante di ridurre i consumi (tra il 30% e il 60% a seconda della zona termica), il discomfort totale e il discomfort freddo, mentre il discomfort caldo tende ad aumentare per la zona termica 1 (esposizione nord-ovest) e a diminuire per la zona termica 5 (esposizione sud-est).

Per quanto riguarda il periodo di raffrescamento, si è osservato come, in caso di livelli di isolamento molto elevati (target nZEB) sia necessario utilizzare una temperatura di *set-point* di 25 °C (un grado in meno rispetto quella comunemente utilizzata per la progettazione estiva).

7 Riferimenti bibliografici

Legislazione

- [1] Repubblica Italiana, Decreto Interministeriale 26 giugno 2015 “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 162 del 15 luglio 2015, Supplemento Ordinario n. 39.
- [2] Repubblica Italiana, Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28 “Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE, pubblicato sulla Gazzetta ufficiale n. 71 del 28 marzo 2011 – Supplemento Ordinario n. 81.
- [3] Repubblica Italiana, Decreto Interministeriale 26 giugno 2015 “Adeguamento del decreto del Ministro dello sviluppo economico, 26 giugno 2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.”, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 162 del 15 luglio 2015, Supplemento Ordinario n. 39.

Norme tecniche

- [4] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN 15251, 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, 2008.
- [5] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN ISO 7730, 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, 2006.
- [6] European Committee for Standardisation, EN 16798-1, 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 (in pubblicazione).
- [7] European Committee for Standardisation, CEN/TR 16798-2, 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 16798-01 (in pubblicazione).
- [8] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN ISO 8996, Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione del metabolismo energetico, 2005.
- [9] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN ISO 9920, Ergonomia dell'ambiente termico - Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento, 2009.
- [10] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI/TS 11300-1, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale, 2014.
- [11] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI/TS 11300-2, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali, 2014.
- [12] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI/TS 11300-3, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva, 2010.

- [13] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI/TS 11300-4, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria, 2016.
- [14] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI/TS 11300-5, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili, 2016.
- [15] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI CEI EN 16247-1, Diagnosi energetiche - Parte 1: Requisiti generali, 2012.
- [16] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI CEI EN 16247-2, Diagnosi energetiche - Parte 2: Edifici, 2014.
- [17] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI CEI EN 16247-3, Diagnosi energetiche - Parte 3: Processi, 2014.
- [18] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN 15459-1, Prestazione energetica degli edifici - Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici, 2018.
- [19] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI 10351, Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà termoigrometriche - Procedura per la scelta dei valori di progetto, 2015.
- [20] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI 10355, Murature e solai, Valori della resistenza termica e metodo di calcolo, 1994.
- [21] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN ISO 10456, Materiali e prodotti per l'edilizia, Proprietà igrometriche. Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto, 2008.
- [22] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN ISO 13786, Prestazione termica dei componenti per edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo, 2018.
- [23] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI EN ISO 6946, Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo, 2018.
- [24] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI 10349-1, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata, 2016.
- [25] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, UNI 7129-1, Impianti a gas per uso domestico e similare alimentati da rete di distribuzione - Progettazione, installazione e messa in servizio - Parte 1: Impianto interno, 2015

Pubblicazioni scientifiche

- [26] A. Ioannou, L.C.M. Itar, "Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy", *Energy and Buildings*, 92, 219-233, 2015.
- [27] S. Guillén-Lambea, B. Rodríguez-Soria, J.M. Marín, "Comfort settings and energy demand for residential nZEB in warm climates", *Applied Energy*, 202, 471-486, 2017.
- [28] Z. Wang, L. Zhang, J. Zhao, Y. He; "Thermal comfort for naturally ventilated residential buildings in Harbin", *Energy and Buildings*, 42, 2406–2415, 2010.
- [29] R. Gagnon, L. Gosselin, S. Decker, "Sensitivity analysis of energy performance and thermal comfort throughout building design process", *Energy and Buildings*, 164, 278–294, 2018.
- [30] R. de Dear, J. Kim, T. Parkinson, "Residential adaptive comfort in a humid subtropical climate—Sydney Australia", *Energy and Buildings*, 158, 1296–1305, 2018.

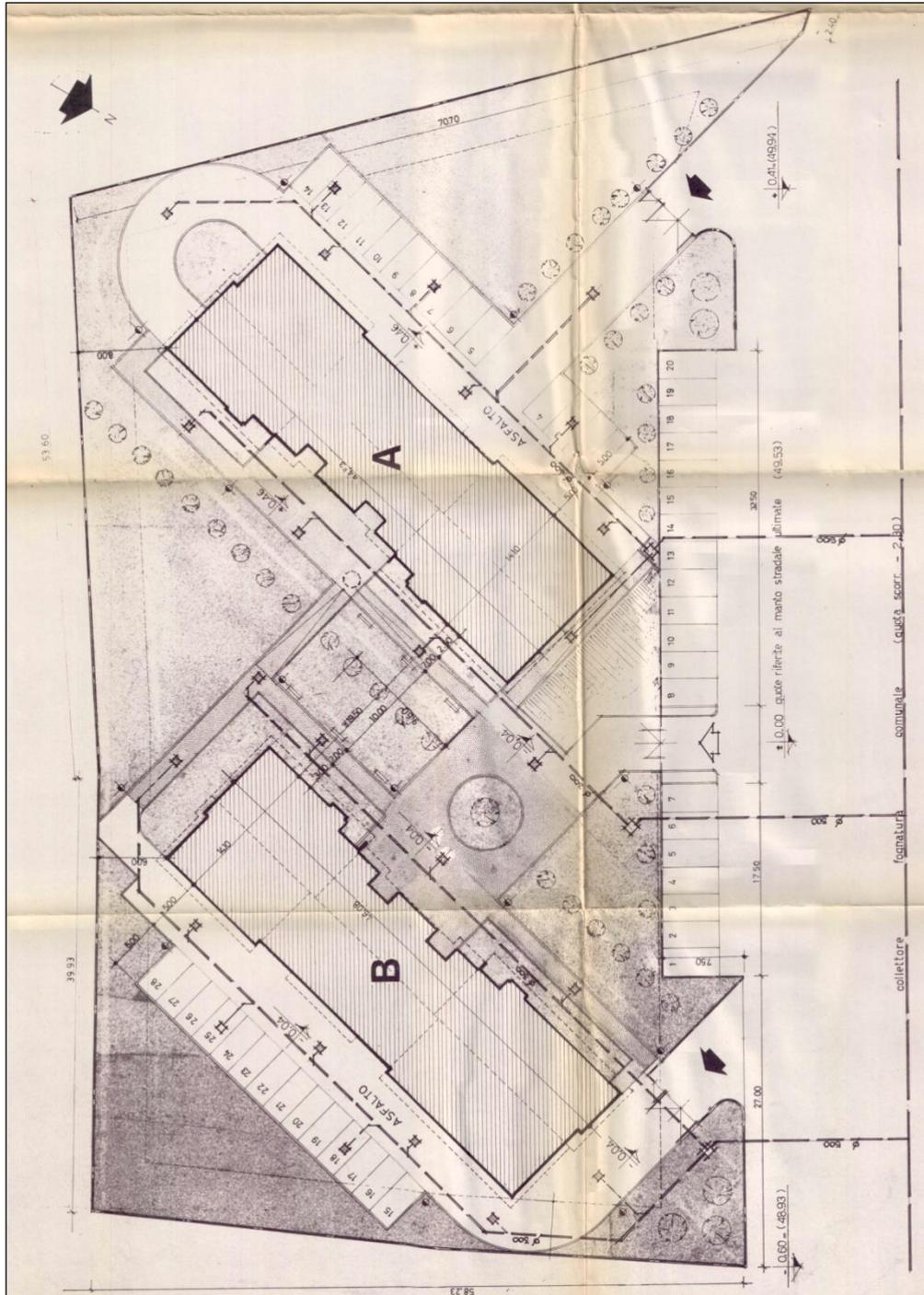
- [31] Y. Song, Y. Sun, S. Luo, Z. Tian, J. Hou, J. Kim, T. Parkinson, R. de Dear, "Residential adaptive comfort in a humid continental climate –Tianjin China", *Energy and Buildings*, 170, 115–121, 2018.
- [32] V. Corrado, I. Ballarini, A. Lorenzati, G. De Luca, "Riqualificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione nZEB. Studio di un edificio di edilizia residenziale pubblica di riferimento nella zona climatica Nord Italia (zona E: $2.100 < GG \leq 3.000$)," ENEA Report RdS/PAR2017 (in pubblicazione).
- [33] I. Ballarini, G. De Luca, A. Paragamyan, A. Pellegrino, V. Corrado, "Integration of Thermal and Visual Comfort in the Retrofit of Existing Buildings: Transformation of an office building into a nZEB". Atti di convegno: IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, 2018
- [34] V. Corrado, I. Ballarini, "L'avanzamento della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio residenziale regionale (Regione Piemonte, IT)", Progetto EPISCOPE, 2016. [http://episcopes.eu/fileadmin/episcopes/public/docs/pilot_actions/IT EPISCOPE RegionalCaseStudy_PO LITO.pdf](http://episcopes.eu/fileadmin/episcopes/public/docs/pilot_actions/IT_EPISCOPE_RegionalCaseStudy_PO_LITO.pdf)
- [35] Cassa Depositi e Prestiti, "Social Housing. Il mercato immobiliare in Italia: focus sull'edilizia sociale", Report monografico, 2014.
- [36] Capozzoli A., Corrado V., Gorrino A., Soma P, "Atlante nazionale dei ponti termici", Edizione Edilclima, 2011.
- [37] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, T. Meyarivan, "Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II". *Lecture Notes in Computer Science*, 2000, 849-858.
- [38] Ministero dello Sviluppo Economico, "Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica (Direttiva 2010/31/UE Art. 5)", 2018 (in pubblicazione).
- [39] V. Corrado, I. Ballarini, G. De Luca, E. Primo, "Riqualificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione nZEB. Studio dell'edificio di riferimento uso uffici della PA nella zona climatica Nord Italia (zona E: $2.100 < GG \leq 3.000$)", ENEA Report RdS/PAR2016, 2017.
- [40] Z. Lin, S. Deng, "A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics", *Building and Environment*, 43, 905-916, 2008.

Sitografia e software

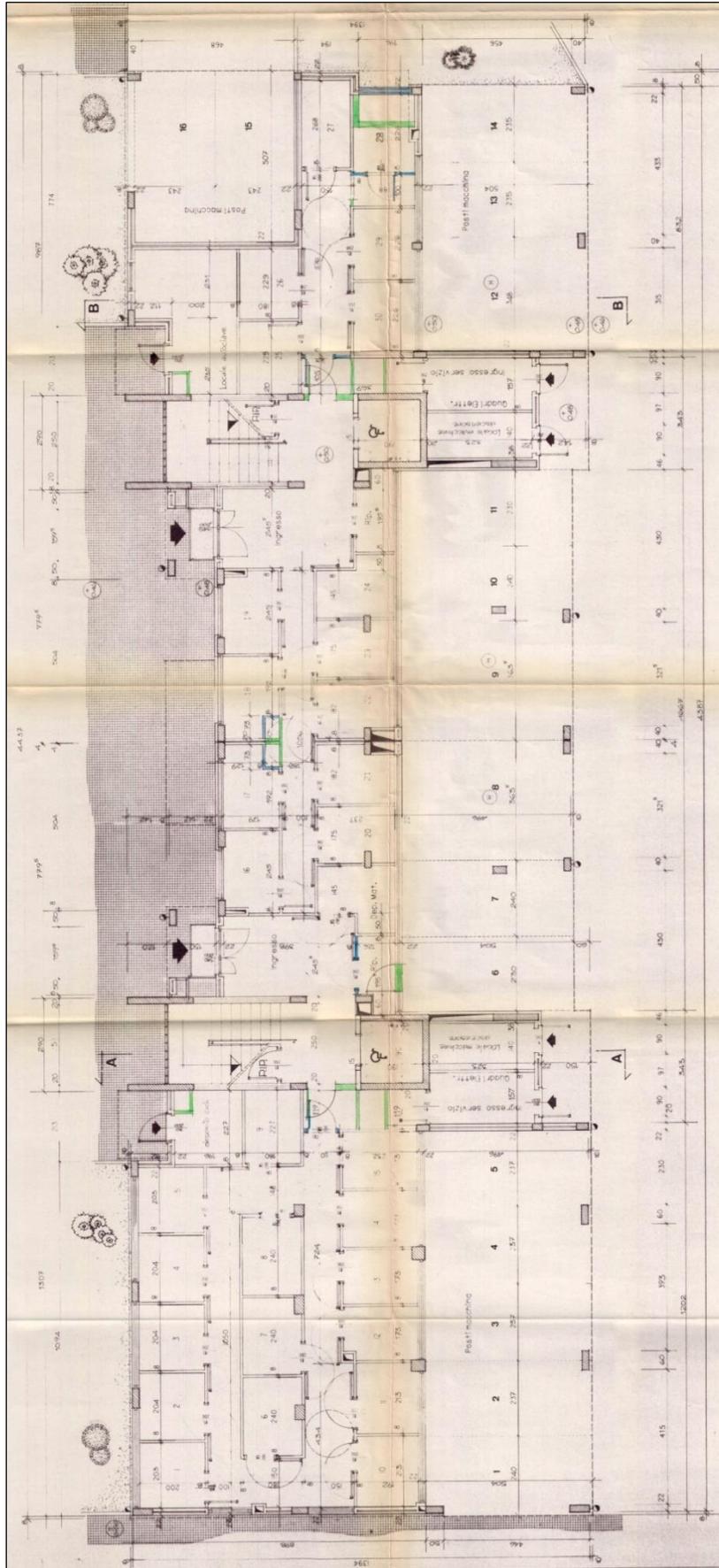
- [41] DesignBuilder - <https://www.designbuilder.co.uk/>
- [42] EnergyPlus - <https://energyplus.net/>
- [43] Scheda tecnica caldaia ARISTON T2 23 MI - <https://www.schede-tecniche.it/schede-tecniche-caldaie/ARISTON-manuale-tecnico-caldaia-murale-gas-T2-23-MI.pdf>
- [44] ARPA Piemonte – Banca dati meteorologica - https://www.arpa.piemonte.gov.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-meteorologica.html
- [45] Comitato Termotecnico Italiano (CTI) – Anni tipo climatici - <https://www.cti2000.it/index.php?controller=news&action=show&newsid=34848>

Allegato A. Elaborati progettuali – Edificio A

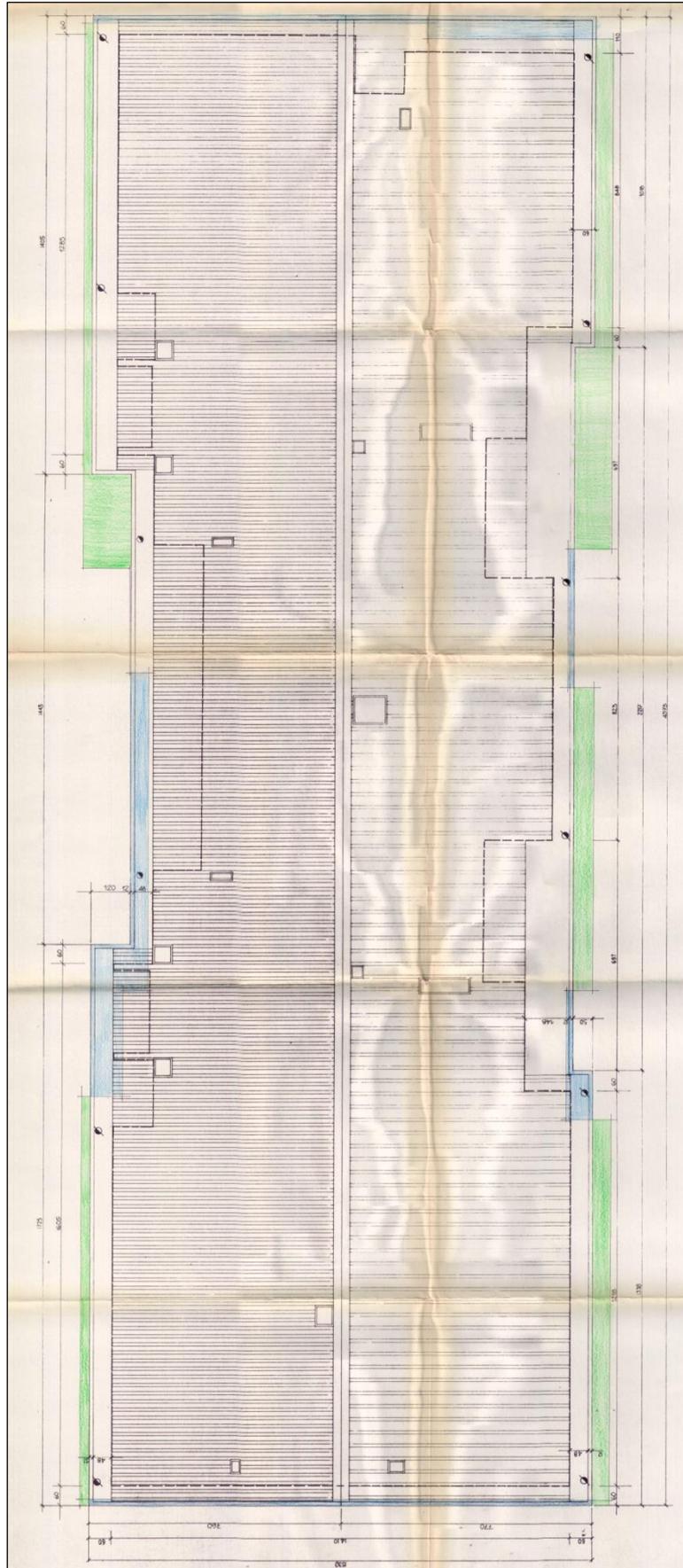
Planimetria e sistemazioni esterne



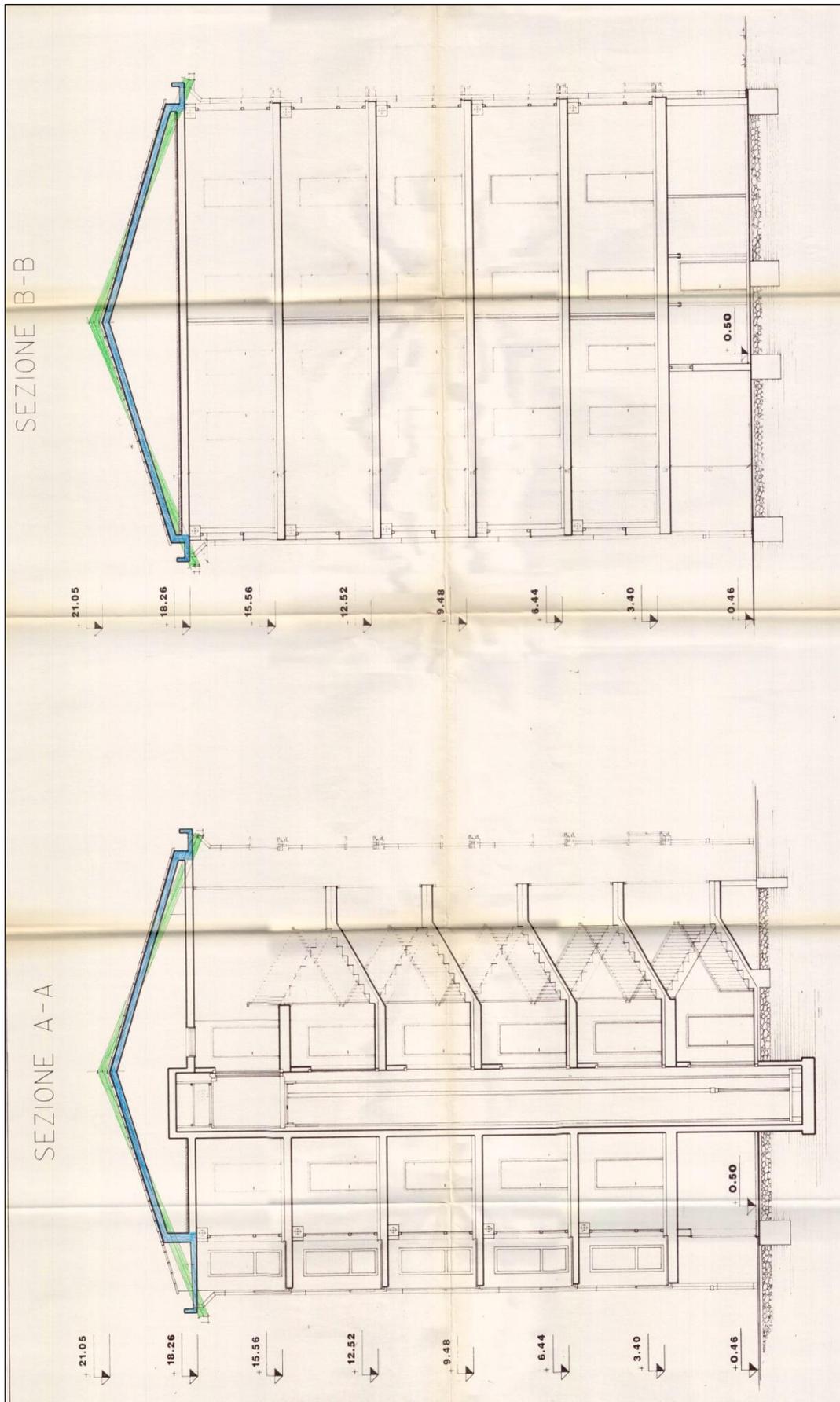
Pianta piano terra



Pianta copertura



Sezioni



Prospetti

