

QUALITÀ DELL'ARIA E COMFORT TERMICO IN UN EDIFICIO NZEB: ANALISI CFD DI POSSIBILI STRATEGIE DI VENTILAZIONE

INDOOR AIR QUALITY AND THERMAL COMFORT IN A NZEB BUILDING:
CFD ANALYSIS OF POSSIBLE VENTILATION STRATEGIES



P O L I T E C N I C O D I T O R I N O

Corso di laurea magistrale in Architettura Costruzioni e Città

Candidato: David Simula

Matricola: 240171

Relatore: Stefano Paolo Corgnati

Co-relatore: Cristina Becchio, Valentina Fabi

Settembre, 2019

Abstract

Il settore edilizio è responsabile del 25% del consumo di energia in Europa e di un terzo delle emissioni globali in atmosfera. In un'ottica di riduzione dell'impatto degli edifici, è stata introdotta la "Energy Performance of Buildings Directive" (EPBD Recast) 2010/31/UE, che ha definito il concetto di Nearly Zero Energy Buildings (NZEB), ovvero edifici caratterizzati da bassi fabbisogni energetici (grazie ad un'attenta progettazione dell'involucro edilizio) e dall'utilizzo di risorse rinnovabili per soddisfare la propria domanda di energia. Recentemente, l'EPBD è stata aggiornata per includere il comfort, la salute dell'occupante e la qualità dell'aria nella definizione di NZEB, riconoscendo il ruolo fondamentale che questi elementi devono avere nelle fasi di progettazione dell'edificio e soprattutto di utilizzo dello stesso.

La tesi di laurea ha l'obiettivo di valutare, per gli edifici NZEB, l'impatto che diverse strategie di ventilazione possono avere sui consumi energetici, sulla qualità dell'aria e sul comfort interno degli occupanti.

In particolare, una ricerca bibliografica iniziale ha permesso di valutare l'influenza delle strategie di ventilazione sul controllo di temperatura e umidità interna e sulla capacità di rimozione degli inquinanti dagli

ambienti chiusi. Inoltre, una parte della tesi si è focalizzata sulla comparazione di diversi software di simulazione, concentrandosi sulla loro capacità di integrare gli aspetti puramente energetici con quelli di qualità dell'aria. L'analisi ha portato alla luce il limite dei software di simulazione dinamica (solitamente utilizzati in ambito energetico-edilizio) nell'affrontare le tematiche di ventilazione e qualità dell'aria, spingendo sempre di più verso l'utilizzo di software specifici di Computational Fluid Dynamics (CFD), che permettono di valutare al meglio la distribuzione dell'aria e delle sue caratteristiche negli ambienti chiusi.

A valle dell'analisi comparata dei software, per la tesi si è scelto di utilizzare DesignBuilder, essendo in grado di unire le analisi energetica e CFD in un unico ambiente di simulazione. CorTau House, edificio residenziale NZEB situato in provincia di Vercelli, è stato scelto come caso studio. Tramite DesignBuilder, il modello energetico è stato costruito e simulato, i cui risultati sono stati confrontati con quelli già presenti in letteratura sul caso studio. L'analisi CFD è stata successivamente utilizzata per studiare l'impatto di diverse strategie di ventilazione (naturale, meccanica, ibrida) sul comfort termico degli occupanti e la qualità dell'aria interna, attraverso la valutazione di indicatori di performance specifici nei due ambiti.

Abstract

The building sector is responsible for 25% of energy consumption in Europe and one third of global emissions in the atmosphere. With the purpose of reducing the impact of buildings, the “Energy Performance of Buildings Directive” (EPBD Recast) 2010/31 /EU was introduced, which defined the concept of Nearly Zero Energy Buildings (NZEB), that are buildings characterized by low energy needs (thanks to a careful design of the building envelope) and the use of renewable sources to satisfy their energy demand. Recently, the EPBD has been updated to include comfort, occupant health and air quality in the definition of NZEB, recognizing the fundamental role of these elements in the building design phase and especially in the use stage.

The thesis aimed to evaluate, for NZEB buildings, the impact that different ventilation strategies can have on energy consumptions, indoor air quality and occupants’ internal thermal comfort.

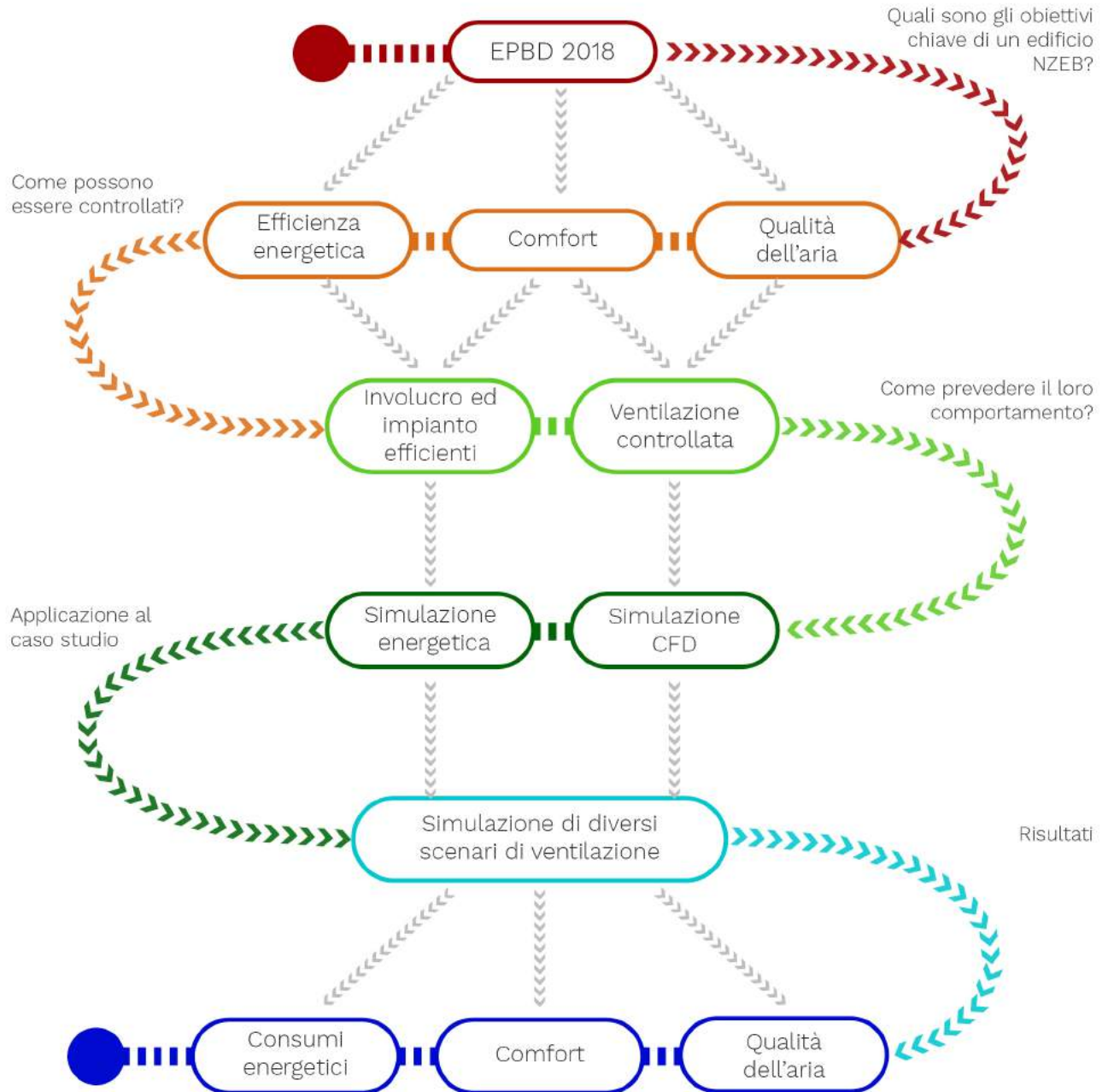
In particular, an initial literature review allowed to evaluate the influence of ventilation strategies on the control of internal temperature and humidity and on the ability to remove contaminants from indoor environments. Furthermore, a

part of the thesis focused on the comparison of different simulation software, focusing on their ability to integrate purely energetic aspects with air quality ones. The analysis highlighted the limitation of dynamic simulation software (usually used in the building sector) in dealing with the issues of ventilation and indoor air quality, orienting towards the use of specific software, as Computational Fluid Dynamics (CFD) ones, to better assess the air and its characteristics in closed environments.

After the comparative analysis of the software, DesignBuilder was selected for the study, as it allows to combine energy and CFD analyses within a single simulation environment. CorTau House, a NZEB residential building located in the province of Vercelli, was chosen as case study. Through DesignBuilder, the energy model was built and simulated, comparing the results with those already reported in the existing literature on the case study.

The CFD analysis was subsequently used to study the impacts of different ventilation strategies (natural, mechanical, hybrid) on occupants’ thermal comfort and on indoor air quality, through the calculation of specific performance indicators for these two topics.

Roadmap



INTRODUZIONE

1 **BACKGROUND** **P.14**

- 1.1 Il cambiamento climatico P.15
- 1.2 L'approccio internazionale P.17
- 1.3 Il consumo di energia P.19
- 1.4 Il quadro normativo P.22

2 **L'EDIFICIO NZEB** **P.27**

- 2.1 Il concetto NZEB P.28
- 2.2 Efficienza energetica P.30
- 2.3 Il comfort termico P.35
- 2.4 La qualità dell'aria P.44

3 **LA VENTILAZIONE** **P.49**

- 3.1 Definizioni e normative P.50
- 3.2 Strategie di ventilazione P.52
- 3.3 Ventilazione naturale P.53
- 3.4 Ventilazione meccanica P.55
- 3.5 Ventilazione ibrida P.57
- 3.6 Comparazione tra le tipologie di ventilazione P.58

4 **LA SIMULAZIONE ENERGETICA E CFD** **P.60**

- 4.1 L'approccio della simulazione energetica e CFD P.61
- 4.2 Il coupling method P.65
- 4.3 I software P.67

5	<i>IL CASO STUDIO</i>	<i>P.70</i>
	<ul style="list-style-type: none">• 5.1 CorTau House P.71• 5.2 Creazione del modello energetico P.72• 5.3 Creazione del modello CFD P.86• 5.4 Simulazioni energetiche e scenari CFD P.91	
6	<i>RISULTATI</i>	<i>P.96</i>
	<ul style="list-style-type: none">• 6.1 Risultati della simulazione energetica P.97• 6.2 Risultati della simulazione CFD P.116	
7	<i>CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI</i>	<i>P.148</i>
8	<i>ALLEGATI</i>	<i>P.152</i>
	<ul style="list-style-type: none">• 8.1 Input per scenari CFD P.153• 8.2 Questionario delle attività P.158• 8.3 Saggio di ricerca P.164	
9	<i>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</i>	<i>P.184</i>
	<ul style="list-style-type: none">• 9.1 Riferimenti immagini P.190• 9.2 Riferimenti tabelle P.192	

INTRODUZIONE



Il cambiamento climatico e l'innalzamento della temperatura media globale sono considerati i problemi principali a livello mondiale. La velocità con cui la temperatura sta progressivamente aumentando è allarmante e l'uomo ne è la causa principale.

La sensibilizzazione verso queste problematiche ha orientato lo sguardo dell'Unione Europea verso la diminuzione delle emissioni di CO₂, ponendo come obiettivo la riduzione dei consumi energetici e l'impiego di risorse rinnovabili.

Sebbene l'impegno degli ultimi anni abbia portato dei risultati considerevoli nella riduzione del consumo energetico, gli obiettivi posti dall'UE per il 2050 richiedono un ulteriore sforzo.

Analizzando il settore edilizio, la maggior parte dello stock è costituito da edifici esistenti, che non sempre hanno subito interventi di efficientamento energetico; ne consegue che il settore presenta ampi margini di miglioramento. Per questo motivo la Energy Performance Building Directive (EPBD) redatta dall'UE nel 2010 risulta cruciale. Essa definisce il concetto di Nearly Zero Energy Building (NZEB), il quale oltre ad evidenziare un consumo energetico estremamente ridotto rispetto allo stock esistente ambisce a sopperire alla richiesta residua tramite l'impiego di risorse rinnovabili.

L'efficienza energetica degli NZEB è raggiunta con la progettazione di un involucro estremamente prestante, il quale, grazie allo strato di isolamento, riduce considerevolmente la quantità di calore dispersa. Se da un lato l'involucro ermetico può ridurre i consumi dall'altro impedisce all'aria di essere dissipata trattenendo i contaminanti e l'eventuale calore in eccesso. In altre parole, viene creato un microclima interno che deve essere controllato per tutelare la salute dell'occupante e garantirne il comfort termico.

Queste osservazioni sono così attuali che nella revisione dell'EPBD redatta lo scorso anno, comfort termico e qualità dell'aria vengono incluse nel concetto di NZEB con la stessa importanza che viene data all'efficienza energetica.

Nella maggior parte degli edifici NZEB esistenti, il controllo di comfort e qualità dell'aria viene effettuato attraverso la ventilazione. Quest'ultima è decisamente efficace per regolare temperatura, umidità e qualità dell'aria. Tuttavia, la sua progettazione non può basarsi unicamente sul numero di ricambi orari richiesti dalle normative ma deve anche garantire una distribuzione efficace dell'aria per raggiungere un livello elevato nelle due categorie.

Per questo motivo la simulazione energetica non è più sufficiente poiché i risultati

sono valori medi relativi alla zona termica che non evidenziano eventuali criticità locali. Per questa ragione bisogna integrare con simulazioni più complesse per le analisi dettagliate dei parametri.

La Computational Fluid Dynamics analysis, ossia l'analisi di computazione fluidodinamica (CFD) risponde a queste esigenze fornendo una descrizione dettagliata in termini di temperatura e velocità per ogni punto dell'ambiente permettendo di analizzare la distribuzione dell'aria, le condizioni di comfort e il discomfort locale.

Supportata da questa metodologia, la progettazione può migliorare il dimensionamento ed il posizionamento delle bocchette di immissione dell'aria e risolvere le criticità che possono nascere nei punti in cui la composizione è più complessa, creando così un'interazione tra la progettazione architettonica e la progettazione energetica dell'edificio ottimizzando i risultati nei due campi.

Obiettivo e metodologia

La tesi si pone l'obiettivo di valutare e simulare come diverse tipologie e soluzioni di ventilazione all'interno di un edificio NZEB possano influenzare il comfort e la qualità dell'aria interna tramite l'utilizzo di simulazioni CFD.

Per raggiungere questo scopo è stata effettuata una ricerca bibliografica sugli elementi che caratterizzano l'edificio NZEB, il cui risultato identifica l'involucro edilizio, le tecnologie impiantistiche e l'utilizzo di risorse rinnovabili locali come elementi chiave per raggiungere gli standard. Tuttavia, la ricerca sottolinea anche che un involucro edilizio molto efficiente oltre a ridurre i fabbisogni energetici, aumenta anche il rischio di trattenere all'interno i contaminanti ed il calore in eccesso in estate, andando a ridurre la qualità dell'aria ed il comfort dell'occupante. Per questo motivo la ventilazione assume un ruolo di primaria importanza nella progettazione di un edificio NZEB, in quanto è capace di regolare temperatura, umidità e qualità dell'aria attraverso un adeguato numero di ricambi orari ed a una corretta distribuzione dell'aria nell'ambiente. Sebbene la simulazione energetica sia capace di analizzare i ricambi d'aria non riesce a valutarne la distribuzione. Per questo motivo è stata effettuata una comparazione tra i diversi software di simulazione energetica con analisi CFD associate capaci di descrivere in modo dettagliato i flussi d'aria.

Il software DesignBuilder è stato scelto per essere applicato al caso studio poiché racchiude modellazione 3D, analisi energetica e analisi CFD all'interno dello stesso am-

biente di simulazione.

L'applicazione è stata eseguita su un edificio NZEB residenziale chiamato CorTau House situato a Livorno Ferraris, Vercelli. Vengono definiti diversi scenari in cui i parametri di comfort e di qualità dell'aria vengono valutati in funzione della tipologia di ventilazione attiva e dei parametri esterni. I risultati vengono infine comparati tra loro per valutarne l'efficacia.

Struttura della tesi

La tesi è composta da 7 capitoli principali:

Cap.1 Background Vengono introdotte le cause e le conseguenze del cambiamento climatico in atto e viene presentato come le politiche globali si avvicinano al problema. In seguito vengono approfonditi i consumi energetici e le emissioni di CO₂ con un focus sul settore edilizio. Infine viene presentato il quadro legislativo con particolare attenzione alla direttiva europea EPBD, trattando dell'evoluzione del suo approccio al concetto NZEB, dalla sua definizione iniziale, all'introduzione di comfort e qualità dell'aria come suoi pilastri portanti.

Cap.2 L'edificio NZEB Vengono approfonditi i concetti di efficienza energetica, comfort e qualità dell'aria. In particolare vengono date le loro definizioni e vengono

analizzati i metodi di valutazione.

Cap.3 La ventilazione Vengono definite le caratteristiche delle strategie di ventilazione (miscelazione e dislocamento) e delle tipologie di ventilazione (ventilazione meccanica, ventilazione naturale e ventilazione ibrida).

Cap.4 La simulazione energetica e CFD Vengono comparati i due tipi di simulazione in funzione dei risultati, tempi di computazione e livello di dettaglio. In seguito viene eseguita la comparazione tra diversi software, necessaria per la scelta del programma da utilizzare per l'applicazione al caso studio.

Cap.5 Il caso studio Vengono introdotti il caso studio ed i parametri di input utilizzati per la creazione del modello energetico e CFD. A seguire vengono introdotti e descritti gli scenari utilizzati per la valutazione dei risultati.

Cap.6 Risultati Viene effettuata un'analisi critica dei risultati ottenuti dalla simulazione energetica per quanto riguarda i consumi energetici ed il comfort e dalla simulazione CFD per quanto riguarda la qualità dell'aria ed il comfort.

Cap.7 Conclusione e sviluppi futuri

Vengono raccolte le considerazioni più importanti sui risultati ottenuti e vengono citati i possibili sviluppi futuri del lavoro.

The background of the slide is a complex, abstract pattern of thin red lines. These lines form a series of overlapping, curved surfaces that create a sense of depth and movement. The lines are most dense in the lower-left quadrant and become sparser as they move towards the upper-right. The overall effect is a dynamic, geometric composition that frames the text.

1.BACKGROUND

1.1 Il cambiamento climatico

Il clima della Terra è cambiato notevolmente nel corso della storia. Negli ultimi 650.000 anni ci sono stati sette cicli glaciali tra cui l'ultimo risale a circa 7.000 anni fa e segna l'inizio dell'era del clima moderno e della civiltà umana. La maggior parte di questi cambiamenti climatici sono attribuiti a piccole variazioni nell'orbita terrestre che hanno cambiato la quantità di radiazione solare ricevuta dalla terra.

Tuttavia, secondo la NASA, il riscaldamento globale in atto è diverso dai precedenti in quanto c'è una probabilità superiore al 95% che sia causato dalle attività dell'uomo dell'ultima metà del 20° secolo e procede ad un ritmo che non ha precedenti. È stato perciò descritto come la più grande minaccia per la salute globale del 21° secolo^[1].

Il *Fifth Assessment Report* dell' Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ha concluso: *"It is extremely likely that human influence has been the dominant cause of the observed warming since the mid-20th century"*^[2] ovvero *"È estremamente probabile che l'influenza umana sia stata la causa principale del riscaldamento osservato dalla metà del 20° secolo"*^[2].

La Terra è circondata da uno strato di gas attivi che compongono l'atmosfera. Essa consente il passaggio della radiazione provenienti dal Sole mentre blocca parte della radiazione riflessa dalla superficie della Terra. Gran parte della radiazione viene quindi trattenuta dall'atmosfera e riemessa in tutte le direzioni. L'effetto serra è un effetto naturale estremamente importante: grazie ad esso la temperatura media attuale della Terra è di circa 15°, consentendo perciò l'esistenza di oceani, dei fiumi e soprattutto della vita. Tuttavia, l'aumento dell'effetto serra antropico, ossia causato dall'intervento dell'uomo, altera il normale equilibrio termico del pianeta portando a sconvolgimenti sia dal punto di vista climatico che ambientale, tra cui il cosiddetto riscaldamento globale.

Nel corso dell'ultimo secolo la richiesta energetica è cresciuta notevolmente.

Le cause principali di questo incremento sono^[3]:

- *La crescita della popolazione*

In accordo con le proiezioni, la popolazione mondiale crescerà dai 7.5 miliardi nel 2016 a 9 miliardi nel 2040. Questo aumento della popolazione concorrerà nell'aumento dell'energia globale richiesta.

- *La crescita dell'economia globale*

Misurata con il Gross Domestic Product (GPD), sembra propensa ad un aumento del 75% rispetto al 2015, al quale segue un aumento del tenore di vita della popolazione, specialmente quelle dell'Asia (India, Cina), il che comporterà un maggiore impiego di energia.

- *La crescita dell'urbanizzazione*

Si stima un aumento di area urbanizzata da un 53% nel 2013 ad un 63% nel 2040. L'aumento del numero di edifici, secondo le stime, provocherebbe un aumento del consumo di energia del 37% tra il 2013 ed il 2035, con un aumento annuale del 1,4%. Come per la crescita dell'economia globale anche qui gli stati non appartenenti all'*Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)* saranno i maggiori contributori nell'aumento di energia.

- *L'aumento della richiesta di veicoli,*

Dalle stime risulta raddoppiare dal 2014 al 2035 passando da 1,2 miliardi a 2,4 miliardi. L'aumento di energia non sarà proporzionale all'aumento dei veicoli in circolazione grazie ai miglioramenti nell'efficienza dei carburanti, al miglioramento delle tecnologie come ad esempio le macchine elettriche e alle normative riguardanti le emissioni. Dalla stima risulta comunque una

crescita del 30% dal 2014 al 2035.

Per soddisfare la richiesta energetica nel corso degli ultimi anni l'impiego di combustibili fossili è cresciuto proporzionalmente.

La loro combustione genera il 76% dell'anidride carbonica (CO₂) prodotta dall'uomo. Quest'ultima è la componente principale dei gas che amplificano l'effetto serra alterandone l'equilibrio e trattenendo all'interno dell'atmosfera una quantità di calore eccessiva. **Fig.1**^[4].

Infatti, negli ultimi 50 anni la concentrazione di CO₂ è passata da un livello di 310 parti per milione (ppm) a 405 ppm. Questo livello è il più alto degli ultimi 400.000 anni e l'aumento si è verificato nel tempo più breve che la storia recente della Terra registri^[5]. Gli effetti del riscaldamento globale sono molteplici sia in termini quantitativi

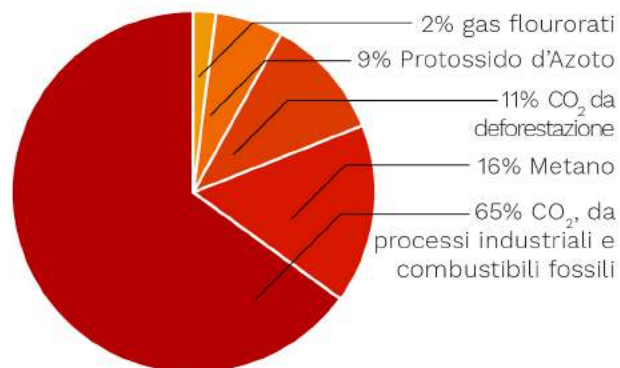


Fig.1 Gas effetto serra
Fonte: epa.gov

che qualitativi. Secondo un'analisi degli scienziati del Goddard Institute for Space Studies della NASA (GISS)^[6], la temperatura media globale nel 2018 è aumentata di circa +0,83 °C dal 1880. **Fig.2**^[7].

L'innalzamento della temperatura ha diverse conseguenze negative^[8]:

- *Aumento del livello del mare*

Di circa 90 mm rispetto dal 1993. Si prevede che aumenti di un altro da 300 mm a 1220 mm entro il 2100.

- *Aumento del rischio di siccità*

La quale porta sia alla desertificazione che alla perdita di produttività del suolo. Le conseguenze sull'agricoltura porteranno ad una ridotta disponibilità di cibo nei Paesi

già a rischio denutrizione, con ripercussioni sulla salute dell'uomo.

- *Aumenta l'intensità, la frequenza e la durata degli uragani e delle tempeste*
In aumento dai primi anni '80 e tenderanno ad incrementare al crescere della temperatura.

1.2 L'approccio internazionale

Il tema del cambiamento climatico ha iniziato ad assumere notevole importanza durante gli anni '70, a seguito di numero studi che ne approfondiscono il tema. Le nuove conoscenze acquisite sul sistema climatico amplificano l'attenzione verso l'inquinamento ed il degrado dei beni ambientali come acqua, aria e suolo^[9].

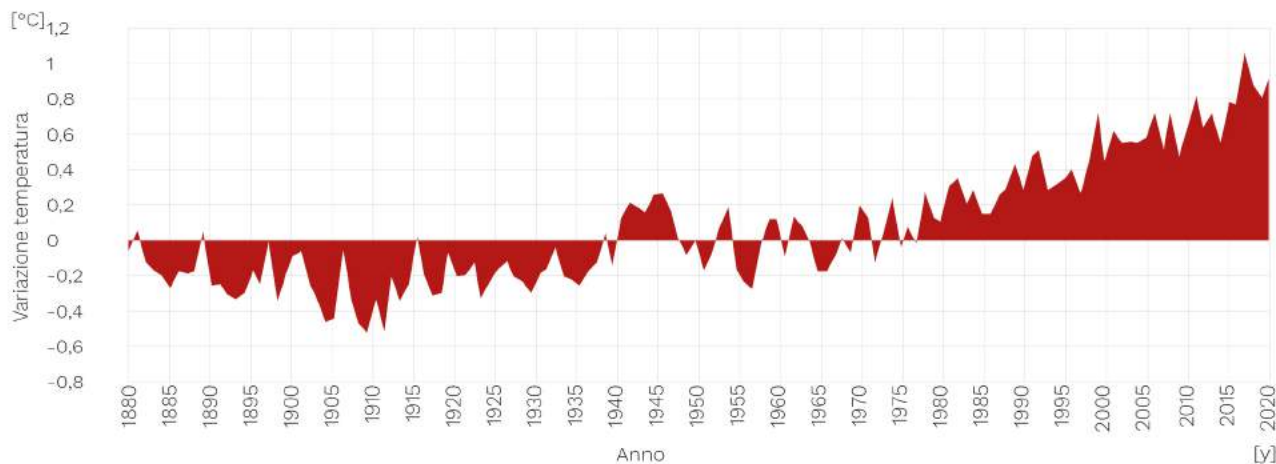


Fig.2 Anomalia nella temperatura media mondiale della terra e degli oceani
Fonte climate.gov

Nel 1972 due eventi pongono le basi per la questione ambientale: la pubblicazione rapporto del Club di Roma: *The Limits of Growth*^[10] che preannuncia l'esaurimento delle risorse ambientali non rinnovabili e la prima conferenza mondiale dell'ONU sull'ambiente, a Stoccolma, dove gli stati partecipanti riconoscono la necessità di creare politiche a scala internazionale per farvi fronte. L'*United Nations Environment Programme (UNEP)*^[11] venne formato a seguito di questa conferenza, rappresentando il primo organismo internazionale che si fa carico dell'impegno internazionale in materia dell'ambiente.

Questo organismo organizza la prima Conferenza internazionale sul clima che si tiene a Ginevra nel 1979 e l'istituzione dell'*Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC)*^[12] che raccoglie scienziati da tutto il mondo per indagare sul cambiamento climatico e le sue cause.

La prima e più importante risposta a livello internazionale si è avuta nel 1992 con la firma della *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*^[13], sottoscritta a conclusione della Conferenza Mondiale di Rio de Janeiro su Ambiente e Sviluppo. Questo accordo, tuttavia, non prevede misure concrete per combattere il cambiamento climatico. Il Protocollo di Kyoto^[14], entrato in vigore nel 2005,

differenzia l'industrializzazione dei paesi nel mondo, considerando che Stati Uniti e Cina sono responsabili di circa un terzo delle emissioni globali di gas serra. Il protocollo pone l'obiettivo di stabilizzare nel corso del XXI secolo la quantità di gas serra così da non compromettere il sistema climatico e permettere alla Terra di bilanciare i gas in atmosfera. Esso propone due strategie: *Mitigation* (limitazione) che punta ad intervenire sulle cause del cambiamento climatico andando a ridurre le emissioni in atmosfera; *Adaptation* (adattamento) che invece impronta politiche economiche, ambientali e sociali per rispondere al cambiamento climatico già in atto.

Alla conferenza sul clima di Parigi (COP21) del 2015, 195 paesi accettano il primo accordo globale sulle azioni per ridurre i cambiamenti climatici.

Gli obiettivi concordati dai governi sono^[15]:

- *Mantenere l'aumento medio della temperatura al di sotto dei 2°C*

Rispetto ai livelli pre-industriali, puntando all'obiettivo ideale di ridurre al di sotto del 1,5°C che riduce in misura significativa i rischi del cambiamento climatico

- *Portare sotto il limite massimo le emissioni globali*

Nel minor tempo possibile, riconoscendo ai paesi in via di sviluppo un tempo superiore

- *Applicare soluzioni innovative*
- Grazie alle nuove scoperte scientifiche

A livello Europeo , sono stati definiti degli step con l'obiettivo di raggiungere una diminuzione compresa tra l'80% ed il 95% delle emissioni di CO₂ entro il 2050^{[16][17]}.

Il pacchetto per il clima e l'energia 2020^[18] prevede:

- Riduzione del 20% delle emissioni di gas a effetto serra, rispetto ai livelli del 1990
- Ricavo 20% del fabbisogno energetico da fonti rinnovabili
- Miglioramento del 20% dell'efficienza energetica.

Il quadro per le politiche dell'energia e del clima 2030 questi obiettivi sono:

- Riduzione del 40% delle emissioni di gas a effetto serra, rispetto ai livelli del 1990
- Una quota almeno del 32% di energia rinnovabile
- Un miglioramento almeno del 32,5% dell'efficienza energetica

Le manovre attuate negli scorsi anni verso

la creazione di un economia decarbonizzata hanno portato grandi progressi, a tal punto che le quote di energia rinnovabile e di efficienza energetica sono state incrementate al 32% e 32,5% partendo da una quota iniziale del 27%^[19].

1.3 Il consumo di energia

L'U.S. Energy Information Administration's International Energy Outlook 2017 (IEO2017)^[20] somma i differenti fattori influenzanti la crescita della richiesta energetica e prevede che il consumo di energia crescerà del 28% tra il 2015 ed il 2040.

La fonte principale di questo incremento è dovuta ai paesi dove l'energia è richiesta per supportare un forte sviluppo economico, in particolare nei paesi che non appartengono all'OECD, i quali creano il 60% dell'aumento di energia globale.

Anche se l'energia richiesta sta aumentando, un fattore positivo risiede nella crescente sensibilizzazione verso l'impiego di risorse rinnovabili, le quali sono la risorsa con maggiore tasso di crescita^[20].

Comparando l'incremento nella richiesta di energia con le emissioni di CO₂ si ha un risultato positivo, in quanto le emissioni rimangono stabili negli anni dal 2014 al 2016 mentre l'energia è aumentata del 3.1%^[21].

La crescita meno pronunciata delle emis-

sioni rispetto ai consumi di energia è dovuta al cambiamento della miscela di risorse fossili impiegate. Tra esse il carbone è quello che genera maggiori quantità di CO₂ e viene ridotto dal 28% al 22%. **Fig.3.-Fig.4.**

Analizzando i consumi di energia da un punto di vista settoriale ci sono tre categorie principali: trasporto, residenziale e industria che, secondo le analisi dell'UE-28, ricoprono rispettivamente il 33,1 %, il 25,4 % ed il 25,3% dei consumi di energia europei. **Fig.5**^[22].

In aggiunta queste analisi monitorano le oscillazioni nei consumi di energia nel periodo dal 2007 al 2015. I dati raccolti rivelano che il consumo finale di energia dell'UE-28 per l'industria è sceso complessivamente del 15,5%. La diminuzione generale del consumo di energia per l'agricoltura è del 7,9%, mentre i tassi di variazione del consumo di energia per i trasporti e per il residenziale risultano leggermente meno rilevanti con un valore rispettivamente di 6,5% e 3,9%. L'unico valore in crescita è quello dei servizi che vede il suo consumo finale di energia aumentato del 4,7%^[22].

La crescita del patrimonio edilizio si attesta intorno all'1% annuo nel settore residenziale. Questa crescita è decisamente bassa principalmente per la crisi finanziaria che

sta attraversando il settore edilizio.

L'impiego predominante degli utilizzi di energia nel residenziale è dovuto al riscaldamento e alla produzione di acqua calda sanitaria che è responsabile del 78,9%^[23].

E' da sottolineare che negli ultimi anni il consumo di energia elettrica è aumentato rispetto al passato anche per le nuove apparecchiature utilizzate negli edifici e dai sistemi di aria condizionata.

Dai dati riportati precedentemente è evidente quanto il settore edilizio sia importante nella definizione dei consumi energetici e nella loro effettiva riduzione. Tuttavia, a differenza degli altri settori, sono richiesti grandi investimenti sia economici che di tempo per sostituire gli edifici esistenti con quelli nuovi, il che rende molto difficile, se non impossibile, il raggiungimento degli obiettivi europei di risparmio energetico basandosi solo su azioni incentrate su nuove costruzioni. Per questo, le politiche energetiche hanno ampliato il loro focus incorporando gli investimenti nella riqualificazione degli edifici come una delle loro principali strategie.

Attraverso la ristrutturazione i consumi energetici e le emissioni di CO₂ possono essere ridotte di circa il 5%. Infatti, almeno il 75% delle costruzioni esistenti sono obsolete dal punto di vista energetico ed il

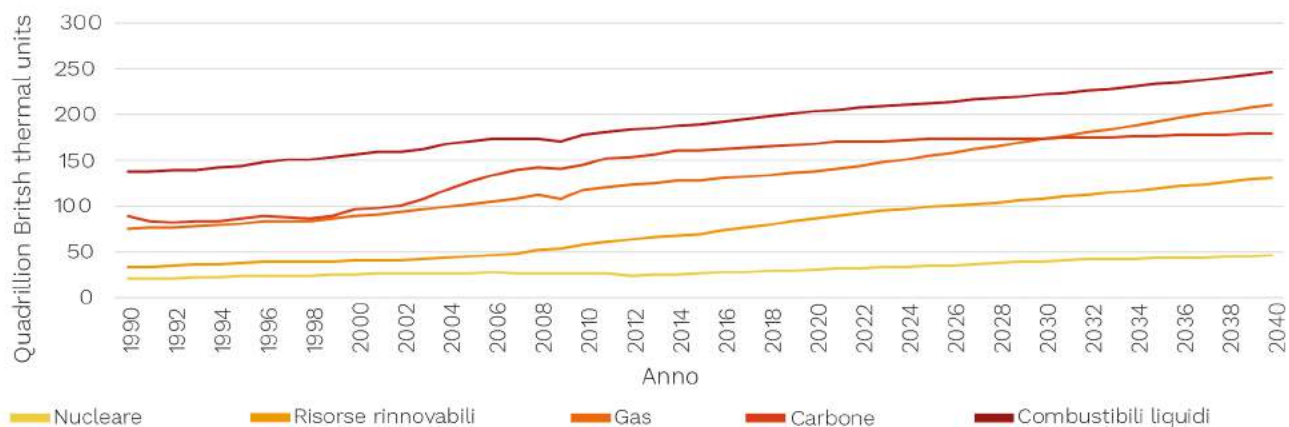


Fig.3 Proiezione dei consumi energetici

Fonte: EIA

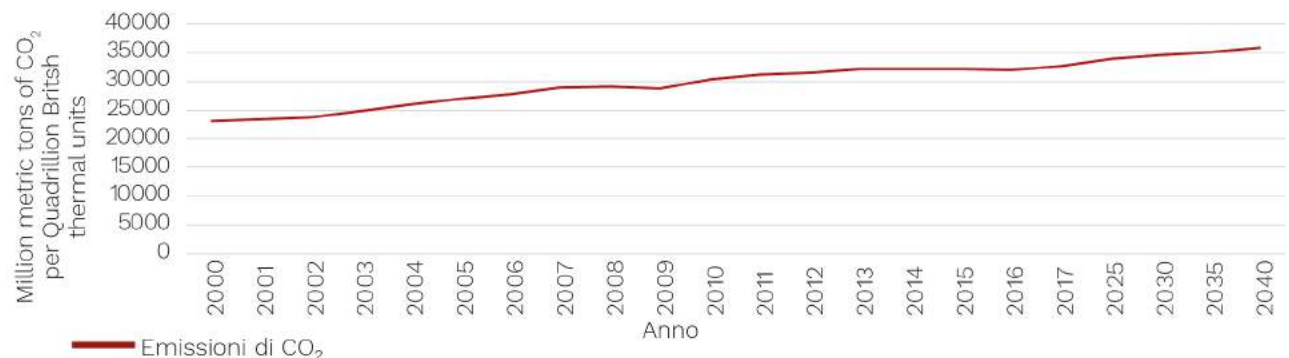


Fig.4 Proiezione delle emissioni di CO₂

Fonte: IEA

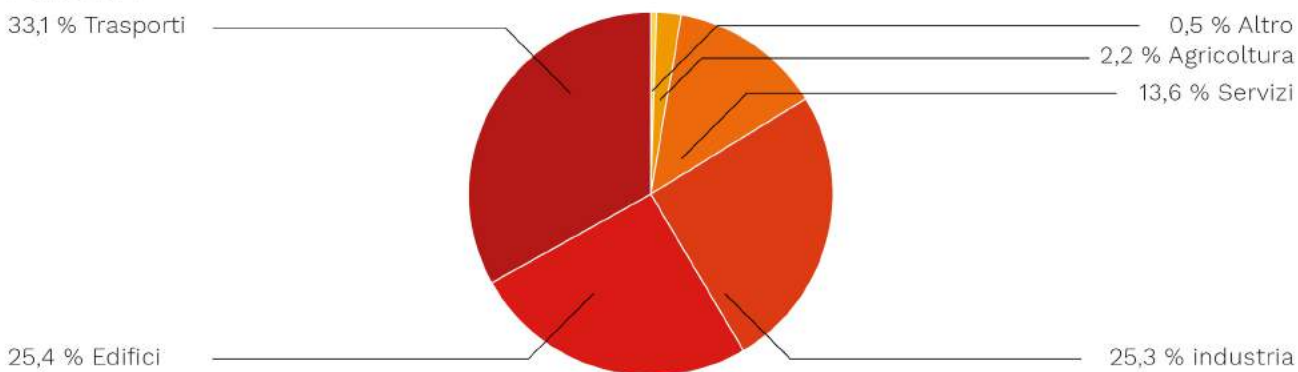


Fig.5 Consumi energetici divisi per settore

Fonte: Eurostat

rateo di nuove costruzioni varia tra lo 0,4% e l'1,2%^[24].

In aggiunta al miglioramento dal punto di vista energetico la ristrutturazione degli edifici permette di creare benefici economici, sociali e ambientali oltre a contribuire a migliorare il comfort e alla riduzione di problemi respiratori e altre malattie causate da uno scarso microclima interno.

1.4 Il quadro legislativo

Come anticipato, il settore dell'edilizia è uno dei principali consumatori di energia in tutto il mondo, rappresenta circa il 25% del consumo totale di energia primaria in Europa. La riduzione del consumo di energia e l'uso di fonti rinnovabili costituiscono misure importanti, necessarie per ridurre la dipendenza energetica dell'UE.

L'Unione Europea si è pertanto impegnata a promuovere uno sviluppo energetico sostenibile, sicuro e decarbonizzato, fissando ambiziosi impegni per ridurre ulteriormente le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 40 % entro il 2030 rispetto al 1990 e per aumentare la quota di consumo di energia da fonti rinnovabili di almeno il 27%^[25].

Per raggiungere tali obiettivi, viene presentata la direttiva europea: *Energy Performance of Buildings Directive (EPBD Recast)*

2010/31/UE^[26] sulle prestazioni energetiche degli edifici per promuoverne il miglioramento all'interno dell'Unione Europea e viene introdotto un nuovo standard per la costruzione, l'edificio a energia quasi zero (nZEB). La direttiva è stata creata con l'obiettivo di regolare il consumo di energia all'interno del settore edilizio e richiede che gli stati membri migliorino i loro regolamenti per raggiungere i nuovi standard. L'articolo 2: *Definizioni*, definisce un edificio a energia quasi zero in tal modo:

“Edificio a energia quasi zero: edificio ad altissima prestazione energetica, determinata conformemente all'allegato I. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze”^[26].

Grazie alla definizione proposta, viene differenziato dagli edifici ad altissima prestazione energetica, come ad esempio la Passive House in quanto, oltre ad avere un basso fabbisogno, si richiede che esso venga soddisfatto da una percentuale significativa di risorse rinnovabili prodotte in loco o in zone limitrofe, così da concorrere nella diminuzione delle emissioni di CO₂.

Per valutare un edificio nZEB il parametro

da tenere in considerazione è la differenza tra energia primaria richiesta e energia primaria prodotta, il cui valore deve essere prossimo allo zero. Nel caso la differenza sia zero o negativa, significa che l'energia prodotta eguaglia o supera quella utilizzata, classificando l'edificio come Net Zero Energy Building (NZEB).

Tramite l'articolo 5: *Calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica*, si definiscono i due obiettivi principali dello standard nZEB: i requisiti minimi della prestazione energetica e l'ottimizzazione dei costi della sua attuazione.

Costo ottimale significa che il livello di prestazione energetica deve comportare il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato, laddove il costo più basso è determinato tenendo conto dei costi di investimento legati all'energia, dei costi di manutenzione e operativi ed eventuali costi di smaltimento.

L'articolo 9 dell'EPBD ha definito il 31 Di-

cembre 2018 come limite per il quale tutti i nuovi edifici occupati o posseduti da enti pubblici siano nZEB ed il 31 dicembre 2020 come limite per il quale ogni nuova costruzione dovrà essere nZEB. **Fig.6.** Inoltre spetta agli stati membri elaborare linee guida nazionali per aumentare il numero di progetti nZEB, sviluppare politiche e fissare obiettivi al fine di promuovere il rinnovamento degli edifici con prestazioni inferiori e dettagliare la definizione di nZEB così da tenere in considerazione i parametri della singola nazione o regione includendo un indicatore numerico del consumo di energia primaria espresso in kWh/m² all'anno. Il punto (9) dell'EPBD definisce che:

“La prestazione energetica degli edifici dovrebbe essere calcolata in base ad una metodologia, che potrebbe essere differenziata a livello nazionale e regionale. Ciò comprende, oltre alle caratteristiche termiche, altri fattori che svolgono un ruolo di crescente importanza, come il tipo di im-



Fig.6 Linea temporale dell'EPBD
Fonte: EPBD recast 2010/31/UE

pianto di riscaldamento e condizionamento, l'impiego di energia da fonti rinnovabili, gli elementi passivi di riscaldamento e rinfrescamento, i sistemi di ombreggiamento, la qualità dell'aria interna, un'adeguata illuminazione naturale e le caratteristiche architettoniche dell'edificio. Tale metodologia di calcolo dovrebbe tener conto della prestazione energetica annuale di un edificio e non essere basata unicamente sul periodo in cui il riscaldamento è necessario. Essa dovrebbe tener conto delle norme europee vigenti."^[26].

È interessante notare che la direttiva fornisce solo una definizione qualitativa sugli nZEB, al fine di garantirne la flessibilità e non un approccio uniforme.

Infatti, in base al contesto ambientale e climatico è necessario ricercare soluzioni passive che minimizzino la domanda energetica e quindi la necessità di intervento degli impianti meccanici.

Questa libertà di interpretazione crea una classificazione diversa tra gli stati membri. Come descritto da Delia D'Agostino e Livio Mazzearella^[27] le diversità esistono nei riguardi della tipologia di edificio, ossia se di nuova costruzione o ristrutturazione, se privato o pubblico e del metodo di calcolo per la definizione dello standard, periodo di bilancio e parametro di controllo. **Fig.7.**

Attualmente, l'attenzione rivolta alla qualità dell'ambiente interno (IEQ), sta aumentando. Tenendo in considerazione che le persone spendono circa il 90% del tempo all'interno di un ambiente chiuso è importante assicurare che esso sia salutare e confortevole^[28].

La EPBD 2018/844^[29] può creare ottime opportunità per affrontare il tema dell'IEQ. Infatti essa menziona come la salute, la qualità dell'aria e il comfort debbano essere ottimizzati.

La qualità dell'aria viene trattata nel punto 13 dell'EPBD, dove viene analizzata in funzione dell'involucro edilizio, il quale deve avere un "*isolamento completo ed omogeneo*" così da evitare che le infiltrazioni riducano le temperatura superficiali al di sotto della temperatura di rugiada creando così fenomeni di condensa.

Punto 13 EBPD:

"Le linee guida dell'Organizzazione mondiale della sanità del 2009 stabiliscono che, per quanto concerne la qualità dell'aria interna, edifici più efficienti offrono maggiore comfort e benessere agli occupanti e migliorano la salute. I ponti termici, l'inadeguatezza dell'isolamento e le infiltrazioni d'aria possono generare temperature superficiali al di sotto della temperatura di

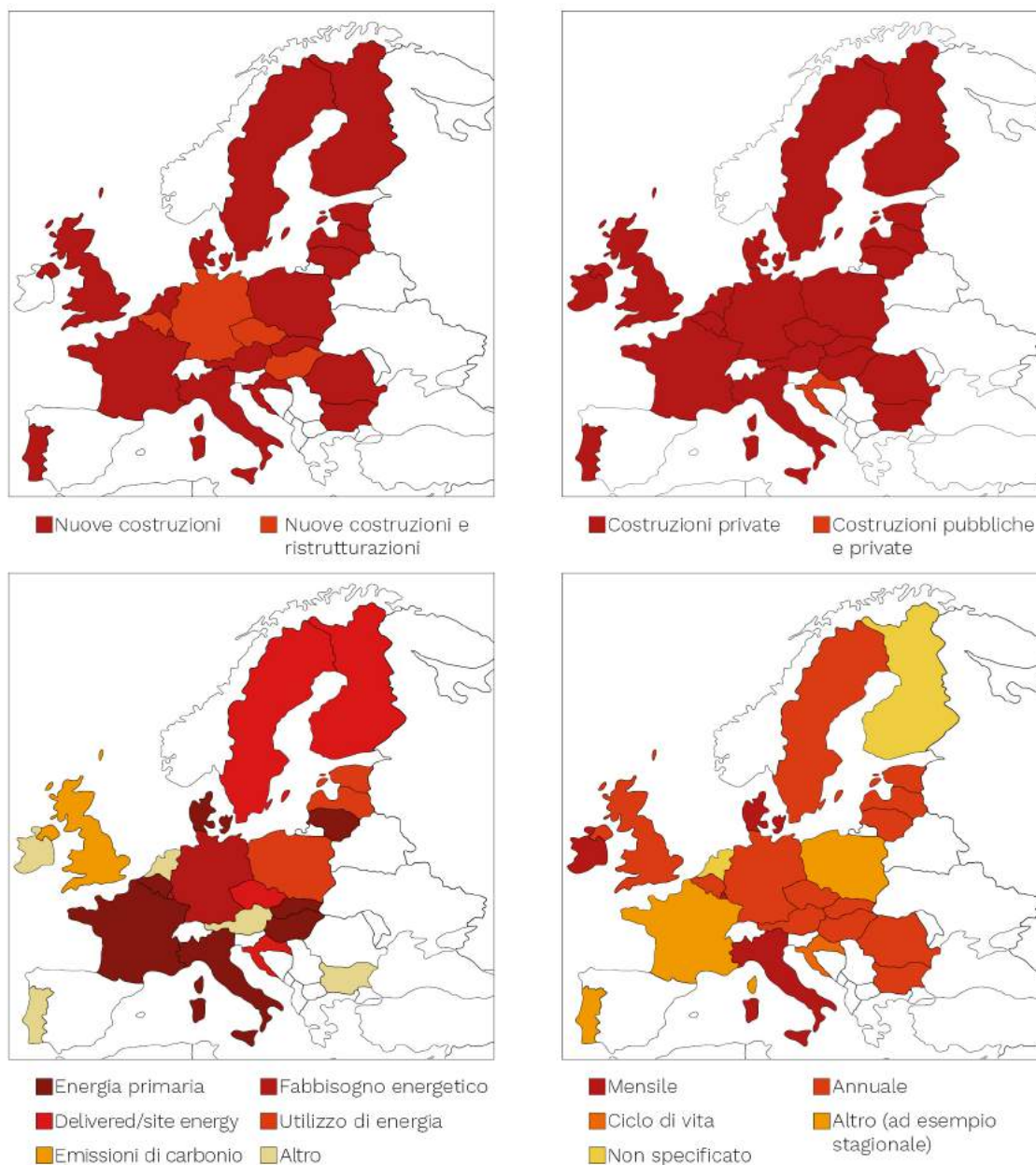


Fig.7 Differenze nell'applicazione dell'EPBD nei vari stati membri
 Rielaborato da Delia D'Agostino e Livio Mazzarella, (2019), "What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions"

rugia da dell'aria, oltre che umidità. È fondamentale pertanto garantire un isolamento completo e omogeneo dell'edificio, compresi i balconi, le finestre, i tetti, i muri, le porte e i pavimenti, ed è opportuno prestare particolare attenzione a evitare che la temperatura di una qualsiasi superficie interna dell'edificio scenda al di sotto della temperatura di rugiada.^[29]

Il punto 15, invece, tratta il comfort termico e visivo. All'interno di questo punto viene sottolineata l'importanza di migliorare l'efficienza di tutto l'edificio e non solo dell'involucro edilizio, specialmente gli elementi passivi che limitano il fabbisogno ambientale dell'edificio migliorando il comfort interno.

Punto 15 EPBD:

"È importante garantire che le misure tese a migliorare la prestazione energetica nell'edilizia non si limitino all'involucro dell'edificio, ma includano tutti gli elementi pertinenti e i sistemi tecnici di un edificio, come gli elementi passivi che contribuiscono alle tecniche passive volte a ridurre il fabbisogno energetico per il riscaldamento o il rinfrescamento, il consumo energetico per l'illuminazione e la ventilazione, migliorando in tal modo il comfort termico e visivo.^[29]

Come per la direttiva del 2010, anche in quella del 2018 vengono fissati gli obiettivi senza dare una specifica metodologia per affrontarli, lasciando agli stati membri la delibera di normative entro Marzo del 2020. Le strategie degli stati membri devono riconoscere comfort, salute e produttività come perni cardine per le nuove costruzioni e ristrutturazioni, includendo politiche che assicurino adeguati livelli di luce naturale, comfort termico e acustico e IAQ^[30]. **Fig.8.** Il focus della direttiva si sposta quindi da un punto di vista puramente energetico ad un altro che assegna il ruolo principale all'occupante e alle sue aspettative nei riguardi della qualità dell'ambiente interno.

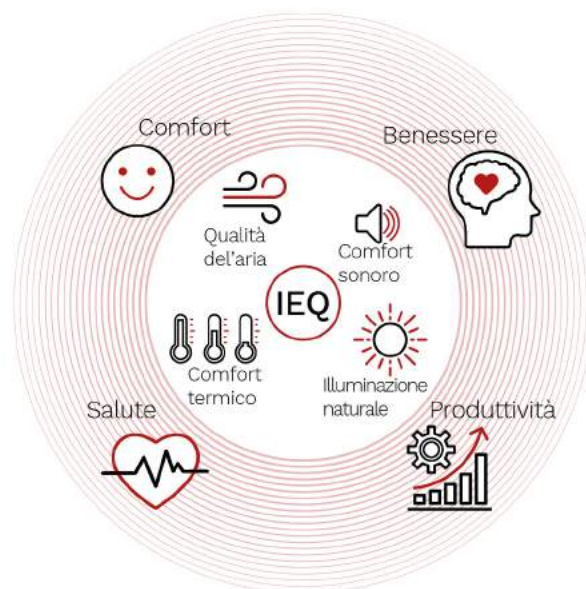


Fig.8 Parametri dell'IEQ
Fonte: BPIE

2.L'EDIFICIO NZEB



2.1 Concetto NZEB

L'obiettivo nella progettazione di un edificio NZEB è ottenere un'alta prestazione energetica, un adeguato comfort e qualità dell'aria in funzione dei costi di investimento e del ritorno economico. Questo implica l'interazione tra le scelte architettoniche ed energetiche per raggiungere gli standard minimi senza ostacolare la composizione. La fase iniziale della progettazione deve essere basata sull'analisi costi benefici ossia ottenere una notevole efficienza energetica nel rispetto dei costi durante il ciclo di vita dell'edificio e dei benefici ricavati da ogni intervento. Spesso infatti eccedere

nell'implementazione di soluzioni per aumentare il risparmio energetico comporta eccessivi costi di investimento che non sempre vengono tradotti in un incremento di prestazioni significativo.

La scelta delle tecnologie per ridurre i consumi è fondamentale: in un primo step bisogna ridurre direttamente il fabbisogno energetico attraverso la progettazione e l'involucro e poi agire sui consumi utilizzando un impianto efficiente.

Infine l'energia richiesta dopo l'efficientamento dell'edificio e dell'impiantistica deve essere generata da energie rinnovabili. **Fig.9^[27]**. In aggiunta è da tenere in considerazione che i parametri che descrivono gli



Fig.9 Concetto su cui si fonda l'edificio nZEB

Rielaborato da Delia D'Agostino e Livio Mazzarella, (2019), "What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions"

standard NZEB sono strettamente connessi tra loro. Come descritto in **Fig.10**, l'energia è legata al comfort termico attraverso il raffrescamento/riscaldamento e umidificazione/deumidificazione, alla qualità dell'aria attraverso la ventilazione, al comfort visivo attraverso l'utilizzo delle schermature ed infine al comfort acustico attraverso l'a-

pertura delle finestre per la ventilazione naturale.

Questo evidenzia che le decisioni progettuali dovranno essere prese con la cognizione di bilanciare i fattori positivi e negativi delle 5 categorie. Al contrario, nel caso si analizzasse ogni parametro singolarmente si rischierebbe di compromettere gli altri.

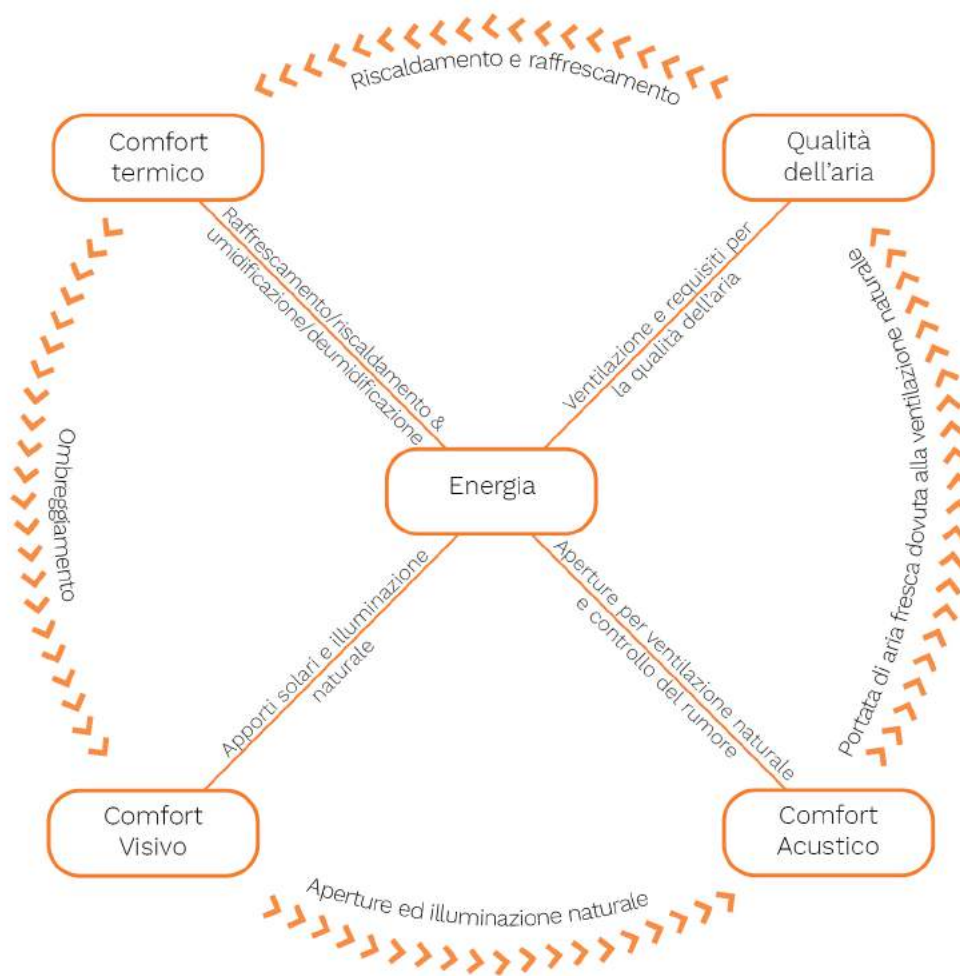


Fig.10 Correlazione tra energia, comfort e qualità dell'aria

2.2 Efficienza energetica

Aspetti quali la forma, l'orientamento e le strutture dell'edificio sono fondamentali per sfruttare al massimo fattori quali l'irraggiamento, i venti, le temperature e l'ombreggiamento.

In inverno l'assorbimento di calore deve essere massimizzato attraverso un buon livello di isolamento termico, mentre in estate deve essere limitato dalle schermature ed è importante garantire un buon livello di ventilazione e di illuminazione.

Dunque integrare la componente energetica fin dalle prime fasi della progettazione è necessario per ottenere un risultato che rispetti gli standard NZEB.

Come citato in precedenza, si può agire direttamente sui fabbisogni energetici attraverso la progettazione e l'involucro oppure sui consumi energetici attraverso l'impianto. **Fig.11.**

2.2.1 Progettazione e involucro

La progettazione e un involucro efficiente sono i primi passi nella creazione di un edificio NZEB. Essi possono ridurre in maniera considerevole i fabbisogni energetici, così da poter sopperire alle richieste energetiche residue attraverso l'uso di fonti rinnovabili.

La progettazione deve essere capace di canalizzare le risorse naturali disponibili del

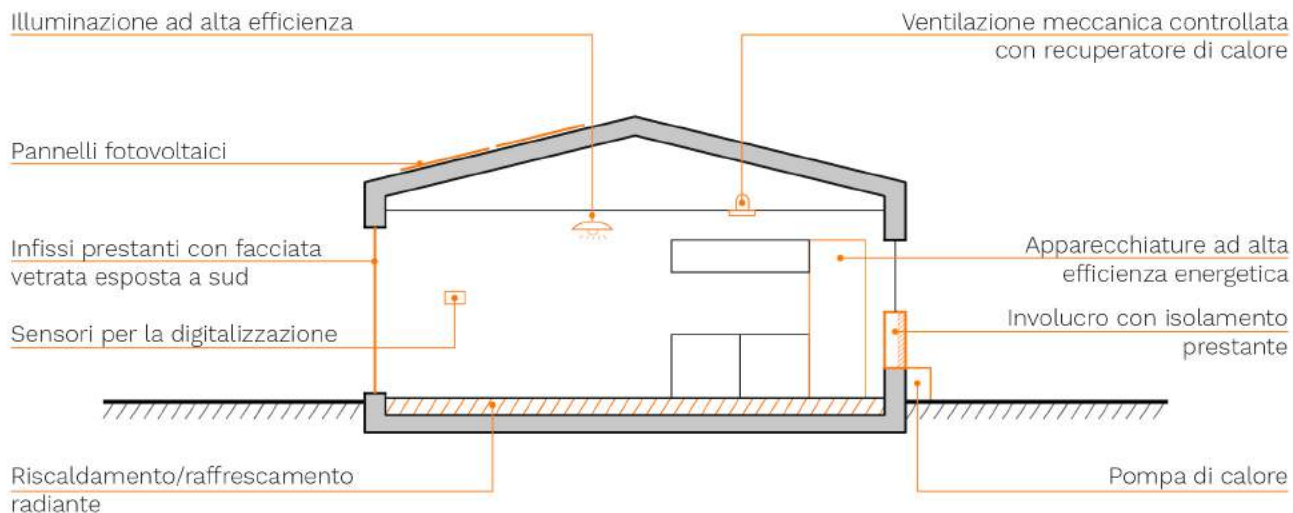


Fig.11 Schema concettuale degli elementi caratterizzanti di un edificio NZEB

sito per garantire il comfort termico. Questi approcci specifici possono essere legati al sole, al vento, alla luce ed a considerazioni sul microclima interno ed esterno. L'utilizzo di queste risorse deve essere un punto centrale nella progettazione degli edifici NZEB, volta al raggiungimento del comfort termico utilizzando al minimo l'impianto. Ciò significa ridurre il fabbisogno di raffrescamento durante l'estate e di riscaldamento in inverno attraverso l'orientamento, l'ombreggiatura esterna, le prestazioni e la disposizione dell'involucro trasparente e la ventilazione naturale.

L'involucro edilizio ha un ruolo fondamentale per il raggiungimento degli standard NZEB e rappresenta l'elemento più importante. Esso non è più concepito come un semplice elemento di separazione tra interno ed esterno ma come un filtro in grado di controllare gli effetti delle variazioni delle condizioni ambientali esterne al fine di mantenere le condizioni di comfort interno con il minor consumo possibile di energia.

La forma determina il volume di spazio all'interno di un edificio che deve essere riscaldato o raffrescato. Di conseguenza, le dispersioni di energia saranno minori all'aumentare della compattezza. Inoltre,

grazie all'implementazione di materiali con basse trasmittanze ed un'attenzione verso i nodi tecnologici, per eliminare o quantomeno attenuare l'influenza dei ponti termici, viene ridotta in maniera significativa la dispersione di calore verso l'esterno.

L'involucro trasparente è ugualmente importante: la radiazione solare che lo attraversa può portare ad un rilevante guadagno di calore in quanto il vetro confina il calore all'interno dello spazio. Di conseguenza, la temperatura risultante all'interno dell'edificio potrebbe essere anche maggiore della temperatura esterna se i sistemi di fenestrazione non sono progettati accuratamente.

Attualmente, i serramenti moderni sono a tenuta stagna e di conseguenza aiutano a ridurre le dispersioni. I controlli ambientali, come i dispositivi di ombreggiamento esterni, sono essenziali poiché riducono notevolmente i fabbisogni per mantenere il comfort termico all'interno degli edifici, controllando il guadagno di calore.

La massimizzazione della luce naturale è altrettanto importante. La presenza di luce naturale in uno spazio occupato comporta sia un senso di benessere che una diminuzione di utilizzo della luce artificiale. La dimensione ed il posizionamento adeguato di finestre, lucernari ed altre aperture

sito per garantire il comfort termico. Questi approcci specifici possono essere legati al sole, al vento, alla luce ed a considerazioni sul microclima interno ed esterno. L'utilizzo di queste risorse deve essere un punto centrale nella progettazione degli edifici NZEB, volta al raggiungimento del comfort termico utilizzando al minimo l'impianto. Ciò significa ridurre il fabbisogno di raffrescamento durante l'estate e di riscaldamento in inverno attraverso l'orientamento, l'ombreggiatura esterna, le prestazioni e la disposizione dell'involucro trasparente e la ventilazione naturale.

L'involucro edilizio ha un ruolo fondamentale per il raggiungimento degli standard NZEB e rappresenta l'elemento più importante. Esso non è più concepito come un semplice elemento di separazione tra interno ed esterno ma come un filtro in grado di controllare gli effetti delle variazioni delle condizioni ambientali esterne al fine di mantenere le condizioni di comfort interno con il minor consumo possibile di energia.

La forma determina il volume di spazio all'interno di un edificio che deve essere riscaldato o raffrescato. Di conseguenza, le dispersioni di energia saranno minori all'aumentare della compattezza. Inoltre,

grazie all'implementazione di materiali con basse trasmittanze ed un'attenzione verso i nodi tecnologici, per eliminare o quantomeno attenuare l'influenza dei ponti termici, viene ridotta in maniera significativa la dispersione di calore verso l'esterno.

L'involucro trasparente è ugualmente importante: la radiazione solare che lo attraversa può portare ad un rilevante guadagno di calore in quanto il vetro confina il calore all'interno dello spazio. Di conseguenza, la temperatura risultante all'interno dell'edificio potrebbe essere anche maggiore della temperatura esterna se i sistemi di fenestrazione non sono progettati accuratamente.

Attualmente, i serramenti moderni sono a tenuta stagna e di conseguenza aiutano a ridurre le dispersioni. I controlli ambientali, come i dispositivi di ombreggiamento esterni, sono essenziali poiché riducono notevolmente i fabbisogni per mantenere il comfort termico all'interno degli edifici, controllando il guadagno di calore.

La massimizzazione della luce naturale è altrettanto importante. La presenza di luce naturale in uno spazio occupato comporta sia un senso di benessere che una diminuzione di utilizzo della luce artificiale. La dimensione ed il posizionamento adeguato di finestre, lucernari ed altre aperture

nell'edificio forniscono i mezzi per sfruttare la luce del giorno. Bilanciare le aperture in funzione di illuminazione naturale e apporti solari è importante poiché all'aumentare dell'illuminazione naturale aumenterà il calore da trattare. Infatti l'integrazione della luce naturale con l'illuminazione artificiale può ridurre in modo considerevole il consumo di energia, ma allo stesso tempo può aumentare i carichi di raffrescamento a causa del guadagno di calore.

L'aria fresca in un edificio porta benefici sia per la salute che per il comfort dei suoi occupanti. La ventilazione naturale è considerata una soluzione efficiente e salutare in quanto riduce i consumi energetici dovuti alla ventilazione meccanica.

Per l'obiettivo di design NZEB, le misure di design passivo possono essere usate con giudizio per influenzare il movimento dell'aria esterna in uno spazio costruito. Questi interventi possono ridurre e, in alcuni casi in determinate condizioni climatiche, eliminare pienamente la dipendenza della ventilazione meccanica. Diversi aspetti dall'orientamento alla forma, dalle aperture nell'involucro edilizio alla pianificazione dello spazio interno sono da tenere in considerazione in fase progettuale per poter utilizzare la ventilazione naturale come sistema principale per l'edificio.

Tuttavia, nell'implementazione delle soluzioni passive bisogna tenere in considerazione l'influenza dei fattori esterni per evitare fenomeni involontari che andrebbero a ridurre, se non ad annullare, i guadagni energetici ed il comfort degli occupanti.

Ad esempio, l'involucro ermetico riduce il passaggio di calore tra l'interno e l'esterno e aiuta a mantenere una temperatura interna confortevole. Fornisce un ambiente più salubre, aggiunge il controllo del suono e aiuta a mantenere lo spazio interno più fresco nei mesi estivi e al caldo durante gli inverni. Però, in particolare quando combinato ad apporti solari non controllati e ad una ventilazione insufficiente, potrebbe causare l'effetto di overheating.

Questo fenomeno consiste nell'accumulo di calore in eccesso all'interno dell'ambiente che non riesce ad essere dissipato tramite le infiltrazioni come succede negli edifici a prestazione energetica inferiore. Esso può essere mitigato dall'implementazione di un sistema di ombreggiamento che permetta di assorbire la massima quantità di apporti solari nel periodo invernale e di ridurli durante il periodo estivo in combinazione ad un'adeguata ventilazione, sia essa meccanica o naturale, per permettere al calore in eccesso di disperdersi all'esterno.

Un altro fattore negativo che può verificarsi è la condensa. Questa è dovuta al disac-

nell'edificio forniscono i mezzi per sfruttare la luce del giorno. Bilanciare le aperture in funzione di illuminazione naturale e apporti solari è importante poiché all'aumentare dell'illuminazione naturale aumenterà il calore da trattare. Infatti l'integrazione della luce naturale con l'illuminazione artificiale può ridurre in modo considerevole il consumo di energia, ma allo stesso tempo può aumentare i carichi di raffrescamento a causa del guadagno di calore.

L'aria fresca in un edificio porta benefici sia per la salute che per il comfort dei suoi occupanti. La ventilazione naturale è considerata una soluzione efficiente e salutare in quanto riduce i consumi energetici dovuti alla ventilazione meccanica.

Per l'obiettivo di design NZEB, le misure di design passivo possono essere usate con giudizio per influenzare il movimento dell'aria esterna in uno spazio costruito. Questi interventi possono ridurre e, in alcuni casi in determinate condizioni climatiche, eliminare pienamente la dipendenza della ventilazione meccanica. Diversi aspetti dall'orientamento alla forma, dalle aperture nell'involucro edilizio alla pianificazione dello spazio interno sono da tenere in considerazione in fase progettuale per poter utilizzare la ventilazione naturale come sistema principale per l'edificio.

Tuttavia, nell'implementazione delle soluzioni passive bisogna tenere in considerazione l'influenza dei fattori esterni per evitare fenomeni involontari che andrebbero a ridurre, se non ad annullare, i guadagni energetici ed il comfort degli occupanti.

Ad esempio, l'involucro ermetico riduce il passaggio di calore tra l'interno e l'esterno e aiuta a mantenere una temperatura interna confortevole. Fornisce un ambiente più salubre, aggiunge il controllo del suono e aiuta a mantenere lo spazio interno più fresco nei mesi estivi e al caldo durante gli inverni. Però, in particolare quando combinato ad apporti solari non controllati e ad una ventilazione insufficiente, potrebbe causare l'effetto di overheating.

Questo fenomeno consiste nell'accumulo di calore in eccesso all'interno dell'ambiente che non riesce ad essere dissipato tramite le infiltrazioni come succede negli edifici a prestazione energetica inferiore. Esso può essere mitigato dall'implementazione di un sistema di ombreggiamento che permetta di assorbire la massima quantità di apporti solari nel periodo invernale e di ridurli durante il periodo estivo in combinazione ad un'adeguata ventilazione, sia essa meccanica o naturale, per permettere al calore in eccesso di disperdersi all'esterno.

Un altro fattore negativo che può verificarsi è la condensa. Questa è dovuta al disac-

coppiamento termico tra interno ed esterno creato dall'ermeticità dell'involucro. La ventilazione riesce a controllare l'umidità e a impedire il verificarsi di questo fenomeno.

Tuttavia, per quanto la progettazione e l'involucro migliorino sia le prestazioni energetiche che le condizioni di comfort, l'edificio dovrà essere supportato da un impianto efficiente per garantirle durante l'intero anno.

2.2.2 Impianto

Tenere conto delle richieste funzionali rispetto alla richiesta di energia è necessario per scegliere tra l'ampia gamma di soluzioni moderne oggi disponibili. Infatti, un impianto efficiente è capace di ridurre in modo significativo i consumi energetici.

Quando si parla di efficienza dell'impianto ci si riferisce principalmente ad i rendimenti non solo della macchina ma di tutti i suoi componenti. Infatti non basta scegliere un generatore ad alta efficienza, come può esserlo la pompa di calore, ma anche i sistemi di regolazione, di distribuzione e dei terminali devono essere prestanti.

I sistemi radianti hanno un'elevata resa e bassi costi di manutenzione se comparati ad altri terminali, quali ad esempio i radiatori. Essi garantiscono un riscaldamento o un raffrescamento esteso sull'intera super-

ficie così da avere una distribuzione di calore uniforme nell'ambiente.

Inoltre la temperatura dell'acqua passante per le tubazioni sarà compresa tra i 25°C ed i 35°C contro i 60°C - 70°C necessari per i radiatori con la diretta conseguenza di una richiesta di energia inferiore.

Il generatore più utilizzato negli edifici nZEB è la pompa di calore, principalmente per il suo alto coefficiente di prestazioni (COP) che indica il rapporto tra l'assorbimento elettrico della macchina ed il calore fornito dall'impianto.

Il principio di funzionamento della pompa di calore è l'inverso di quello delle macchine frigorifere. Il calore viene estratto da una fonte naturale sia essa aria acqua o terra e viene trasferito dentro l'edificio a temperatura idonea.

Esistono diverse tipologie di pompa di calore:

- *Pompe di calore che sfruttano il calore dell'aria*

L'aria possiede sempre energia termica se superiore alla temperatura di zero assoluto. La pompa di calore ad aria sfrutta questa energia per riscaldare o raffrescare l'ambiente.

- *Pompe di calore che sfruttano il calore del terreno*

A differenza dell'aria, il terreno ha temperature relativamente alte e costanti anche durante l'inverno. Il funzionamento consiste nell'inserimento di sonde nel terreno che permettono di assorbire il calore, il quale sarà maggiore all'aumentare della profondità raggiunta dalle sonde.

- *Pompe di calore che sfruttano il calore dell'acqua*

Per sfruttare questo tipo di pompa di calore bisogna utilizzare un pozzo o un bacino per raccogliere e far defluire l'acqua così da sfruttarne l'energia. Bisogna oltretutto verificare la composizione dell'acqua che influisce in modo determinante sul funzionamento della pompa di calore.

Infine è spesso adottata la ventilazione meccanica controllata con sistema di recuperatore di calore. Questo sistema permette di controllare la temperatura, l'umidità e la qualità dell'aria. Il recuperatore di calore, o scambiatore termico, permette di raffreddare o riscaldare l'aria in ingresso sfruttando lo scambio di calore con l'aria viziata che viene estratta. Questo permette di mantenere la temperatura dell'aria immessa prossima a quella di set-point anche se la temperatura esterna è più bassa o più alta.

2.2.3 Risorse rinnovabili

Una volta che l'involucro e l'impianto sono perfezionati e i fabbisogni ed i consumi energetici sono ridotti al minimo, la parte rimanente di energia richiesta deve essere fornita principalmente da energie rinnovabili.

Oltre a produrre energia a costo zero, una volta coperto il costo di investimento, esse non producono inquinanti o anidride carbonica e quindi hanno un impatto minimo nei riguardi dell'ambiente.

Esistono diversi tipi di fonte di energia rinnovabile applicabili alla scala di edificio.

Le fonti di energia più utilizzate dagli edifici NZEB sono:

- *Energia geotermica*

Consiste nello sfruttare il calore del terreno, il quale presenta una temperatura costante relativamente alta anche durante l'inverno. Attraverso l'impiego delle pompe di calore si può sfruttare l'energia del terreno sia per riscaldare che per raffreddare l'ambiente. A differenza di altre risorse rinnovabili, l'energia geotermica è sfruttabile su gran parte del territorio poiché non influenzata così fortemente dal clima come le altre tecnologie.

- *Energia solare*

L'energia irradiata dal sole può essere sfruttata tramite i pannelli solari termici e i pannelli solari fotovoltaici, i primi utilizzano l'energia irradiata per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria, mentre i secondi la trasformano in energia elettrica che potrà essere sfruttata per gli elettrodomestici. L'energia solare è la più utilizzata poiché è la più sicura tra quelle rinnovabili grazie alla flessibilità nelle condizioni di funzionamento dei pannelli solari e fotovoltaici. Sebbene, essi varino le loro prestazioni in base a orientamento e inclinazione riescono a produrre un quantitativo di energia sufficiente nella maggior parte dei climi. Inoltre, se comparati con l'energia geotermica, il costo e la semplicità di installazione sono notevoli.

2.3 Comfort

L'ambiente interno è definito dall'involucro dell'edificio, che ha la funzione di separare l'ambiente interno da quello esterno per creare l'habitat per l'uomo. L'ambiente è percepito su due livelli distinti: il primo è dipendente dalla cultura e dalla società mentre il secondo è basato sulla fisiologia e psicologia del singolo individuo. La componente culturale è complessa da tenere in considerazione poiché connessa

alla storia e all'ambiente sociale in cui si trova l'individuo il quale determina il proprio stato di comfort basandosi sulle sue aspettative.

Viceversa, la componente fisiologica e la relativa risposta verso gli impulsi generati dall'ambiente è decisamente più semplice da prevedere.

Il corpo umano scambia costantemente calore con l'ambiente circostante, il calore viene prodotto dal corpo attraverso il metabolismo e viene disperso nell'ambiente tramite conduzione, convezione e irraggiamento.

La temperatura interna del corpo umano è di circa 37°C e gli scambi termici sono necessari per mantenere questo valore.

La definizione del comfort è definita nella norma UNI EN ISO 7730^[31]:

“La condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico”^[31]

Ossia gli occupanti sono in una condizione di comfort quando non percepiscono né caldo né freddo.

Il comfort è un parametro molto importante per gli edifici nZEB in quanto essi sono efficienti unicamente quando l'occupan-

te si trova in una situazione di benessere. In caso contrario, gli occupanti agiranno per ritrovare la condizione di comfort, ad esempio aprendo le finestre per cambiare l'aria anche se le condizioni esterne sono sfavorevoli, il che si traduce il più delle volte in consumi energetici maggiori.

Il loro comportamento non è strettamente legato alle caratteristiche del sistema e dell'impianto ma anche al loro grado di informazione nei riguardi del corretto funzionamento delle apparecchiature dell'edificio ed alle proprie aspettative.

Per questo il comfort non è semplice da prevedere: esistono tuttavia dei fattori chiave che influenzano, seppur diversamente da individuo ad individuo, le condizioni di comfort.

2.3.1 Metodi di valutazione

Il comfort è regolato dai seguenti fattori:

- Temperatura dell'aria [°C]
Determinante sullo scambio termico tra occupante e ambiente, più è alta la temperatura maggiore sarà lo scambio termico, viceversa più bassa la temperatura minore lo scambio termico
- Temperatura media radiante [°C]
Rappresenta la temperatura media pesata

tra le temperature delle singole superfici che delimitano l'ambiente. Una differenza eccessiva tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante (TMR) significa che le pareti risultano più fredde dell'ambiente interno ed il calore viene emesso dall'occupante verso queste superfici creando una sensazione di freddo.

La condizione risulta confortevole per l'occupante se la differenza tra temperatura e la TMR è minore di 2°C.

- Umidità relativa [%]

È il rapporto tra la quantità d'acqua contenuta in un Kg di aria secca ad una certa temperatura e la quantità massima di acqua che potrebbe essere contenuta alla stessa temperatura dallo stesso Kg d'aria secca. L'umidità relativa (UR) influisce negativamente sul comfort dell'occupante solo se estremamente alta o bassa. Nel periodo estivo una quantità eccessiva di umidità crea discomfort amplificando la sensazione di caldo ed impedendo al sudore di evaporare; al contrario, nel periodo invernale un'umidità molto bassa incrementa la sensazione di freddo in quanto l'umidità che raggiunge la superficie della pelle evapora e crea una sensazione di freddo. Il range di comfort è dal 50% al 60% in estate e dal 40% al 50% in inverno.

- Velocità dell'aria [m/s]

Il movimento dell'aria produce effetti termici senza una vera variazione di temperatura perché favorisce la dissipazione del calore fintanto che la temperatura dell'occupante è superiore a quella dell'ambiente.

Tuttavia il raffrescamento tramite il movimento dell'aria è limitato dagli effetti negativi se la velocità dell'aria è eccessiva, in particolare in ambienti dove l'attività è principalmente sedentaria.

- Attività metabolica [Met]

L'occupante produce una quantità variabile di calore che dipende dalla tipologia di attività che sta svolgendo. Più precisamente la produzione di calore aumenta insieme all'intensità del lavoro svolto. Ad esempio, il sonno equivale a 0,7 Met e un'attività sedentaria d'ufficio è pari a 1,4 Met.

Abbigliamento [Clo]

Il vestiario influisce sulle perdite di calore per evaporazione e sugli scambi di calore. Solitamente 1 Clo è il vestiario invernale e 0,5 Clo è il vestiario estivo.

Esistono due metodi principali per calcolare il comfort: il modello di Fanger ed il modello adattivo.

Il modello di Fanger è stato sviluppato negli anni '60 e fornisce una previsione di comfort usando il bilancio del corpo umano. È lo standard a cui si riferiscono le principali norme, tra cui l'UNI EN ISO 7730^[31].

Tuttavia non è adatto per tutti gli edifici in quanto tiene conto solo parzialmente dell'adattamento termico dell'occupante verso l'ambiente interno e dei parametri personali (età, sesso, cultura), parametri fisiologici (preferenze e aspettative di temperatura, attitudini personali) e parametri relativi all'interazione dell'occupante con l'ambiente (percezione visiva e acustica e qualità dell'aria).

In particolare, negli edifici che non vengono ventilati meccanicamente l'occupante può percepire il caldo in maniera meno severa rispetto a quanto predetto da questo modello poiché nel momento in cui l'occupante percepisce discomfort reagirà per ripristinare le condizioni ottimali.

Il bilancio termico che descrive il sistema termodinamico dove l'individuo e l'ambiente scambiano calore e lavoro può essere descritto come segue. **Fig.12:**

$$S = M - W - E - E_{res} - C_{res} - C - R - K$$

Dove:

- S è la variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo
- M è la potenza generata dall'attività metabolica
- W è la potenza meccanica scambiata tra corpo umano e ambiente
- E è la potenza termica dispersa per evaporazione attraverso la pelle
- E_{res} è potenza termica ceduta all'ambiente nella respirazione come calore latente
- C_{res} è la potenza termica ceduta all'ambiente nella respirazione come calore sensibile
- C è la potenza termica scambiata per convezione
- R è la potenza termica scambiata per irraggiamento
- K è la potenza termica scambiata per conduzione

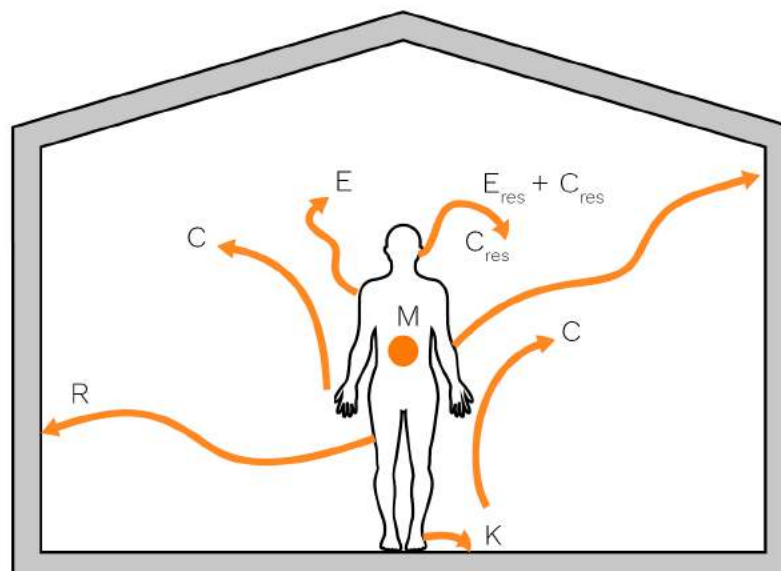


Fig.12 Schema del bilancio termico tra corpo umano e ambiente
 Fonte: UNI EN ISO 7730^[31]

L'indice maggiormente utilizzato per la definizione del comfort è il Predicted Mean Vote (PMV), ossia il voto medio previsto, che valuta lo scostamento delle condizioni reali a quelle di comfort attraverso indici che esprimono una media tra le valutazioni di un grande numero di soggetti.

Questo indice è adottato dalla UNI EN ISO 7730^[31] che in funzione delle variabili sopra descritte classifica lo stato di comfort attraverso l'indice riportato in **Fig.13**.

Direttamente connessa al PMV, c'è la percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) che quantifica la percentuale di persone che avvertono una sensazione di caldo o di freddo all'interno dell'ambiente. **Fig.14**.

Come si evince dal grafico anche con un valore di PMV pari a 0, la percentuale di insoddisfatti sarà il 5%.

La norma UNI EN 15251^[32] suddivide la sensazione di comfort in quattro categorie. **Tab.2**. Le categorie rappresentano il livello di aspettativa dell'occupante. La categoria 1 corrisponde ad un elevato livello di aspettativa ed è raccomandata per spazi occupati da persone con bisogni speciali come disabili, malati, bambini e anziani; la categoria 2 corrisponde ad un livello normale di aspettativa e dovrebbe essere utilizzata per le nuove costruzioni; la categoria 3 rappresenta un livello accettabile ed è utilizzata negli edifici esistenti; la categoria 4 contie-

ne i valori esterni ad i criteri delle precedenti categorie. Questa categoria deve essere considerata accettabile solo per una limitata parte dell'anno.

Negli ultimi anni l'interesse nel metodo di valutazione del comfort adattivo è aumentato a dismisura.

Quest'ultimo è stato proposto da de Dear e Brager^[33] (1998) ed è incluso nelle versioni più recenti dell'ASHRAE standard 55^[34] e UNI EN 15251^[32]. Esso è utilizzato prevalentemente in edifici senza l'ausilio di raffrescamento e dove l'interazione con le finestre è possibile. È basato sul concetto che il livello di adattamento e di aspettativa degli occupanti è fortemente relazionato con le condizioni climatiche esterne. **Fig.15**. Diversi studi hanno dimostrato che il modello di Fanger non riesce a definire un range di temperature in cui le persone sono in uno stato di comfort negli edifici dove le temperature interne sono variabili, tipiche degli edifici ventilati naturalmente. Al contrario quando viene utilizzato il modello adattivo la progettazione deve considerare che gli occupanti si adatteranno all'ambiente o adatteranno l'ambiente ai loro bisogni. In altre parole ci si aspetta che l'occupante abbia continue interazioni con i dispositivi a disposizione nell'edificio.

Di conseguenza il comportamento degli occupanti è sempre più importante nella

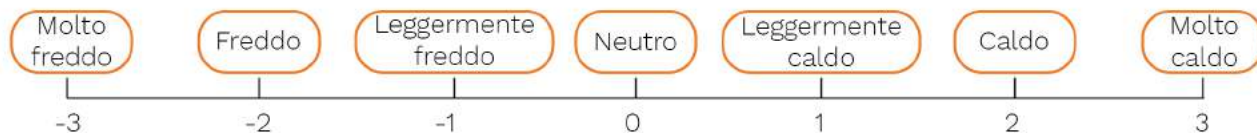


Fig.13 Indice del PMV
Fonte: UNI EN ISO 7730^[31]

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

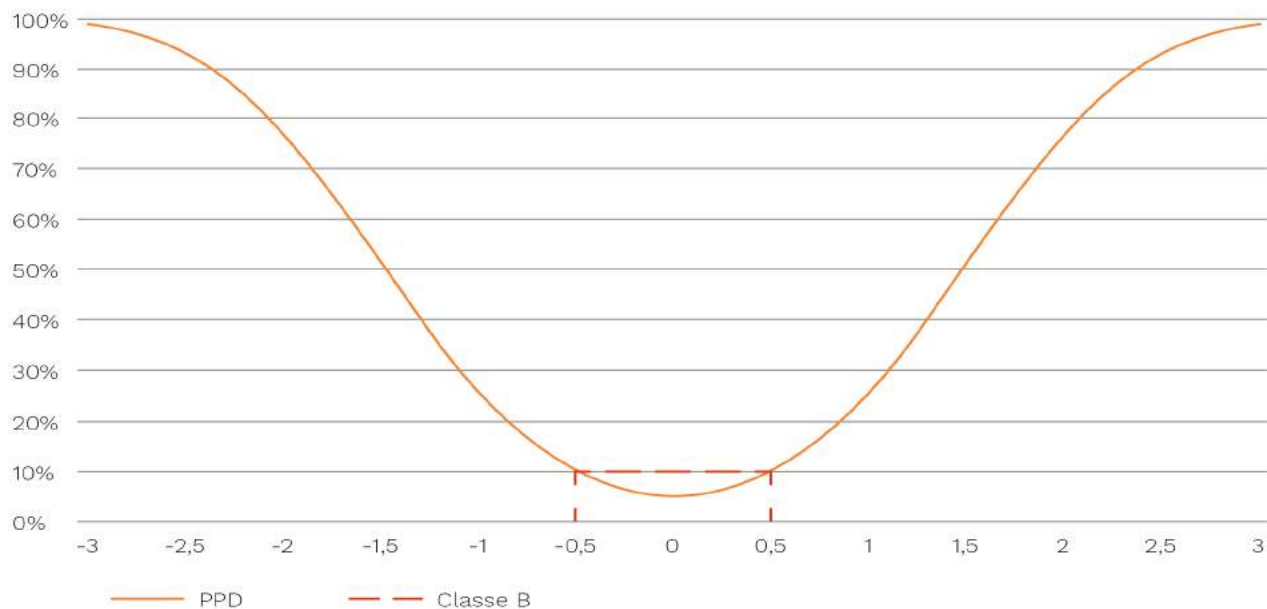


Fig.14 Grafico del PPD in funzione del PMV
Fonte: UNI EN ISO 7730^[31]

Tab.1 Limiti di accettabilità per il comfort termico-igrometrico
Fonte: UNI EN 15251^[32]

Categoria	PPD [%]	PMV
Categoria I	< 6	-0,2 < PMV < 0,2
Categoria II	< 10	-0,5 < PMV < 0,5
Categoria III	< 15	-0,7 < PMV < 0,7
Categoria IV	> 15	PMV > 0,7

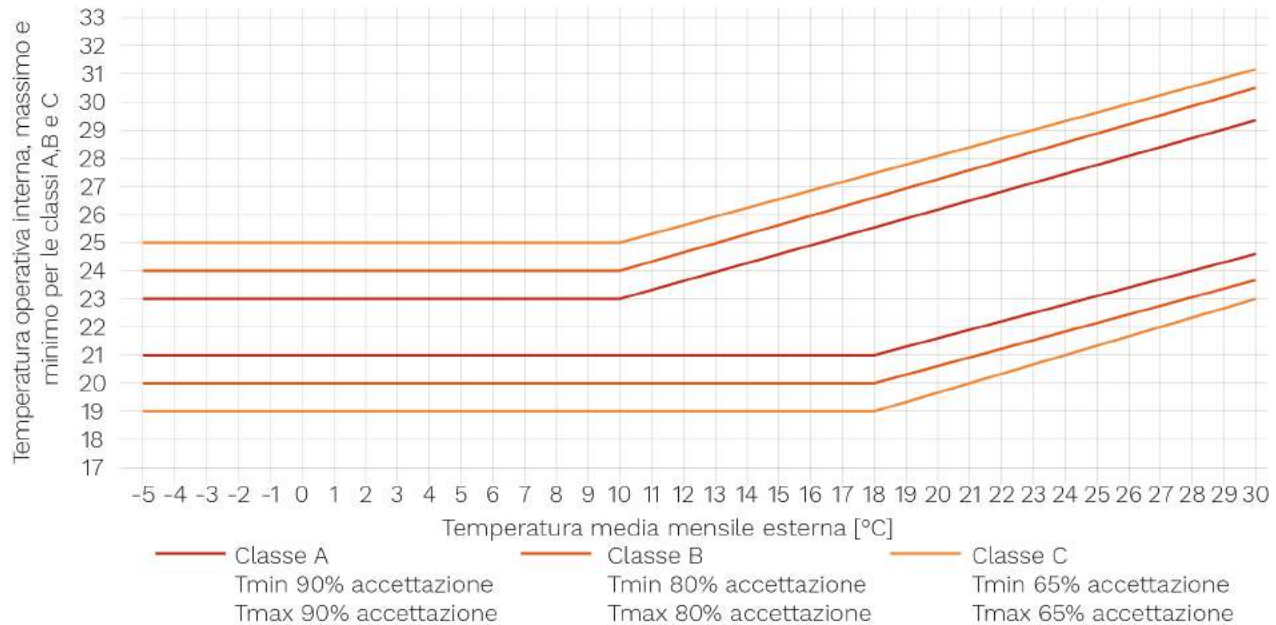


Fig.15 Range di accettazione secondo il comfort adattivo
Fonte: UNI EN 15251^[32]

determinazione della qualità dell'ambiente interno e nelle prestazioni dell'edificio. Lo studio di de Dear e Brager^[33] indica che la valutazione del comfort è pressoché identica tra modello adattivo e modello di Fanger negli edifici governati dalla ventilazione meccanica mentre per quelli che sfruttano la ventilazione naturale il modello adattivo prevede un range di temperature confortevoli più ampio rispetto a quelle previste dal modello di Fanger. **Fig.16.**

2.3.2 Discomfort termico locale

Le valutazioni del PMV e PPD riguardano

l'interazione tra corpo umano e l'ambiente che lo circonda. Tuttavia esistono delle condizioni per cui, anche se il PMV e PPD risultino accettabili, si venga a creare un discomfort locale. La norma UNI EN ISO 7730^[31] regola anche queste situazioni indicando le seguenti categorie:

- Corrente d'aria
Influenza maggiormente individui che svolgono attività leggere con una sensazione di comfort prossima allo zero, viene invece avvertita di meno dalle persone che svolgono un'attività più intensa o che già percepiscono una sensazione di caldo. **Fig.17a.**

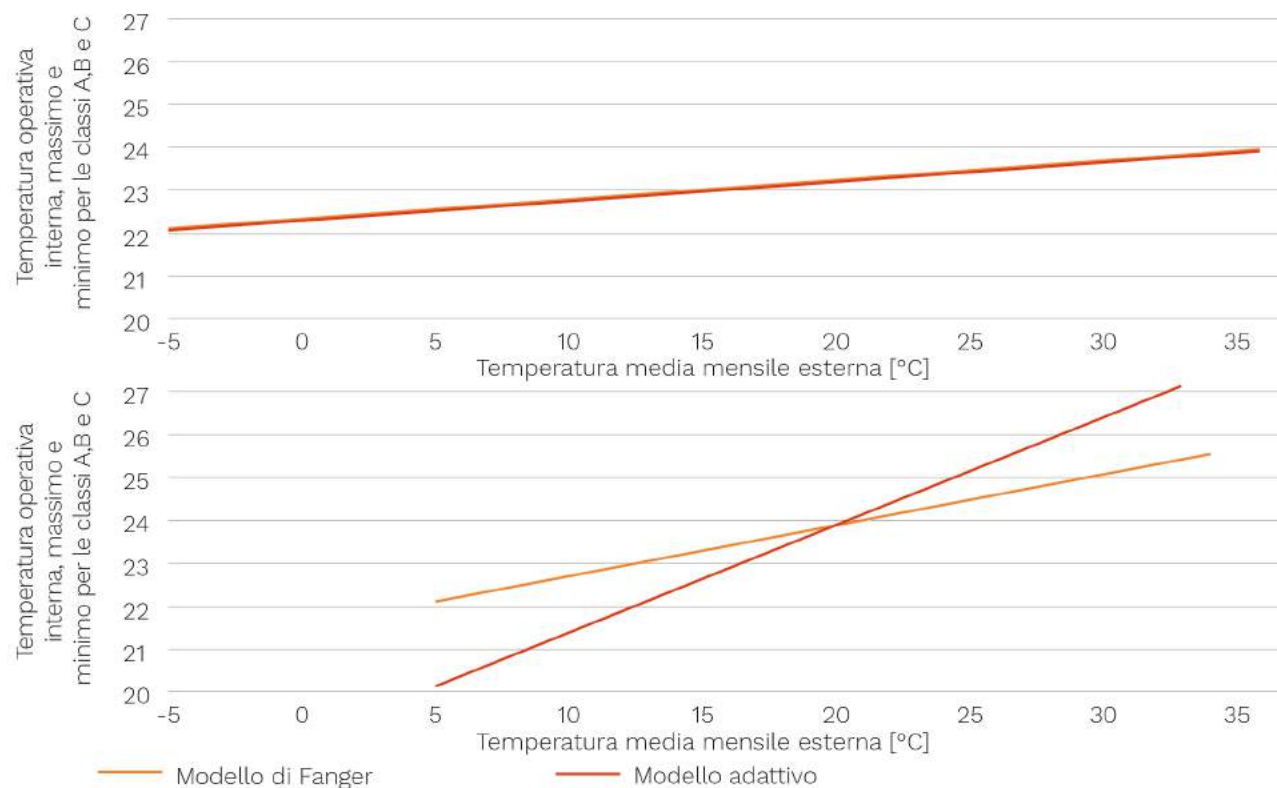


Fig.16 Comparazione tra il modello di Fanger ed il modello adattivo

Rielaborato da: de Dear, Richard Brager, G. S., (1998), *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*

- Differenza verticale di temperatura dell'aria

Un gradiente di temperatura tra testa e piedi eccessivamente elevato può creare una condizione di discomfort. **Fig.17b.**

- Pavimenti caldi o freddi

Il possibile discomfort è causato dallo scambio termico tra l'occupante ed il pavimento attraverso i piedi ed è regolato dalla temperatura del pavimento, conducibilità termica, capacità termica del rivestimento

del pavimento, calzature indossate e tempo trascorso a contatto. **Fig.17c.**

- Asimmetria radiante

Il discomfort può essere causato dalla presenza di superfici fredde come pareti vetrate o non isolate. Come detto in precedenza, questo concetto è legato alla TMR ed è considerata accettabile una differenza di 2°C tra essa e la temperatura interna dell'ambiente. **Fig.17d.**

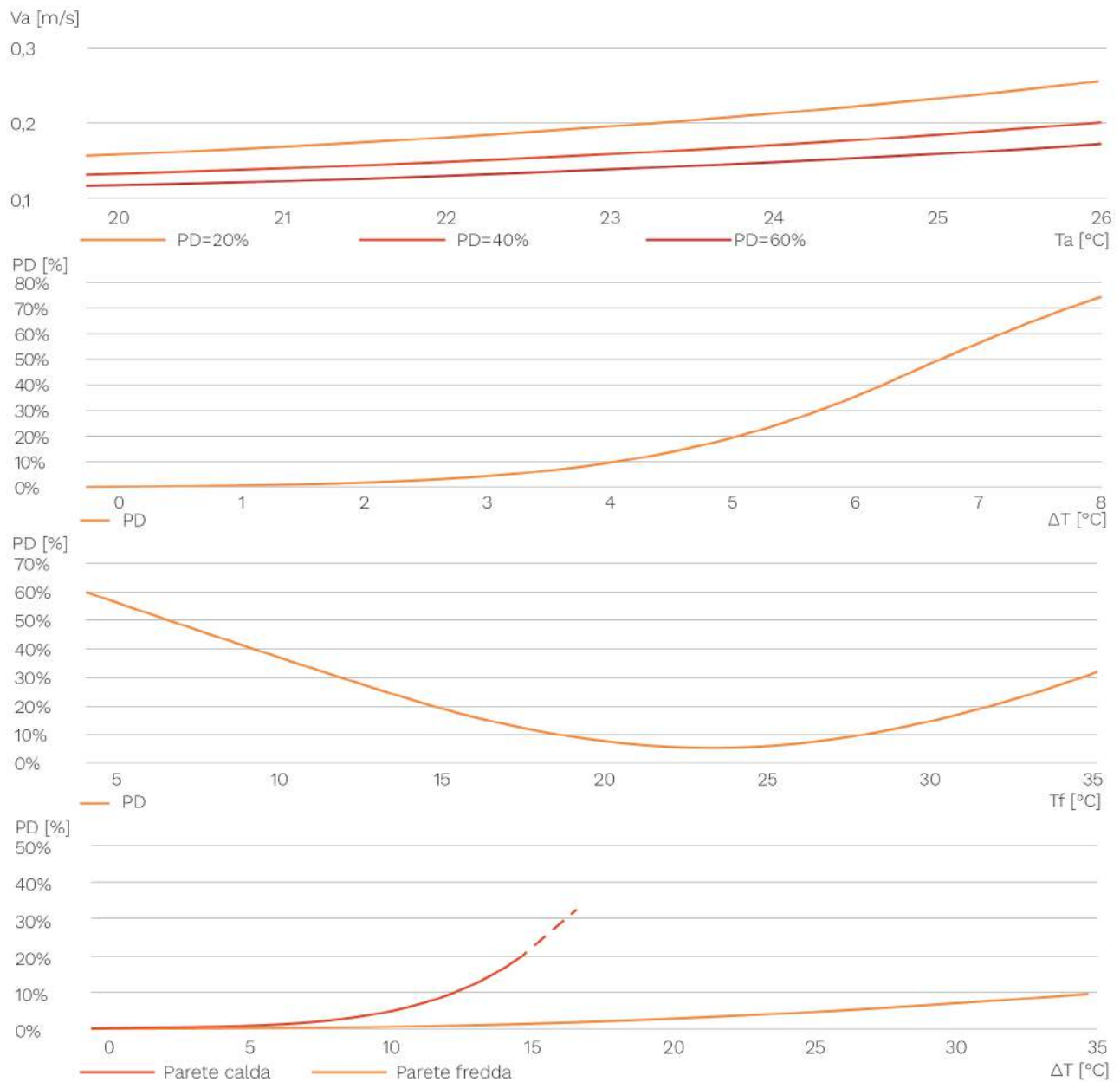


Fig.17 a) PD in funzione delle correnti d'aria; b) PD in funzione della differenza verticale di temperatura; c) PD in funzione della temperatura del pavimento; d) PD in funzione dell'asimmetria radiante
Fonte: UNI EN ISO 7730^[31]

2.4 Qualità dell'aria

Negli ultimi anni la tendenza a creare edifici energeticamente efficienti ha determinato un diverso ambiente interno per l'uomo. Gli edifici nZEB sono costruiti con un involucro ermetico per conservare energia che però trattiene i contaminanti interni che non riescono ad essere dispersi all'esterno e sorge la necessità di rimandare alla ventilazione l'obiettivo di provvedere a mantenerli ad un livello accettabile.

L'*Indoor Air Quality (IAQ)*, ovvero la qualità dell'aria interna, è uno dei principali elementi che influenzano il benessere e la salute dell'occupante.

L'IAQ descrive come l'aria all'interno dell'edificio possa influire sulla salute, comfort e produttività del lavoro dell'occupante. Essa include diversi parametri tra cui: temperatura, umidità, numero di ricambi orari d'aria e concentrazione di contaminanti.^[35]

Una buona IAQ è definita dall'introduzione di aria fresca con una corretta distribuzione all'interno dell'ambiente, dal controllo degli inquinanti e dal mantenimento della temperatura e dell'umidità relativa a livelli ammissibili.

I fattori più comuni che riducono l'IAQ sono il fumo di tabacco, la combustione prodotta dalla cucina, l'isolamento in fibra di vetro,

una scarsa manutenzione dell'impianto di ventilazione ed insufficienti ricambi d'aria^[36].

Gli occupanti prevedono due requisiti principali per l'aria interna. In primo luogo, l'aria deve contenere un basso numero di inquinanti per preservare la propria salute, in secondo luogo, l'aria dev'essere percepita fresca e piacevole anziché stantia. Ci sono comunque grandi differenze personali nei requisiti: alcune persone trascorrono gran parte del loro tempo nello stesso ambiente interno, altre no; alcune persone sono molto sensibili e hanno elevate esigenze dell'aria che respirano mentre altre sono piuttosto insensibili e quindi hanno requisiti minori.

La qualità dell'aria interna in un edificio non è costante, anzi è fortemente influenzata da cambiamenti nelle attività degli occupanti e dall'ambiente esterno. Essa può essere migliorata da una combinazione tra il controllo delle sorgenti inquinanti e dalla ventilazione^[37]. Controllare la sorgente, quando possibile, è spesso la soluzione migliore poiché non influisce negativamente sul consumo energetico. Se invece la sorgente non può essere sigillata, aumentare il numero di ricambi d'aria può aiutare a ridurre la presenza di inquinanti in ambiente al costo di aumentare i consumi energetici.

2.4.1 Metodi di valutazione

L'IAQ è regolata dai seguenti fattori:

- Temperatura dell'aria [°C]
- Umidità relativa [%]
- Ricambi orari d'aria [ac/h]

I ricambi orari sono un parametro fondamentale per la qualità dell'aria interna in quanto sono il metodo principale per diluire, o eliminare, gli inquinanti interni. Essi sono determinati dalla norma UNI EN ISO 7730^[31] e dalla norma UNI EN 12521^[32], le quali definiscono il numero di ricambi orari minimi per garantire una corretta ventilazione dell'ambiente.

- Concentrazione degli inquinanti [ppm]
- La concentrazione degli inquinanti è il parametro di riferimento per analizzare la qualità dell'aria. Chiaramente, maggiore è la quantità di inquinanti minore è la qualità dell'aria. Il valore massimo consigliato dall'ASHRAE è 1000 ppm. **Fig.18**^[38].

Gli inquinanti interni possono danneggiare sia la salute dell'occupante che quella dell'edificio. Perciò è importante controllare la loro concentrazione. Uno dei me-

Limite di esposizione massimo per un tempo massimo di 8 ore	ppm 5000
Effetti negativi sulla salute	2500
Primi sintomi di sonnolenza (livello massimo consigliato dall'ASHRAE)	1000
Percezione di aria esausta	700
Livello accettabile	450
Salutare, livello normale in ambiente esterno	350

Fig.18 Qualità dell'aria in funzione della quantità di contaminanti
Fonte: BPIE

todi per quantificare l'efficienza della ventilazione consiste nel valutare l'abilità del sistema nel rimuovere i contaminanti generati all'interno dell'ambiente, attraverso la misurazione della concentrazione di inquinanti nella bocchetta di estrazione rispetto al valore medio dell'ambiente. Tuttavia, i risultati di questa misurazione sono estremamente dipendenti dalla posizione della fonte di inquinanti nello spazio. Se essa è vicina alla bocchetta di estrazione l'efficienza sarà buona, viceversa se lontana sarà scarsa. **Fig.19.**

In entrambi i casi la concentrazione di inquinanti nella bocchetta di estrazione ed in ambiente è la stessa se si presuppone

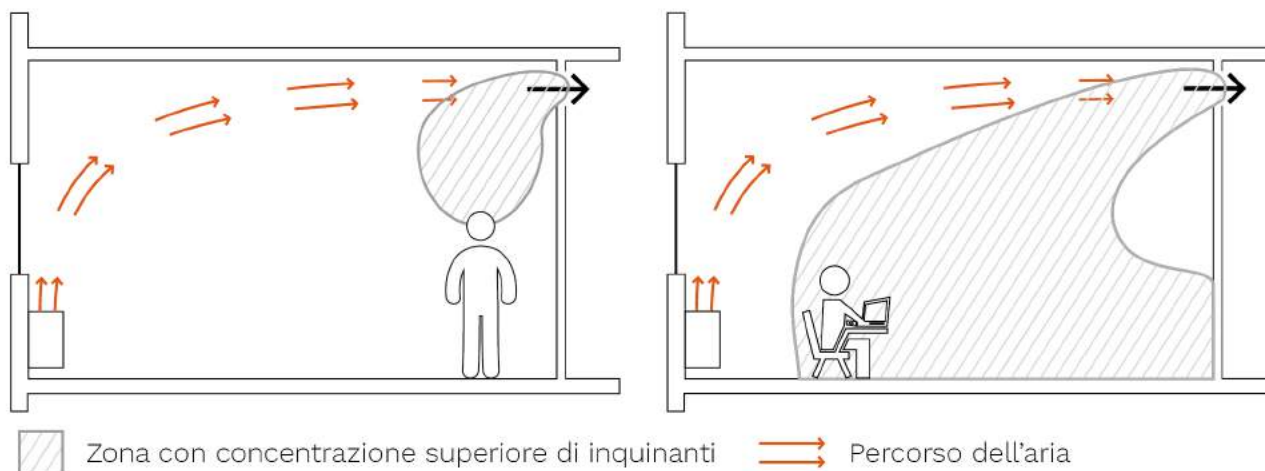


Fig.19 a) Fonte dei contaminanti in prossimità della bocchetta di estrazione b) Fonte dei contaminanti lontana dalla bocchetta di estrazione

di essere in una situazione di miscela perfetta.

Un sistema di ventilazione di rado crea una situazione di miscela perfetta e la localizzazione delle fonti di inquinanti sono, nella maggior parte dei casi, sconosciute o incostanti. Per questo è richiesto un metodo generale di misurazione. *Local Mean Age of air (LMA)*, ossia l'età dell'aria media rappresenta l'efficienza della ventilazione del sistema attraverso la sua capacità di scambiare aria nell'ambiente. In altre parole è un indicatore della freschezza dell'aria.

Essa è stata introdotta da Sandberg nel 1981 ed è definita come il tempo medio necessario per l'aria per raggiungere un punto definito dell'ambiente partendo dal punto di immissione^[39]. **Fig.20.**

Si basa sulla metodologia del *tracer gas* de-

scritta dalla norma ISO 16000-8^[40], la quale utilizza un gas tracciante che sia inerte, non tossico e che non metta a rischio la salute dell'occupante, solitamente anidride carbonica, Elio o Argon, che viene miscelato con l'aria immessa o con l'aria già presente in ambiente così da differenziarle. Ipotizzando di tracciare l'aria già presente in ambiente con il gas, una volta che l'aria fresca viene immessa e l'aria esausta viene estratta la concentrazione del gas diminuirà ed il tempo in cui l'aria non tracciata raggiunge il punto in analisi è definito età media dell'aria.

Dal lato pratico, se le concentrazioni di contaminanti dell'aria all'interno dell'ambiente e dell'aria immessa sono note si potrà valutare, attraverso l'età dell'aria, l'efficienza nella ventilazione nel rimuoverli.

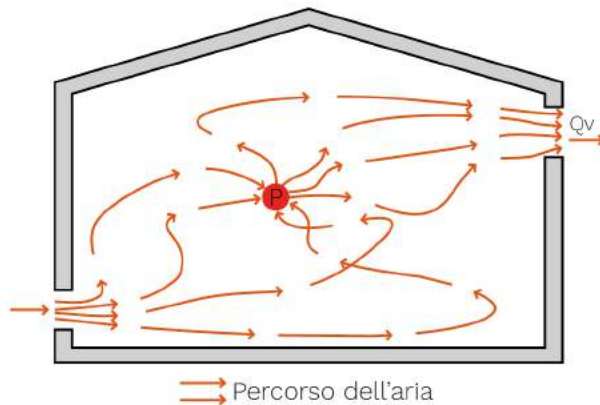


Fig.20 Schema concettuale dell'età dell'aria

È da tenere in considerazione che l'aria si muove in funzione della differenza di densità che a sua volta dipende dalla temperatura, pressione ed umidità.

Per cui i risultati forniti dall'LMA saranno diversi in funzione della differenza di temperatura tra interno ed esterno per quanto riguarda ventilazione naturale e infiltrazioni ed in funzione della differenza tra temperatura di immissione dell'aria e temperatura dell'aria interna per la ventilazione meccanica.^[41]

L'Air Change Effectiveness (ACE), ossia l'efficacia della ventilazione, è la capacità del

sistema di ventilazione di distribuire l'aria all'interno dell'ambiente. ACE è definito come il rapporto tra l'età dell'aria che avrebbe l'ambiente in una situazione di perfetta miscela e l'età dell'aria presente all'altezza respiratoria^[42].

Poiché l'età media dell'aria uscente dall'ambiente è identica a quella che si avrebbe attraverso la stanza considerando una miscela perfetta allora ACE equivale anche al rapporto tra l'età dell'aria esausta e l'età dell'aria all'altezza respiratoria.

Questo parametro non è da confondere con l'efficienza della ventilazione in quanto quest'ultima definisce la capacità del sistema di rimuovere gli inquinanti interni mentre l'ACE, come detto precedentemente, definisce il grado di distribuzione di aria fresca all'altezza della respirazione. Un valore pari ad 1 indica un ambiente dove l'aria è perfettamente miscelata, al contrario un valore inferiore ad 1 indica che l'aria non è perfettamente distribuita. **Tab.2.**

Ad esempio avere un cortocircuito tra immissione e ripresa avrà un basso valore in

Tab.2 Valori di ACE in funzione della tipologia di ventilazione

ACE	
Cortocircuito	ACE < 1
Miscelazione perfetta	ACE = 1
Dislocamento	ACE > 1
Ventilazione naturale	ACE > 1

quanto si crea una zona stagnante.

Aumentare le portate d'aria non si traduce direttamente in un aumento dell'ACE, poiché è altrettanto importante il posizionamento delle bocchette o delle aperture.

I due parametri alla base del movimento dell'aria, sia esso esterno o interno, sono le differenze tra temperatura e pressione. In aggiunta all'interno di un edificio essi sono influenzati da:

- Geometria della stanza
- Posizionamento delle bocchette
- Portate di immissione ed estrazione
- Temperatura di mandata
- Intensità e posizione degli apporti interni
- Ostruzioni
- Temperatura superficiale e flussi termici
- Pressione del vento
- Infiltrazioni

Cambiare lievemente questi parametri può avere un effetto importante sul risultato finale in quanto faranno variare il flusso d'aria presente in ambiente.

Un'accurata previsione dei percorsi dell'aria all'interno delle stanze diventa sempre più importante per il design del sistema di ventilazione. Per raggiungere la massima efficienza energetica, un comfort adeguato ed un livello ottimale di distribuzione dell'aria, i flussi devono essere analizzati durante la fase di progetto dell'edificio.

Questa previsione non può essere eseguita dai software di simulazione energetica, perché i risultati saranno valori uniformi all'interno della stessa zona, di conseguenza è necessario utilizzare il supporto della simulazione CFD poiché può prevedere il comportamento dei flussi d'aria all'interno dell'ambiente.

3.LA VENTILAZIONE



3.1 Definizioni e normative

Come detto in precedenza, la ventilazione ha una notevole influenza sul bilancio energetico dell'edificio e sul comfort.

Innanzitutto, è necessario differenziare le portate d'aria dovute alle infiltrazioni, ossia i flussi d'aria non controllati che passano attraverso i punti dell'involucro edilizio più permeabili, e portate d'aria dovute alla ventilazione, sia essa meccanica o naturale.

Un'adeguata ventilazione è necessaria per immettere aria fresca in modo costante all'interno dell'ambiente così da poter:

- *Rimuovere l'aria esausta ed eventuali contaminanti*
- *Migliorare il comfort dell'occupante*
Il quale percepirà l'aria fresca e pulita
- *Controllare l'umidità*

La quale potrebbe generare muffe nei punti più deboli a livello termico, ed in casi estremi, intaccare la salute dell'occupante.

I flussi d'aria entranti in ambienti ed i fenomeni correlati, quali scambio di calore, di umidità e di inquinanti, sono un problema complesso in quanto bisogna tenere in

considerazione i parametri dell'ambiente esterno, come la pressione del vento e le differenze di temperatura, in funzione alle caratteristiche dell'edificio ed al comportamento dell'occupante. Questi parametri influenzano in modo significativo le infiltrazioni e la ventilazione naturale, mentre nel caso della ventilazione meccanica controllata vengono limitati dal trattamento che l'aria riceve prima di essere immessa in ambiente.

Per considerare adeguata la ventilazione non dovranno essere solo garantiti i ricambi orari minimi imposti da normativa ma dovranno essere progettati i suoi percorsi. L'aria deve essere diretta da zone con aria pulita (salotto e camere) verso zone con aria esausta (bagni, cucina e servizi) e deve essere distribuita in modo tale che raggiunga tutti i punti dell'edificio senza creare zone stagnanti, con alte concentrazioni di inquinanti e umidità. Infatti, nella progettazione della ventilazione, specialmente quella meccanica, i locali di servizio vengono mantenuti ad una pressione minore rispetto a quelli nobili, così da direzionare il percorso.

Esistono diverse normative che definiscono la regolamentazione della ventilazione:

- UNI EN 12792^[43]

Fornisce la terminologia e le definizioni su cui si basano le altre normative. In particolare differenzia areazione e ventilazione in base alla continuità. Infatti la ventilazione, sia essa meccanica o naturale, deve essere continua mentre l'areazione è in funzione del comportamento dell'occupante

- DM 5/7/1975^[44], Articolo 6

Introduce le conseguenze di un ambiente confinato da un involucro che non ha infiltrazioni sufficienti per garantire un corretto ricambio d'aria. Non potendo fare affidamento sul comportamento arbitrario dell'occupante bisogna inserire una VMC dove la ventilazione naturale non è fruibile.

- UNI EN ISO 13790^[45]

Norma per il calcolo dei fabbisogni degli edifici che include le dispersioni per ventilazione. Essa definisce i tassi di ricambi orari basandosi sulla norma UNI EN 15251^[32]

- UNI EN ISO 13788^[46]

Norma impiegata per le verifiche termoigrometriche. La ventilazione è indicata come strategia per l'eliminazione di condensa ed eventuali muffe. Attraverso i calcoli definiti da questa norma si può valutare il rischio di generazione di muffe.

- UNI EN 15242^[47]

Norma per la valutazione delle portate d'aria negli edifici. Essa contiene un metodo di calcolo per valutare i ricambi d'aria dovuti all'apertura delle finestre. Utilizzando questo metodo vengono evidenziati gli sprechi energetici dovuti all'areazione

Le normative UNI EN 15251^[32] e UNI 10339^[48] definiscono le portate da utilizzare per il dimensionamento della ventilazione meccanica. La norma UNI 10339^[48] propone i ricambi orari minimi che per la residenza sono pari a 11 m³/h a persona e 4 ac/h rispettivamente per immissione ed estrazione dell'aria.

La norma UNI EN 15251^[32] permette di calcolare le portate d'aria immessa in funzione del numero di persone oppure in base alla superficie di pavimento. Le portate d'aria di ripresa sono invece definite come costanti e variano unicamente in funzione della categoria. **Tab.3.** La categoria I rappresenta un livello di aspettativa molto alto, utilizzato particolarmente per ambienti dove gli occupanti sono persone molto sensibili con requisiti particolari; la categoria II rappresenta un livello di aspettativa normale, utilizzabile per le nuove costruzioni e per le ristrutturazioni; infine, la categoria III rappresenta un livello di aspettativa moderato, utilizzato per gli edifici esistenti.

Tab.3 Tassi di ventilazione

Fonte: UNI EN 15251^[32]

TASSO DI VENTILAZIONE SECONDO UNI EN 15251							
Categoria	Tasso di rinnovo dell'aria [*]		Soggiorno e stanze da letto, principalmente flusso di aria esterna		Flusso estratto [l/s]		
	l/s	Vol/h	l/s persona [**]	l/s m ²	Cucina	Bagni	Toilettes
I	0,49	0,7	10	1,4	28	20	14
II	0,42	0,6	7	1	20	15	10
III	0,35	0,5	4	0,6	14	10	7

[*] I tassi di rinnovo dell'aria espressi in l/s m² e i ricambi orari Vol/h corrispondono tra loro quando l'altezza del soffitto è 2,5 m

[**] Il numero degli occupanti in una residenza può essere stimato dal numero delle stanze da letto. Le assunzioni fatte a livello nazionale devono essere usate qualora esistenti. Esse possono diverse per i calcoli relativi all'energia e all'IAQ

3.2 Strategie di ventilazione

Per caratterizzare la distribuzione dell'aria all'interno dell'ambiente si utilizzano solitamente due tipologie di immissione^[49]:

- *Miscelazione*

Dove in una situazione ideale la distribuzione dell'aria è omogenea in tutto l'ambiente. Questa strategia è tipica dei sistemi di ventilazione con le bocchette di immissione a soffitto ed in una situazione diversa da quella ideale si possono verificare cortocircuiti quando l'aria immessa viene estratta senza che venga miscelata completamente con l'aria già presente in am-

biente. Se l'aria fosse immessa a velocità notevolmente superiori a quelle ammesse nei momenti in cui l'occupante è presente (da 2 m/s a 12 m/s) l'energia cinetica sarebbe sufficiente per movimentare l'aria dell'ambiente circostante creando così una miscela perfetta. **Fig.21.**

- *Dislocamento*

Dove l'aria immessa in ambiente non si miscela con quella già presente, questa situazione si ottiene attraverso l'immissione di aria a livello del pavimento con l'estrazione a livello del soffitto. Grazie all'assenza di miscela gli inquinanti presenti nell'aria secondaria vengono estratti senza intaccare

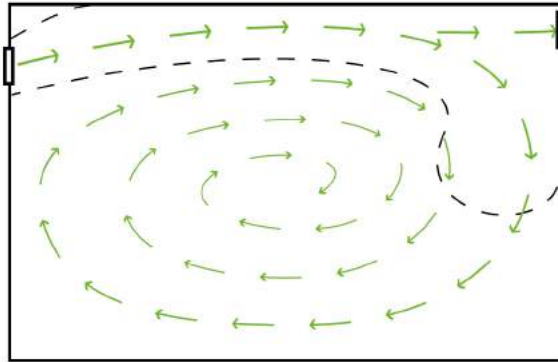


Fig.21 Distribuzione dell'aria per mescolamento
Rielaborato da: 2005 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI), Chapter 27 Ventilation and Infiltration

l'aria pulita. **Fig.22.**

Questo sistema garantisce una distribuzione dell'aria fresca eccellente. Infatti se analizzata attraverso l'ACE si otterranno valori maggiori di 1.

3.3 Ventilazione naturale

La ventilazione naturale può portare un alto numero di ricambi orari in modo economico grazie all'impiego delle forze naturali e ad un'accurata progettazione dell'involucro trasparente. E' il sistema di ventilazione maggiormente influenzato dal comportamento dell'occupante, in quanto è legato alla sua interazione con l'edificio.

È però considerato meno affidabile di quella meccanica poiché oltre all'arbitrarietà degli occupanti deve tenere conto dei pa-

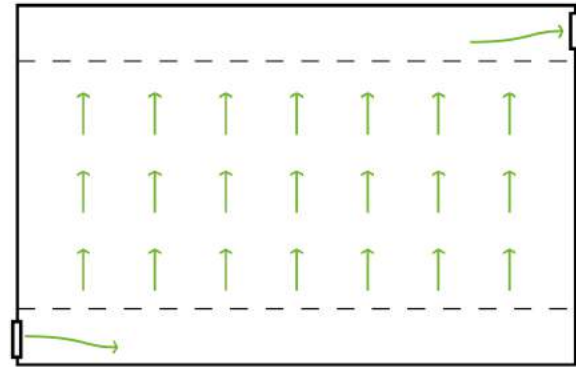


Fig.22 Distribuzione dell'aria per dislocamento
Rielaborato da: 2005 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI), Chapter 27 Ventilation and Infiltration

rametri incostanti dell'aria esterna quali temperatura, umidità, velocità del vento e pressione. Questi parametri variano sia durante l'arco della giornata che con le stagioni, rendendo complessa la previsione delle portate in ingresso.

La sua progettazione risulta quindi più complessa rispetto a quella della ventilazione meccanica poiché bisogna dimensionare e posizionare le finestre prevedendo le variazioni dei parametri esterni.

Inoltre i ricambi d'aria dell'ambiente devono essere costanti, il che comporta evidenti problemi. Oltre ai problemi di sicurezza che si creerebbero nel momento in cui l'occupante non è presente nell'edificio, la ventilazione naturale continua immetterebbe anche aria con condizioni termicamente sfavorevoli che porterebbero ad un incre-

mento del fabbisogno ambientale e ad una diminuzione del comfort termico.

Anche le condizioni meteorologiche giocano un ruolo fondamentale nell'interazione dell'occupante con le finestre, difficilmente se queste condizioni sono avverse (forti piogge, vento intenso) l'occupante aprirà le finestre per ricambiare l'aria.

Infine, il grande svantaggio della ventilazione naturale risiede nella mancanza di un trattamento dell'aria in ingresso, il che comporta l'immissione di inquinanti direttamente in ambiente.

Nonostante tutto, la ventilazione naturale ha diversi vantaggi. La percezione dell'occupante verso la ventilazione naturale è più favorevole che verso quella meccanica, questo principalmente perché l'interazione con le finestre è un approccio diretto e l'occupante ha una sensazione di maggiore controllo sul comfort e sulle condizioni interne dell'ambiente. Infatti, proprio grazie a questa interazione diretta, l'occupante può aprire le finestre secondo le sue abitudini, come ad esempio aprire le finestre appena svegli per ricambiare l'aria.

La ventilazione naturale si sviluppa attraverso una differenza di pressione tra inter-

no ed esterno, provocata dalla pressione del vento e dalla densità dell'aria.

L'aria tenderà sempre a spostarsi dalla zona con una maggiore densità, ossia ad una temperatura più fredda, verso quella con densità più bassa, ossia a temperatura più calda.

Seguendo questo principio si può utilizzare la ventilazione naturale come free cooling nel momento in cui la temperatura interna è maggiore rispetto a quella esterna, in particolare durante la notte in estate.

Infine, tenendo in considerazione l'effetto del vento, la ventilazione naturale è generata dalla differenza di pressione dovuta allo scorrimento dell'aria intorno all'edificio. Questo comporta una sovrappressione sulla facciata esposta al vento ed una depressione in quella opposta, come spiegato in **Fig.23**. La differenza di pressione tra le due facciate può essere sfruttata per creare movimenti d'aria nell'ambiente interno. Un edificio dove la ventilazione naturale è il sistema principale di ventilazione deve, di conseguenza, essere adeguatamente progettato. Infatti essa non risente solo delle aperture nell'involucro edilizio ma anche della disposizione interna. Tendenzialmente, spazi lunghi e stretti, come ad esempio i corridoi, convogliano l'aria aumentando la velocità mentre spazi con un rap-

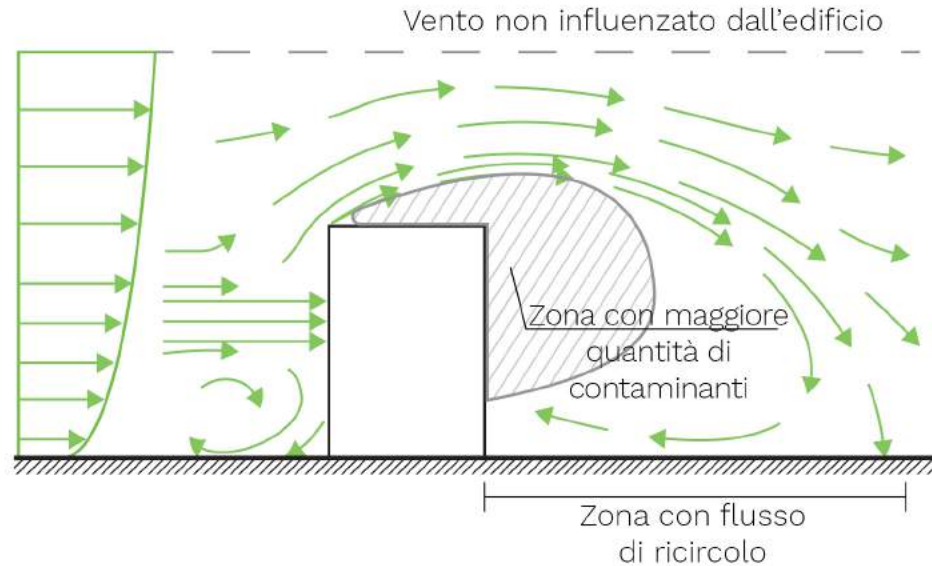


Fig.23 Situazione di sovrappressione e depressione in presenza di vento
Rielaborato da: ASHRAE 1999

porto tra lunghezza e profondità minore avranno velocità inferiori.

Inoltre, l'apertura e la chiusura delle porte interne avrà una grande incidenza sulla configurazione dei percorsi dell'aria. Nel caso siano aperte l'aria tenderà a distribuirsi in tutto l'edificio, seguendo la differenza di pressione anche nel caso in cui solo un locale sia ventilato, mentre, nel caso siano chiuse, il flusso è limitato all'interno del locale arieggiato, ad eccezione delle infiltrazioni dovute agli spifferi delle porte.

Queste considerazioni possono essere sia positive che negative, infatti, possono essere sfruttate per migliorare le condizioni

di comfort e IAQ. Ad esempio aprire le finestre su facciate opposte creerà una corrente d'aria che nel periodo estivo può essere sfruttata come *free cooling*.

3.4 Ventilazione meccanica

La ventilazione meccanica è un sistema attivo che garantisce l'immissione controllata dell'aria in ambiente. Essa è il sistema più utilizzato negli edifici nZEB principalmente perché permette di garantire un ricambio d'aria costante durante l'intero arco della giornata senza compromettere i fabbisogni energetici dell'edificio.

Infatti, a differenza della ventilazione natu-

rale, l'aria viene immessa in ambiente, ad una temperatura simile a quella interna, dopo essere stata trattata e depurata da eventuali contaminanti.

Nella maggior parte dei casi, la ventilazione meccanica è dotata di un recuperatore di calore. Questo sistema permette all'aria in ingresso di assorbire parte del calore di quella espulsa così da regolare la temperatura prima di essere immessa. L'efficienza di questo sistema è strettamente legata al rendimento del recuperatore di calore.

Alcune tipologie di ventilazione meccanica sono forniti di economizzatore, il quale permette di sfruttare al massimo le potenzialità dell'aria dell'ambiente esterno in condizioni favorevoli. Ad esempio, in uno scenario estivo se la temperatura esterna è più bassa di quella interna il sistema di ventilazione meccanica con economizzatore immetterà l'aria fresca a portate superiori per massimizzare il raffrescamento. Questo tipo di ventilazione ha molteplici vantaggi. In primis, il risparmio energetico di riscaldamento e raffrescamento può risultare superiore rispetto ad un ambiente ventilato con ventilazione naturale poiché l'aria è immessa in ambiente ad una temperatura prossima al set-point.

Il ricambio d'aria è costante nel tempo e funziona indipendentemente dalla presenza dell'occupante, il che rende più sempli-

ce rispettare gli standard minimi.

Tuttavia, bisogna anche tenere in considerazione il consumo energetico dell'impianto di ventilazione, che chiaramente non è presente in quello naturale.

La progettazione dell'impianto della ventilazione meccanica deve essere accurato non solo per garantire i ricambi d'aria ma anche per la distribuzione della stessa all'interno dell'ambiente. Infatti, anche se vengono garantite le richieste di ricambi orari minimi non è detto che il sistema sia efficace. Le bocchette di mandata devono essere ad una distanza sufficiente da quelle di ripresa per poter permettere un riciclo d'aria nell'intero ambiente, poiché, se così non fosse, si creerebbe un cortocircuito che formerebbe diverse zone stagnanti con un aumento di concentrazione degli inquinanti.

Infine la ventilazione meccanica permette di creare zone di sovrappressione e depressione nei vari locali. Questo, come detto in precedenza, permette di direzionare i percorsi dell'aria e garantisce che quest'ultima non circoli dagli ambienti di servizio verso quelli nobili.

Esistono diverse tipologie di impianto di ventilazione meccanica^[50], tra cui:

- *Impianti di ventilazione meccanica a flusso semplice autoregolabile*

Il sistema ha lo scopo di rinnovare l'aria degli ambienti in cui l'IAQ è più bassa, in particolari bagni e cucina. Le bocchette di mandata garantiscono i ricambi orari necessari mentre quelle di estrazione sono responsabili del movimento dell'aria grazie ai ventilatori nei canali.

Il flusso d'aria pulita viene immesso in ambiente e, dopo aver circolato all'interno dell'abitazione, raggiunge i locali di servizio assorbendo eventuali inquinanti e successivamente viene estratto dalle bocchette di ripresa.

- *Impianti di ventilazione meccanica a flusso semplice igroregolabile*

Il principio di funzionamento è lo stesso della ventilazione meccanica autoregolabile con la differenza che in questo sistema sono presenti sensori per l'umidità che regolano l'immissione dell'aria a seconda dei livelli di umidità in ambiente.

- *Impianti di ventilazione meccanica a doppio flusso*

È il sistema di ventilazione più sofisticato ed energeticamente conveniente, esso ha due canali: uno per l'immissione e uno per la ripresa. Con questa tipologia di impianto è possibile filtrare e trattare l'aria in ingresso e recuperare il calore da quella in uscita così da incrementare i risparmi energetici.

3.5 Ventilazione ibrida

Ventilazione ibrida è il termine che descrive un sistema che non è né interamente controllato dalla ventilazione naturale né dalla ventilazione meccanica ma che ne combina i vantaggi. Infatti, l'occupante potrà interagire con le finestre avendo così un controllo diretto sul sistema, supportato dalla costanza della ventilazione meccanica. Il design di questo tipo di ventilazione si basa sul concetto di aprire le finestre per la maggior parte delle ore in cui è presente l'occupante, assistito dalla ventilazione meccanica nelle ore di assenza o nei periodi in cui le condizioni dell'ambiente esterno scoraggino l'apertura delle finestre, come ad esempio forti piogge o forte vento.

Yangrui Song et al^[51] all'interno del suo articolo studia l'interazione dell'occupante con ventilazione naturale e meccanica in funzione della temperatura esterna. Dai risultati si avrà un picco di persone favorevoli all'utilizzo della ventilazione naturale ad una temperatura esterna di circa 25°C mentre, per la ventilazione meccanica, si avrà una crescita notevole una volta superati i 25°C, come mostrato in **Fig.24**.

Questo denota che gli occupanti saranno

favorevoli all'utilizzo della ventilazione naturale in autunno ed in primavera dove la temperatura esterna rientra nel range di maggiore utilizzo, mentre in inverno ed in estate può essere utilizzata la ventilazione meccanica per immettere l'aria ad una temperatura accettabile limitando ulteriormente i consumi energetici dovuti al raffrescamento ed al riscaldamento.

3.6 Comparazione tra le tipologie di ventilazioni

Ricapitolando, per ogni tipo di ventilazione esistono diversi vantaggi e svantaggi. La scelta del sistema migliore ricade sul progettista che dovrà cercare di garantire il comfort e l'IAQ rispettando anche gli standard minimi imposti da normativa. La soluzione migliore dovrà tener conto del clima esterno, in particolare per la ventilazione naturale e ibrida. Oltre a tempe-

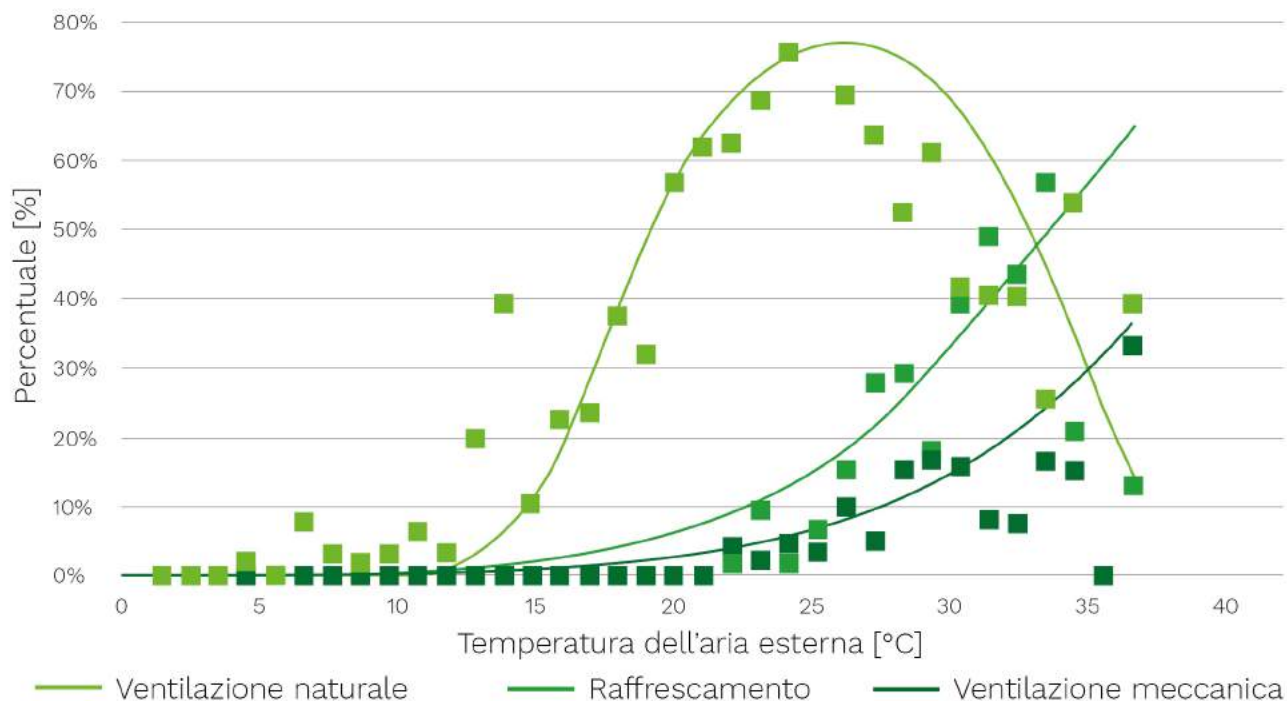


Fig.24 Variazione del comfort adattivo in base a tipologia di ventilazione e temperatura esterna
 Rielaborato da: Yangrui Song, Yuexia Sun, Shugang Luo, Jing Houa, Jungsoo Kim, Thomas Parkinson, Richard de Dear, (2017), "Indoor environment and adaptive thermal comfort models in residential buildings in Tianjin, China"

rature, umidità, velocità del vento bisogna anche tenere in considerazione l'ambiente confinante; se l'abitazione è posizionata in un punto inquinato, ad esempio in prossimità di una zona industriale, la qualità dell'aria potrebbe non essere sufficiente per sfruttare la ventilazione naturale e bisognerà quindi optare per quella mec-

canica. Infatti, la ventilazione meccanica possiede tra i suoi vantaggi la capacità di adattarsi praticamente ad ogni condizione climatica grazie alla capacità di immettere aria trattata ad una temperatura prossima a quella d'ambiente. I vantaggi e gli svantaggi sono ricapitolati in **Tab.4**^[52].

Tab.4 Comparazione tra ventilazione naturale, ventilazione meccanica e ventilazione ibrida

Rielaborato da: James Atkinson, Yves Chartier, Carmen Lúcia, Pessoa-Silva, Paul Jensen, Yuguo Li, Wing-Hong Seto, (2009), "Natural ventilation for infection control in health-care settings"

Comparazione tipologie di ventilazione			
	Ventilazione meccanica	Ventilazione naturale	Ventilazione ibrida
Vantaggi	Adattabile ad ogni condizione climatica	Disponibile per climi caldi o moderati	Utilizzabile per la maggior parte delle condizioni climatiche
	Controllo sulle condizioni ambientali	Costo di investimento e di manutenzione praticamente inesistenti	Alto potenziale di risparmi energetici
	Range di controllo minore da parte degli occupanti	Capacità di raggiungere un alto numero di ricambi orari	Estremamente flessibile
		Controllo diretto da parte dell'occupante	Controllo diretto da parte dell'occupante
Svantaggi	Costo di installazione e di manutenzione superiore rispetto a quella naturale	Difficile prevedere il comportamento della ventilazione in funzione dei parametri dell'aria esterna	Costo di installazione e di manutenzione può essere alto
	Potenziale rumore del macchinario	Impossibilità di creare zone ad alta e bassa pressione per dirigere i flussi d'aria	Può essere difficile da progettare in modo efficiente
		Facilmente influenzabile dal comportamento dell'occupante	
Riduce il livello di comfort dell'occupante se il clima è troppo caldo o troppo freddo			

The background features a complex, abstract wireframe structure composed of numerous thin, green lines. These lines form a series of overlapping, curved surfaces that create a sense of depth and movement, resembling a mesh or a digital landscape. The lines are most dense in the lower-left and lower-right areas, while they become sparser towards the top-left corner.

4.LA SIMULAZIONE ENERGETICA E CFD

4.1 Approccio della simulazione energetica e CFD

Gli argomenti trattati in questo capitolo sono approfonditi nel saggio di ricerca allegato alla tesi.

Esistono 3 tipi di simulazione energetica in relazione alla precisione temporale che viene utilizzata:

- *Simulazione stazionaria e semi-stazionaria*

La simulazione stazionaria assume una precisione temporale ridotta, considerando una temperatura media per la stagione di riscaldamento e raffrescamento, mentre quella semi-stazionaria assume una precisione mensile. In questi due tipi di simulazione si effettua il bilancio termico attraverso il confronto tra temperature dell'ambiente esterno ed interno considerando la trasmittanza della superficie come costante nel tempo senza sfasamento e senza massa. Gli input di queste simulazioni sono la localizzazione, i volumi, un'indicazione dell'impiantistica e delle prestazioni termiche dell'involucro edilizio.

Esse sono usate comunemente per la valutazione energetica degli edifici o nelle

prime fasi di progettazione, per avere un'idea generale dell'andamento dei fabbisogni energetici.

- *Simulazione dinamica*

Ha una precisione oraria o sub-oraria. Questa precisione permette di avere una descrizione più accurata del comportamento dell'edificio in relazione alla variazione dei parametri dell'ambiente esterno, come pressione, temperatura, apporti solari, ecc. Si possono implementare input variabili nel tempo anche per le caratteristiche dell'edificio, come ad esempio i sistemi di controllo per le schermature e l'illuminazione oltre a tenere conto dell'effetto dello sfasamento.

Grazie alla sua precisione si può impiegare per ottimizzare gli apporti energetici ed i consumi, il comportamento dell'edificio e la scelta degli impianti.

L'unica problematica di questo tipo di simulazione si verifica nel caso in cui non siano disponibili sufficienti informazioni dell'edificio, poiché il livello di dettaglio richiesto per gli input è più elevato rispetto alle precedenti.

Esistono tre tipi di approccio per le simulazioni energetiche: approccio nodale, approccio zonale, approccio della computazione fluidodinamica (CFD)^[53].

- *Approccio nodale*

La simulazione energetica di software come EnergyPlus si basano sull'approccio nodale, detto anche tecnica multizona. Esso considera ogni zona all'interno dell'edificio come un volume omogeneo caratterizzato da variabili uniformi. Perciò ogni zona è approssimata ad un nodo che viene descritto con unica temperatura, pressione, umidità, ecc.

Non solo i volumi delle zone vengono assimilati a dei nodi ma anche pareti esterne, partizioni, finestre o apporti interni. Le equazioni di bilancio termico vengono risolte per ogni nodo del sistema. Per questo motivo è considerato un sistema unidimensionale. **Fig.25.**

Il grande vantaggio di questa tecnica risiede nel calcolare le condizioni energetiche di zone, anche di grandi dimensioni in breve tempo. E' particolarmente utilizzata per valutare i consumi energetici. Tuttavia, la semplificazione adottata da questa metodologia rende complesso, se non impossibile, valutare parametri o situazioni specifiche che variano significativamente all'interno della zona, come ad esempio la qualità dell'aria ed il comfort, l'impatto di un apporto interno sull'ambiente circostante, ecc.

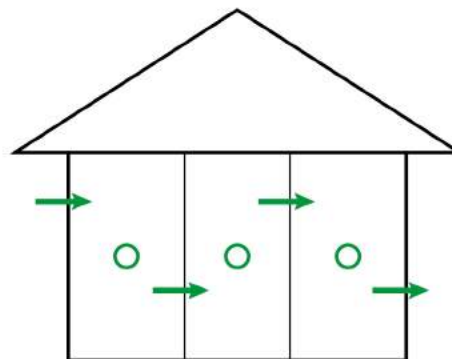


Fig.25 Schema concettuale dell'approccio nodale
Rielaborato da: Aurélie Foucquier, Sylvain Robert, Frédéric Suard, Louis Stéphan, Arnaud Jay, (2013), "State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review"

- *Approccio zonale*

E' una semplificazione del CFD. Questo sistema suddivide la stanza in diverse celle e risolve le equazioni di bilancio per ogni cella del sistema estrapolando i risultati in una sezione dell'edificio. Per questo motivo è descritto come un approccio bidimensionale. **Fig.26.**

I vantaggi sono la valutazione della distribuzione spaziale di temperatura, pressione, concentrazione degli inquinanti, velocità dell'aria senza un tempo di computazione eccessivo. Tuttavia, essendo una semplificazione del CFD, esso raggiunge una precisione limitata in particolare se impiegato su geometrie complesse.

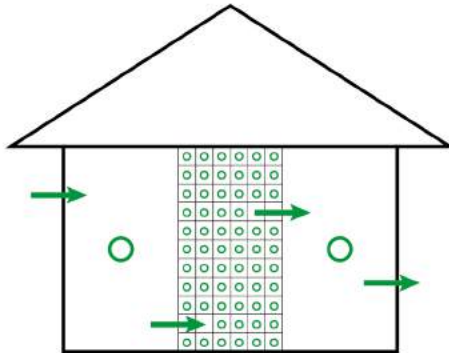


Fig.26 Schema concettuale dell'approccio zonale
Rielaborato da: Aurélie Foucquier, Sylvain Robert, Frédéric Suard, Louis Stéphan, Arnaud Jay, (2013), "State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review"

- *Approccio CFD*

Si basa sulla computazione dinamica dei fluidi che è una branca di fisica che studia il movimento dei fluidi e delle forze che agiscono su di essi. È basata sulle equazioni di Navier-Stokes che descrivono come pressione, velocità, densità e temperatura di un fluido in movimento sono relazionate.

Esso è l'approccio più completo poiché permette di studiare geometrie complesse ed è spesso utilizzato per la sua abilità nel produrre una descrizione dettagliata del flusso d'aria. Permette un'analisi più approfondita della distribuzione dell'aria che sarebbe difficile e dispendioso ottenere utilizzando tecniche tradizionali^[54].

Grazie al livello di dettaglio dei risultati le

applicazioni sono molteplici. Inizialmente era utilizzato per il design di componenti industriali e successivamente ha trovato applicazione nel settore edilizio. Può essere utilizzato per la progettazione a livello di quartiere per evitare le isole di calore e controllare i flussi d'aria intorno agli edifici^[55], per supportare la progettazione di edifici serviti dalla ventilazione naturale^[56], per supportare il progetto del sistema HVAC^[57], e per analizzare situazioni specifiche come il flusso d'aria all'interno di una facciata ventilata^[58].

Per supportare la progettazione di un edificio NZEB, bisogna considerare i parametri dell'ambiente che circonda l'edificio e di come essi interagiscano per poter sfruttare al massimo le potenzialità del sito.

Questi parametri venivano studiati sperimentalmente attraverso il tunnel del vento ma richiedevano un grande dispendio sia economico che di tempo. Oggi, si possono simulare con i software CFD così da valutare già dalle fasi iniziali di progetto i comportamenti dei flussi d'aria.

I dati necessari per eseguire una simulazione CFD possono essere raccolti in due categorie. La prima riguarda i parametri fisici, cioè geometria dell'edificio, flussi termici da apparecchiature, occupanti ed illuminazione, flussi d'aria, ecc. mentre il secondo

raccoglie i parametri necessari per la computazione e serve principalmente per bilanciare precisione e velocità nello sviluppo dei risultati. Queste variabili includono la topologia della griglia, gli errori residui, i modelli di turbolenza, le iterazioni di calcolo, ecc.

Per analizzare il flusso di un fluido, l'ambiente in analisi, definito dominio, è diviso in sotto-domini, così da poter studiare geometrie complessi. I sotto-domini sono spesso chiamati elementi o celle e se raggruppati sono definiti griglia. Le equazioni che li governano sono discretizzate e risolte all'interno di ogni cella. **Fig.27.**

La griglia è uno degli elementi più importanti e più difficili da controllare, il livello di accuratezza e di computazione dei risultati aumenta all'aumentare della sua precisione^[59]. Infatti, una griglia con un passo troppo largo rischia di perdere informazioni utili sui flussi, specialmente se il modello è complesso, al contrario una griglia trop-

po fitta aumenterà notevolmente i tempi di computazione senza migliorare in modo significativo la precisione dei risultati.

Una volta che la griglia è definita le condizioni di contorno devono essere inserite per impostare gli input della simulazione. Condizioni quali velocità e portate definiscono come un flusso entra o esca dal modello, altre informazioni, come i flussi termici, definiscono lo scambio di energia tra il modello e l'ambiente confinante. Infatti, le condizioni di contorno connettono il modello con l'ambiente che lo circonda, senza di loro la simulazione non è definita e nella maggior parte dei casi non può precedere^[60].

Impostare manualmente le condizioni di contorno è molto complesso poiché un cambiamento minore in una di loro può comportare una grande differenza nei risultati^[61] oltre che a richiedere un grande dispendio di tempo, poiché bisogna dovrebbero essere impostati manualmente i

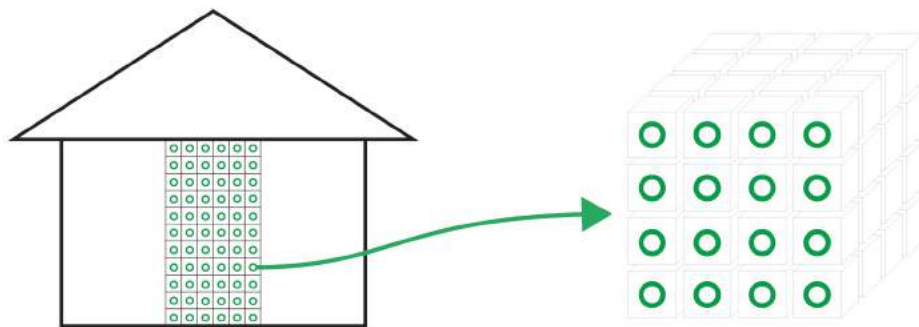


Fig.27 Schema concettuale dell'approccio CFD

parametri di tutte le superfici presenti nel dominio.

Il CFD è uno strumento molto utile poiché una volta impostate le condizioni di contorno si possono studiare differenti scenari di interesse valutando il comportamento dell'ambiente in funzione alle modifiche apportate a queste condizioni^[62]. Ad esempio, studiare l'andamento dei flussi d'aria quando sono aperte alcune finestre piuttosto che altre.

I campi di applicazione, i vantaggi e gli svantaggi delle tre tecniche sono riassunti in **Tab.5**.

4.2 Coupling method

Come già citato, impostare manualmente le condizioni di contorno per effettuare la simulazione CFD è un'operazione molto complessa e può portare a risultati errati nel caso non fosse eseguita in maniera sufficientemente precisa. Per questo motivo si utilizza il coupling method, che consiste nell'integrazione delle informazioni fornite dalla simulazione energetica e dalla simulazione CFD così da sfruttare le capacità di entrambi i programmi, **Tab.6**^[63].

Infatti, la simulazione energetica può for-

Tab.5 Comparazione tra l'approccio nodale, l'approccio zonale e l'approccio CFD

Rielaborato da: Aurélie Fouquier, Sylvain Robert, Frédéric Suard, Louis Stéphan, Arnaud Jay, (2013), "State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review"

Sommaro delle tecniche di simulazione				
Tecnica	Specifiche	Campo di applicazione	Vantaggi	Svantaggi
Approccio nodale	Una cella equivale ad una zona con variabili uniformi (1 dimensione)	-Valutazione energetica complessiva dell'edificio	Analisi complessiva dell'edificio in breve tempo con impostazione del modello relativamente semplice	Difficoltà nello studio di situazioni specifiche
Approccio zonale	Una cella equivale ad una porzione della zona con variabili diverse per ogni cella	-Comfort termico -ventilazione naturale -ventilazione meccanica	Distribuzione spaziale delle variabili di stato (temperatura, pressione, velocità, ecc.)	Tempo di computazione relativamente alto, richiesta di molte informazioni riguardanti i flussi.
Approccio CFD	Una cella equivale ad un volume di controllo di dimensioni ridotte. Le variabili nella zona sono diverse per ogni volume di controllo	-Comfort termico -Distribuzione contaminanti -IAQ	Descrizione dettagliata del flusso d'aria interna all'edificio. Precisione notevole rispetto alle altre tecniche nella valutazione di tutti i parametri dell'aria	Tempo di computazione notevole, difficoltà nell'impostazione degli input del modello.

Tab.6 Comparazione tra le caratteristiche della simulazione energetica e della simulazione CFD

Rielaborato da: Zhiqiang John Zhai, Qingyan Yan Chen, (2005), "Performance of coupled building energy and CFD simulations"

	Simulazione energetica	Simulazione CFD
Impatto del clima e del sole	X	
Risposta dell'involucro edilizio	X	
Sistema HVAC	X	
Consumo di energia	X	
Comportamento dell'occupante	X	
Simulazione dinamica	X	
Comfort termico		X
Qualità dell'aria		X
Distribuzione dell'aria		X

nire i dati riguardanti riscaldamento, raffrescamento e temperature delle superfici interne al CFD, viceversa il CFD può fornire i flussi termici convettivi, la velocità e la temperatura dell'aria alla simulazione energetica.

Il coupling può essere interno o esterno. Il primo sviluppa i calcoli per entrambe le simulazioni dallo stesso motore di calcolo, mentre il secondo procede trattando separatamente le due simulazioni ed i dati vengono scambiati per ogni intervallo di tempo prestabilito.

Il numero di interazioni ed il numero di intervalli di tempo in cui vengono scambiate le informazioni definiscono la tipologia di coupling esterno. **Fig.28.**

- *Coupling statico*

Può essere tramite un unico step oppure due step. Questo metodo è il più rapido poiché, nel primo caso, invia le informazioni dalla simulazione energetica a quella CFD un'unica volta e nel secondo caso oltre a ricevere le informazioni il CFD le rimanda alla simulazione energetica

- *Coupling dinamico*

Può essere diviso in tre sotto categorie in base al numero di intervalli di tempo in cui è presente l'iterazione tra simulazione energetica e CFD.

Il più semplice è il coupling in un unico intervallo di tempo dove le informazioni vengono scambiate tra le due simulazioni fino a raggiungere la convergenza in un

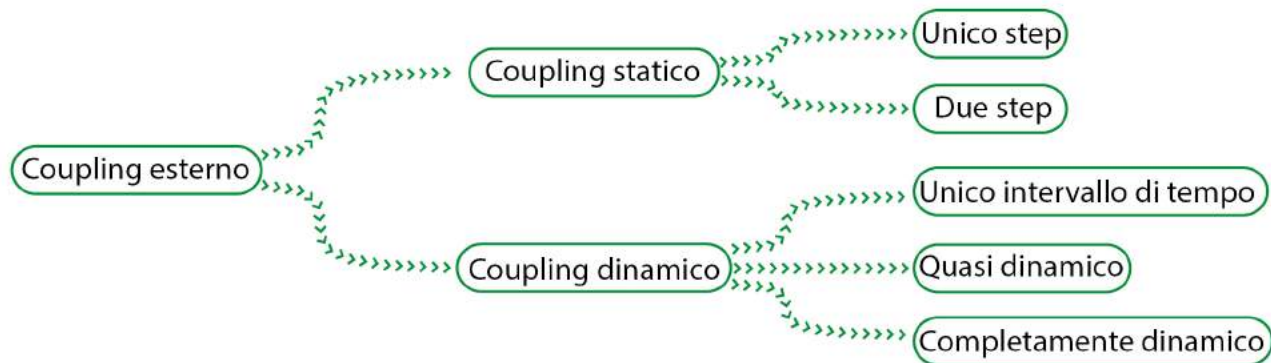


Fig.28 Tipologie di coupling esterno

Rielaborato da: Zhiqiang John Zhai, Qingyan Yan Chen, (2005), "Performance of coupled building energy and CFD simulations"

singolo intervallo, Lo scambio quasi dinamico scambia informazioni per diversi intervalli di tempo prestabiliti ed infine lo scambio completamente dinamico scambia informazioni fino a raggiungere la convergenza per ogni intervallo di tempo. Sebbene la precisione aumenterà con il numero di scambi bisogna considerare che anche il tempo di computazione aumenterà.

4.3 Software

La scelta del software è stata effettuata attraverso una ricerca letteraria con l'obiettivo di definire il software capace di:

- Effettuare la simulazione energetica dinamica per valutare l'edificio nel suo complesso
- Effettuare la simulazione CFD per analizzare i flussi d'aria all'interno dell'ambiente
- Capacità di correlare la simulazione energetica e simulazione CFD così da assumere le condizioni al contorno e definire la griglia
- Avere un'elevata precisione nella definizione dei risultati per entrambe le simulazioni per quanto riguarda:
 - Temperatura
 - Pressione
 - Velocità
 - Consumi energetici
 - Parametri di comfort
 - Parametri di qualità dell'aria

Inizialmente la ricerca ha fornito molteplici software disponibili ma sono stati analizzati nello specifico DesignBuilder, IDA-ICE e TRNSYS in quanto sono risultati i più completi per soddisfare gli obiettivi.

- TRNSYS^[64]

Transient System Simulation (TRNSYS) è un programma di simulazione dinamica sviluppato dall'università del Wisconsin, la prima versione è stata lanciata nel 1998 con una struttura modulare che è stata concepita per risolvere sistemi energetici complessi dividendoli in una serie di componenti.

La maggior parte delle simulazioni mira a valutare le performance dei sistemi elettrici o termici. Nel ramo dell'edilizia è impiegato per analizzare i componenti del sistema HVAC, i quali vengono analizzati insieme al bilancio termico dell'involucro e ai flussi d'aria.

TRNSYS non ha un modulo CFD integrato, per questa ragione deve essere integrato da un software CFD esterno, al quale TRNSYS può trasmettere le condizioni al contorno una volta che la simulazione energetica è stata eseguita.

Dalla ricerca letteraria è emerso che TRNSYS viene sovente integrato con FLUENT^[65], software di simulazione CFD che si basa sulle equazioni di Navier-Stokes per descrivere il flusso d'aria ed i suoi pa-

rametri. Sebbene TRNSYS sia capace di fornire la maggior parte delle condizioni al contorno, per impostare la ventilazione naturale necessita di un'estensione chiamata COMIS che permette di calcolare i parametri necessari per la ventilazione naturale, free cooling e facciate ventilate utilizzando COMIS come motore di calcolo, il quale è un programma di simulazione multizona per la ventilazione naturale ed infiltrazioni.

I risultati ottenibili tramite la simulazione CFD sono vincolati alla scelta del programma da utilizzare per il coupling, nel caso specifico FLUENT fornisce i risultati dettagliati per tutti i parametri dell'aria e, attraverso una post-computazione, per i parametri del comfort termico.

- IDA-ICE^[66]

IDA Indoor Climate and Energy è un software di simulazione dinamica sviluppato da EQUA nel 1998. Esso è usato prevalentemente per lo studio del clima interno e delle prestazioni energetiche.

I risultati forniti dalla simulazione dinamica sono la temperatura dell'aria, le temperature superficiali, la stima del comfort attraverso il PMV ed il PPD, la temperatura operativa per la stima del comfort asimmetrico e la stratificazione della temperatura nei sistemi di ventilazione per dislocamento.

IDA-ICE prevede un modulo CFD interno

ma nella versione analizzata (IDA-ICE v.4.8) è ancora in fase beta. Per questo motivo al tempo attuale è meglio utilizzare un software esterno per la simulazione CFD. Tuttavia, la generazione automatica della griglia e l'assunzione delle condizioni al contorno della simulazione sono già implementate. I risultati dell'analisi CFD interna sono la temperatura dell'aria, i flussi termici trasmessi attraverso le superfici e la pressione.

- DesignBuilder^[67]

DesignBuilder è un software di modellazione 3D che offre tutte le caratteristiche necessarie per sviluppare il progetto architettonico e la simulazione energetica.

È stato sviluppato in Inghilterra nel 2005 come prima interfaccia grafica per EnergyPlus^[68] che è un software di simulazione energetica dinamica sviluppato dal governo degli Stati Uniti dal 2001.

Il suo principale utilizzo è la valutazione delle performance energetiche fornendo risultati come temperature interne, fabbisogni energetici, consumi ecc.

Il modulo CFD è presente nella versione Engineering Pro che permette di generare la griglia ed importare le condizioni di contorno dal modello e dalla simulazione energetica.

Il CFD restituisce diversi risultati: in un primo step temperatura, velocità e pressione. A seguito dello sviluppo di questi risultati si può eseguire un'analisi sul comfort, la quale fornisce dati sul PMV, PPD e si possono calcolare LMA e ACE per quanto riguarda la distribuzione dell'aria.

La scelta finale del software da utilizzare per le simulazioni da effettuare sul caso studio è ricaduta su DesignBuilder poiché la modellazione 3D, la simulazione energetica ed il modulo CFD cooperano direttamente senza bisogno di integrazioni da software aggiuntivi.

Questo semplifica notevolmente il numero di interazioni necessarie e garantisce una precisione dei risultati più completa ed accurata evitando le eventuali complicazioni dovute all'interoperabilità tra i vari programmi.

The background features a complex, abstract design of thin, light blue lines. On the left side, there is a dense, overlapping grid of lines that curves and flows downwards. This grid transitions into a series of parallel, wavy lines that sweep across the bottom and right side of the page. The overall effect is a sense of dynamic movement and depth, set against a plain white background.

5.IL CASO STUDIO

5.1 CorTau House

Il caso studio è una villetta monofamiliare chiamata CorTau House situata a Livorno Ferraris in provincia di Vercelli, che rappresenta una riqualificazione in chiave energetica di un tradizionale edificio rurale.

Fig.29 . La nuova costruzione è inserita al

di sotto del tetto preesistente, la cui struttura e tegole sono stati conservati, come anche i pilastri in mattoni.

Il progetto è distribuito su un unico livello con una superficie utile di 130 m² ed un volume di 390 m³ diviso in zona giorno e zona notte. Quest'ultima è posizionata su un piano mezzato. Tutti gli spazi sono stati



Fig.29 Cortau House

progettati ponendo particolare attenzione ai principi bioclimatici. Le finestre più ampie sono posizionate sul fronte Sud per massimizzare gli apporti solari durante l'inverno e sono dotate di un sistema di ombreggiamento per ridurli durante l'estate.

Il solaio piano si estende oltre i muri perimetrali per creare uno sbalzo che aiuti a bilanciare l'ingresso degli apporti solari diretti per evitare problemi di overheating durante l'estate.

Le soluzioni energetiche utilizzate sono in linea con i target nZEB e puntano al raggiungimento della massima efficienza e a garantire le migliori di comfort per l'occupante. I muri perimetrali sono isolati esternamente con pannelli in lana di roccia da 16 cm che aiutano a ridurre la trasmittanza media delle pareti a $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. I ponti termici generati dall'intersezione con i pilastri posizionati sul perimetro della casa vengono eliminati posizionando questi ultimi esternamente allo strato di isolamento. Anche i solai sono isolati con pannelli di lana di roccia resistenti a compressione con una trasmittanza complessiva di $0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$ per il solaio controterra e di $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ per il soffitto.

L'impianto è composto da una pompa di calore acqua-acqua con una potenza no-

minale di 8 kW che utilizza il pozzo di falda superficiale, Essa serve sia il riscaldamento che il raffrescamento attraverso il pavimento radiante sia l'acqua calda sanitaria. Il pavimento radiante ha due collettori, uno per la zona giorno e uno per la zona notte così da poter impostare due set-point diversi sia per il riscaldamento che per il raffrescamento.

L'edificio è servito di un sistema di ventilazione meccanica controllata dotato di recuperatore di calore che garantisce il numero minimo di ricambi d'aria orari e controlla temperatura, umidità e la qualità dell'aria.

L'intero impianto è elettrico e tutti i consumi per riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, apparecchiature e cucina, la quale è fornita da fornelli e forno elettrici sono coperti dall'impianto fotovoltaico da $7 \text{ kW}_{\text{peak}}$ collegato alla rete, posizionato sul fronte Sud della copertura preesistente.

5.2 Creazione del modello energetico

Per effettuare la simulazione energetica di un modello la prima operazione consiste nella trasformazione del modello architettonico in modello energetico. **Fig.30** In

altre parole il modello energetico basa le sue fondamenta su delle regole imposte da normativa e focalizza la sua attenzione sia sulle dimensioni reali che sulle prestazioni degli elementi che compongono l'edificio. Perciò occorre inserire i dati necessari per la valutazione energetica ed eliminare quelli superflui per evitare di sovraccaricare il programma con informazioni che non influiranno i risultati.

5.2.1 Suddivisione in zone

Il primo step consiste nel suddividere l'edificio in zone termiche, le quali vengono definite dalla normativa UNI TS 11300 parte 1^[69] come: "Parte dell'ambiente climatizzato man-

tenuto a temperatura (ed eventualmente umidità) uniforme attraverso lo stesso impianto di climatizzazione"^[69]

La stessa norma spiega anche come devono essere definiti i confini delle zone termiche:

"[...] Per definire i confini delle zone termiche si considerano le superfici esterne dell'involucro del volume climatizzato e le superfici di mezzera degli elementi che dividono zone termiche adiacenti"^[69]

Considerando che la CorTau House ha un pavimento radiante dotato di due collettori per dare la possibilità di impostare set-



Fig.30 Modello energetico di DesignBuilder

point diversi tra zona giorno e zona notte si è scelto di suddividere l'edificio in due zone termiche per rappresentare questa possibilità. Grazie a questa suddivisione si potranno anche impostare parametri diversi per quanto riguarda gli apporti interni, le attività dell'occupante, ecc.

Per rappresentare al meglio la situazione reale nelle simulazione sono stati aggiunti gli elementi confinanti all'edificio. L'edificio a Ovest e la bussola vengono considerati come ambienti non climatizzati mentre i pilastri ed il tetto preesistenti vengono

considerati come elementi di ombreggiatura. **Fig.31.**

5.2.2 Località

La CorTau House è situata a Livorno Ferraris, Vercelli. Tra i file climatici disponibili nel database di EnergyPlus è stato scelto quello di Torino Caselle, il quale presenta delle caratteristiche prossime a quelle della località dove è situato l'edificio. **Tab.7.** I dati forniti file climatico sono:



Fig.31 Suddivisione in zone

- Temperatura dell'aria esterna
- Radiazione diffusa
- Radiazione diretta
- Azimuth solare
- Velocità del vento
- Direzione del vento
- Umidità relativa

Partendo dalla zona climatica la normativa UNI TS 11300 parte 1^[69] definisce il periodo di riscaldamento e raffrescamento con le relative temperatura di set-point e set-back.

Per la zona climatica E sono definiti un periodo di riscaldamento che va dal 15 ottobre fino al 15 aprile con un set-point di 20°C dalle 7:00 alle 20:00 e un set-back di 18°C dalle 20:00 alle 7:00. Mentre il periodo di

raffrescamento possiede un set-point di 26° dalle 7:00 alle 20:00 e un set-back di 27°C dalle 20:00 alle 7:00. **Tab.8.**

5.2.3 Geometria

Gli spazi interni sono distribuiti su un unico livello. La superficie complessiva è di 130 m² divisi in zona giorno e zona notte, quest'ultima situata su un piano mezzato, per cui le altezze sono rispettivamente di 3,15 m e 2,7 m. La zona giorno è composta da cucina, sala, bagno ed antibagno per un totale di circa 74 m², mentre la zona notte è formata da due camere da letto, studio, bagno ed antibagno di 57 m². **Fig.32-Fig.33.**

Tab.7 Dati del luogo di riferimento

Caratteristiche	
Latitudine	45,22 °C
Longitudine	7,65 °C
Altitudine	287 m
Zona climatica	E

Tab.8 Periodo di riscaldamento secondo la normativa UNI TS 11300^[69], e periodo di raffrescamento

Periodo di riscaldamento e raffrescamento			
Periodo	Durata	T _{Set-Point}	T _{Set-Back}
Raffrescamento	15 ottobre - 15 aprile	20°C	18°C
Riscaldamento	15 aprile - ottobre	26°C	27°C

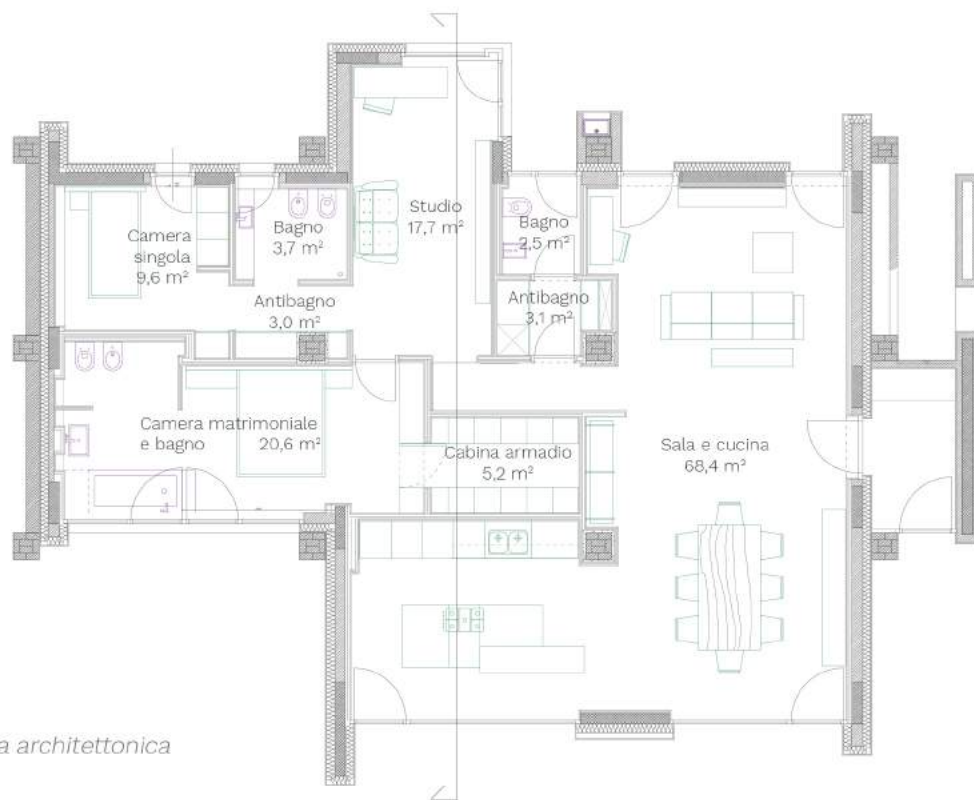


Fig.32 Pianta architettonica

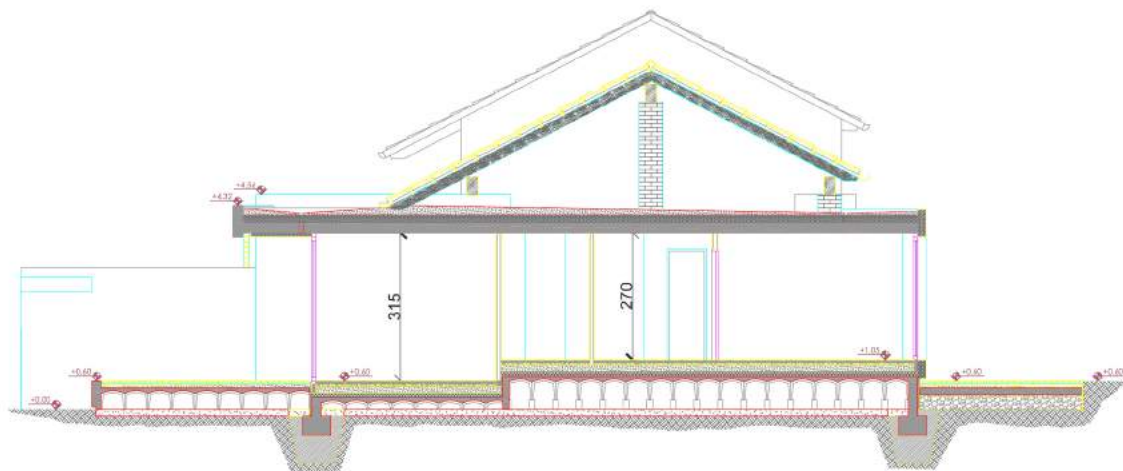


Fig.33 Sezione trasversale

5.2.4 Stratigrafie

- Copertura

La copertura piana ha la stratigrafia rappresentata in **Fig.34a** con un valore di trasmittanza termica complessiva pari a $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. E' stato utilizzato un isolamento in lana di roccia da 16 cm posizionato esternamente per diminuire le dispersioni e per evitare la condensa.

- Solaio controterra

Il solaio controterra ha la stratigrafia composta come in **Fig.34b** ed è posizionato sopra gli igloo con un valore di trasmittanza termica pari a $0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$. E' stato posto uno strato di 10 cm di XPS al di sotto del massetto copri impianti sia per contenere le dispersioni verso il terreno che per direzionare il flusso termico del pavimento radiante verso l'interno dell'edificio.

- Superficie Opaca

Le superfici esterne hanno una struttura varia, in mattoni o in cemento armato con stratigrafia rappresentata in **Fig.34c** con un valore di trasmittanza termica medio di $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. E' stato utilizzato un isolamento in lana di roccia da 16 cm posizionato esternamente per diminuire le dispersioni ed evitare la condensa.

- Partizioni interne

Le partizioni interne sono composte da doppia lastra di cartongesso con isolante all'interno **Fig.34d**. Gli spessori sono variabili per accomodare il passaggio degli impianti.

- Superficie trasparente

I serramenti scelti sono composti da triplo vetro basso emissivo con argon e da un telaio in alluminio con thermal break con una trasmittanza complessiva di $0,96 \text{ W/m}^2\text{K}$.

5.2.5 Schermature

Tutte le finestre sono attrezzate con un sistema di schermatura esterno.

Quest'ultimo viene considerato aperto durante tutto l'inverno mentre durante l'estate le schermature sono regolate in modo tale che siano aperte nel momento in cui l'apporto solare sia inferiore a 300 W/m^2 e che si chiudano nel momento in cui vengono superati.

Grazie a questo controllo si riduce drasticamente il fabbisogno di raffrescamento che altrimenti rappresenterebbe la porzione più abbondante di richiesta energetica negli edifici NZEB dove la dispersione di calore durante l'estate è praticamente assente.

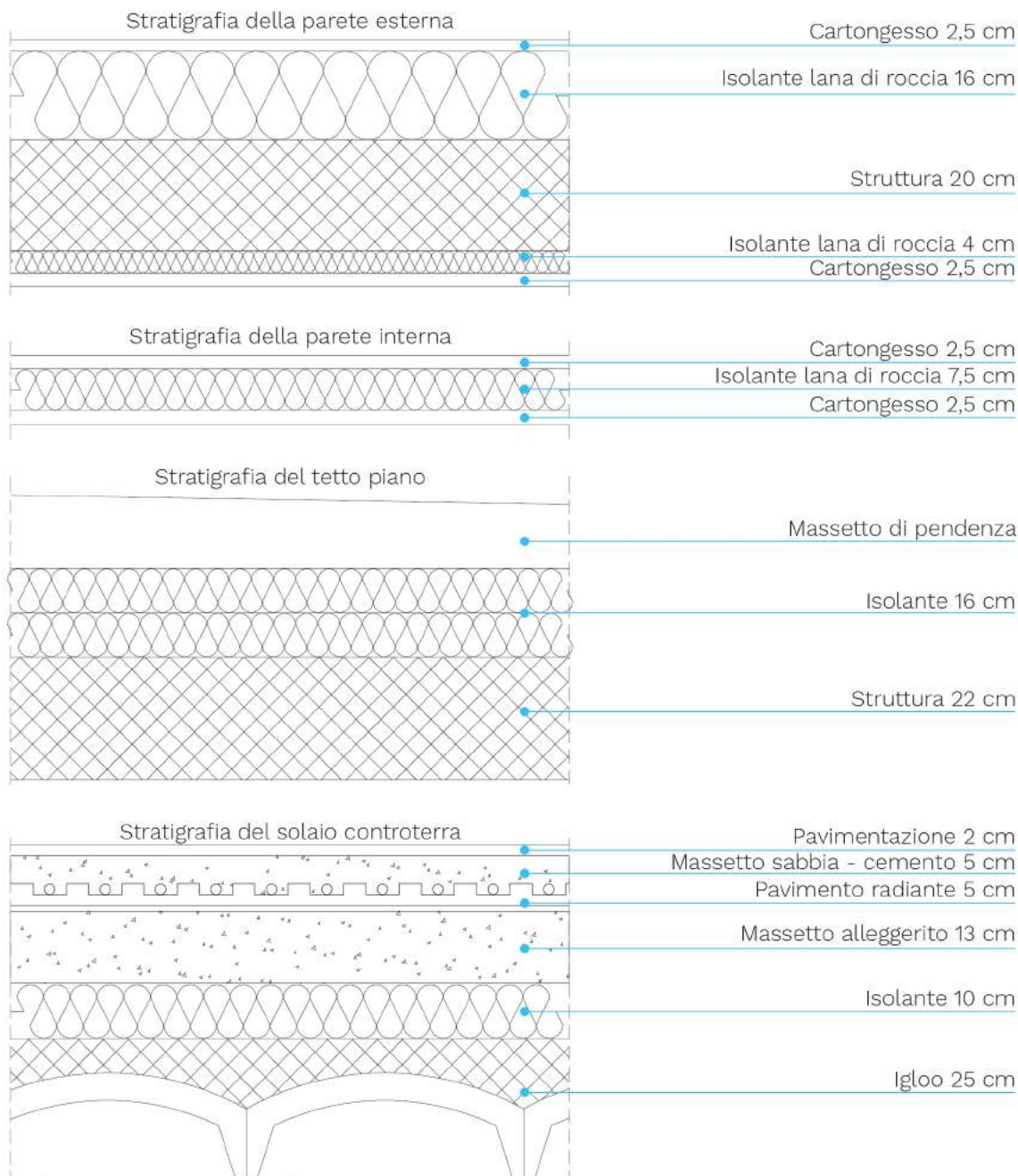


Fig.34 Stratigrafie

5.2.6 Apporti interni

Per la valutazione del fabbisogno energetico di un edificio è necessario inserire in fase di modellazione gli apporti interni di occupanti, apparecchiature ed illuminazione. Essi infatti rappresentano una porzione importante del bilancio energetico, in particolare all'interno di edifici NZEB dove spesso superano gli apporti energetici di riscaldamento e raffrescamento.

- *Occupanti*

Gli occupanti emettono calore all'interno dell'edificio attraverso l'attività metabolica. Il tasso di occupazione è considerato come 0,04 persone/m² come definito dalla normativa UNI 10339^[48]. Per rendere più precisa la valutazione dell'apporto sono stati utilizzati due valori diversi di metabolismo: 1,0 met per la zona notte e 1,2 met per la zona giorno. Le schedule sono state impostate come riportato in **Fig.35**, in accordo con quanto riportato nel questionario allegato alla tesi^[70].

- *Illuminazione*

La normativa ASHRAE standard 90^[71] definisce per l'illuminazione un apporto medio di 3,88 W/m². La schedule, è strettamente legata a quella dell'occupante in quanto si ipotizza che le luci siano accese quan-

do l'occupante è presente ad esclusione dell'orario notturno. **Fig.36**.

Per tenere in considerazione che l'illuminazione sarà necessaria per una durata di tempo superiore durante l'inverno e più breve durante l'estate, è stato utilizzato un controllo sull'illuminazione naturale, più precisamente le luci saranno accese se l'apporto solare sarà inferiore a 300 W/m²

- *Apparecchiature*

Il valore medio per le apparecchiature è pari a 5,89 W/m² in accordo con quanto riportato nella normativa ASHRAE standard 90^[71]. Le schedule sono state impostate secondo la normativa UNI TS 11300^[69]. **Fig.37**.

5.2.7 Ventilazione ed infiltrazione

Le infiltrazioni sono presenti in qualunque tipo di edificio. L'elevata prestazione dell'isolamento di un edificio NZEB riduce il numero di ricambi orari, che in tutte le simulazioni è stato considerato pari a 0,1 ac/h. Per la ventilazione meccanica vengono definite le portate secondo la normativa UNI 10339^[48] e la normativa UNI EN 15251^[32] con l'obiettivo di paragonarle in funzione di consumi, comfort e distribuzione dell'aria. Secondo la prima normativa la portata da utilizzare è di circa 0,5 ac/h mentre per la seconda la portata è circa a 1,1 ac/h.



Fig.35 Schedule per l'illuminazione



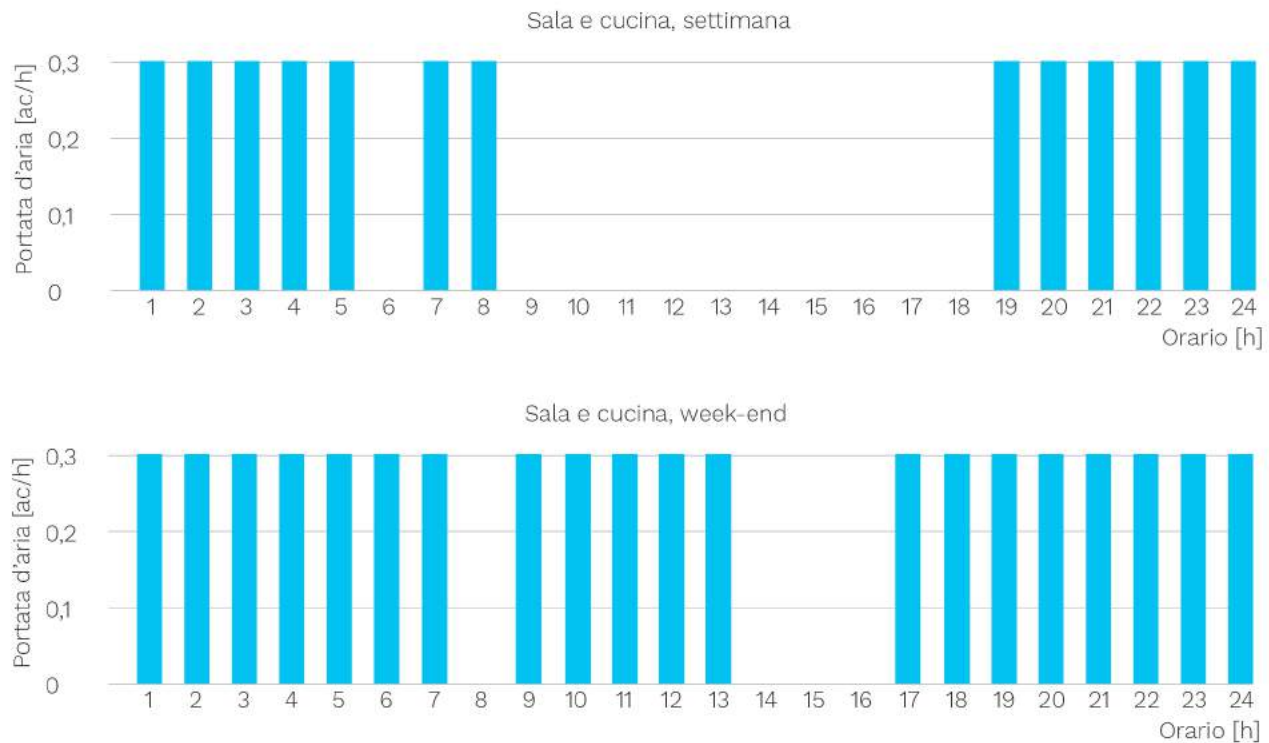
Fig.36 Schedule per gli occupanti



Fig.37 Schedule per le apparecchiature

La ventilazione naturale viene inizialmente impostata con una portata d'aria costante pari a 0,3 ac/h per la prima simulazione, con l'obiettivo di calibrare il modello. Considerando che un ricambio d'aria costante

pari a 0,3 ac/h rappresenta una situazione prevalentemente teorica, a seguito della prima simulazione la ventilazione naturale è stata dettagliata maggiormente seguendo le indicazioni del questionario^[70]. **Fig.38.**



Nota: gli orari compresi tra le 00:00 e le 06:00 durante la settimana e gli orari compresi tra le 00:00 e le 08:00 durante il week-end avranno le finestre aperte solo nelle simulazioni in cui è presente il raffrescamento passivo

Fig.38 a) Schedules per l'apertura delle finestre nella sala e cucina

Rielaborato da: Klaudia Izabela Penkala, Tesi di laurea magistrale (2018), "Occupant Behaviour vs energy consumption in a residential Building. Survey analysis of occupant behaviour in Italian residential context and application of Home Automation Scenarios to improve energy efficiency - CorTau House Case Study"^[70].

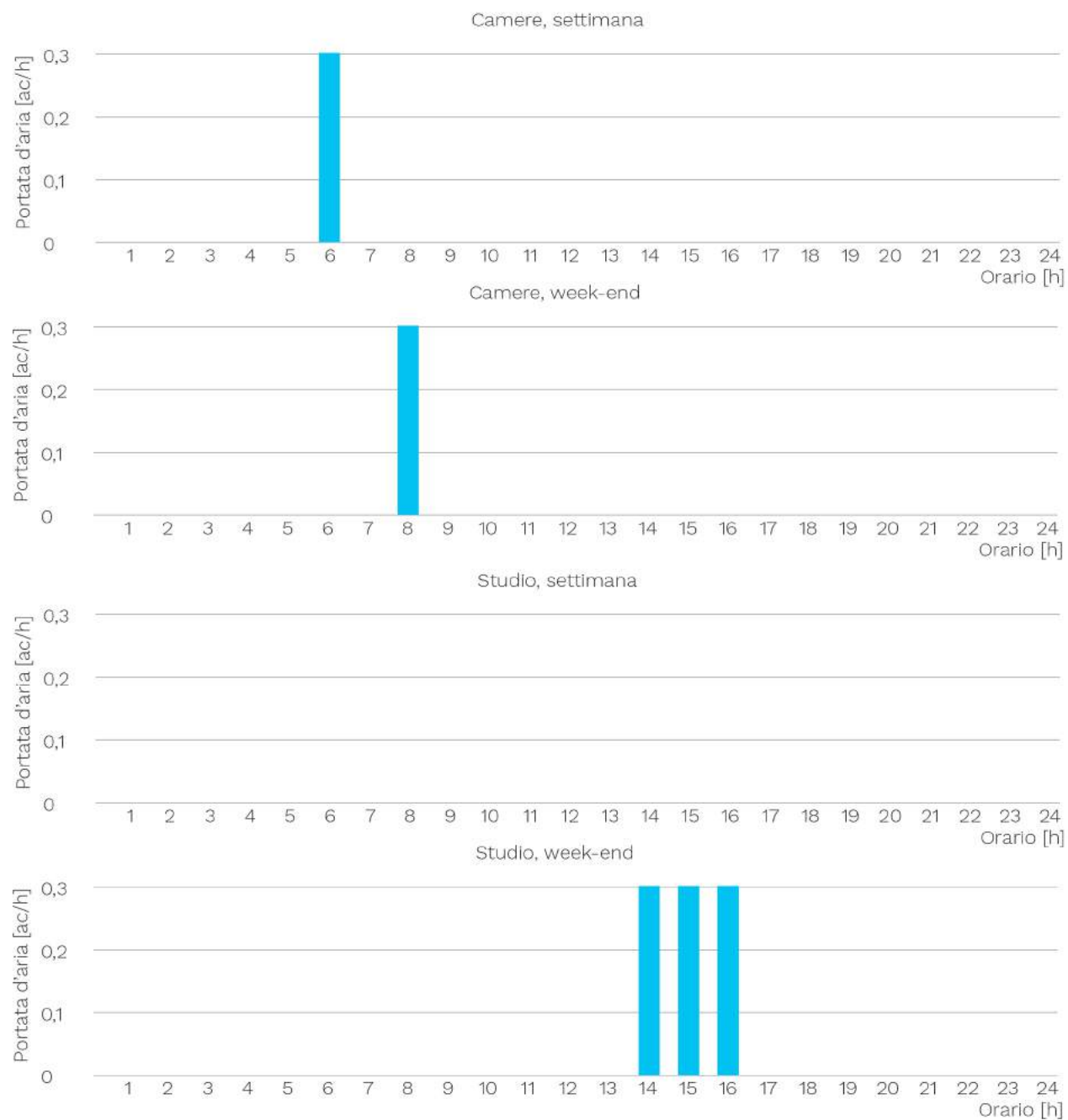


Fig.38 b) Schedules per l'apertura delle finestre nelle camere e nello studio^[70]

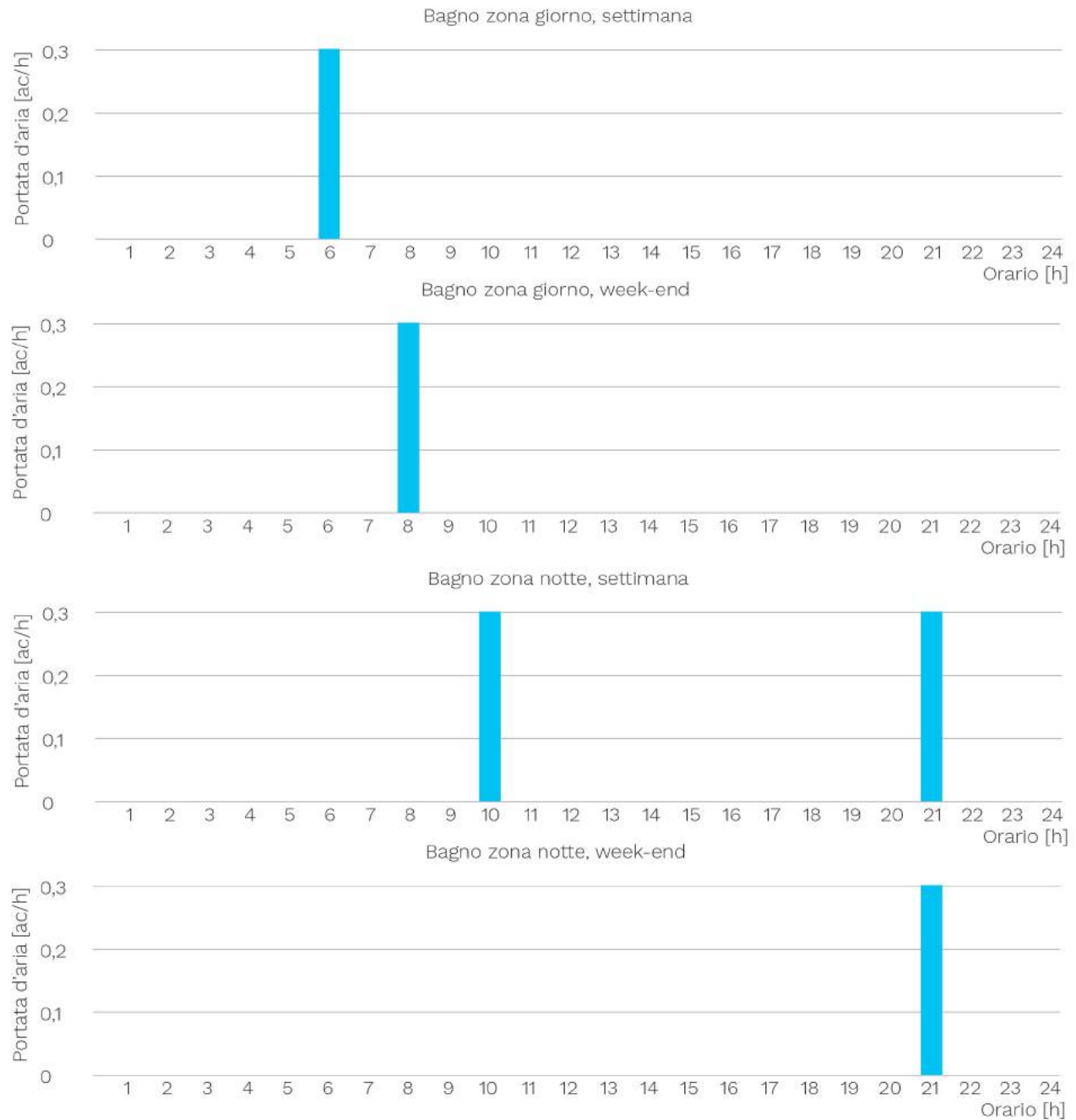


Fig.38 c) Schedule per l'apertura delle finestre nel bagno della zona giorno e nel bagno della zona notte^[70]

5.3 Creazione del modello CFD

Come spiegato nel capitolo 4.1, il CFD si compone di due categorie di parametri, ossia parametri fisici e parametri di computazione.

La prima categoria condivide molte informazioni con il modello utilizzato per la simulazione energetica, infatti non sarà necessario modificare geometria, stratigrafie, schedule, set-point, ecc. Sarà invece necessario definire le portate di ventilazione e gli apporti interni.

La seconda categoria invece comprende i dati inerenti alla griglia, gli errori residui e i parametri di calcolo per la computazione. I quali verranno parzialmente assunti in autonomia dal modello ed in parte impostati manualmente secondo le esigenze di simulazione.

5.3.1 Suddivisione in zone

La suddivisione in zone della simulazione energetica è differente rispetto a quella utilizzata dalla simulazione CFD. La simulazione CFD si basa interamente sulla configurazione dei vari locali e la suddivisione viene definita dalle partizioni interne e dalle porte interne. Si risentirà delle zone termiche della simulazione energetica quando

verranno assunte le portate d'aria immessa tramite la ventilazione naturale come condizioni al contorno. DesignBuilder le calcola tenendo in considerazione che la differenza di temperatura tra interno ed esterno. Dove la temperatura interna è il valore medio della zona termica in cui è presente la finestra in analisi. Perciò, limitare l'estensione della zona ad un unico locale può aiutare a ridurre l'imprecisione in quanto la media tra le temperature è eseguita su una superficie minore.

5.3.2 Apporti interni

La simulazione CFD non permette di importare gli apporti interni dalla simulazione energetica come condizioni al contorno. Il che significa che dovranno essere inseriti manualmente per rappresentare al meglio la situazione reale. DesignBuilder permette di inserire dei componenti ai quali è possibile assegnare delle proprietà per rappresentare gli apporti interni.

I parametri che si possono impostare sono:

- *Temperatura superficiale*

Utilizzato per definire la temperatura di una superficie, ad esempio per il pavimento radiante

- *Flusso termico*

Utilizzato per definire il flusso termico di un componente, ad esempio l'apporto di occupanti, illuminazione e apparecchiature

- *Immissione d'aria*

Utilizzato per definire posizione, portata, temperatura, angolo di immissione e velocità minima di una bocchetta d'immissione

- *Estrazione d'aria*

Utilizzato per definire posizione e portata di una bocchetta di estrazione

- *Illuminazione*

Le sorgenti luminose sono rappresentate da un componente a cui è stato assegnato il flusso termico emesso.

Partendo dal risultato della simulazione energetica che definisce per ogni zona la quantità di energia emessa dagli apporti interni di illuminazione è stato definito l'apporto di ogni singola sorgente suddividendo l'energia complessiva in funzione della superficie che la sorgente deve illuminare. La posizione delle sorgenti luminose è stata definita dal progetto architettonico. **Fig.39.**

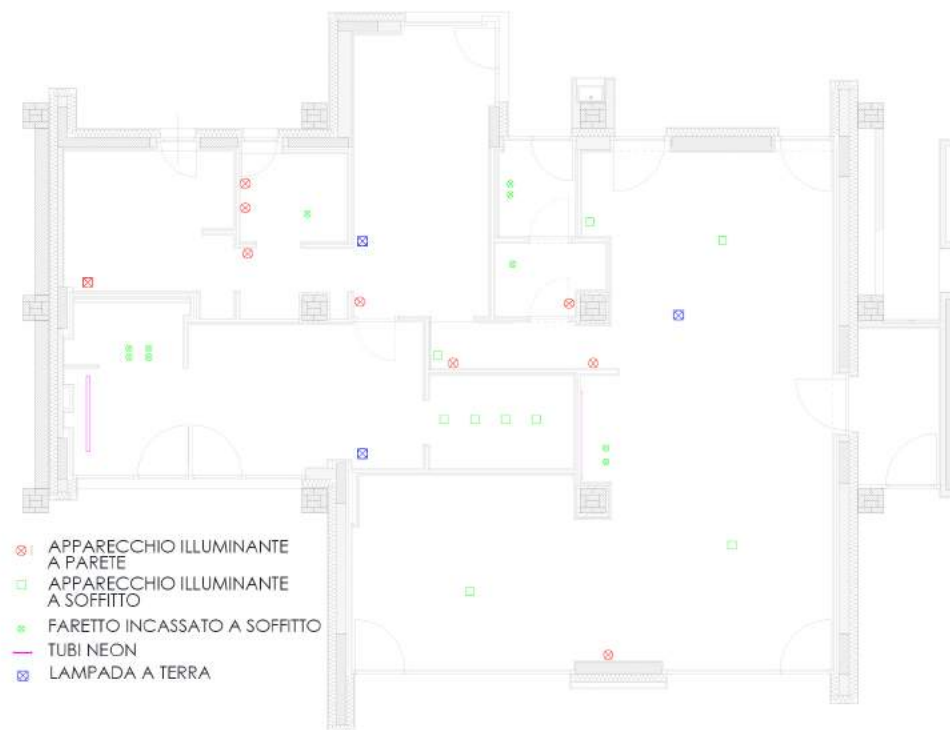


Fig.39 Pianta delle sorgenti luminose

- Apparecchiature

Le apparecchiature sono rappresentate da un componente a cui è stato assegnato il flusso termico emesso.

Il flusso termico complessivo viene assunto grazie ai risultati della simulazione energetica ed è stato suddiviso in base alle apparecchiature presenti in ogni locale.

Il flusso termico complessivo viene assunto grazie ai risultati della simulazione energetica ed è stato suddiviso in base alle apparecchiature presenti in ogni locale. Sono state impostate due configurazioni per gli apporti interni dovuti alle apparecchiature. Il primo rappresenta una situazione in cui le apparecchiature sono in stand-by mentre nella seconda le appa-

recchiature della cucina sono in funzione. La posizione delle apparecchiature è stata definita in accordo con la pianta architettonica dell'edificio riportata in **Fig.40**.

- Occupanti

Gli occupanti sono inclusi nella simulazione CFD attraverso l'ausilio dei componenti, ai quali è stato assegnato un flusso termico. La posizione dell'occupante sarà relazionata all'occupazione definita dalle schedule impostate per la simulazione energetica. In funzione dell'orario di simu-



Fig.40 Pianta delle apparecchiature

lazione il loro apporto interno sarà pari a 1,2 met nel periodo in cui saranno presenti nella zona giorno e pari a 1,0 met quando saranno posizionati nella zona notte.

5.3.3 Temperature superficiali interne

Le temperature superficiali interne sono importate direttamente dalla simulazione energetica per ogni orario di simulazione ad eccezione del pavimento radiante, al quale è stata assegnata una temperatura pari a 29°C per il periodo di riscaldamento e pari a 19°C per il periodo di raffrescamento che corrispondono al limite massimo ed al limite minimo in accordo con la normativa UNI EN 1264^[72] (basata sui risultati del discomfort termico illustrato nella normativa UNI 10339^[48]), per evitare di creare un discomfort termico locale dovuto alla temperatura superficiale del pavimento.

5.3.4 Ventilazione naturale ed infiltrazioni

La ventilazione naturale è stata calcolata sfruttando la simulazione energetica che riporta la portata in ingresso ed in uscita di ogni finestra. Le portate sono state successivamente pesate per ottenere un numero di ricambi orari pari a 0,3 ac/h.

Per quanto riguarda le infiltrazioni, la simulazione CFD di DesignBuilder non permette di importarle dalla simulazione energetica poiché non è in grado di bilanciare la massa in ingresso ed in uscita.

Tuttavia, considerare il modello senza le infiltrazioni è un'approssimazione non accettabile poiché costituiscono un fattore fondamentale nella configurazione dei percorsi dell'aria. Perciò, è stata impostata una simulazione energetica dove tutte le finestre (anche quelle non apribili) possiedono una percentuale di apertura pari al 2%. Le portate definite dai risultati da questa simulazione sono state successivamente pesate per ottenere un ricambio d'aria pari a 0,1 ac/h così da tenere in considerazione le infiltrazioni intorno alle finestre. Questo permette di avere un ingresso d'aria pari a quello delle infiltrazioni con l'approssimazione di considerarle unicamente intorno ad i serramenti.

5.3.5 Ventilazione meccanica

La simulazione CFD tratta la ventilazione meccanica diversamente da quella naturale, infatti non permette di importare le sue caratteristiche dalla simulazione energetica. Tuttavia, permette di posizionare e definire le portate di mandata e di ripresa

delle singole bocchette attraverso l'utilizzo dei componenti.

La posizione è stata definita in accordo con la pianta architettonica. **Fig.41**. Mentre le portate sono state calcolate utilizzando le normative UNI 10339^[48] e UNI EN 15251^[32] illustrate nel capitolo 3.2. Tuttavia, la simulazione CFD richiede che la somma delle portate di mandata sia identica a quella di ripresa per cui le portate delle bocchette di ripresa sono state pesate per coincidere con quelle di mandata.

5.3.6 Definizione della griglia

Prima di impostare la griglia deve essere definito dominio della simulazione. In tutte le simulazioni effettuate è composto dall'intero edificio così da poter analizzare il comportamento generale.

La griglia viene definita automaticamente dal modulo CFD per tutto il dominio dopo aver definito il passo massimo e la tolleranza tra le celle. Inoltre la griglia adatta autonomamente la precisione in base alla

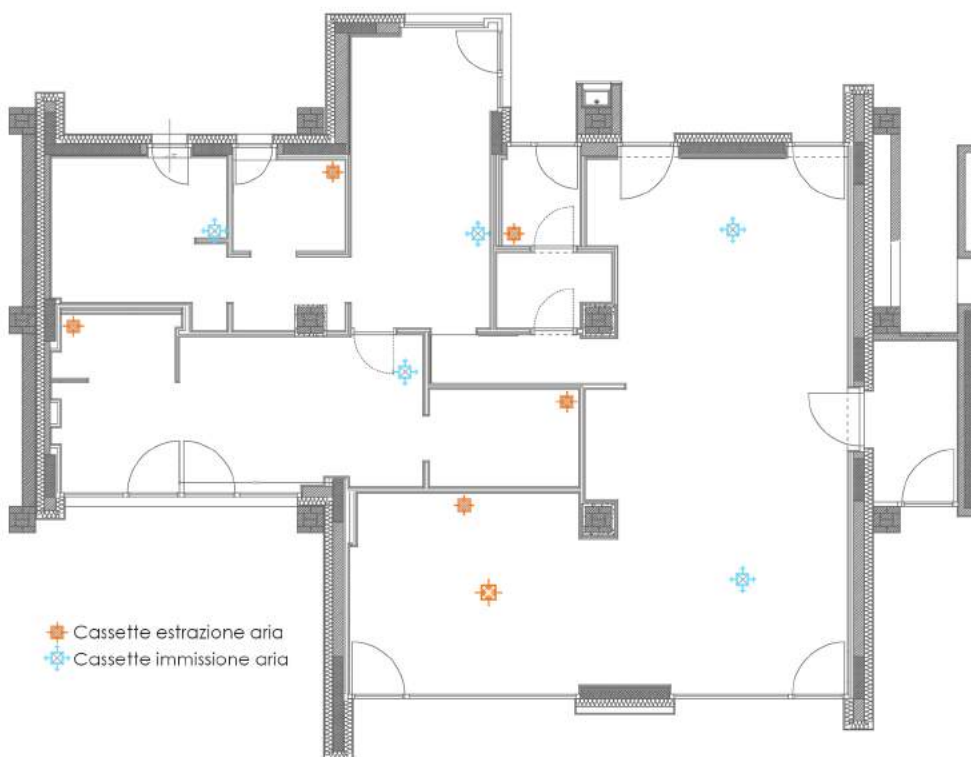


Fig.41 Pianta delle bocchette di immissione e di estrazione

quantità di dettagli, ad esempio in corrispondenza di una sorgente di calore la griglia sarà più densa per aumentare la precisione nella descrizione del comportamento nell'ambiente circostante.

La generazione automatica della griglia permette di risparmiare una notevole quantità di tempo, tuttavia, è possibile adattare manualmente la griglia nel caso si voglia aumentare la precisione localmente.

Inoltre, è possibile selezionare una cella di controllo, la quale permette di vedere l'andamento di un parametro tra quelli disponibili per ogni interazione della simulazione.

5.4 Simulazioni energetiche e CFD

Per analizzare l'efficacia di varie tipologie di ventilazione dal punto di vista dei consumi, del comfort, della distribuzione e qualità dell'aria sono stati simulati diversi scenari, tramite simulazioni sia energetiche che CFD. La prima mira a definire il comportamento generale dell'edificio sia per quanto riguarda i consumi energetici che per quanto riguarda il comfort. Mentre la seconda ha l'obiettivo di verificare nel dettaglio la presenza di eventuali discomfort locali e valutare la distribuzione e la qualità dell'aria attraverso l'età dell'aria.

Le simulazioni energetiche e quelle CFD sono strettamente collegate tra loro. Infatti, per impostare le simulazioni CFD sono state assunte le condizioni al contorno dalla simulazione energetica. Nello specifico, tutti le simulazioni CFD che analizzano la ventilazione naturale assumono le condizioni al contorno dalla simulazione energetica numero 3, la quale rappresenta lo scenario più dettagliato, mentre quelle che riguardano la ventilazione meccanica ed ibrida vengono associate alle rispettive simulazioni energetiche in funzione della portata d'aria analizzata. **Tab.9.**

5.4.1 Simulazioni energetiche

- Scenario 1

Questa simulazione mira a calibrare il modello verificando l'esattezza degli input inseriti e dei risultati paragonandoli alla letteratura già esistente sull'argomento^[73]. L'intero sistema impiantistico viene considerato con un rendimento pari al 100% così che la simulazione restituisca i fabbisogni energetici ambientali dell'edificio. Il sistema di ventilazione che serve l'edificio è quello naturale, la cui portata è stata impostata a 0,3 ac/h durante l'intero arco della giornata.

Tab.9 Relazione tra gli scenari analizzati con la simulazione energetica e con la simulazione CFD.

Tipologia di ventilazione	Simulazione energetica utilizzata per l'assunzione delle condizioni al contorno	Simulazione CFD
Ventilazione naturale	Scenario 3: Ventilazione naturale con portata pari a 0,3 ac/h e <i>free cooling</i>	Scenario 1: orario 08:15, 20 Gennaio
		Scenario 2: orario 08:15, 20 Gennaio
		Scenario 5: orario 13:45, 27 Agosto
		Scenario 7: orario 19:45, 17 Agosto
		Scenario 10: orario 23:45, 17 Agosto
Ventilazione meccanica	Scenario 5: Ventilazione meccanica con portata pari a 0,5 ac/h (UNI EN 10339)	Scenario 3: orario 08:15, 20 Gennaio
		Scenario 6: orario 13:45, 27 Luglio
		Scenario 8: orario 19:45, 17 Agosto
	Scenario 11: orario 23:45, 17 Agosto	
	Scenario 6: Ventilazione meccanica con portata pari a 1,1 ac/h (UNI EN 15251)	Scenario 4: orario 08:15, 20 Gennaio
Ventilazione ibrida	Scenario 8: Ventilazione ibrida, Ventilazione meccanica con portata pari a 0,5 ac/h (UNI EN 10339), portata ridotta nei periodi non occupati; finestre aperte nella zona giorno	Scenario 9: orario 19:45, 17 Agosto

- Scenario 2

La ventilazione naturale ipotizzata nella simulazione precedente rappresenta una condizione prevalentemente teorica. Infatti, è improbabile che l'occupante lasci aperte le finestre in modo costante durante l'inverno dove l'aria sarà fredda e creerà discomfort o nei periodi in cui non è presente creando evidenti problemi di sicurezza. Per questa ragione la seconda simulazione punta ad affinare le impostazioni della ventilazione naturale utilizzando delle schedule che si basano sulle informazioni

fornite dal questionario eseguito da *Kludia Izabela Penkala* nella sua tesi di laurea "*Occupant Behaviour vs energy consumption in a residential Building. Survey analysis of occupant behaviour in Italian residential context and application of Home Automation Scenarios to improve energy efficiency - CorTau House Case Study*"^[70]. Esso definisce l'attività svolta dall'occupante in un determinato orario, rendendo più facile la definizione della posizione e di conseguenza il locale ventilato. Le schedule utilizzate per questo scenario sono riportate nel

capitolo 5.2.7 *Ventilazione ed infiltrazione*, Fig.38.

- Scenario 3

Come spiegato precedentemente, uno dei grandi vantaggi della ventilazione naturale risiede nella capacità di creare il *free cooling* nelle ore in cui la temperatura esterna è minore di quella interna. Per valutarne l'efficacia da un punto di vista energetico, in aggiunta alle schedule della ventilazione naturale della simulazione 2 è stato impostato che le finestre della zona giorno vengano aperte durante la notte per la durata del periodo di raffrescamento.

- Scenario 4 - Scenario 5 - Scenario 6

L'edificio è servito dalla ventilazione meccanica con una portata d'aria costante durante l'intero arco della giornata. La differenza tra le tre simulazioni risiede nella portata, la quale è impostata pari a 0,3 ac/h nella simulazione 4 per poter effettuare un confronto diretto con la simulazione 1, a 0,5 ac/h circa come definito dalla normativa UNI 10339^[48] per la simulazione 5 e pari a 1,10 ac/h come definito dalla normativa UNI EN 15251^[32] per la simulazione 6. Questa comparazione mira a evidenziare le differenze tra le condizioni di comfort e dei consumi energetici in relazione all'aumento della portata d'aria.

- Scenario 7

La normativa UNI TS 11300^[69] esplicita che con l'obiettivo di riduzione dei consumi energetici si può ridurre la portata d'aria immessa durante i periodi in cui l'occupante non è presente. Per simulare questa condizione viene ridotta la portata della ventilazione meccanica negli orari compresi tra le 09:00 e le 19:00 dei giorni lavorativi, dove si suppone che l'occupante non sia presente.

- Scenario 8

Rappresenta la condizione in cui l'edificio è servito dalla ventilazione ibrida. La ventilazione meccanica supporta l'intero edificio ad eccezione della zona giorno dove si alterna con la ventilazione naturale. Quest'ultima è attiva in funzione delle schedule impostate per la simulazione 2. Inoltre la portata della ventilazione meccanica viene ridotta negli orari non occupati come nella simulazione 7.

5.4.2 Simulazioni CFD

- *Orario di simulazione: 08:15, 20 gennaio*

Gli scenari 1, 2, 3 e 4 sono eseguiti in data 20 gennaio alle ore 8:15 rappresentativo di un giorno caratteristico invernale, nel quale le temperature esterne sono decisamente inferiori rispetto a quelle interne. L'orario è

stato impostato alle 8:15 poichè, nel caso della ventilazione naturale, mira a rappresentare le condizioni in cui l'occupante apre le finestre delle camere appena sveglia, più per un motivo abitudinario che per raggiungere il comfort termico.

Scenario 1 - Scenario 2

Nei primi due scenari l'edificio è servito dalla ventilazione naturale con una portata complessiva di 0,3 ac/h. Le finestre sono considerate aperte nella camera matrimoniale e nella camera singola. La differenza risiede nell'apertura delle porte interne. Si è scelto di evidenziare questa differenza poichè si vuole dimostrare come la ventilazione naturale sia estremamente influenzata dall'apertura e dalla chiusura delle porte interne, specialmente se solo alcuni dei locali sono ventilati direttamente.

Nella prima simulazione le porte interne vengono considerate chiuse mentre nella seconda le porte interne vengono considerate aperte. Questi due scenari mirano a comparare le differenze tra le due configurazioni in funzione di comfort e di distribuzione dell'aria, rendendo noto che la condizione termica dell'aria esterna è sfavorevole poiché con una temperatura di 0,4°C assunta dal file climatico di DesignBuilder.

Scenario 3 - Scenario 4

In questi scenari l'edificio è servito dalla ventilazione meccanica. Nel primo caso è stata impostata una portata pari a 0,5 ac/h secondo la normativa UNI 10339^[48], nel secondo caso è stata impostata con una portata pari a 1,1 ac/h. Questi due scenari mirano a verificare le variazioni di comfort e di distribuzione dell'aria in funzione delle portate d'aria.

- *Orario di simulazione: 13:45, 27 Luglio*

Gli scenari 5 e 6 sono stati simulati alle ore 13:45 del 27 Luglio. L'orario e il giorno sono stati scelti per rappresentare una condizione tipica estiva dove la temperatura esterna è superiore rispetto a quella interna e dove gli apporti interni sono elevati e concentrati nella zona della cucina, in quanto viene ipotizzato che l'occupante stia cucinando.

Scenario 5 - Scenario 6

Nel primo scenario si ipotizza la presenza di ventilazione naturale, considerando le finestre della zona giorno sempre aperte; il secondo scenario, invece, ipotizza la presenza di ventilazione meccanica a servizio dell'intera abitazione con una portata d'aria pari a 0,5 ac/h come definito dalla normativa UNI 10339^[48]. Questi due scenari mirano a comparare le differenze tra i due

tipi di ventilazione in funzione di comfort e distribuzione dell'aria con una condizione termica sfavorevole.

- *Orario di simulazione: 19:45, 17 Agosto*
Gli scenari 7, 8 e 9 vengono simulati alle ore 19:45 del 17 Agosto. Come per la simulazione precedente si ipotizza che l'occupante stia cucinando, perciò gli apporti saranno elevati e concentrati nella zona della cucina. La differenza tra i due orari risiede nelle condizioni termiche esterne. Infatti, in questo caso la temperatura esterna sarà prossima a quella interna.

Scenario 7 - Scenario 8 - Scenario 9

Questi scenari mirano a valutare l'efficacia della ventilazione naturale, meccanica e ibrida in funzione di comfort e distribuzione dell'aria nel caso in cui non vi sia una differenza di temperatura significativo tra interno ed esterno. Nel primo scenario l'edificio sarà servito dalla ventilazione naturale, dove il locale ventilato sarà la zona giorno. Il secondo scenario utilizzerà la ventilazione meccanica con una portata pari a 0,5 ac/h come definito dalla normativa UNI 10339^[48] ed infine, lo scenario 9 rappresenterà l'edificio servito dalla ventilazione ibri-

da, la quale unirà la ventilazione meccanica con pari portata allo scenario precedente, alternandola con la ventilazione naturale nella zona giorno.

- *Orario di simulazione: 23:45, 17 Agosto*
Gli scenari 10 e 11 vengono simulati alle 23:45 del 17 Agosto. L'orario ed il giorno sono rappresentativi di una situazione tipica estiva dove sarà possibile sfruttare il *free cooling* grazie alla differenza di temperatura tra interno ed esterno.

Scenario 10 - Scenario 11

Lo scenario 10 ipotizza la presenza della ventilazione naturale con le finestre aperte nella zona giorno in accordo con quanto riportato nel questionario^[70] mentre lo scenario 11 assume la presenza della ventilazione meccanica con portata 0,5 ac/h in riferimento alla normativa UNI 10339^[48].

Queste due scenari mirano a dimostrare l'efficacia del *free cooling* creato dalla ventilazione naturale e confrontarlo con una situazione coincidente ma servita dalla ventilazione meccanica.

The background of the slide is a complex, abstract pattern of thin, blue, curved lines. These lines form a series of overlapping, concentric, and slightly irregular shapes that create a sense of depth and movement, resembling a stylized wave or a series of overlapping orbits. The lines are most dense in the lower-left and lower-right areas, where they form a grid-like pattern, and become sparser as they curve towards the top and right edges of the frame.

6.RISULTATI

6.1 Risultati della simulazione energetica

Nelle pagine a seguire vengono riportati i risultati inerenti al consumo energetico per raffrescamento, riscaldamento e ventilazione meccanica calcolati attraverso la simulazione energetica di DesignBuilder.

La prima riga del grafico rappresenta il consumo energetico per raffrescamento nella settimana estiva ed il consumo energetico per riscaldamento nella settimana invernale. La seconda riga rappresenta l'andamento delle temperatura interna, della temperatura operativa, della temperatura radiante e della temperatura esterna così da permettere di analizzare i consumi energetici in funzione delle temperature dell'ambiente interno ed esterno. Infine la terza riga rappresenta la somma delle portate della ventilazione naturale e delle infiltrazioni o della ventilazione meccanica e delle infiltrazioni. È da tenere in considerazione che le infiltrazioni saranno sempre presenti con un incidenza costante pari a 0,1 ac/h.

A seguire vengono riportati i risultati ottenuti dall'analisi del comfort attraverso il PMV, calcolato attraverso la simulazione energetica di DesignBuilder.

Sebbene l'indicatore abbia una scala di valori che parte da -3 ed arriva a +3 è stato scelto di associare alla simulazione della

settimana estiva un intorno compreso tra 0 e +1 mentre per la settimana invernale un intorno compreso tra -1 e 0. Questo poiché in tutte le simulazioni i risultati non superano mai questi valori ma soprattutto perché rende più semplice la lettura del grafico e permette di identificare facilmente la categoria di comfort a cui appartengono. Infine, vengono comparati i risultati ottenuti in funzione di comfort e consumi energetici.

Scenario 1

Ventilazione naturale con portata costante pari a 0,3 ac/h

Scenario 2

Ventilazione naturale con portata pari a 0,3 ac/h in riferimento al questionario

Scenario 3

Ventilazione naturale con portata pari a 0,3 ac/h in riferimento al questionario e raffrescamento passivo

Scenario 4

Ventilazione meccanica con portata pari a 0,3 ac/h

Scenario 5

Ventilazione meccanica con portata pari a 0,5 ac/h (UNI EN 10339)

Scenario 6

Ventilazione meccanica con portata pari a 1,1 ac/h (UNI EN 15251)

Scenario 7

Ventilazione meccanica con portata pari a 0,5 ac/h (UNI EN 10339), portata ridotta nei periodi non occupati

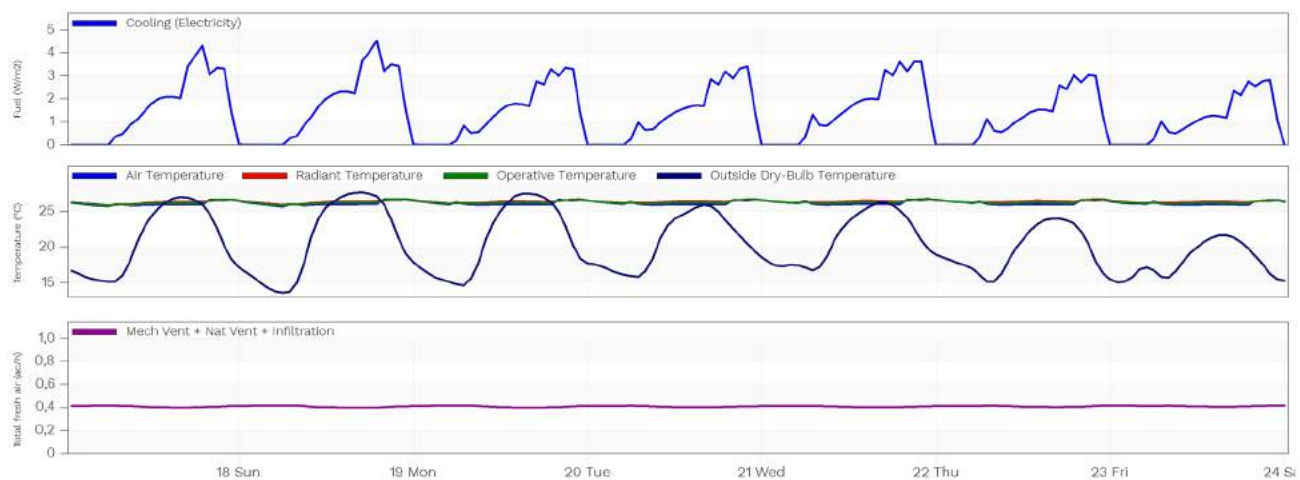
Scenario 8

Ventilazione ibrida, ventilazione meccanica con portata pari a 0,5 ac/h (UNI EN 10339), portata ridotta nei periodi non occupati; finestre aperte nella zona giorno

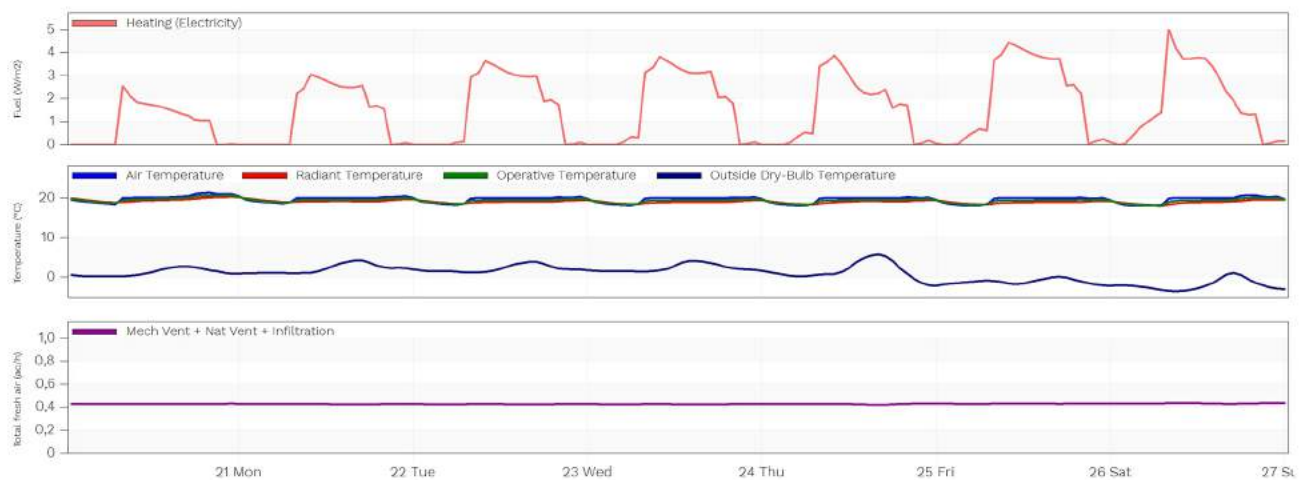
- Consumi energetici - Simulazione energetica - Scenario 1

	Riscaldamento [kWh/m ² a]	Raffrescamento [kWh/m ² a]	Ventilazione [kWh/m ² a]	Totale [kWh/m ² a]
Fabbisogni	16,99	20,48	-	37,47
Consumi	4,02	4,08	-	8,10

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto



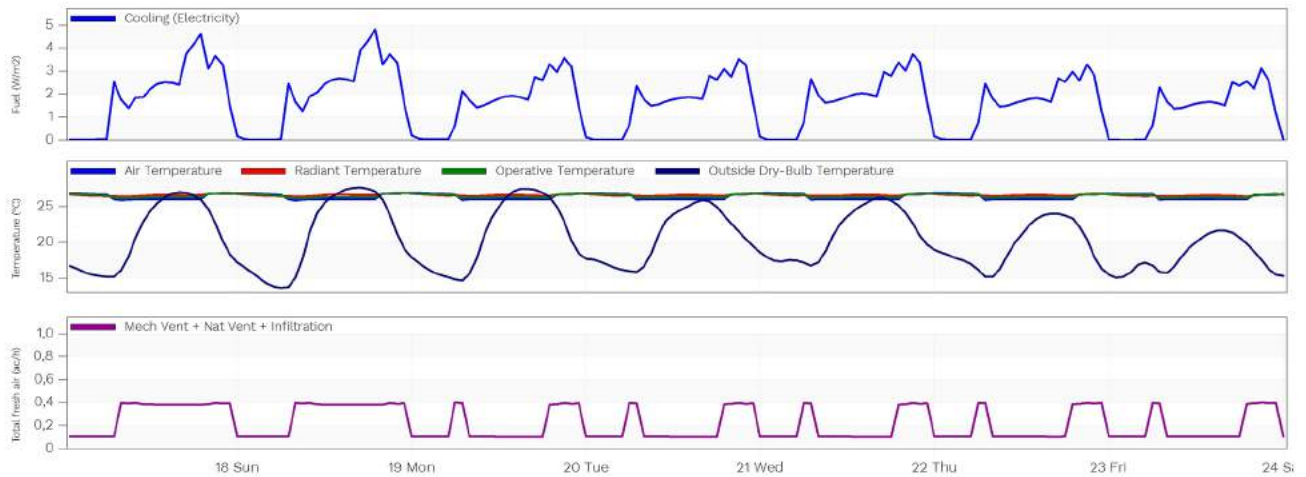
Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio



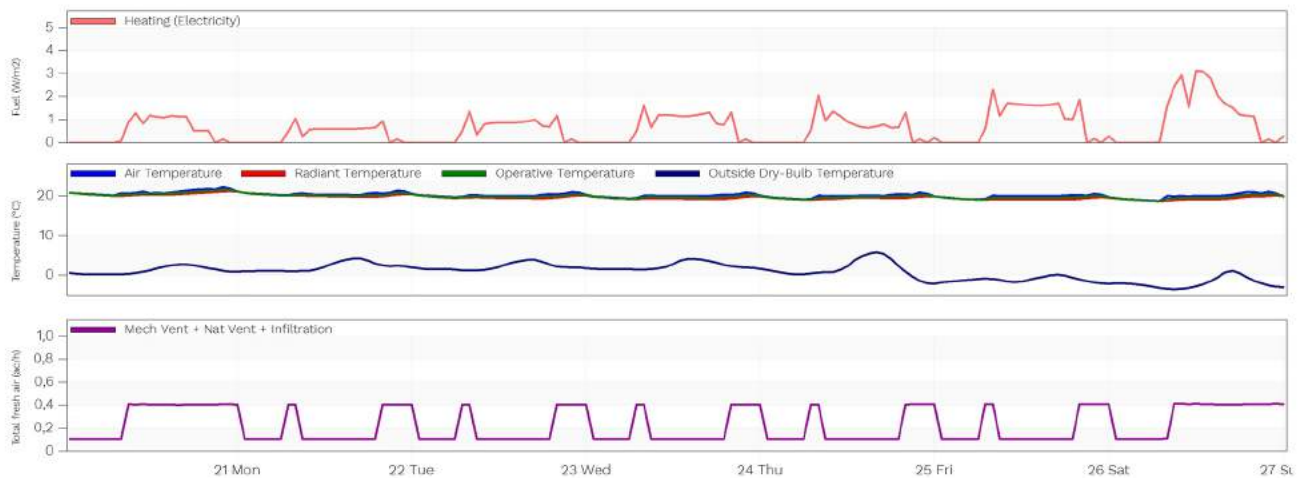
- *Consumi energetici - Simulazione energetica - Scenario 2*

	Riscaldamento [kWh/m ² a]	Raffrescamento [kWh/m ² a]	Ventilazione [kWh/m ² a]	Totale [kWh/m ² a]
Fabbisogni	7,63	24,41	-	32,04
Consumi	1,80	4,87	-	6,67

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto



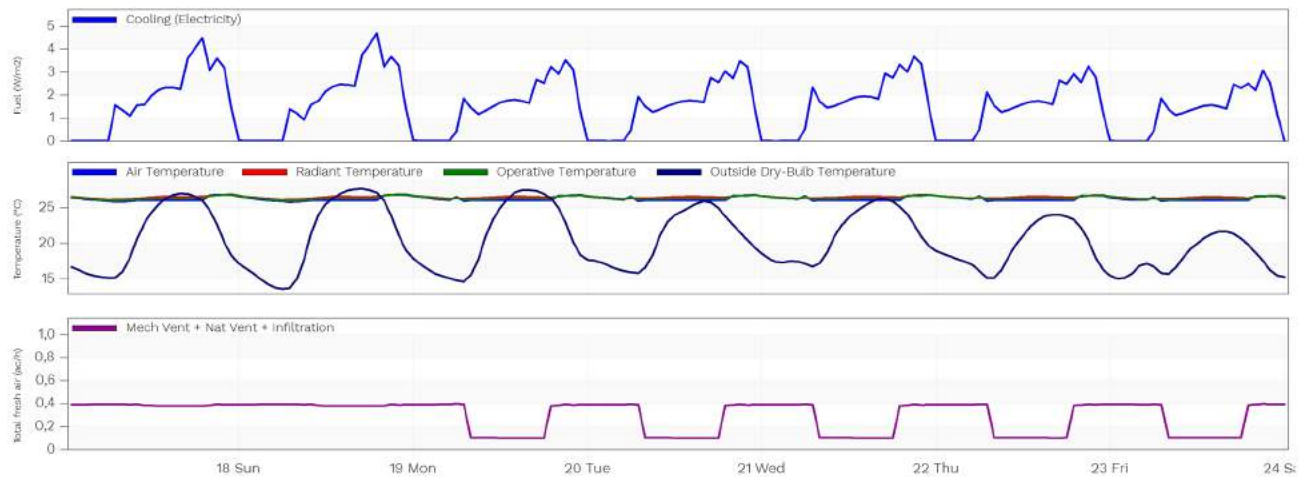
Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio



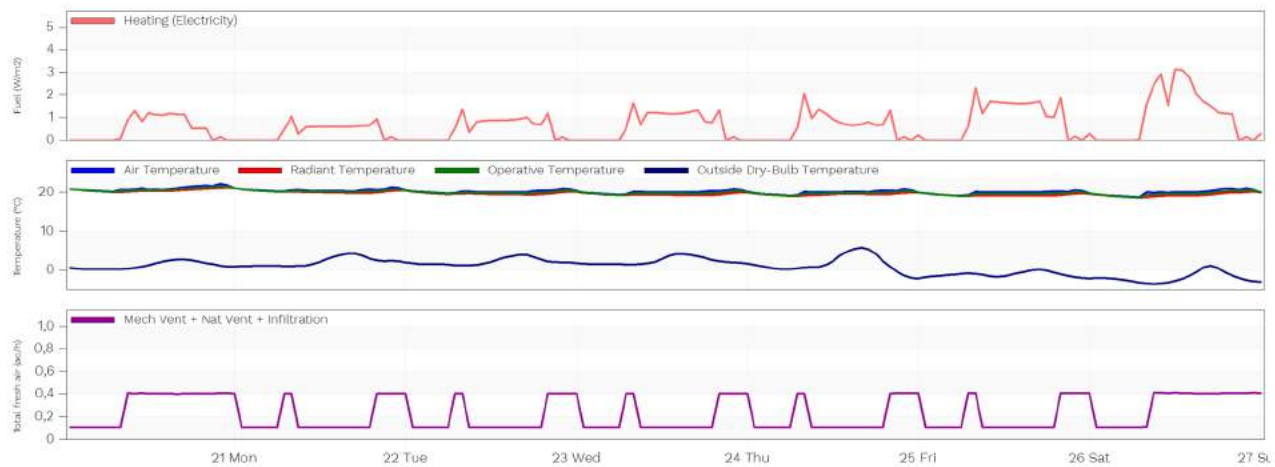
- Consumi energetici - Simulazione energetica - Scenario 3

	Riscaldamento [kWh/m ² a]	Raffrescamento [kWh/m ² a]	Ventilazione [kWh/m ² a]	Totale [kWh/m ² a]
Fabbisogni	7,63	22,08	-	29,71
Consumi	1,80	4,40	-	8,10

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto



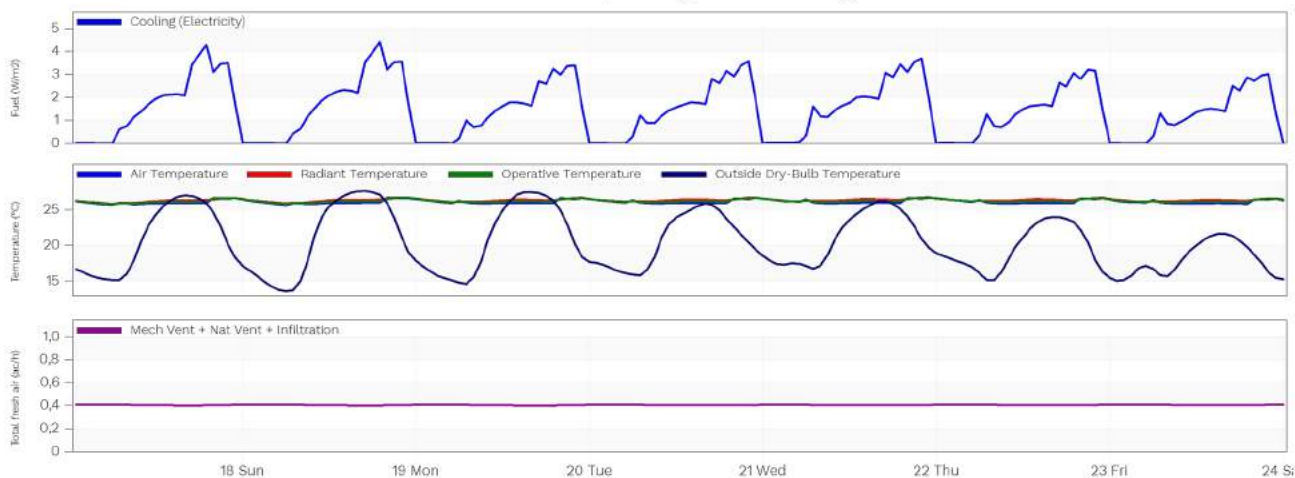
Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio



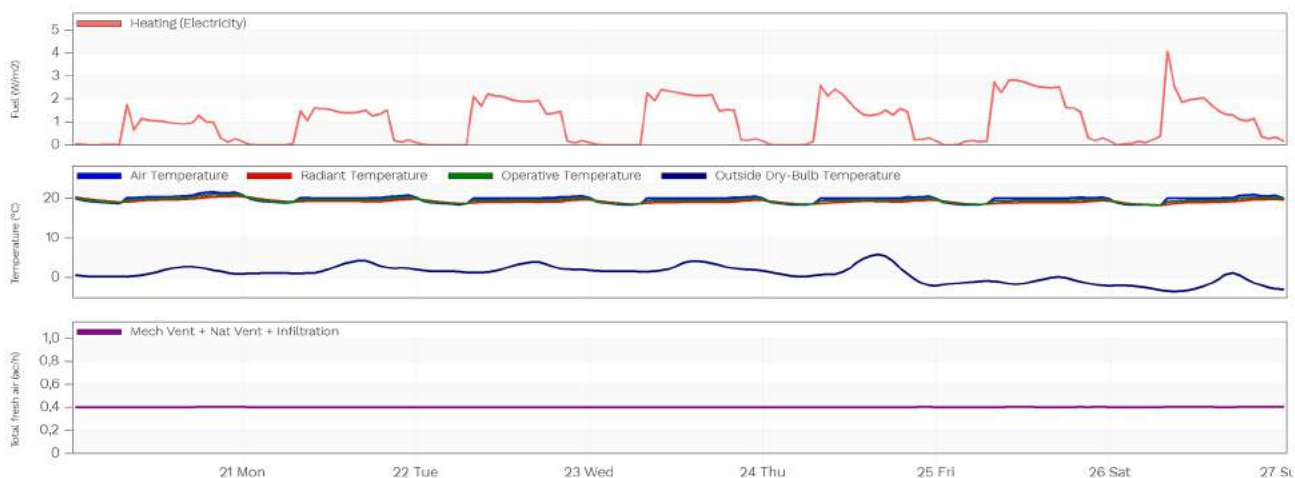
- *Consumi energetici - Simulazione energetica - Scenario 4*

	Riscaldamento [kWh/m ² a]	Raffrescamento [kWh/m ² a]	Ventilazione [kWh/m ² a]	Totale [kWh/m ² a]
Fabbisogni	13,00	21,88	-	34,88
Consumi	3,07	4,36	3,63	11,06

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto



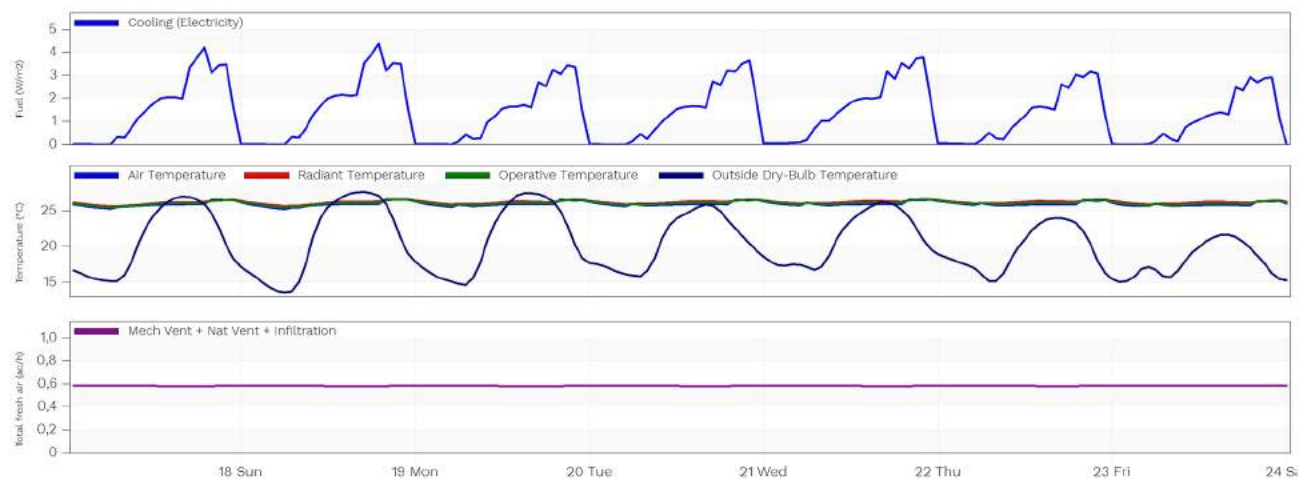
Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio



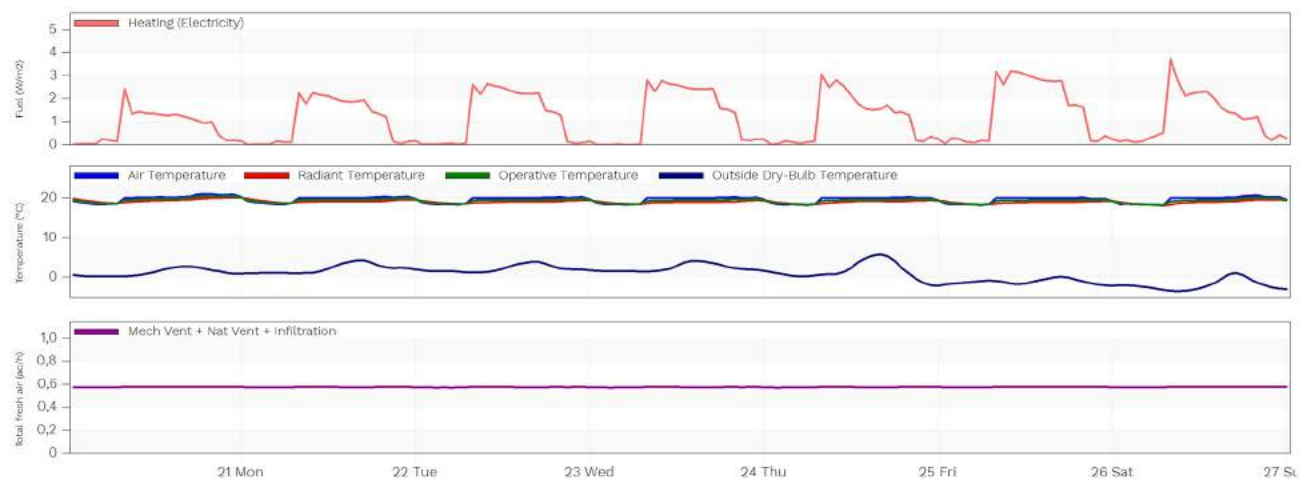
- Consumi energetici - Simulazione energetica - Scenario 5

	Riscaldamento [kWh/m ² a]	Raffrescamento [kWh/m ² a]	Ventilazione [kWh/m ² a]	Totale [kWh/m ² a]
Fabbisogni	15,77	19,71	-	35,48
Consumi	3,73	3,93	5,76	13,42

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto



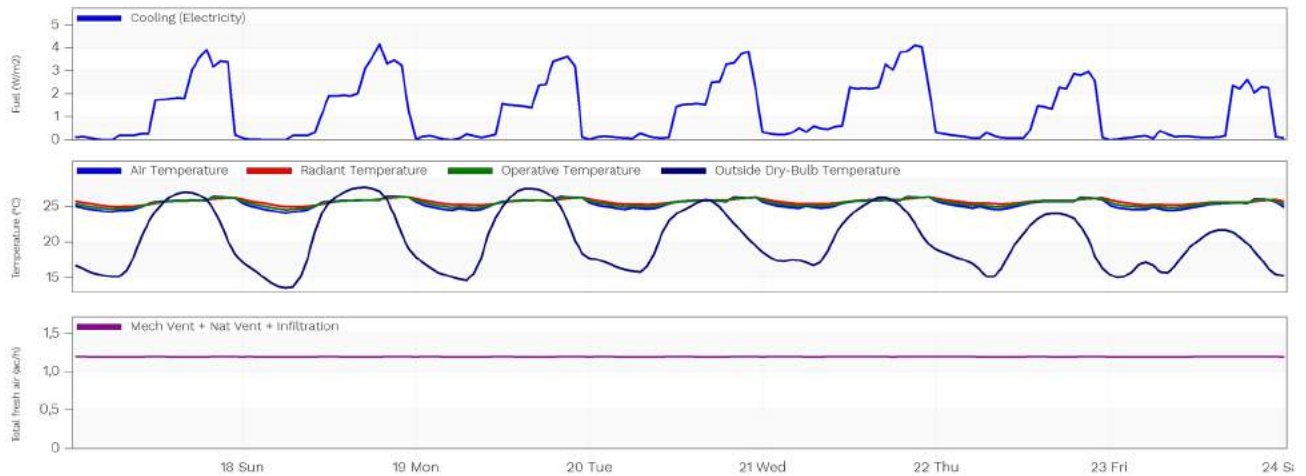
Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio



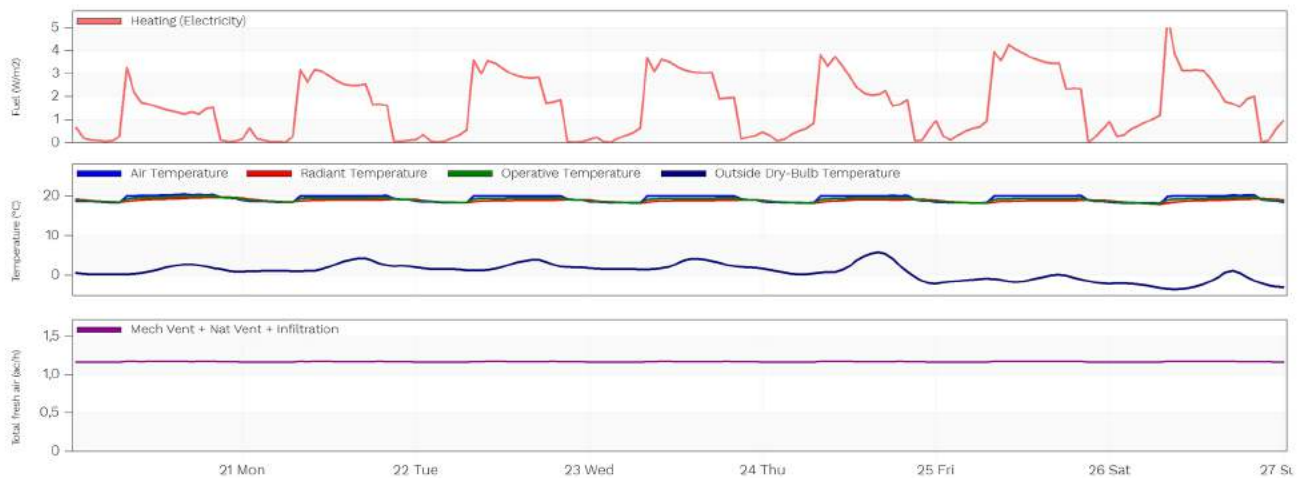
- Consumi energetici - Simulazione energetica - Scenario 6

	Riscaldamento [kWh/m ² a]	Raffrescamento [kWh/m ² a]	Ventilazione [kWh/m ² a]	Totale [kWh/m ² a]
Fabbisogni	22,47	16,60	-	39,07
Consumi	5,31	3,31	13,07	21,69

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto



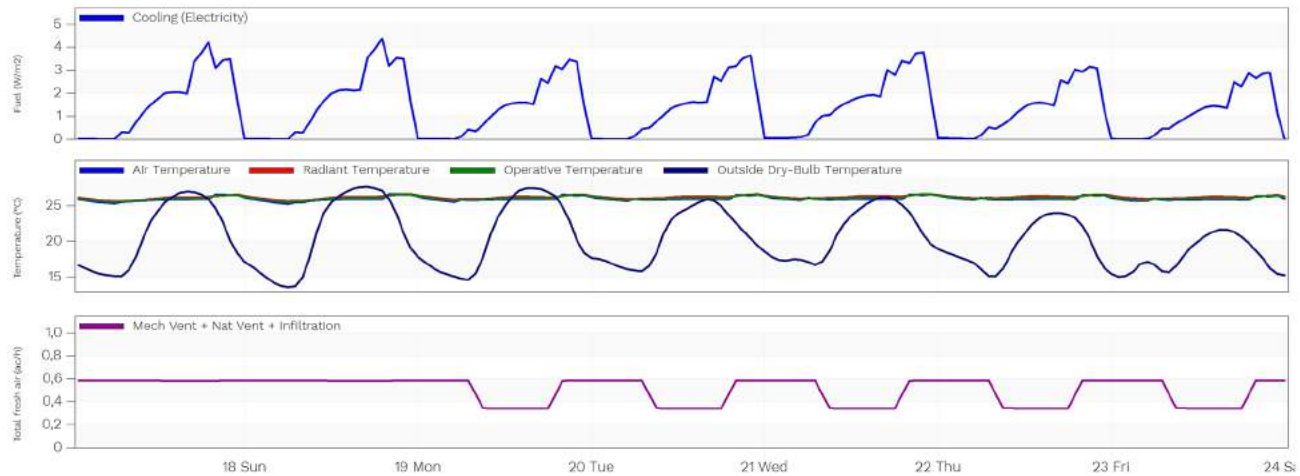
Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio



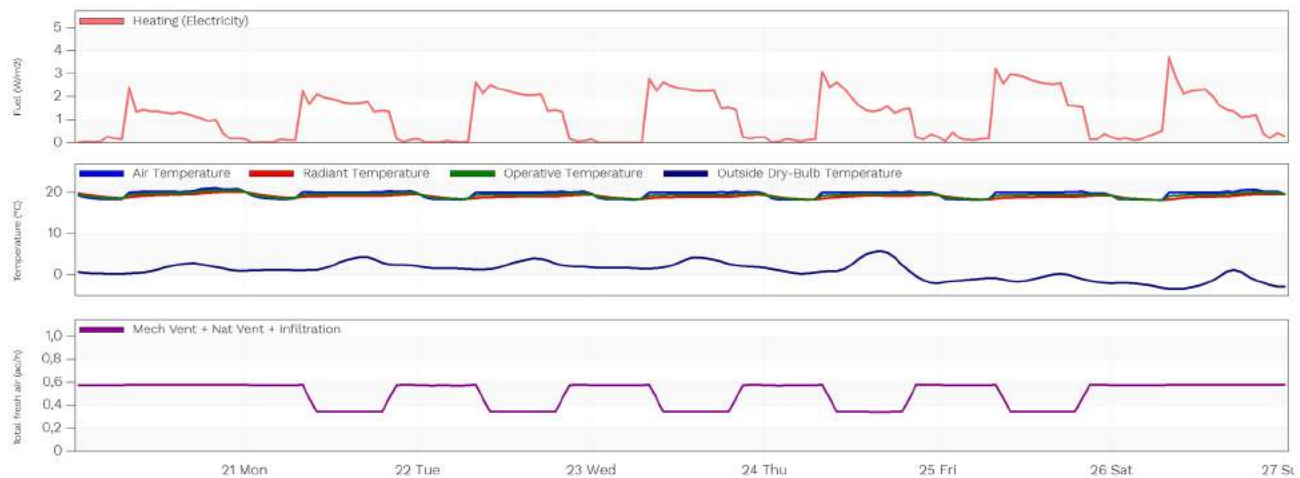
- Consumi energetici - Simulazione energetica - Scenario 7

	Riscaldamento [kWh/m ² a]	Raffrescamento [kWh/m ² a]	Ventilazione [kWh/m ² a]	Totale [kWh/m ² a]
Fabbisogni	14,91	20,14	-	35,05
Consumi	3,53	4,01	4,65	12,19

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto



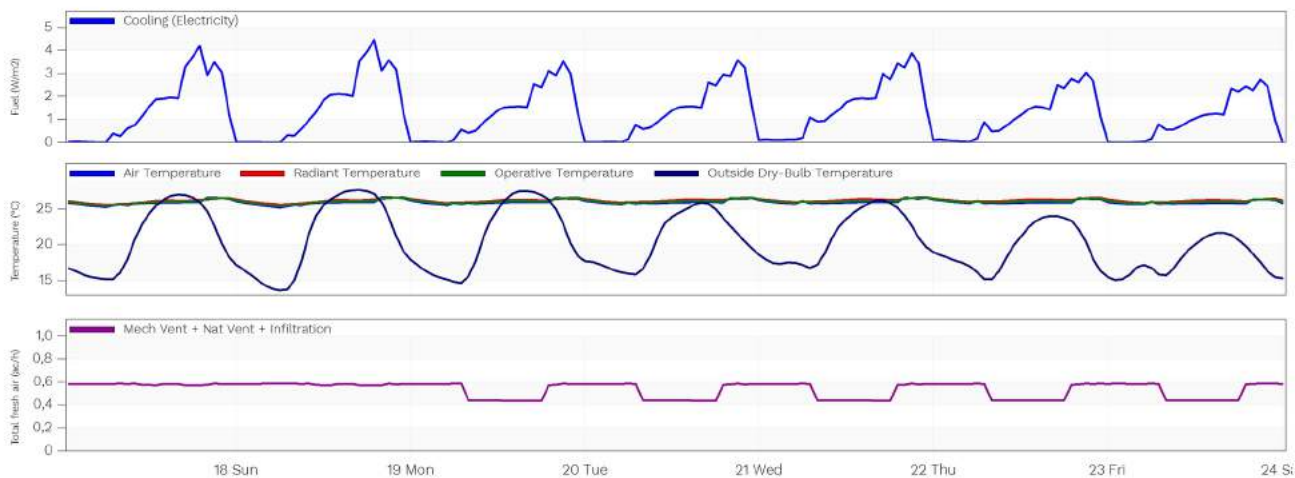
Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio



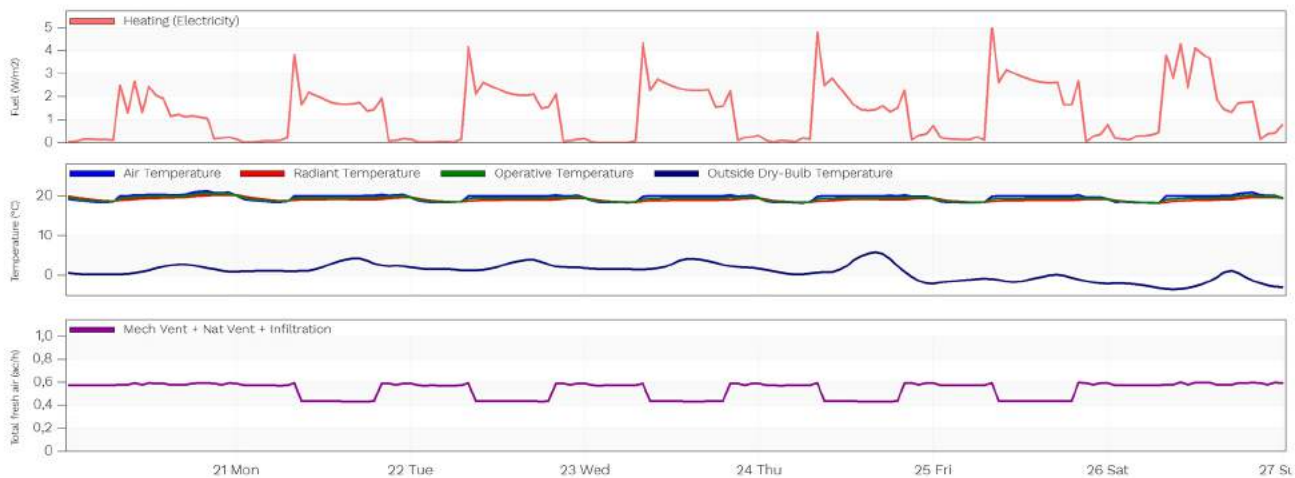
- *Consumi energetici - Simulazione energetica - Scenario 8*

	Riscaldamento [kWh/m ² a]	Raffrescamento [kWh/m ² a]	Ventilazione [kWh/m ² a]	Totale [kWh/m ² a]
Fabbisogni	13,09	20,59	-	33,68
Consumi	3,94	3,85	4,05	11,84

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto

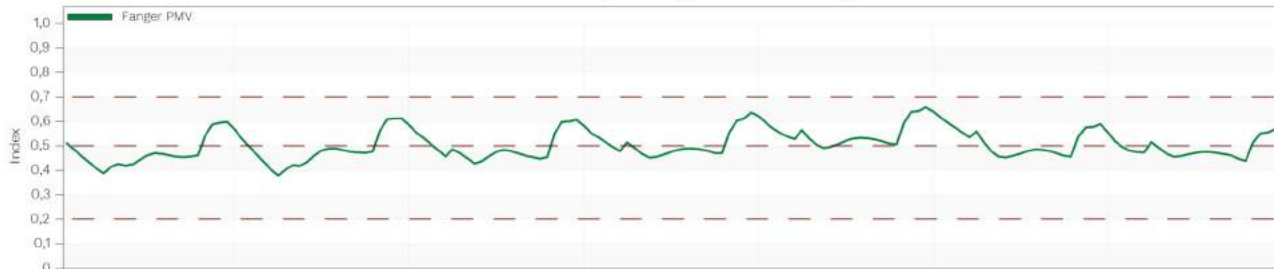


Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio

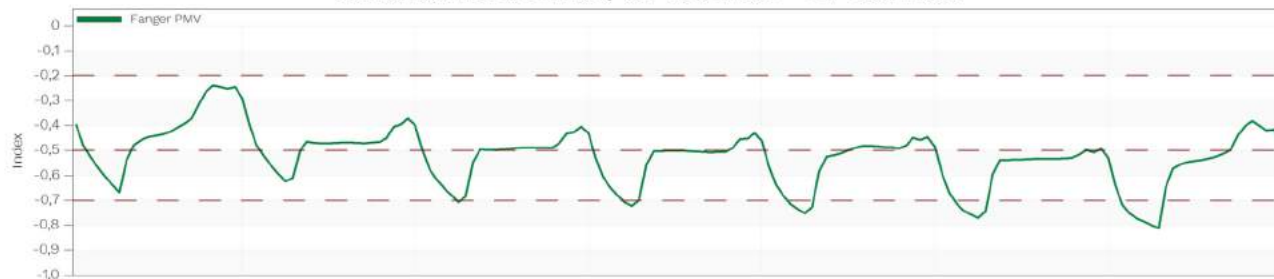


- *PMV - Simulazione energetica - Scenario 1*

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto

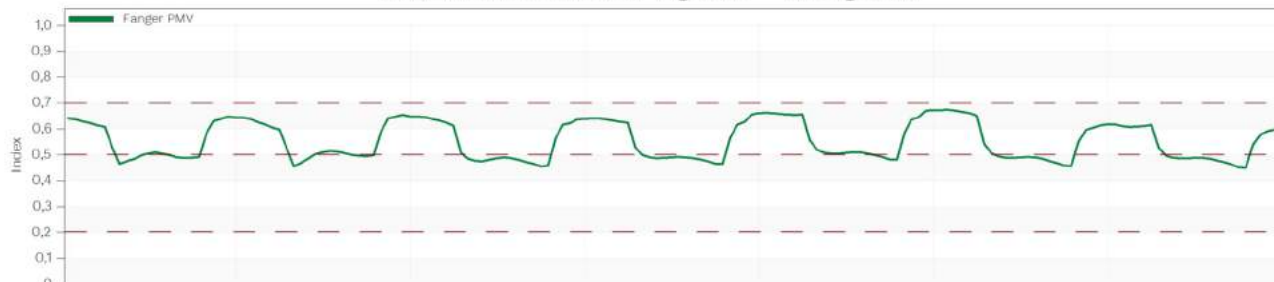


Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio

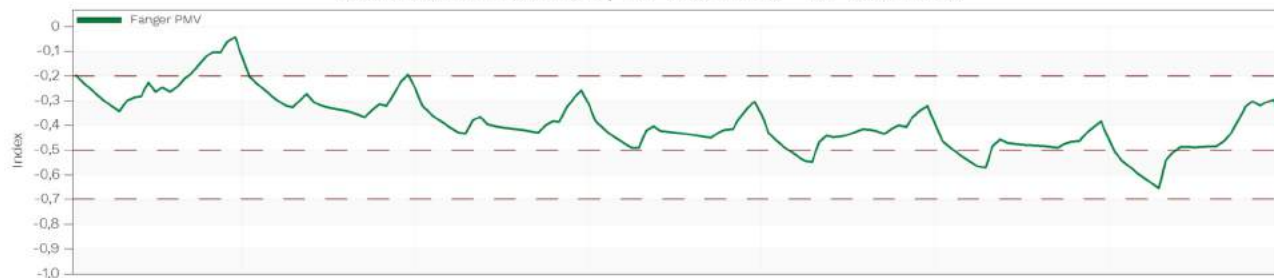


- *PMV - Simulazione energetica - Scenario 2*

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto

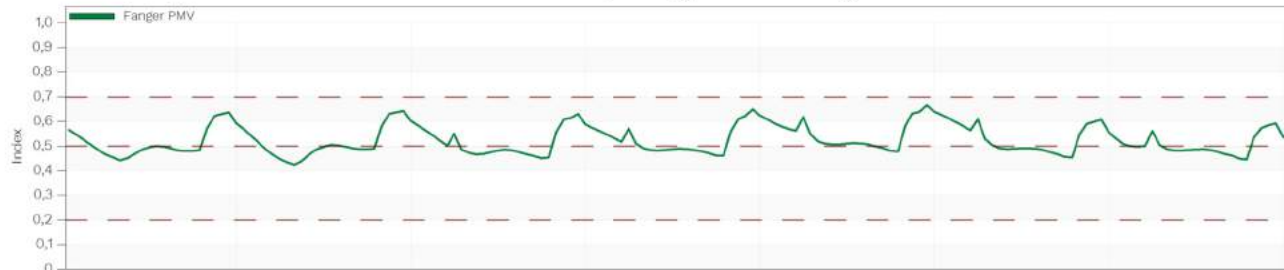


Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio

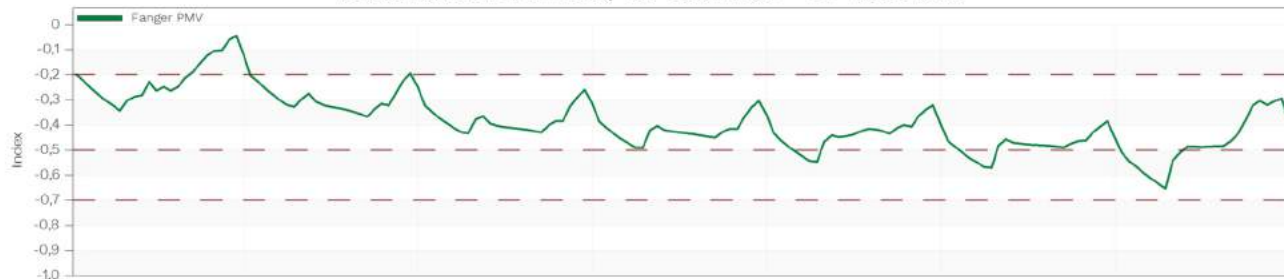


- *PMV - Simulazione energetica - Scenario 3*

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto



Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio

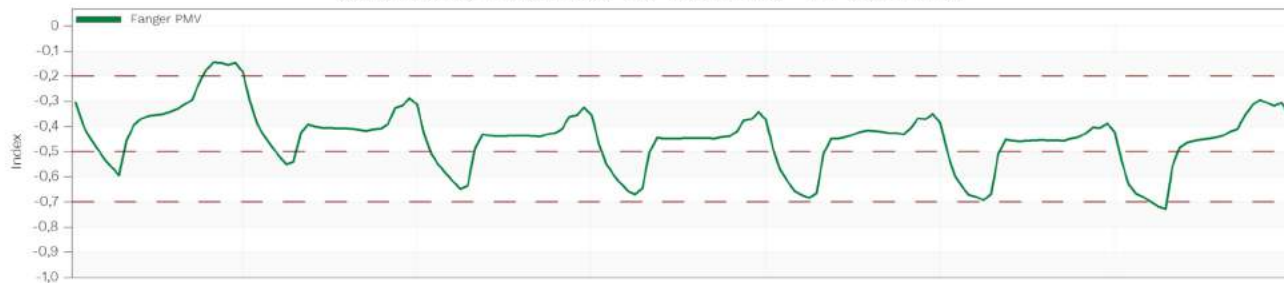


- *PMV - Simulazione energetica - Scenario 4*

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto



Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio

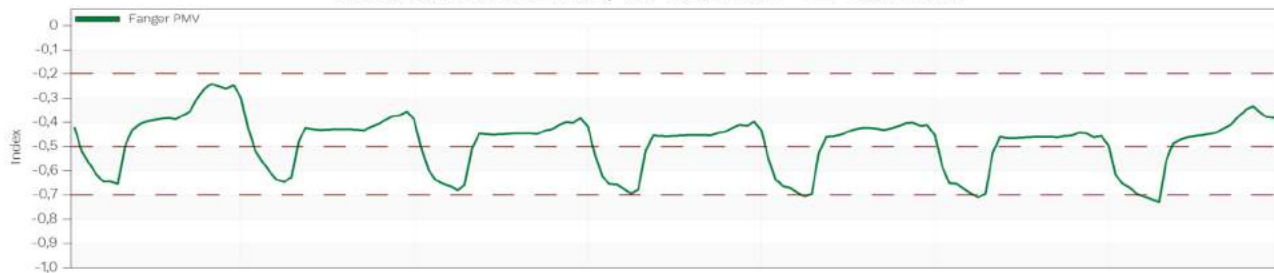


- *PMV - Simulazione energetica - Scenario 5*

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto

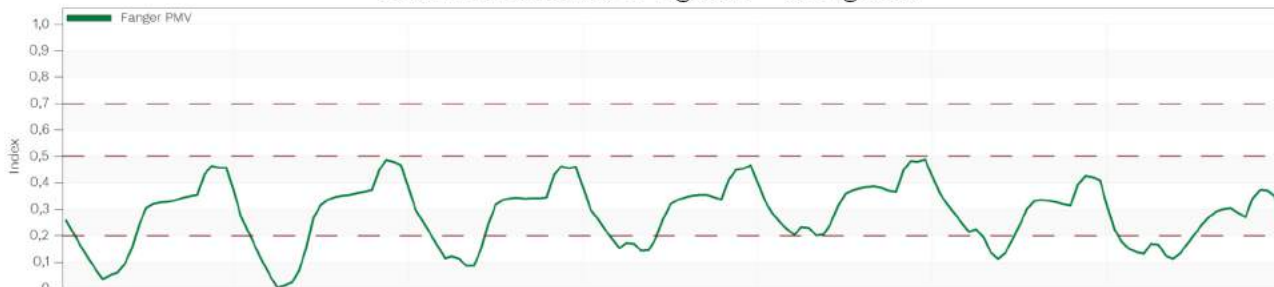


Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio

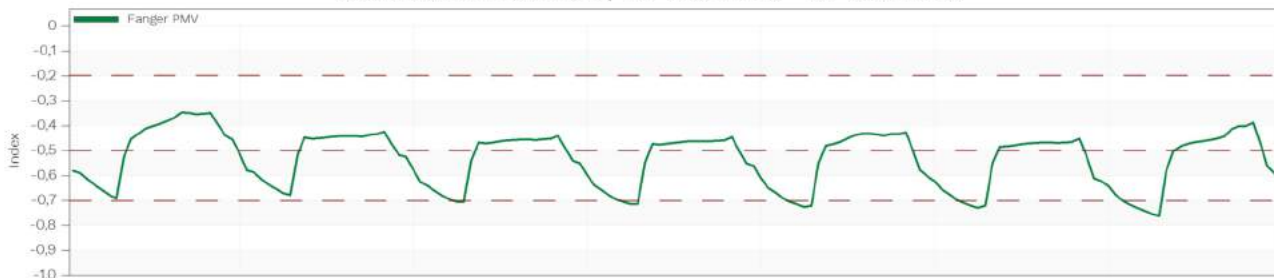


- *PMV - Simulazione energetica - Scenario 6*

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto

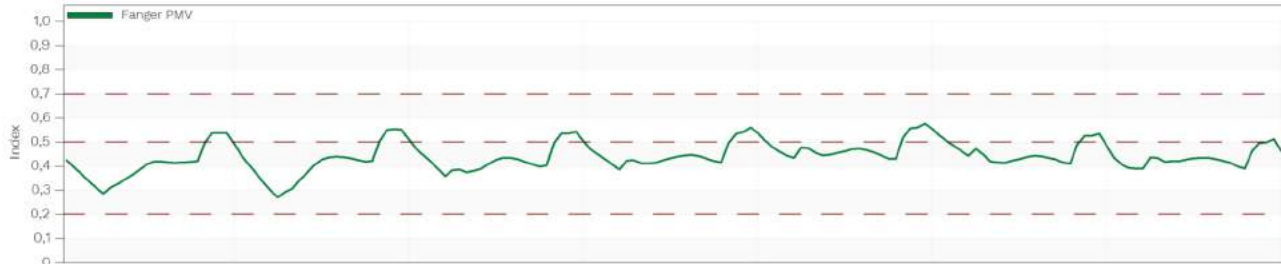


Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio

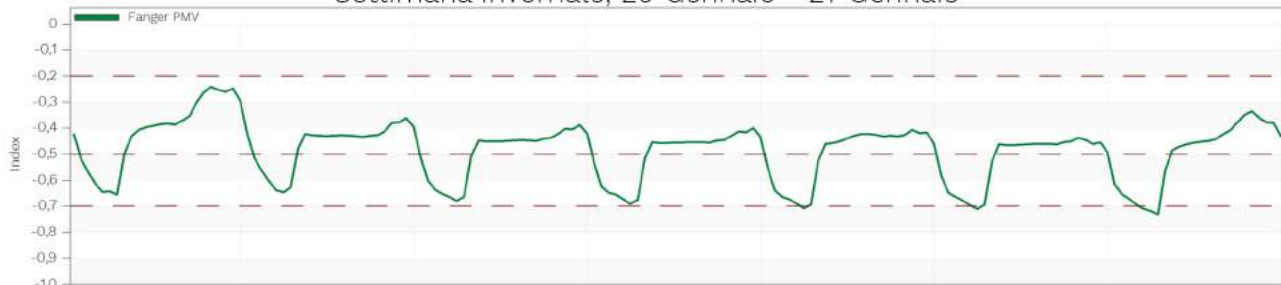


- *PMV - Simulazione energetica - Scenario 7*

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto

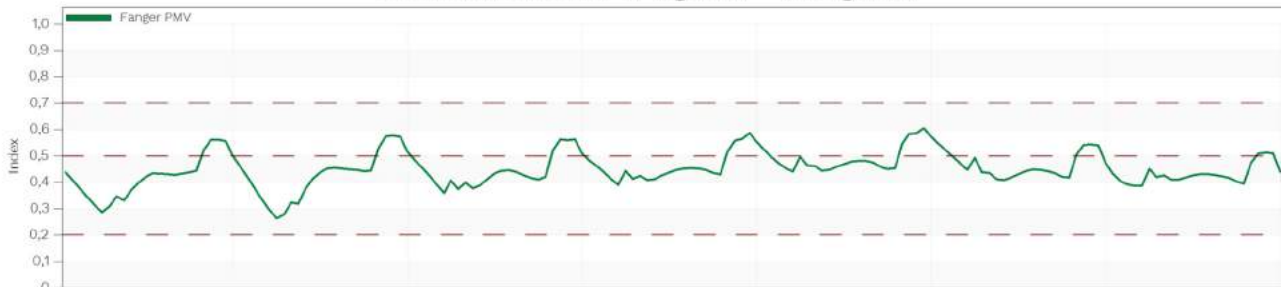


Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio



- *PMV - Simulazione energetica - Scenario 8*

Settimana estiva, 17 Agosto - 24 Agosto



Settimana invernale, 20 Gennaio - 27 Gennaio



6.1.1 Consumi energetici

Le configurazioni servite dalla ventilazione naturale hanno un consumo energetico complessivo nettamente inferiore rispetto a quelle servite dalla ventilazione meccanica, principalmente per il consumo energetico di quest'ultima.

Tra le tre configurazioni servite dalla ventilazione naturale (scenario 1, 2 e 3), la prima ha dei consumi energetici per soddisfare il fabbisogno di riscaldamento superiori rispetto alle altre due poiché l'aria viene immessa in modo costante indipendentemente dalle condizioni termiche esterne. Infatti, nello scenario 2 e 3 dove le finestre sono chiuse durante la notte in inverno e negli orari in cui l'occupante non è presente il consumo energetico dovuto al riscaldamento viene ridotto del 55%. Nella terza simulazione invece, oltre ad assumere le condizioni della simulazione 2 si ipotizza che gli occupanti aprano le finestre durante la notte nel periodo di raffrescamento con il risultato di ridurre il consumo energetico del 10%.

I consumi energetici per soddisfare il raffrescamento delle simulazioni 2 e 3 sono superiori alla simulazione 1 poiché l'aria immessa ed estratta dall'ambiente durante l'intero arco della giornata è inferiore. Di

conseguenza il calore all'interno dell'ambiente non viene estratto con la stessa velocità delle simulazioni precedenti aumentando il consumo energetico necessario per il raffrescamento.

Per quanto riguarda i consumi energetici delle simulazioni servite dalla ventilazione meccanica (scenario 4, 5, 6 e 7) si hanno notevoli differenze dovute al consumo energetico della ventilazione meccanica in funzione della portata d'aria immessa. Infatti, comparando la simulazione 5 dove la portata d'aria immessa è pari a circa 0,5 ac/h in accordo con la normativa UNI 10339^[48] e la simulazione 6 dove è pari a circa 1,1 ac/h in accordo con la normativa UNI EN 15251^[32] la differenza è pari al 56%. In accordo con quanto riportato nella normativa UNI TS 11300^[69], la quale afferma che con l'obiettivo di ridurre i consumi la portata della ventilazione meccanica può essere diminuita nei periodi in cui l'occupante non è presente, la simulazione 7 prevede che le portate siano ridotte nel periodo compreso tra le 09:00 e le 19:00 di tutti i giorni lavorativi. Grazie a questa accortezza i consumi energetici della ventilazione meccanica vengono ridotti del 20% rispetto alla simulazione 5 senza alterare in modo significativo i consumi energetici di riscaldamento e raffrescamento.

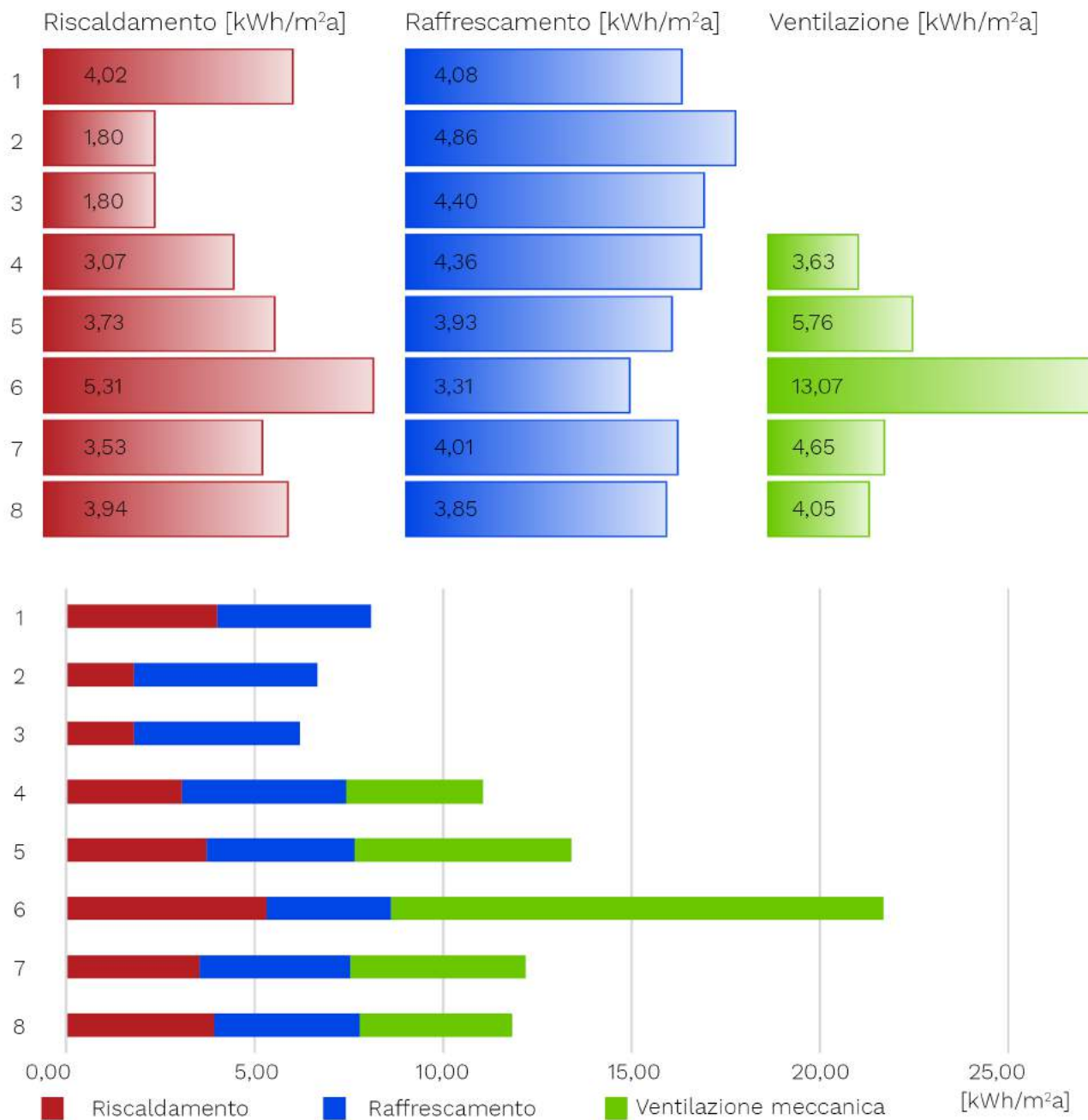


Fig.42 Consumi energetici per riscaldamento, raffrescamento e ventilazione meccanica

La simulazione 8 è rappresentativa di un edificio servito dalla ventilazione ibrida in cui la ventilazione meccanica è attiva in tutte gli ambienti ad eccezione della zona giorno dove si alterna con la ventilazione naturale. La riduzione del consumo energetico della ventilazione è del 30% rispetto alla simulazione 5.

Comparando la ventilazione naturale con quella meccanica tramite le simulazioni 1 e 4, le quali hanno una portata coincidente pari a 0,3 ac/h i consumi energetici per soddisfare il fabbisogno di riscaldamento sono ridotti del 24% mentre i consumi energetici necessari per soddisfare il fabbisogno di raffrescamento incrementano del 7% se viene impiegata la ventilazione meccanica. Sarà però da tenere in considerazione che l'impianto di ventilazione meccanica avrà un consumo energetico mentre la ventilazione naturale permetterà di ventilare l'ambiente senza aggiungere ulteriori consumi.

6.1.2 Comfort termico

Il comfort è stato analizzato in base alle definizioni delle categorie riportate dalla UNI EN 15251^[32], il PMV è da considerarsi come risultato positivo se compreso nelle categorie I e II, ossia se è compreso nella

neutralità termica, caratterizzata da un valore di PMV compreso tra -0,5 e 0,5. Nella categoria III la sensazione di caldo o di freddo non è molto intensa in quanto il PMV è compreso tra -0,7 e 0,7 per cui viene considerato come risultato intermedio, al contrario della categoria IV, la quale è considerata come un risultato negativo, poiché presente un discomfort termico con valori di PMV inferiori a -0,7 e superiori a 0,7.

Nelle due settimane analizzate nel dettaglio, le condizioni di comfort peggiori si verificano nello scenario 2 per il periodo estivo perchè le finestre vengono aperte solo nei periodi occupati e durante la notte. Questo significa che durante gli orari non occupati il calore all'interno non viene estratto peggiorando la sensazione termica dell'occupante.

Per quanto riguarda il periodo invernale, lo scenario 1 è il peggiore. In questo scenario le finestre sono aperte in modo costante durante l'intero arco della giornata immettendo l'aria indipendentemente dalle condizioni termiche dell'ambiente esterno, per cui, specialmente durante la notte e nelle prime ore del mattino l'aria esterna ha una temperatura decisamente inferiore rispetto a quella dell'ambiente interno e la sua immissione peggiora la condizione di comfort amplificando la sensazione di

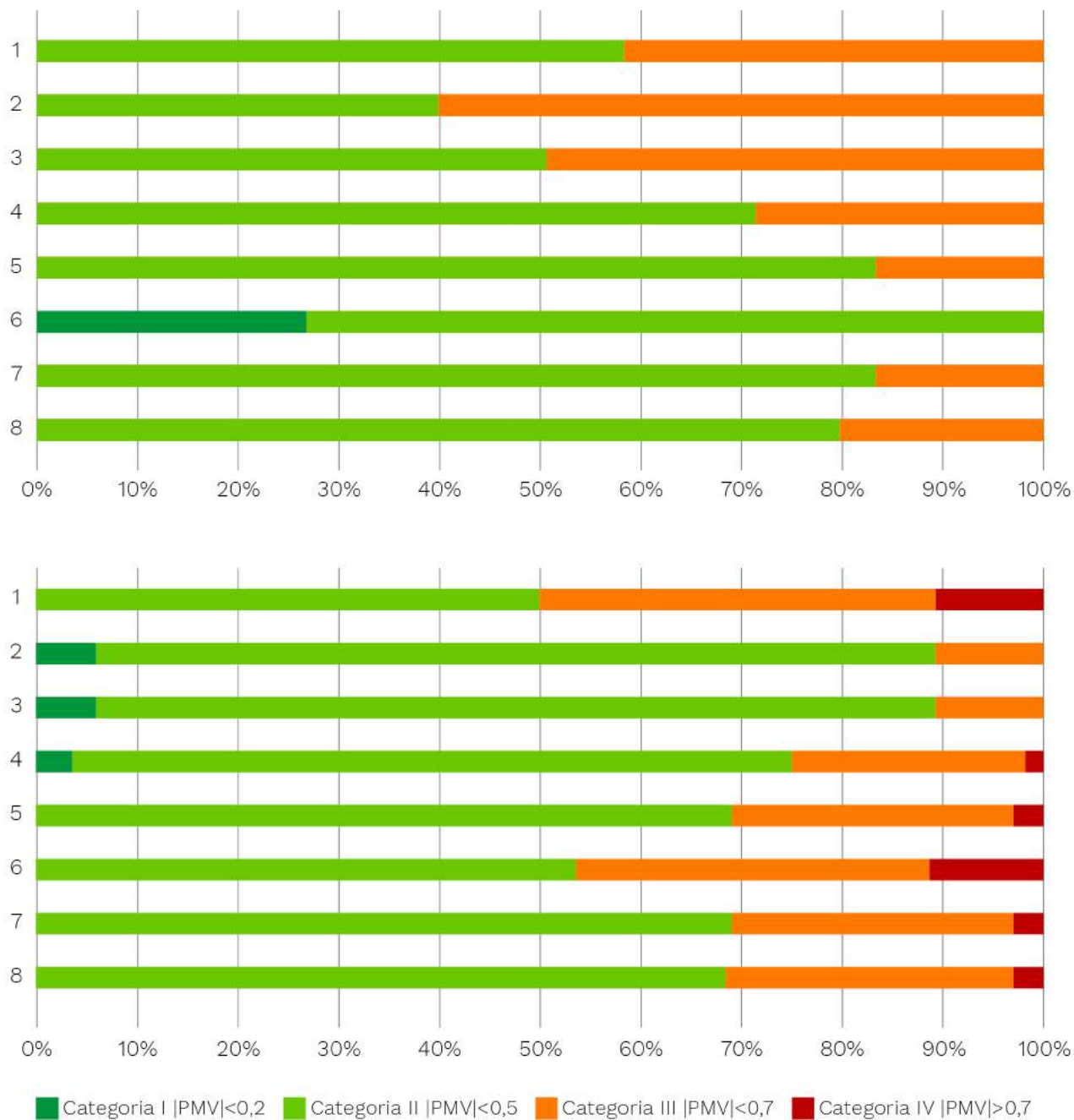


Fig.4.3 Categorie di comfort per la settimana estiva (a) ed invernale (b) analizzate nelle simulazioni

freddo.

I risultati migliori si ottengono invece con lo scenario 6 per il periodo estivo, che grazie portata d'aria maggiore rispetto alle altre simulazioni riesce a ridurre la sensazione di caldo attraverso un'estrazione del calore più rapida e ad una velocità dell'aria più elevata.

Per quanto riguarda il periodo invernale gli scenari 2 e 3 raggiungono le condizioni di comfort migliori. In queste due simulazioni, durante l'inverno l'aria è immessa nei periodi occupati ad eccezione delle ore notturne. Questo riduce la quantità di aria fredda immessa durante la giornata e quindi le condizioni di comfort risultano positive.

Analizzando invece l'intero anno la condizione di comfort peggiore si verifica nella simulazione 1, a causa dell'immissione di aria esterna tramite ventilazione naturale indipendentemente dalle condizioni termiche dell'ambiente esterno.

A seguire la simulazione 6 presenta la condizione di comfort peggiore principalmente perché l'elevato numero di ricambi orari aumenta la velocità dell'aria creando un discomfort.

La simulazione 3 risulta la migliore tra quelle che analizzano la ventilazione naturale. Infatti, se comparata con la simula-

zione 1 incrementa le ore in cui il comfort rientra nella categoria I del 39% e le ore in cui rientra nella categoria 2 del 7%.

Inoltre la simulazione 3 è quella che possiede il maggior numero di ore nella categoria I anche quando viene comparata alla ventilazione meccanica. Tuttavia, bisogna tenere in considerazione che i ricambi d'aria non sono presenti sia nei periodi non occupati che durante l'orario notturno in inverno. Questo influisce negativamente sulla qualità dell'aria poiché il numero di ricambi orari giornalieri è minore rispetto alle simulazioni con la ventilazione meccanica.

Tra le simulazioni che analizzano la ventilazione meccanica, la simulazione 4 ha ottenuto i risultati di comfort migliori ma i ricambi d'aria sono insufficienti per mantenere un buon livello di qualità dell'aria. La simulazione 7 riesce a mantenere ad un alto livello le condizioni di comfort, permettendo di integrare la diminuzione di portata nei periodi non occupati per risparmiare sui consumi energetici.

La simulazione 8, che rappresenta la ventilazione ibrida, non crea eccessive differenze se comparata con la precedente, tuttavia crea dei miglioramenti notevoli sulla distribuzione dell'aria come viene evidenziato successivamente nelle simulazioni CFD.

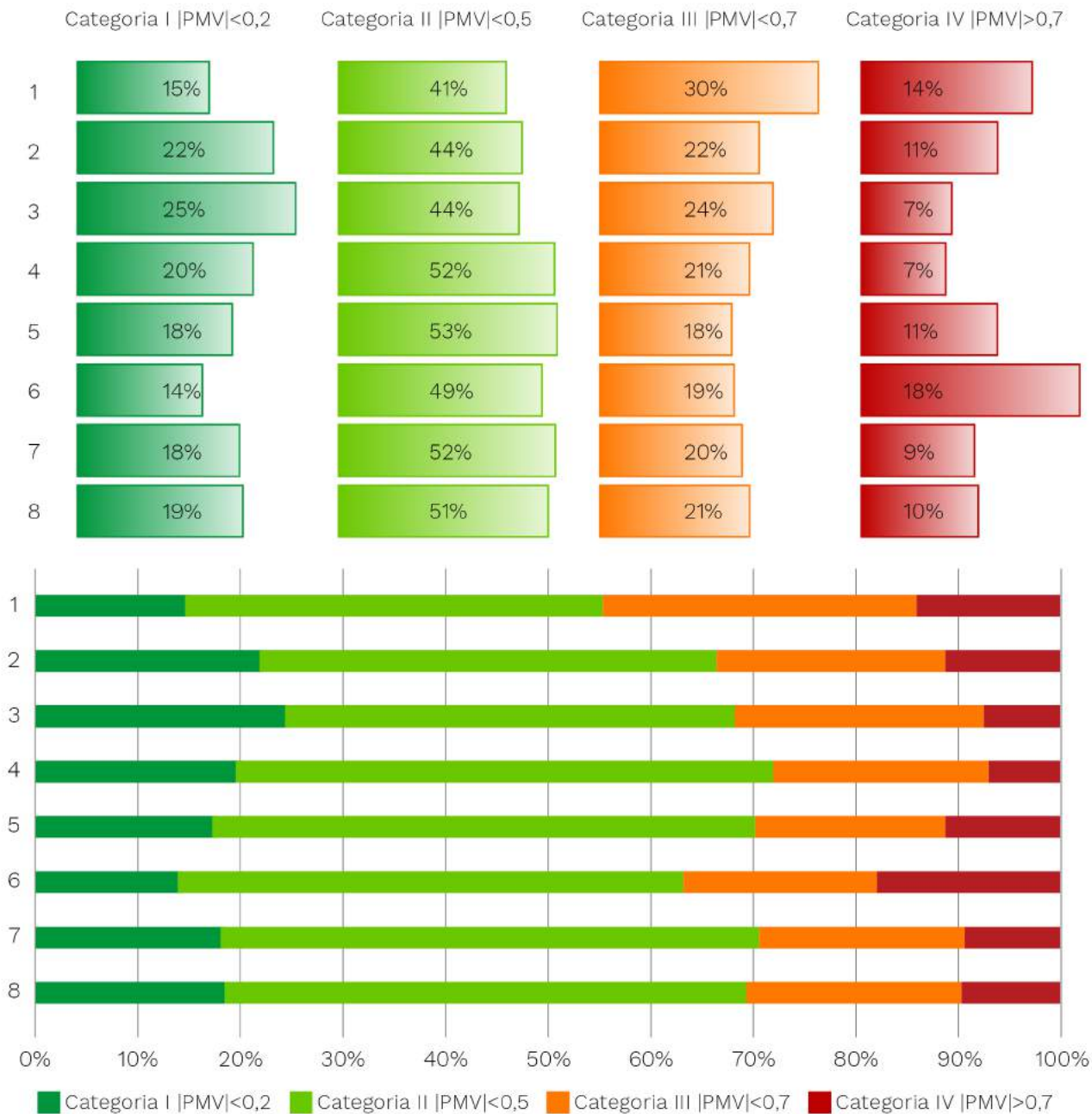


Fig.44 Categorie di comfort durante la simulazione annuale

6.2 Risultati della simulazione CFD

Nelle pagine a seguire vengono riportati i risultati inerenti al comfort ed alla distribuzione dell'aria generati attraverso la simulazione CFD di DesignBuilder.

Il comfort termico viene analizzato con i parametri di voto medio previsto (PMV) e

percentuale prevista di insoddisfatti (PPD). Tuttavia, per limitazioni dovute al software, la rappresentazione in 3D conterrà solo il valore di PMV poiché non è possibile indicare entrambi i parametri contemporaneamente.

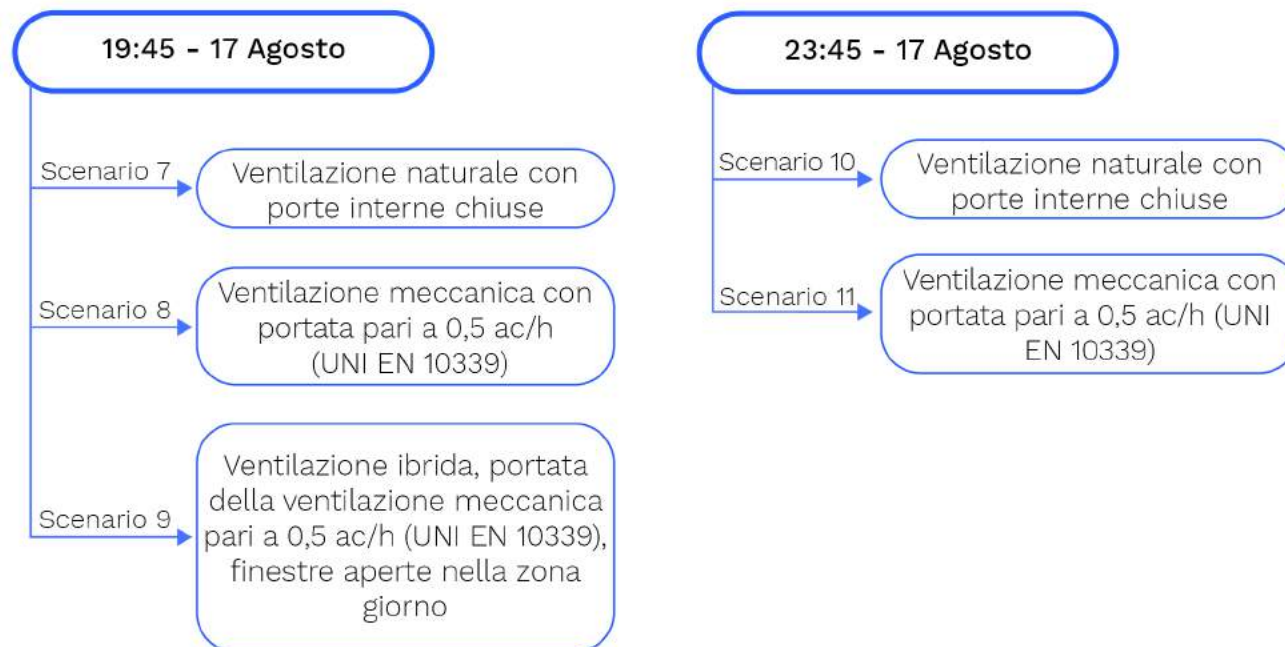
Nelle sezioni, invece il PMV è rappresentato dal riempimento, mentre il PPD è rappresentato dalle linee che corrispondono al valore indicato nelle legende.



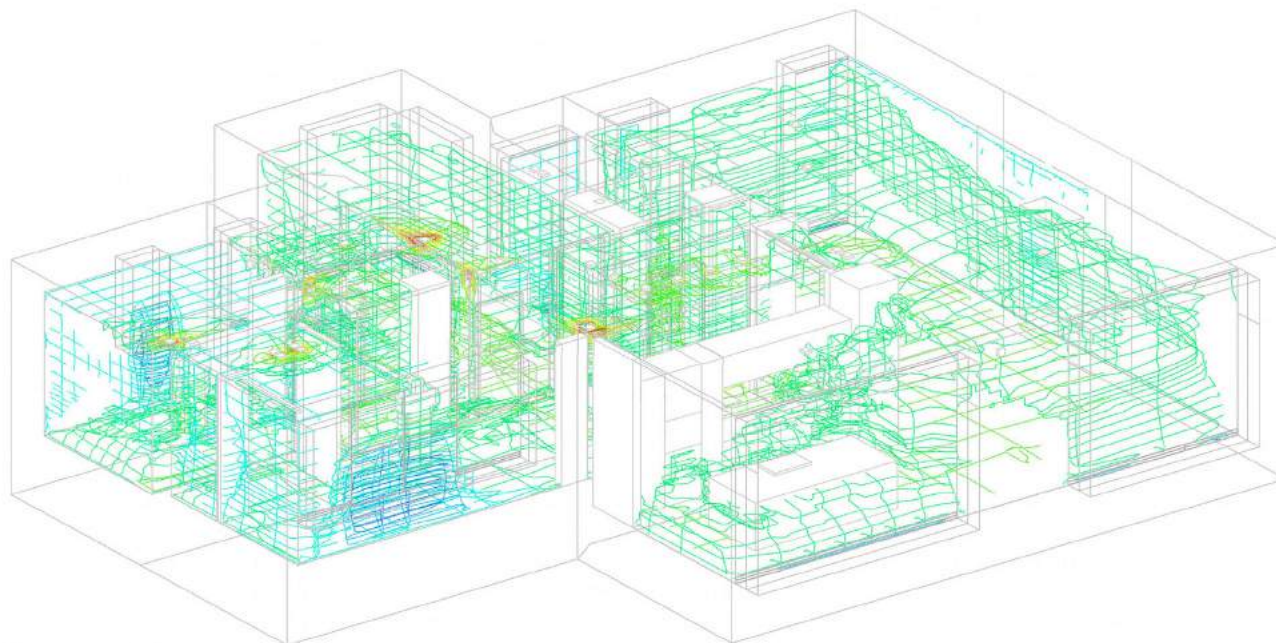
A seguire, vengono riportati i risultati inerenti alla distribuzione dell'aria, i quali vengono valutati attraverso l'età media dell'aria (LMA).

I valori di LMA indicati nelle legende cambiano in funzione dello scenario poiché la variazione dei risultati tra le varie casistiche è notevole e non è stato possibile utilizzare una scala generale per tutte le analisi.

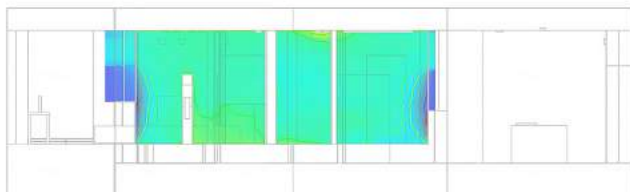
Infine, viene fatta una comparazione tra i diversi scenari in funzione di comfort e distribuzione dell'aria per valutare l'efficacia delle tipologie di ventilazione in base alle condizioni dell'ambiente interno ed esterno.



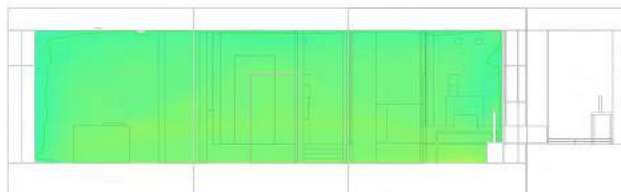
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 1*



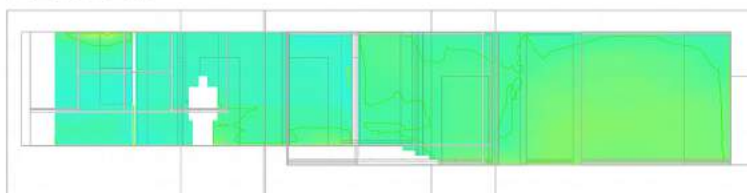
Assonometria



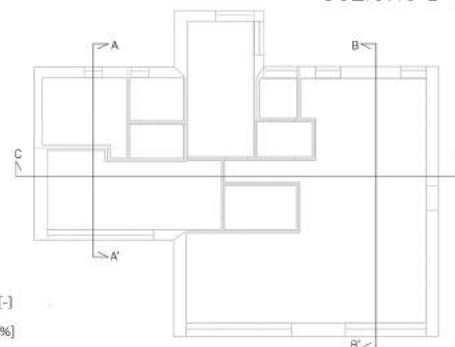
Sezione A-A'



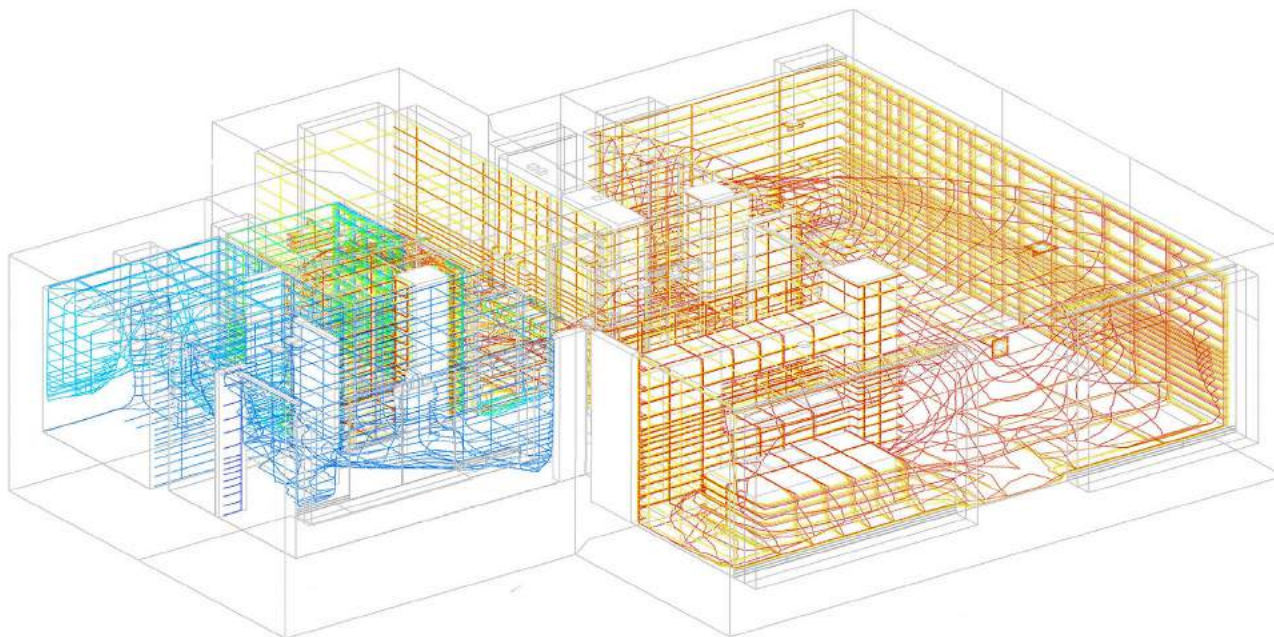
Sezione B-B'



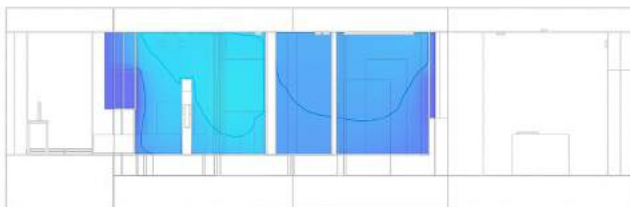
Sezione C-C'



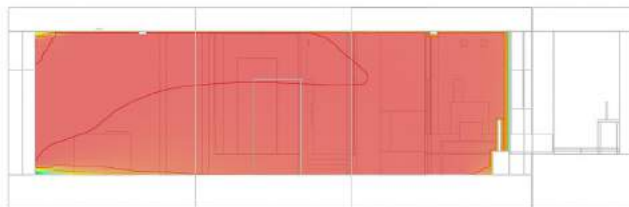
- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 1*



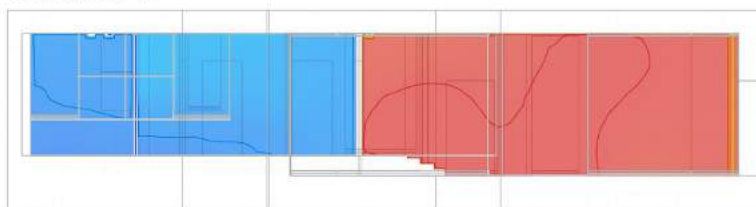
Assonometria



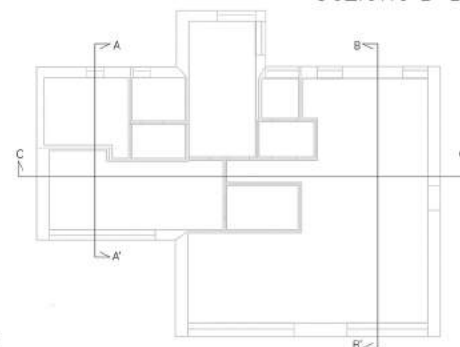
Sezione A-A'



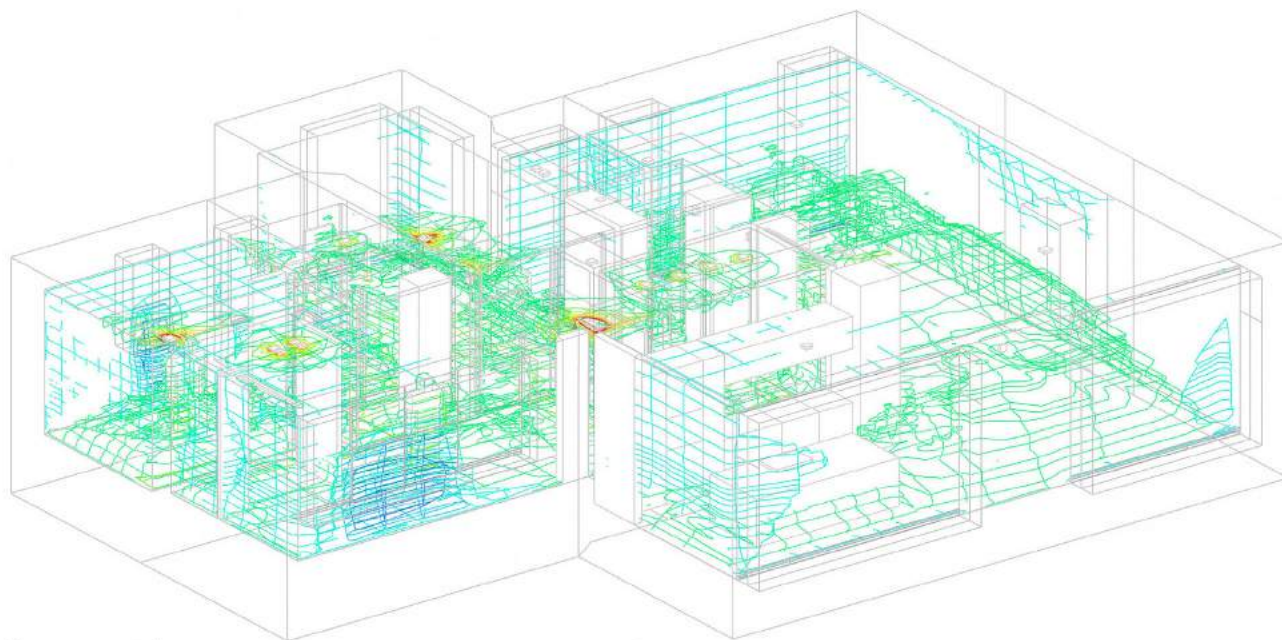
Sezione B-B'



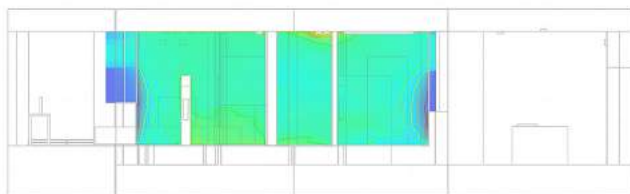
Sezione C-C'



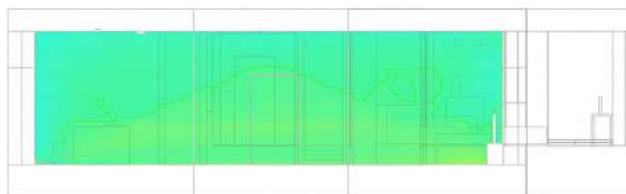
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 2*



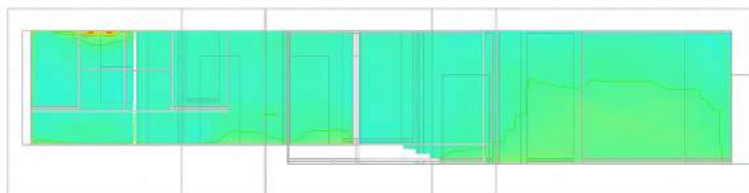
Assonometria



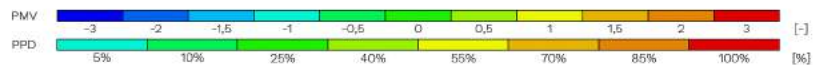
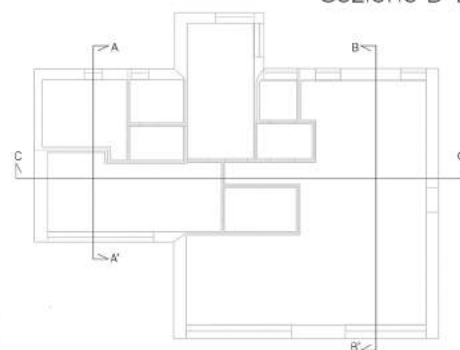
Sezione A-A'



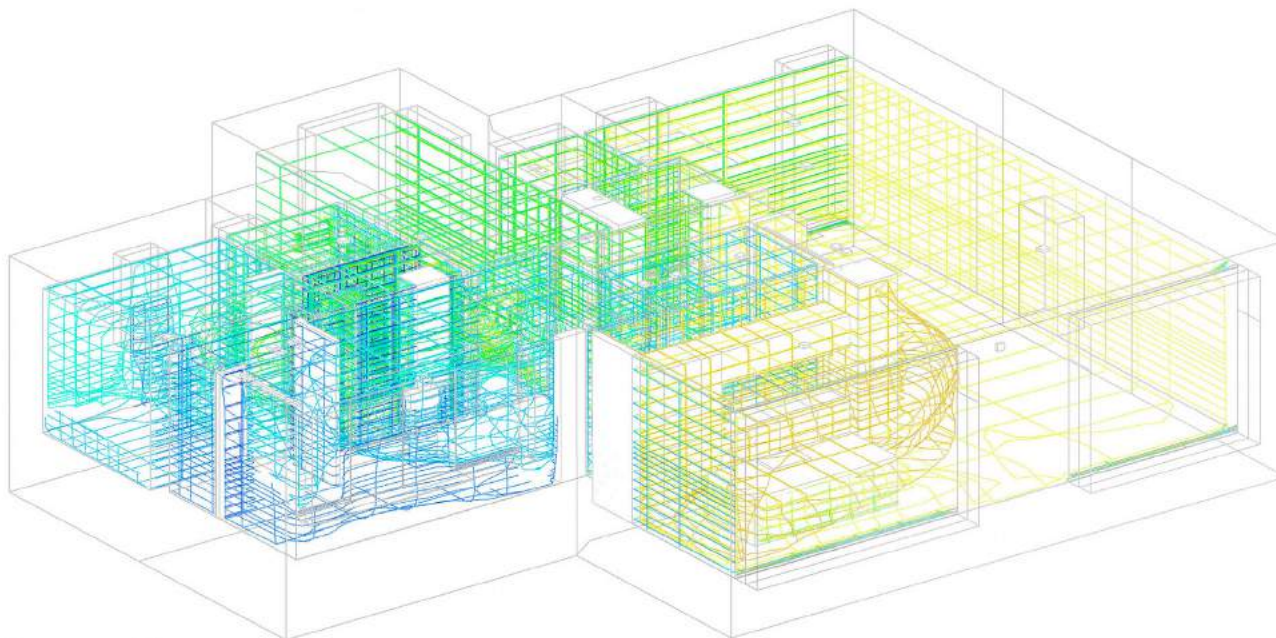
Sezione B-B'



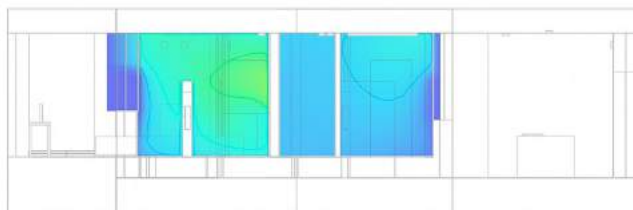
Sezione C-C'



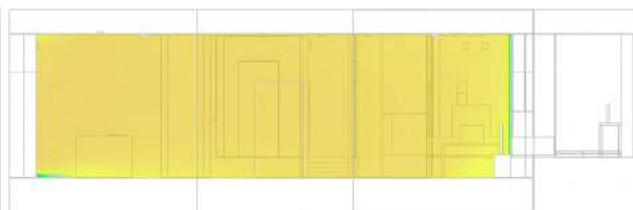
- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 2*



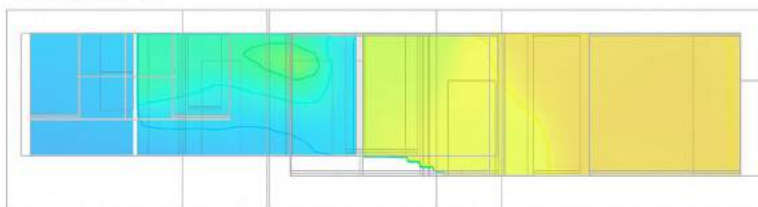
Assonometria



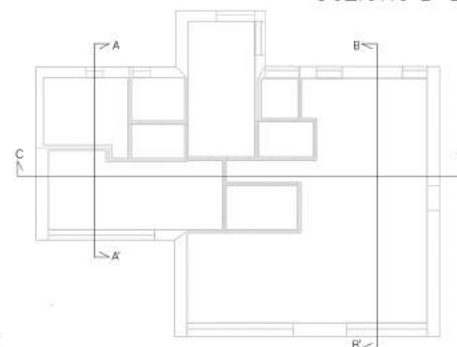
Sezione A-A'



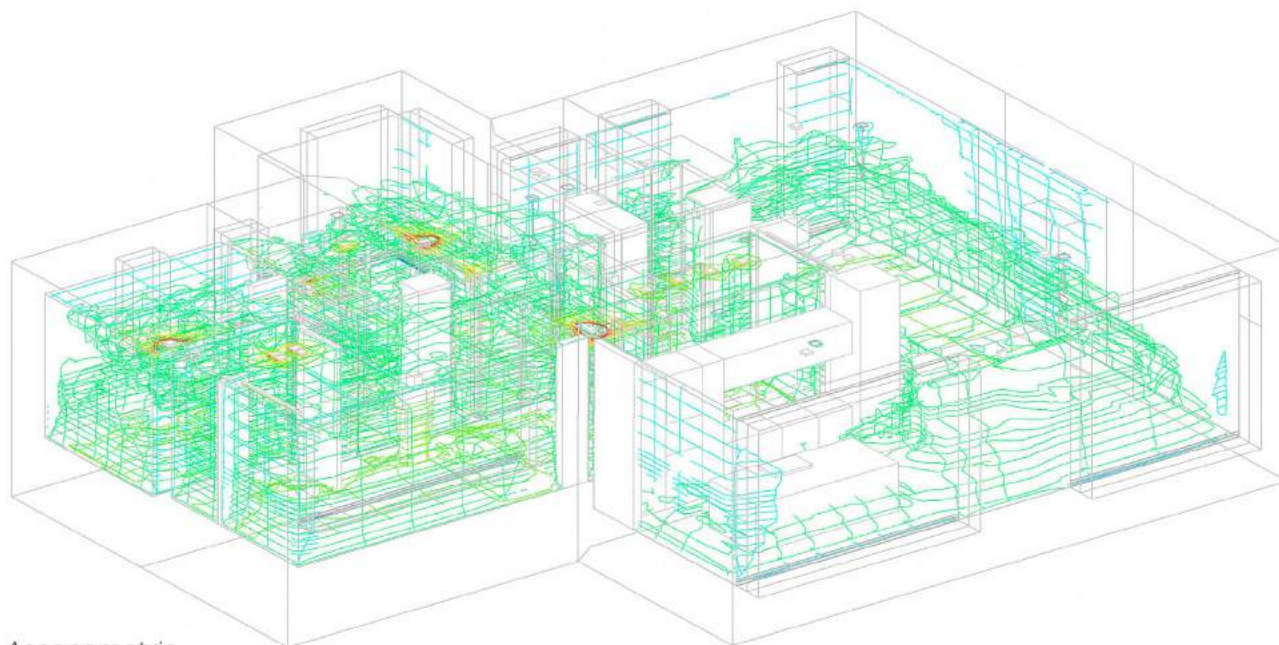
Sezione B-B'



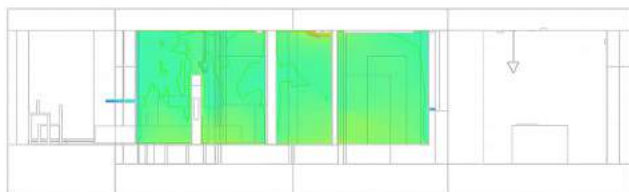
Sezione C-C'



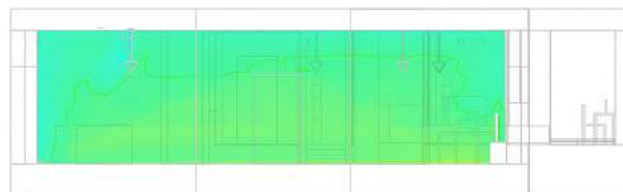
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 3*



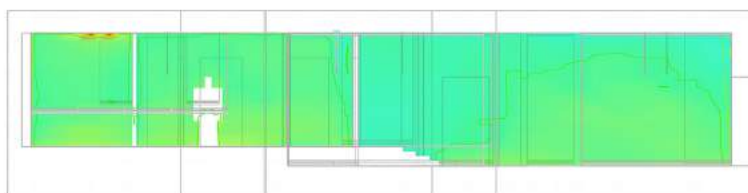
Assonometria



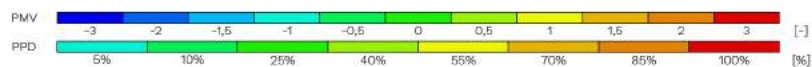
Sezione A-A'



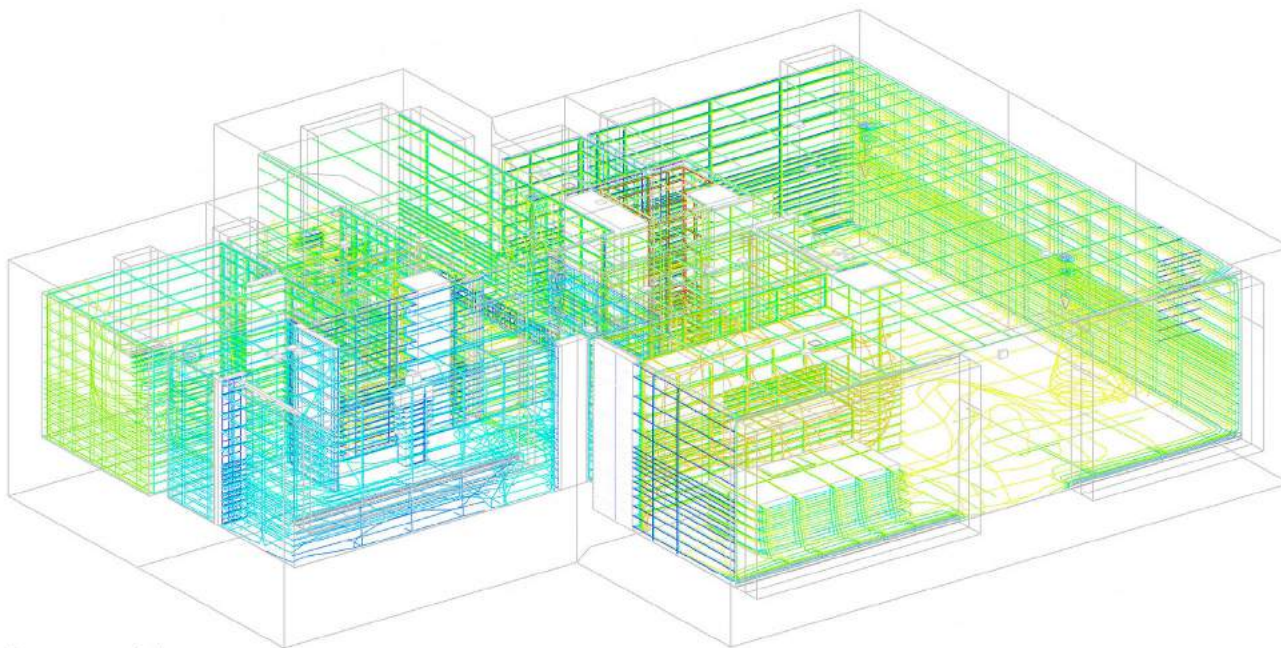
Sezione B-B'



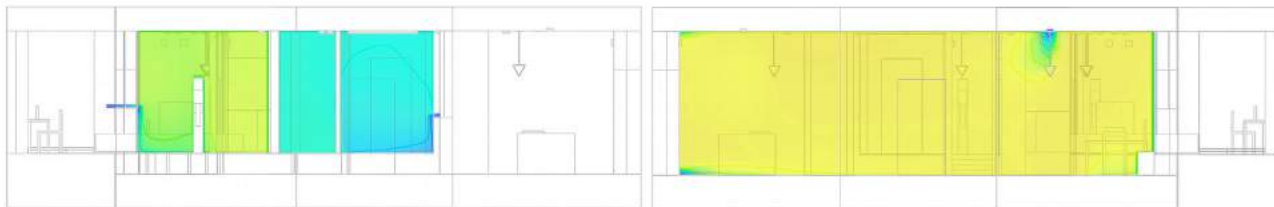
Sezione C-C'



- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 3*

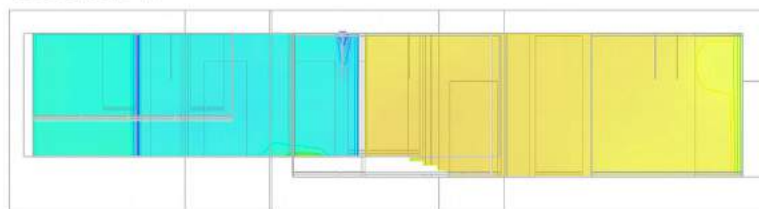


Assonometria

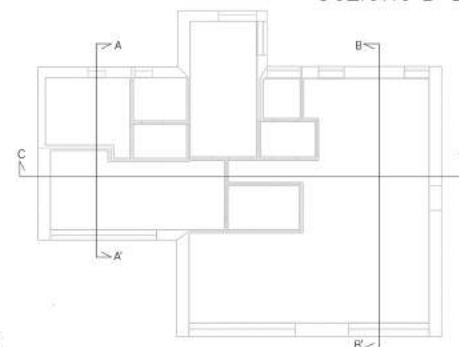


Sezione A-A'

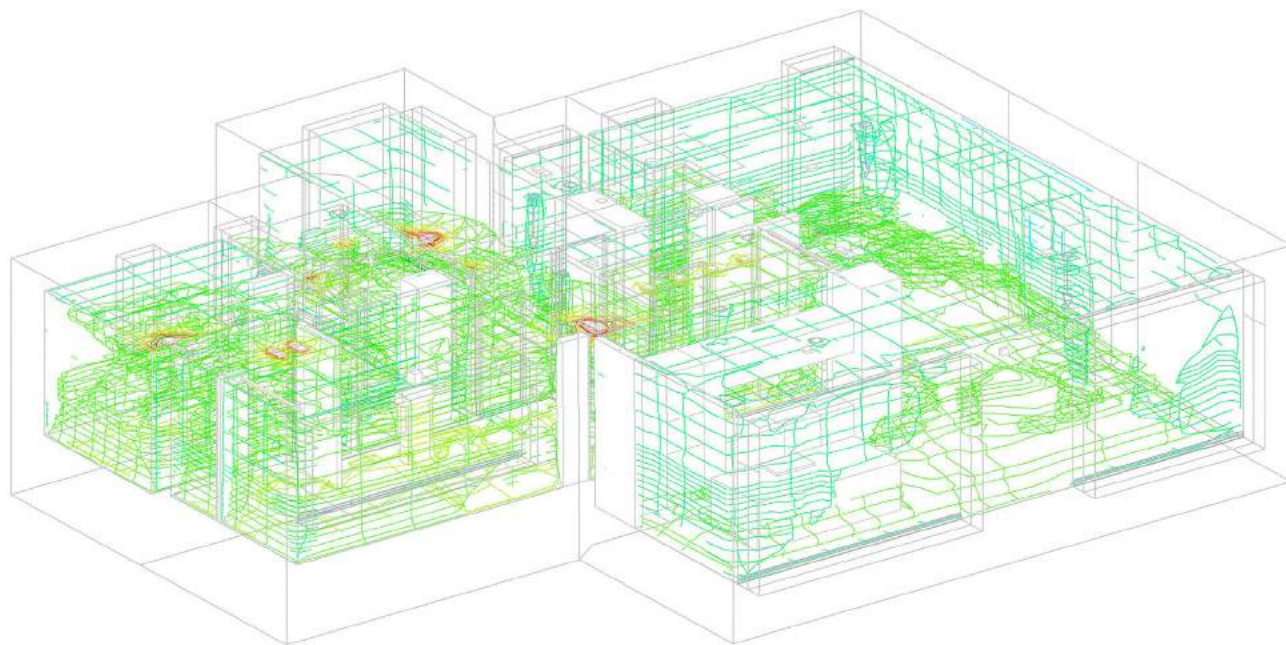
Sezione B-B'



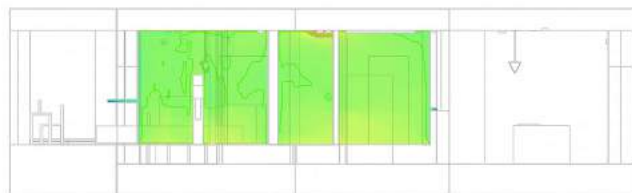
Sezione C-C'



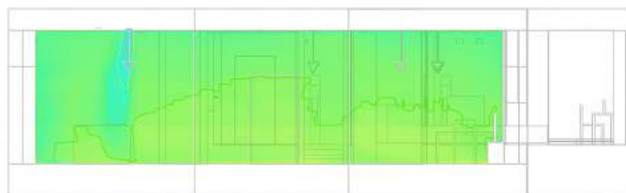
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 4*



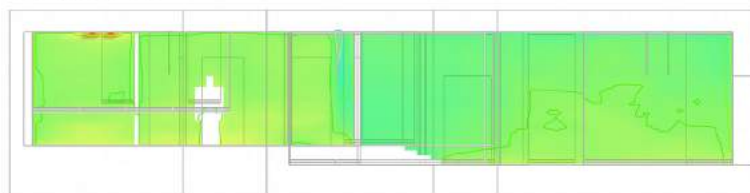
Assonometria



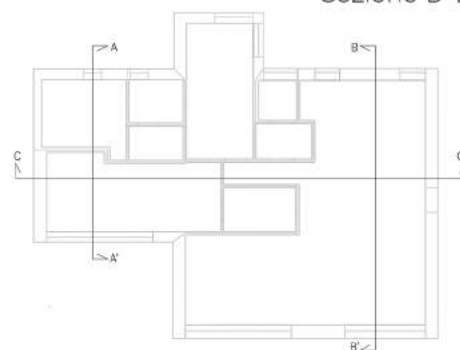
Sezione A-A'



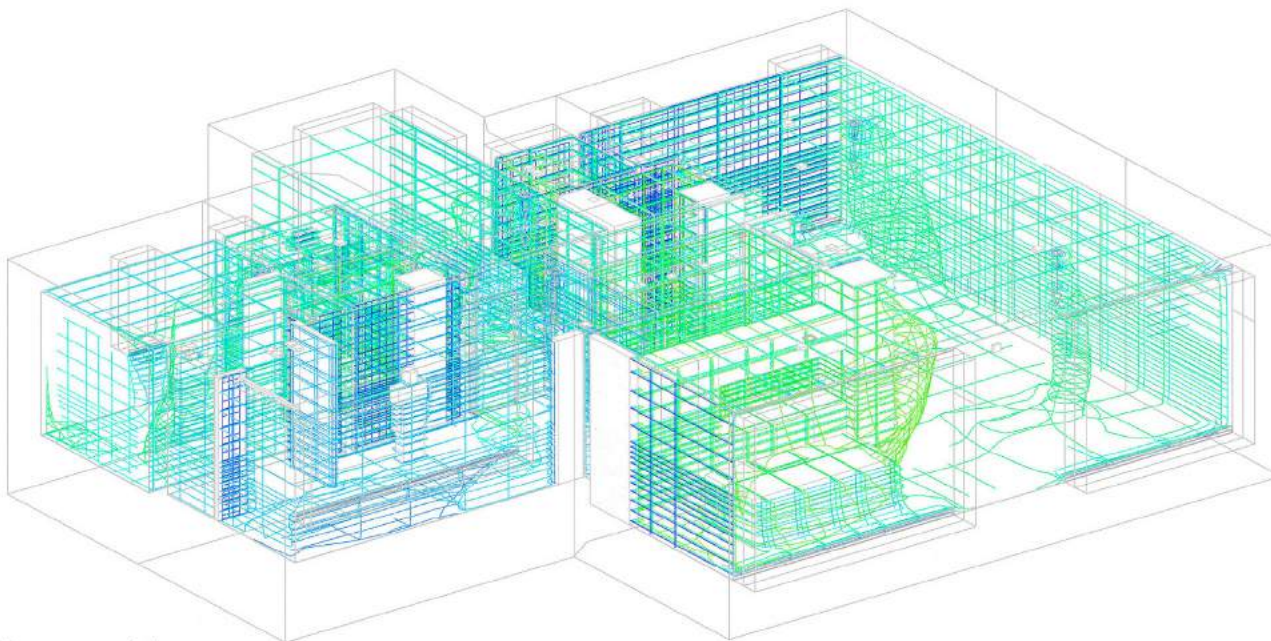
Sezione B-B'



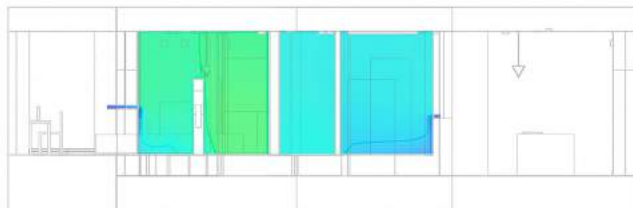
Sezione C-C'



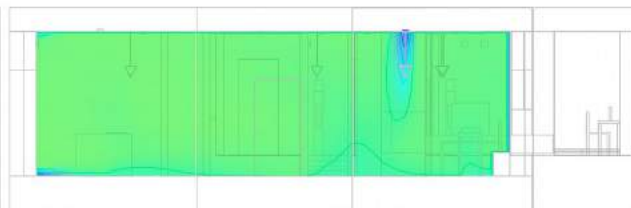
- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 4*



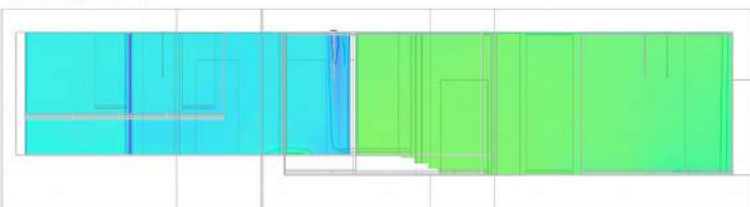
Assonometria



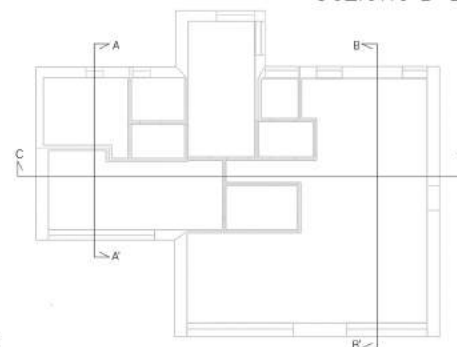
Sezione A-A'



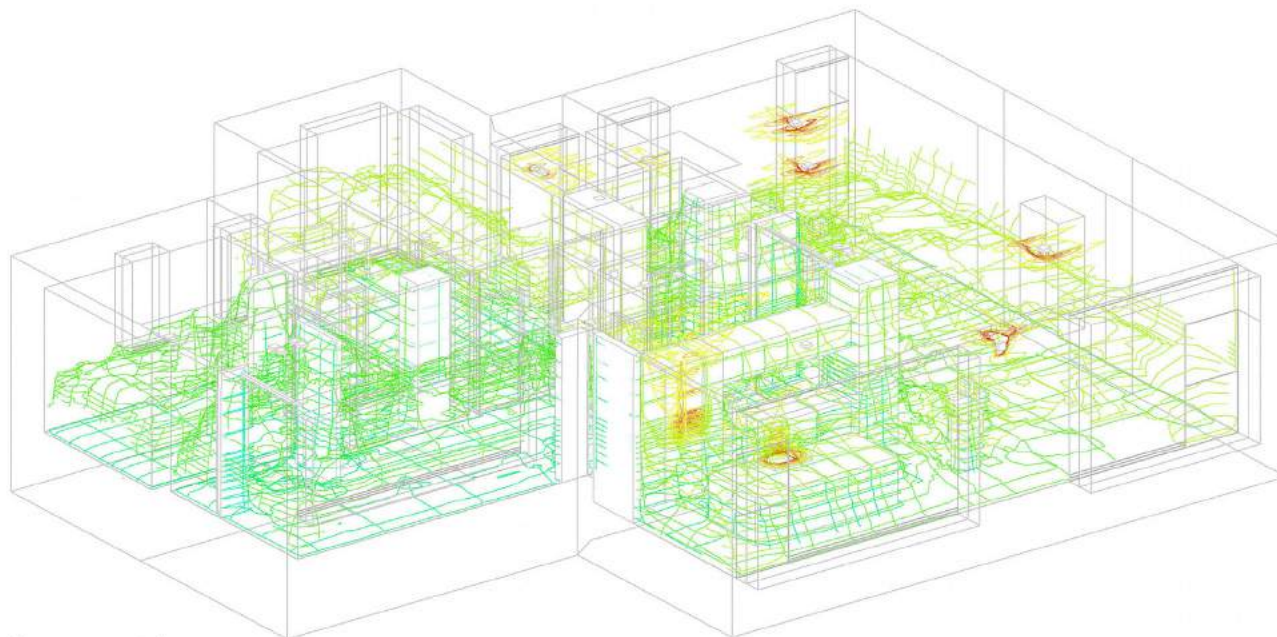
Sezione B-B'



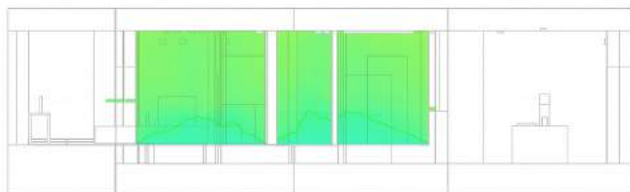
Sezione C-C'



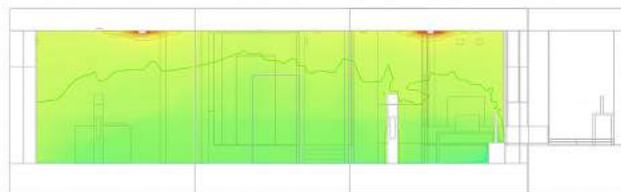
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 5*



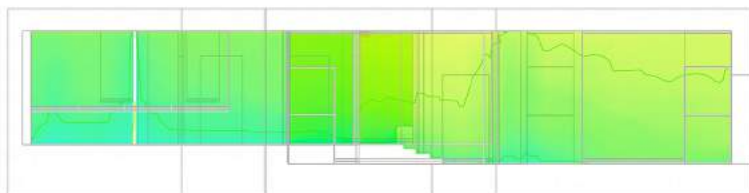
Assonometria



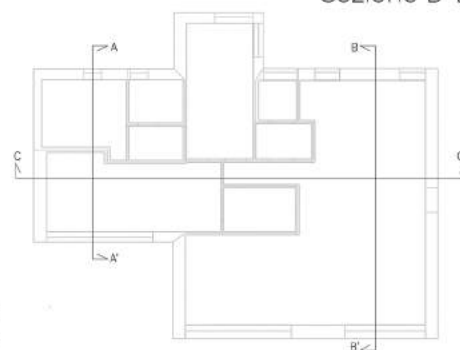
Sezione A-A'



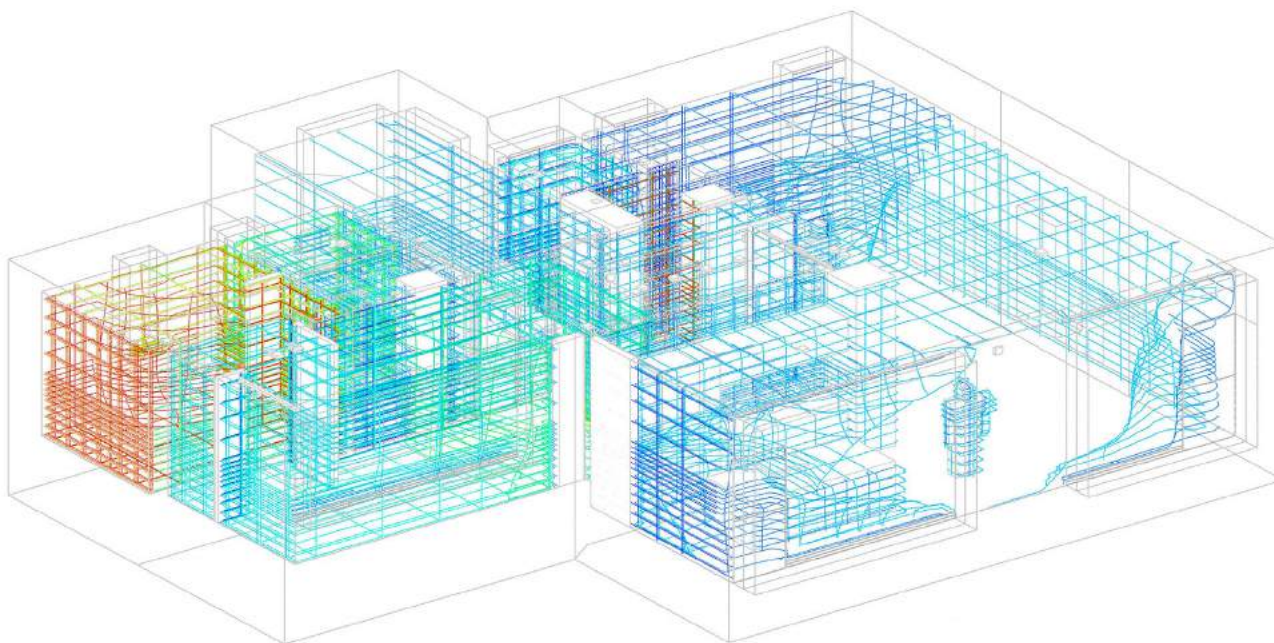
Sezione B-B'



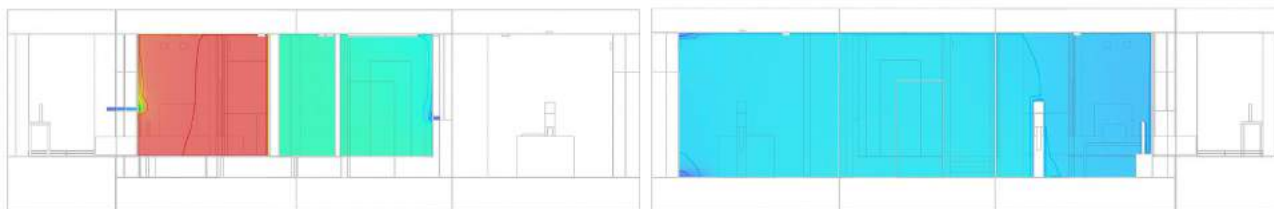
Sezione C-C'



- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 5*

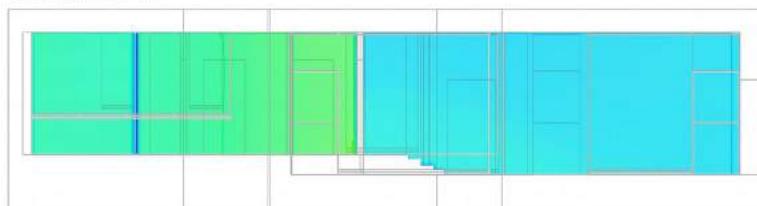


Assonometria

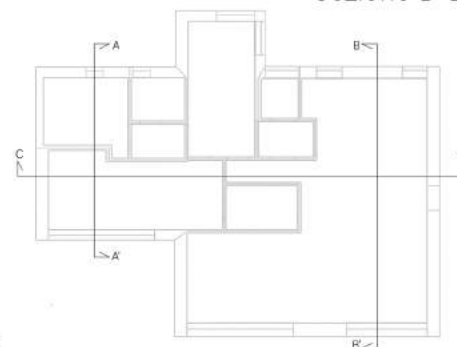


Sezione A-A'

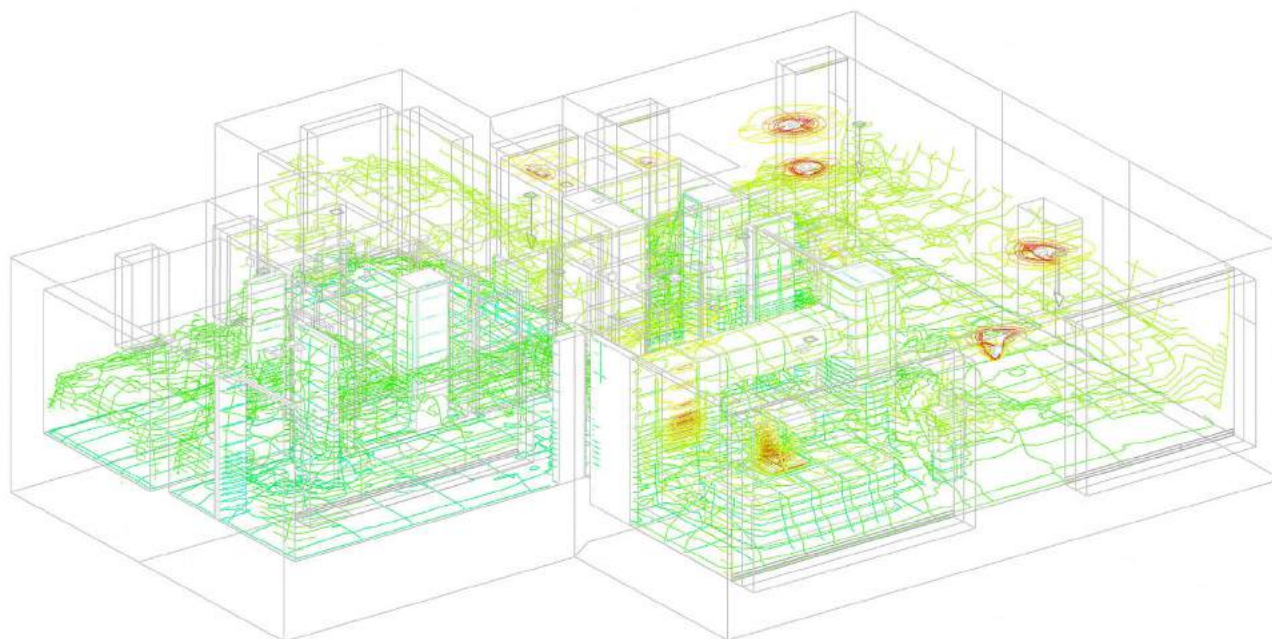
Sezione B-B'



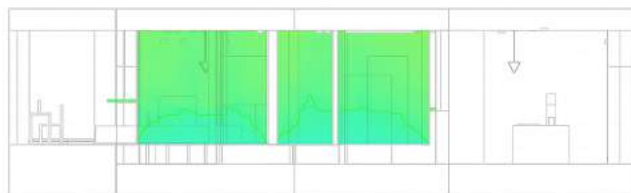
Sezione C-C'



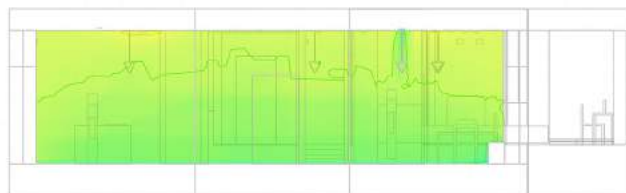
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 6*



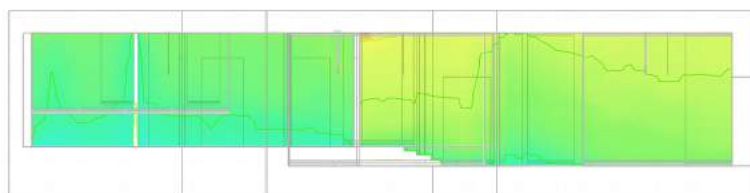
Assonometria



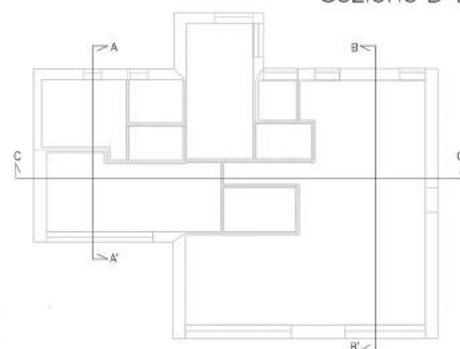
Sezione A-A'



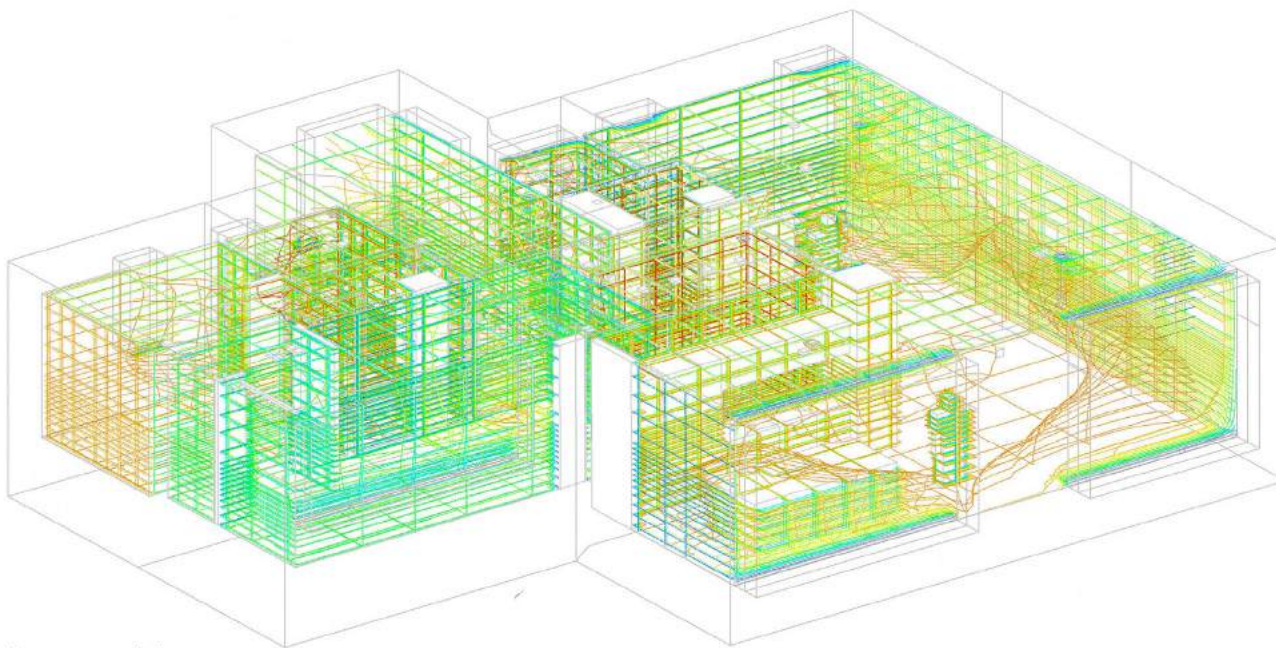
Sezione B-B'



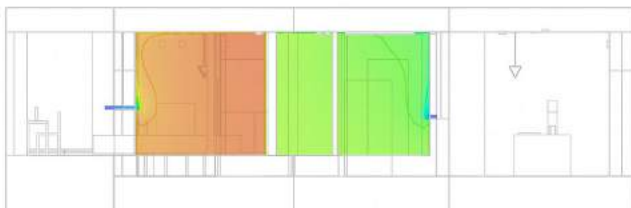
Sezione C-C'



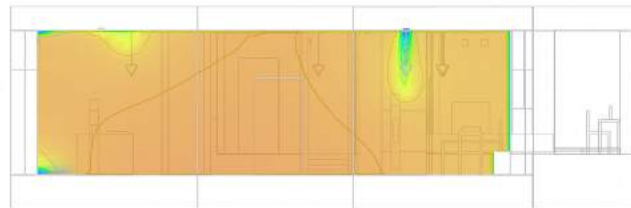
- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 6*



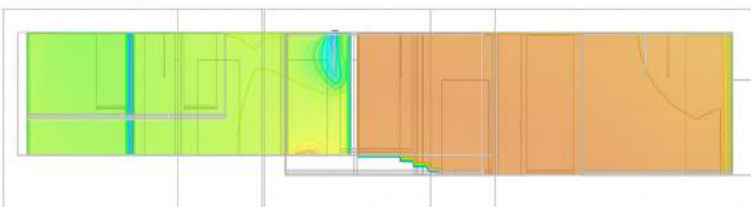
Assonometria



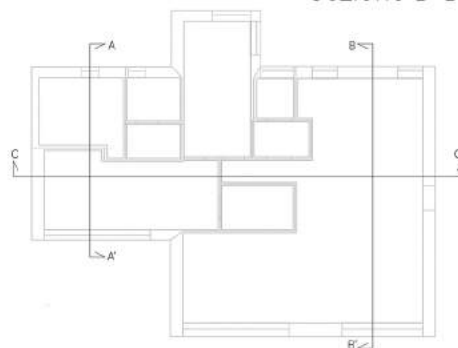
Sezione A-A'



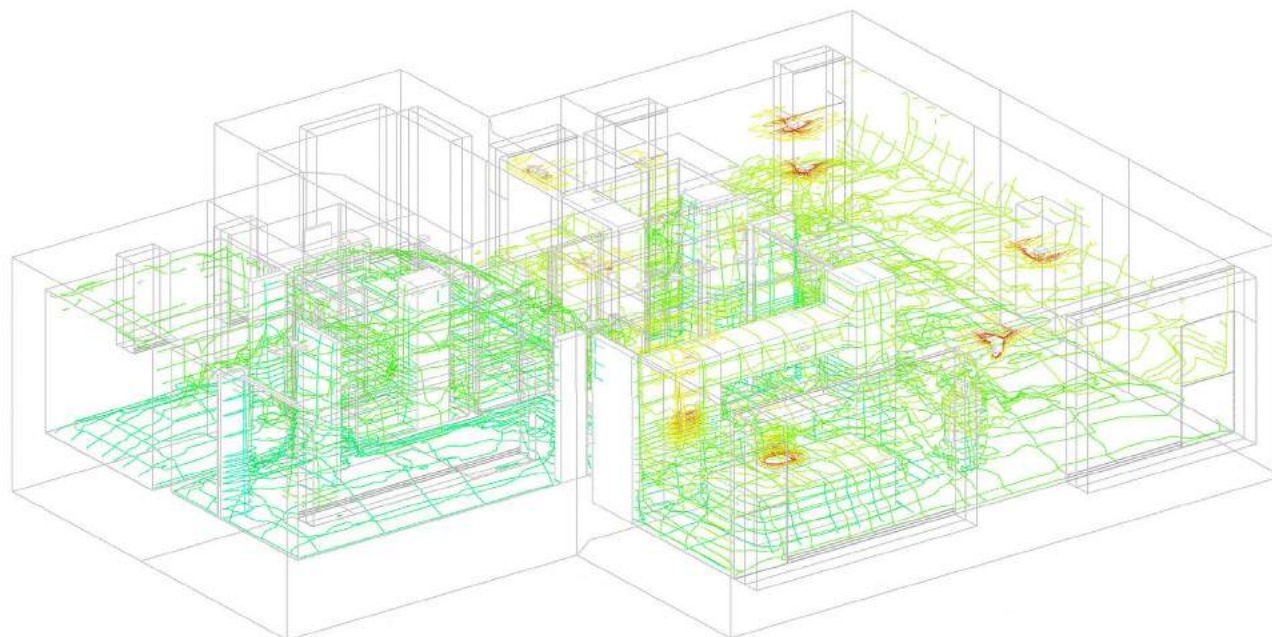
Sezione B-B'



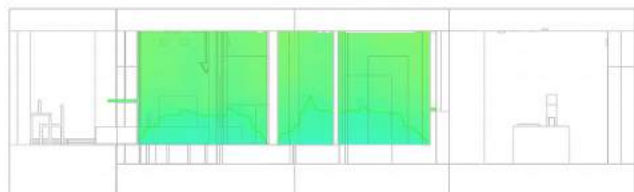
Sezione C-C'



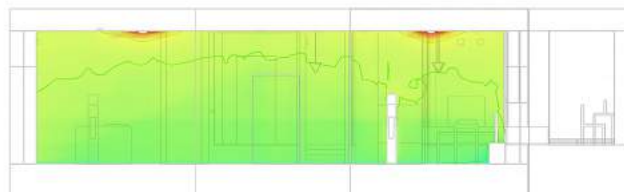
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 7*



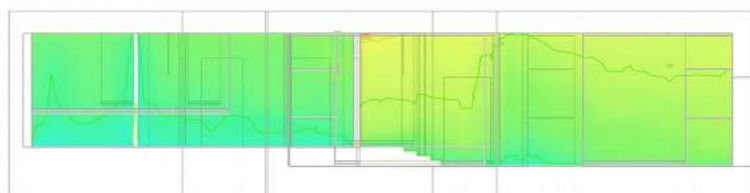
Assonometria



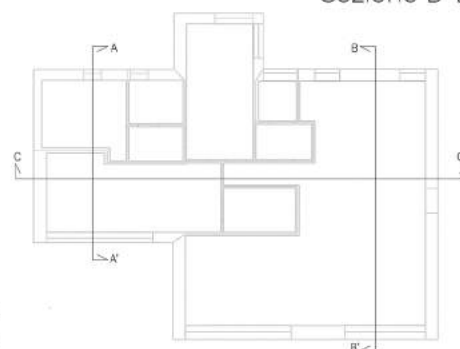
Sezione A-A'



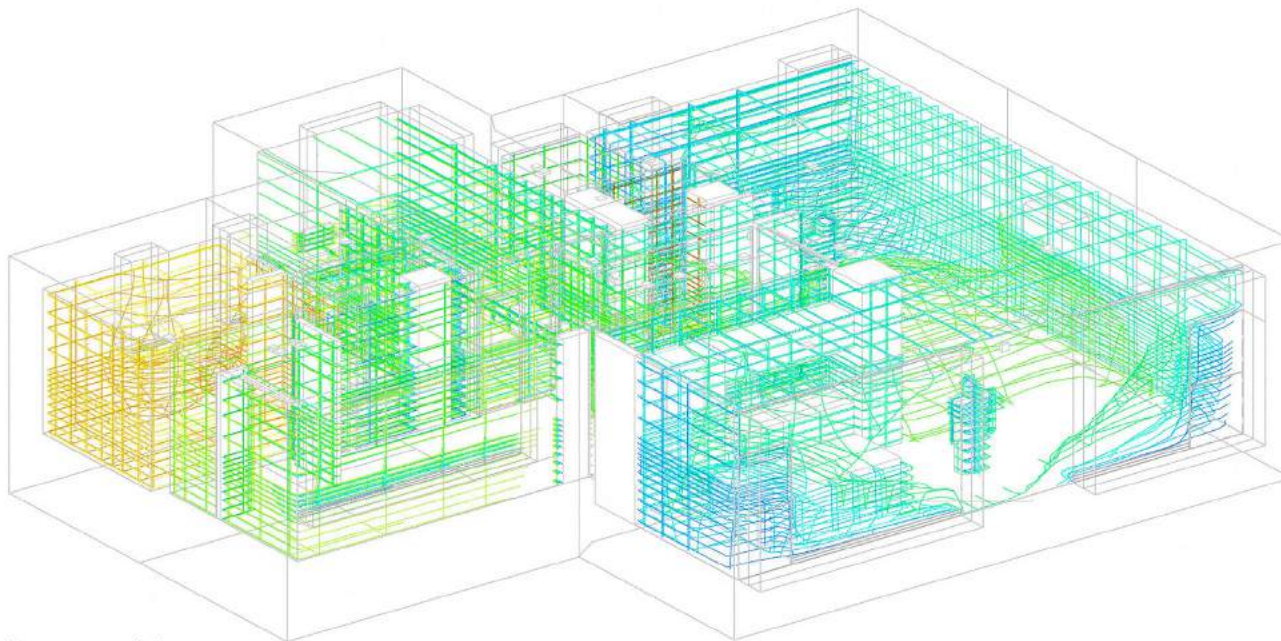
Sezione B-B'



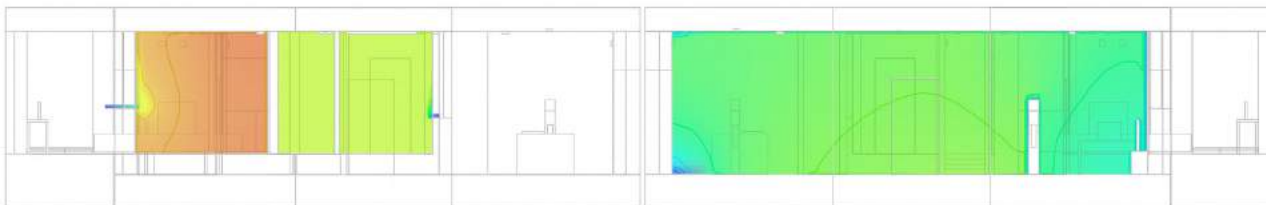
Sezione C-C'



- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 7*

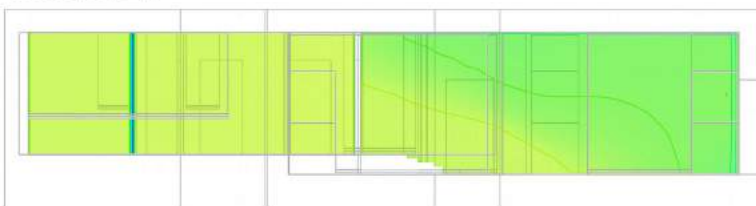


Assonometria

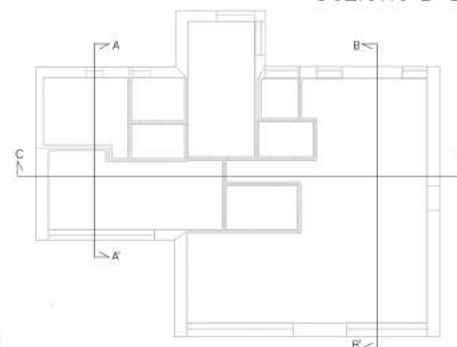


Sezione A-A'

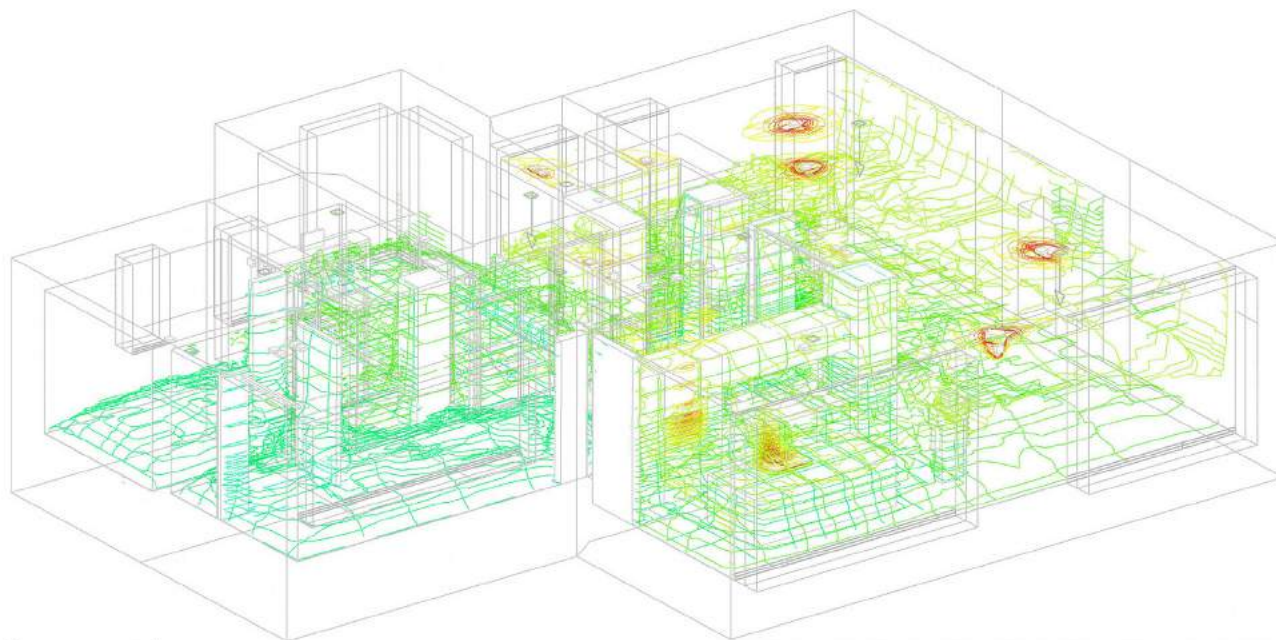
Sezione B-B'



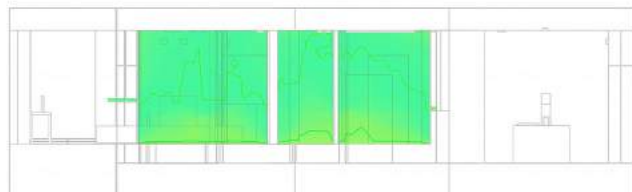
Sezione C-C'



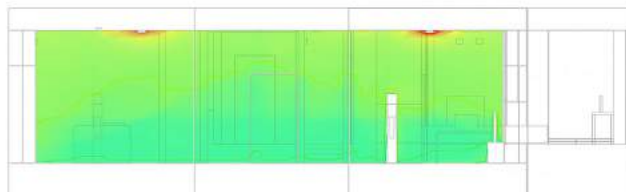
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 8*



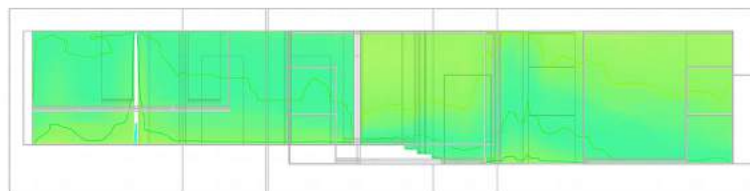
Assonometria



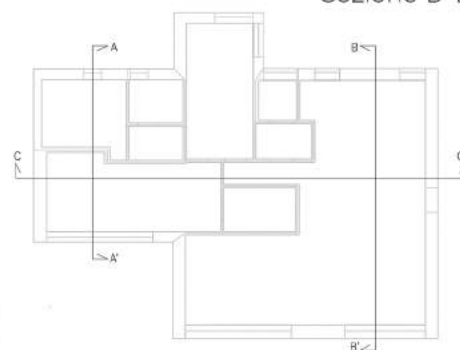
Sezione A-A'



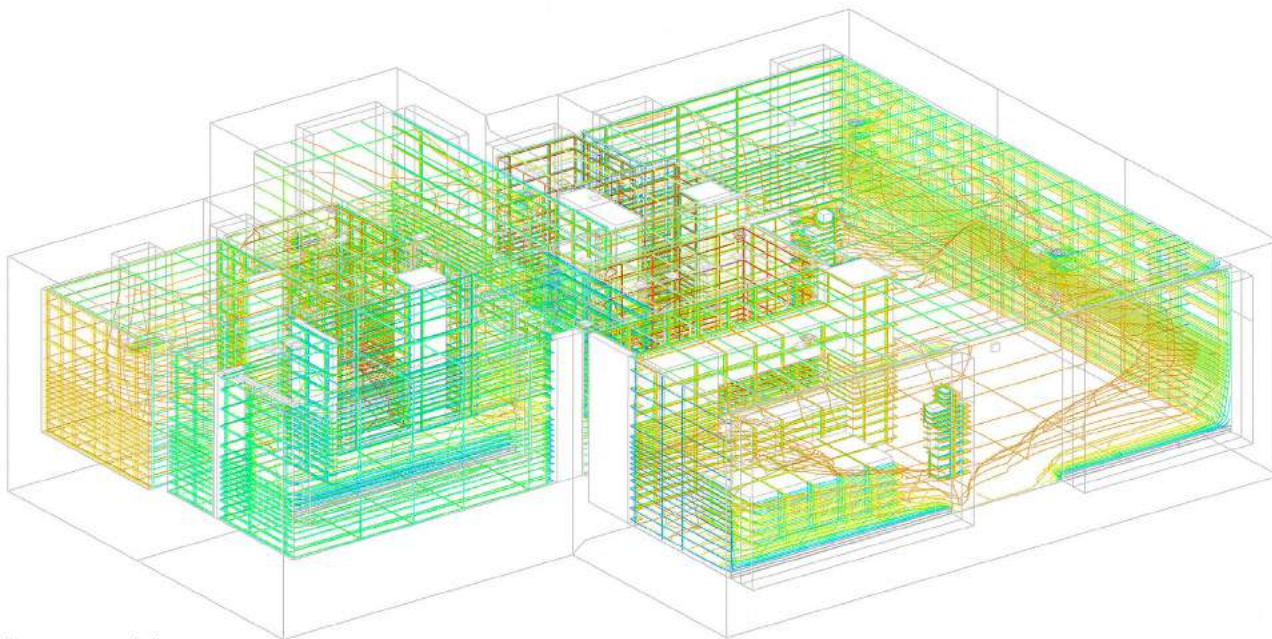
Sezione B-B'



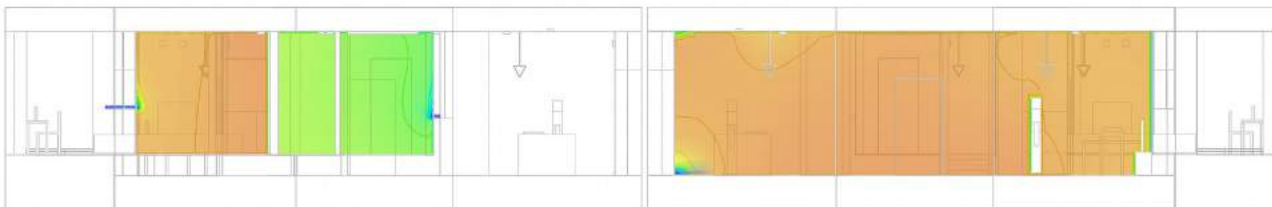
Sezione C-C'



- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 8*

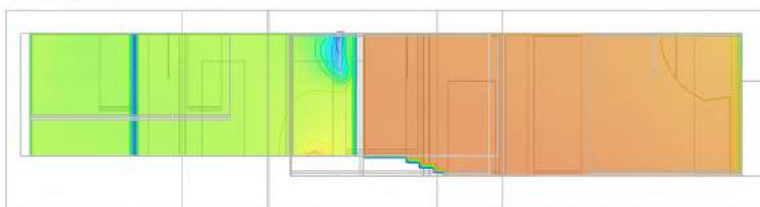


Assonometria

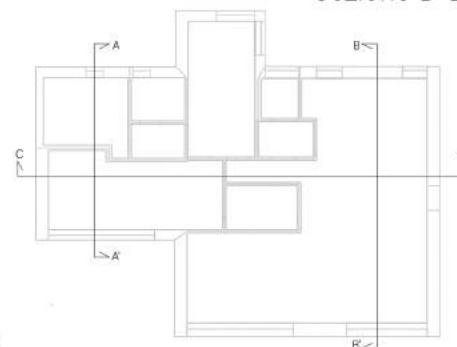


Sezione A-A'

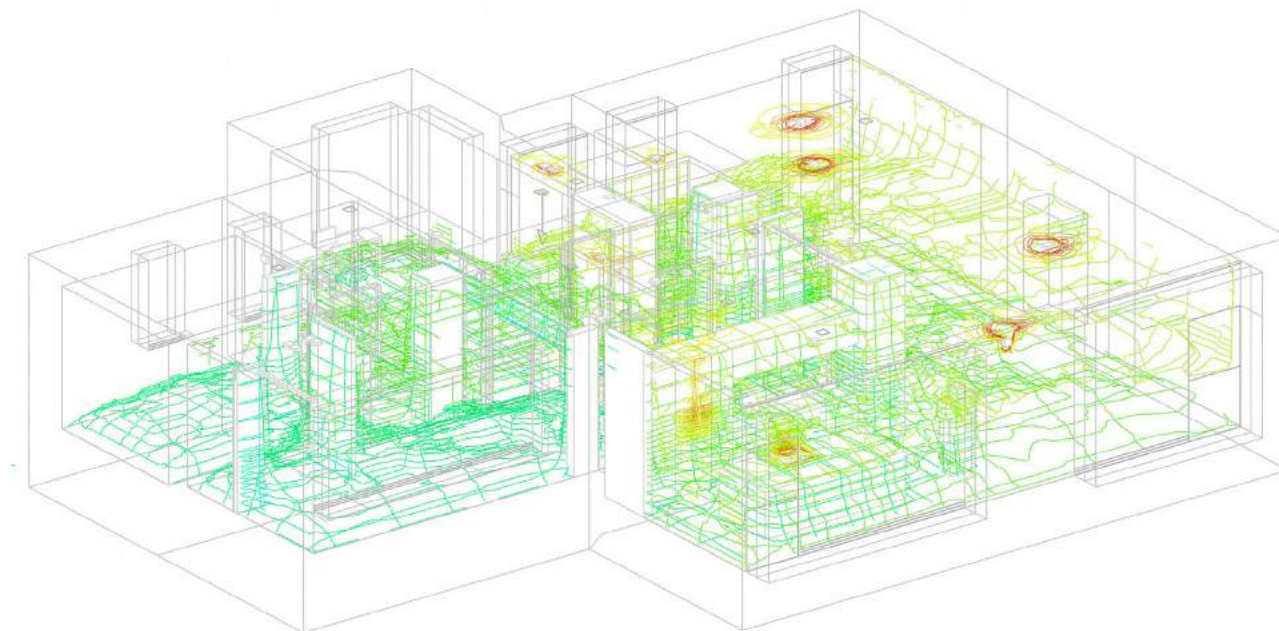
Sezione B-B'



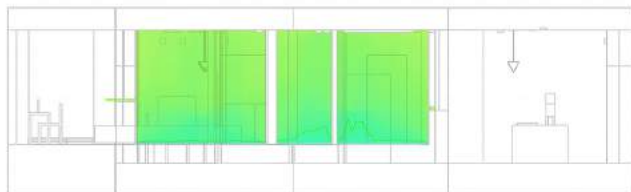
Sezione C-C'



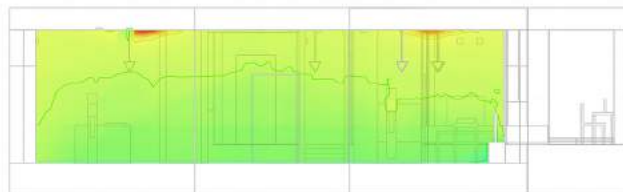
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 9*



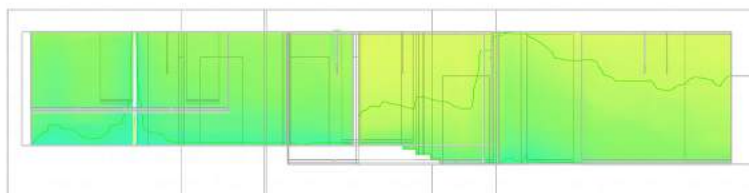
Assonometria



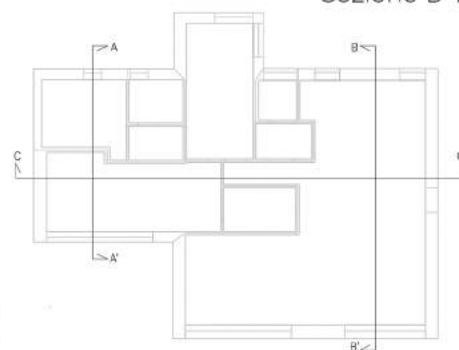
Sezione A-A'



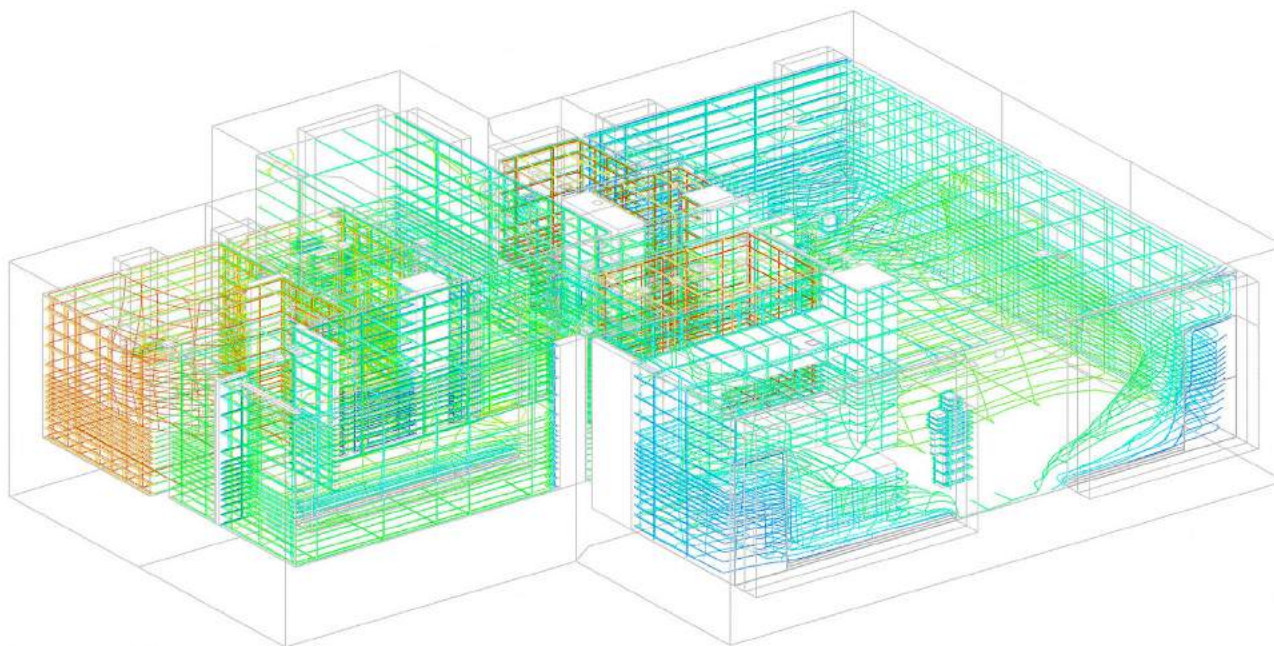
Sezione B-B'



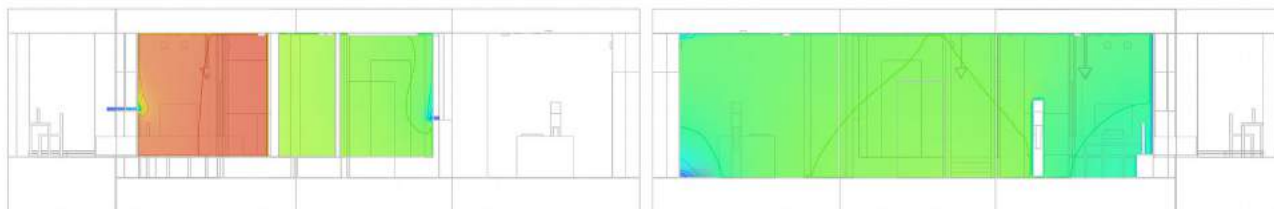
Sezione C-C'



- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 9*

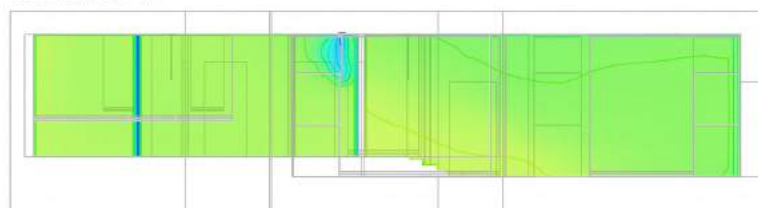


Assonometria

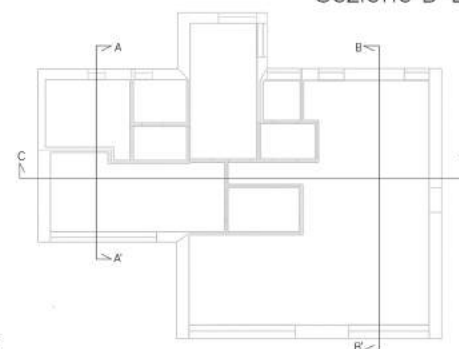


Sezione A-A'

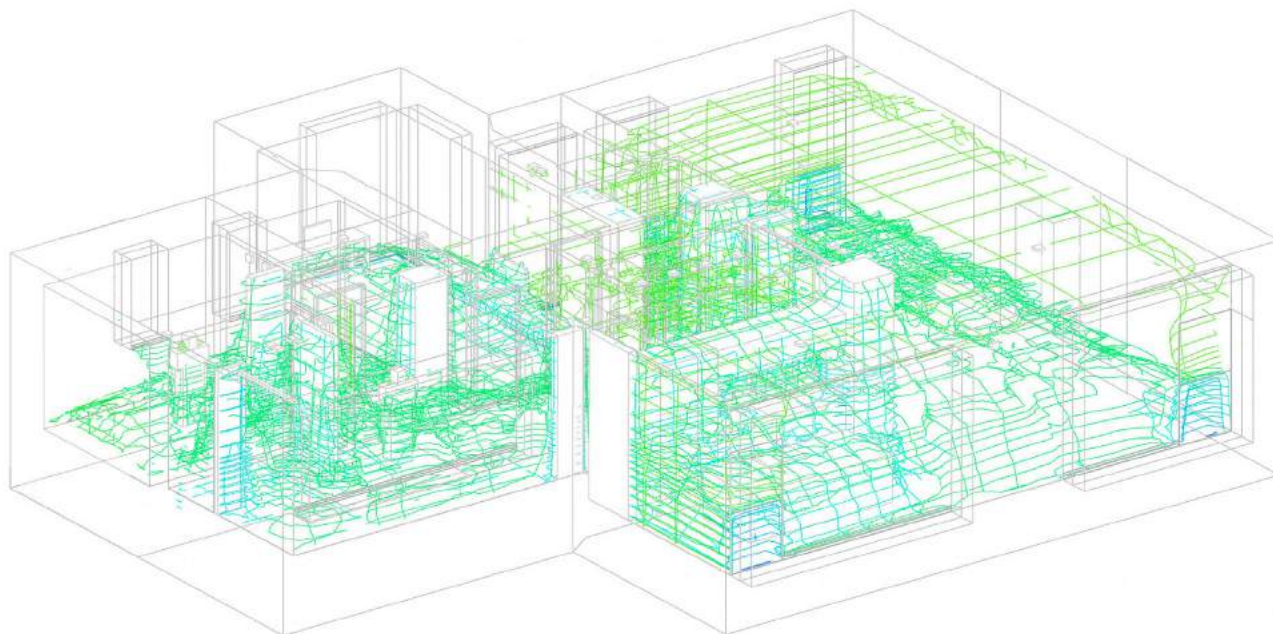
Sezione B-B'



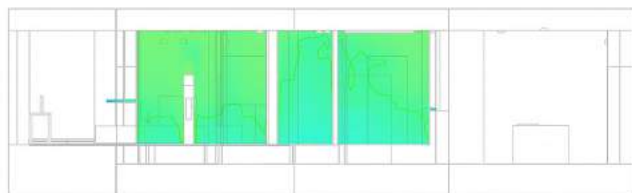
Sezione C-C'



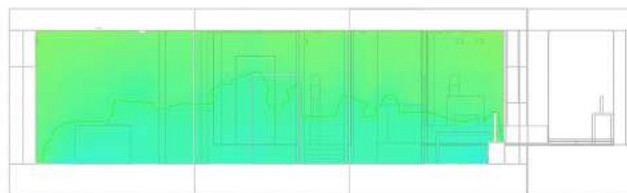
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 10*



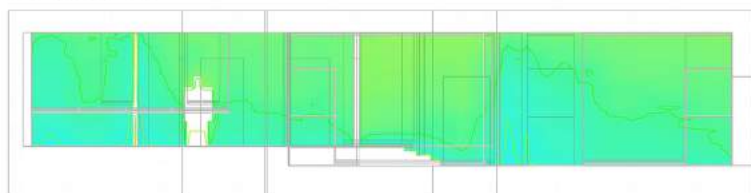
Assonometria



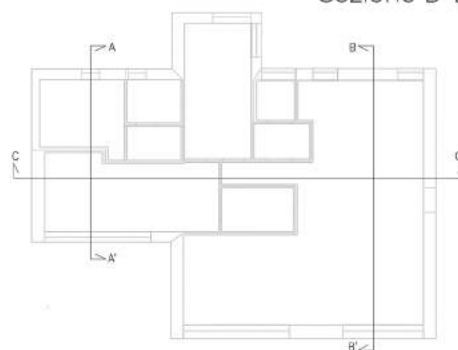
Sezione A-A'



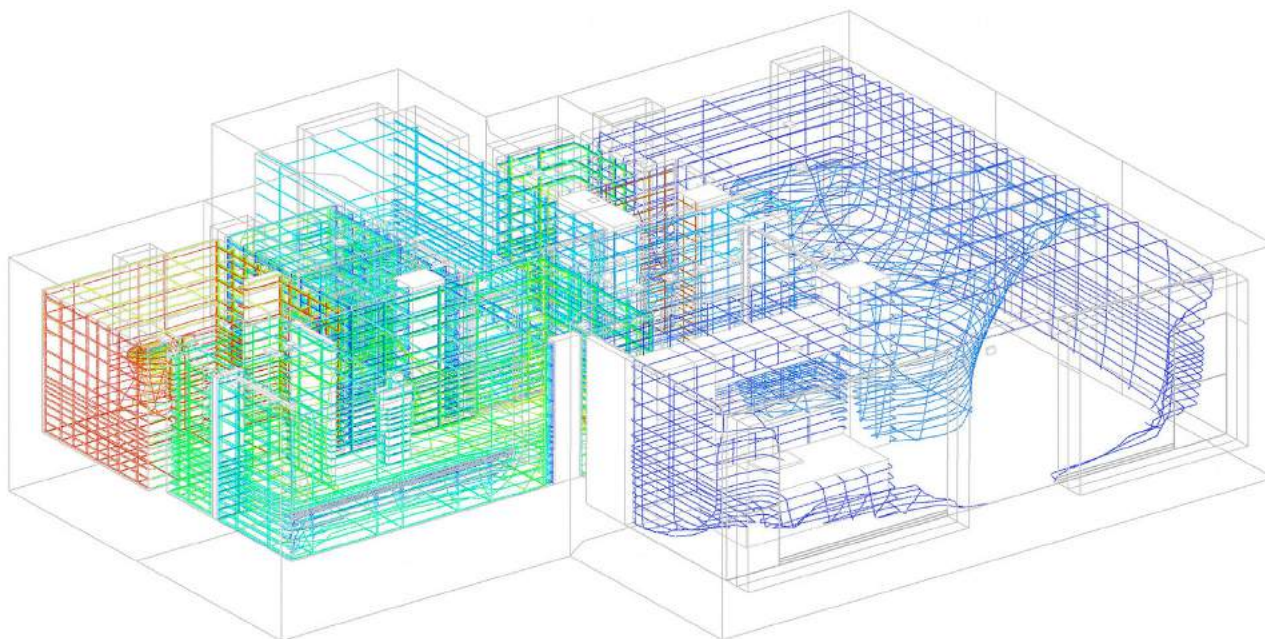
Sezione B-B'



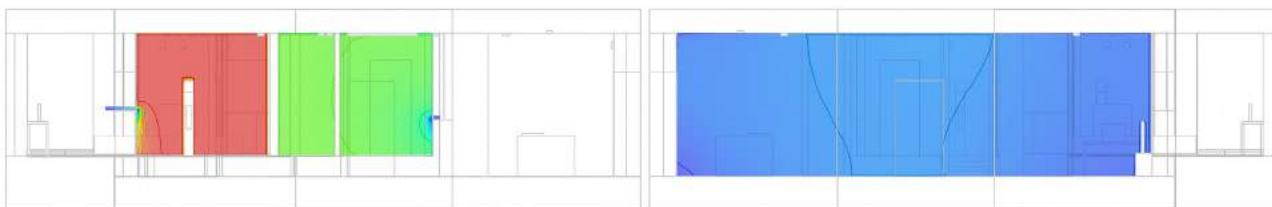
Sezione C-C'



- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 10*

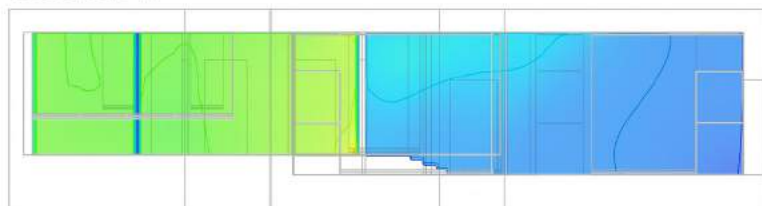


Assonometria

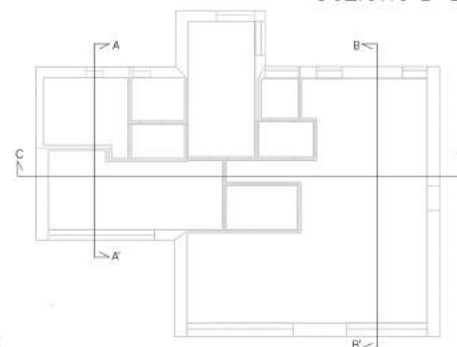


Sezione A-A'

Sezione B-B'



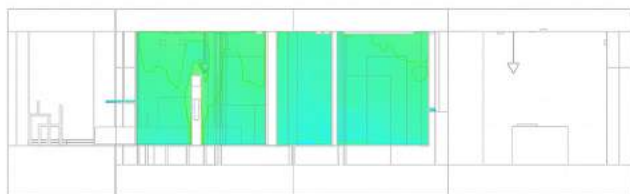
Sezione C-C'



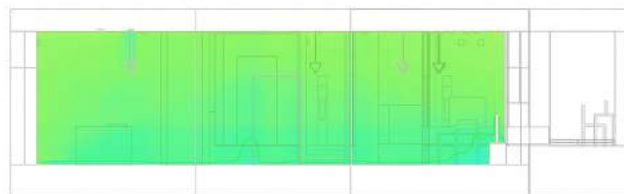
- *Comfort termico - Simulazione CFD - Scenario 11*



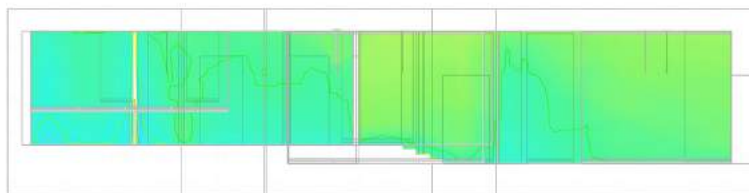
Assonometria



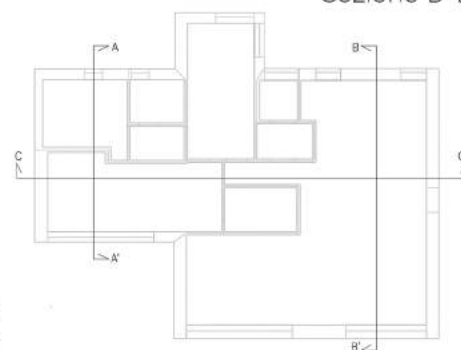
Sezione A-A'



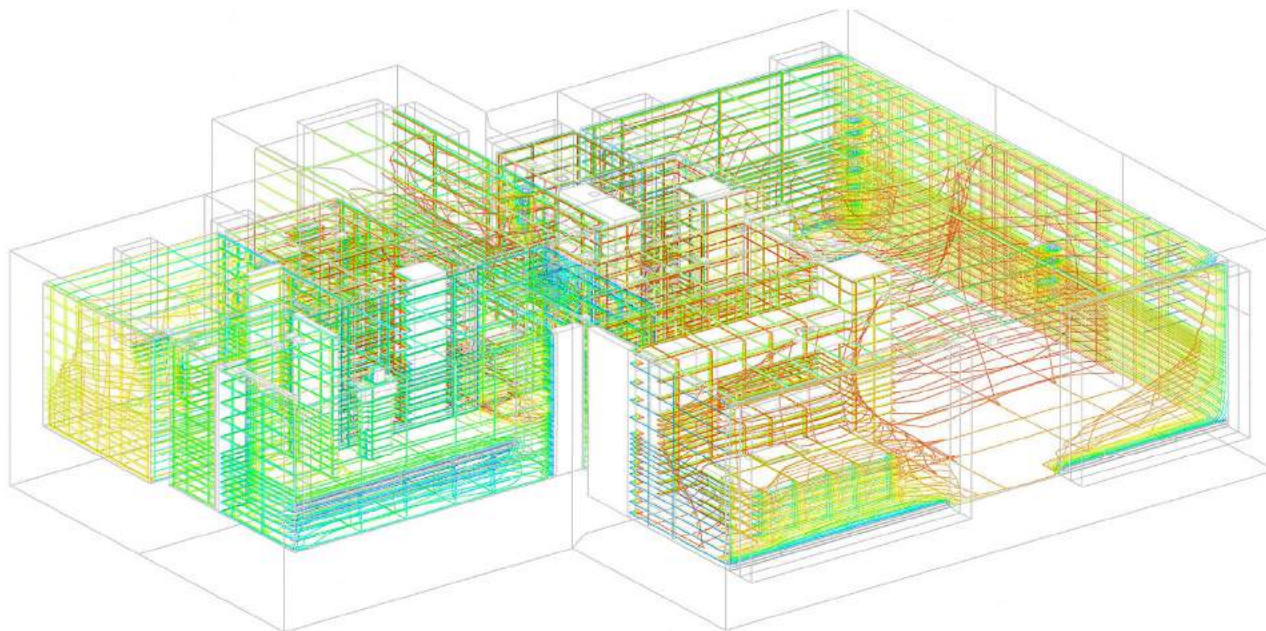
Sezione B-B'



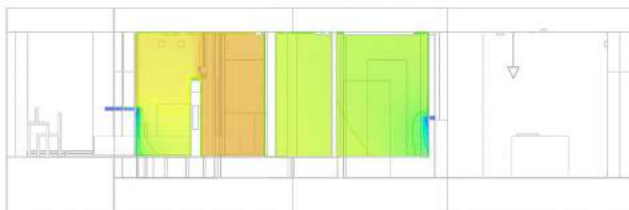
Sezione C-C'



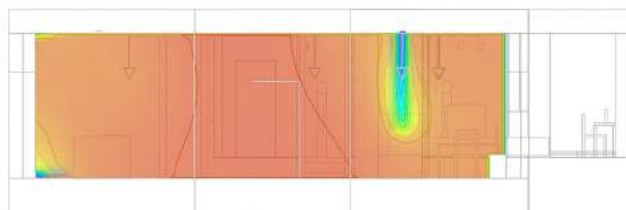
- *Distribuzione dell'aria - Simulazione CFD -Scenario 11*



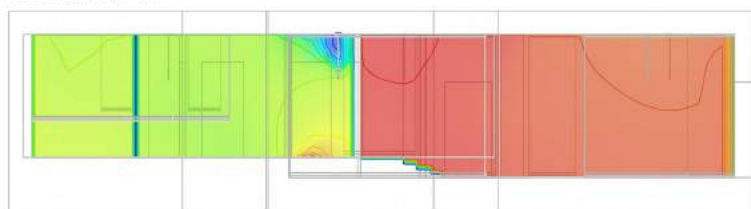
Assonometria



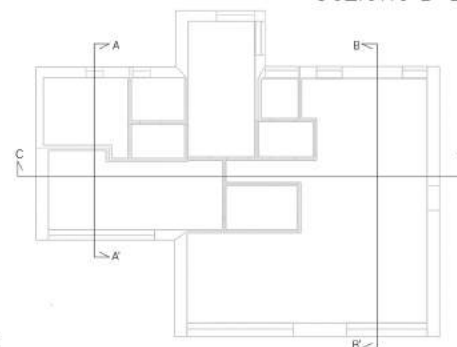
Sezione A-A'



Sezione B-B'



Sezione C-C'



6.2.1 Comfort termico e distribuzione dell'aria

- *Orario di simulazione: 08:15, 20 Gennaio*

Scenario 1

L'aria esterna ha una temperatura di 0,4°C con una differenza di 19,6°C rispetto alla temperatura di set-point. Le finestre vengono considerate aperte nelle due camere con una portata complessiva di 0,3 ac/h. L'immissione di aria fredda crea una situazione di discomfort termico nei locali in cui le finestre sono aperte, dove il PMV e PPD raggiungono rispettivamente picchi di -3 e 100% in prossimità delle finestre. Nella zona giorno la situazione risulta più favorevole dal punto di vista del comfort poiché le porte interne sono chiuse e l'aria fredda non viene distribuita negli altri locali se non per le infiltrazioni dovute agli spifferi delle porte interne. **Fig.45a.**

Dal punto di vista della distribuzione dell'aria, i locali ventilati naturalmente possiedono un valore di LMA estremamente ridotto compreso tra i 200 s ed i 400 s. Tuttavia, sempre a causa della configurazione con le porte interne chiuse, i ricambi d'aria non sono sufficienti per ventilare la zona giorno, infatti i secondi impiegati aumentano notevolmente raggiungendo picchi di 4500 s.

Scenario 2

Nella seconda simulazione è stato scelto di creare una configurazione dove tutte le porte interne sono aperte così da migliorare la distribuzione dell'aria e ridurre le criticità della distribuzione dell'aria.

La situazione dal punto di vista del comfort è peggiorativa. Infatti, la zona notte rimane comunque in uno stato di sensazione termica lievemente fredda a causa dell'immissione dell'aria a bassa temperatura. Tenendo conto che la zona giorno è soggetta all'ingresso di aria fredda dalle finestre il comfort viene ridotto con un picco di -1 in prossimità del corridoio. **Fig.45b.**

Aperto le porte interne l'aria raggiunge più rapidamente i punti dei locali non arieggiati direttamente riducendo l'età dell'aria a 3400s rispetto ai 4500s della simulazione precedente. Nella zona notte si ha un aumento di LMA poiché l'aria viene distribuita anche agli altri locali e non viene convogliata unicamente verso i locali ventilati direttamente. Questo incremento è accettabile poiché il valore risultante rimane relativamente basso con un picco di 1000s rispetto ai 400s della simulazione precedente.

Scenario 3

La ventilazione meccanica ha una temperatura di immissione di 20°C per cui le condizioni termiche dell'ambiente non risento-

no dell'immissione di aria fredda come con la ventilazione naturale.

Questo permetterà di ricambiare l'aria senza influire negativamente sul comfort.

A conferma di ciò, nella terza simulazione viene utilizzata la ventilazione meccanica con una portata 0,5 ac/h come definito dalla normativa 13399^[48]. Utilizzando la ventilazione meccanica il comfort è prossimo alla neutralità termica nella maggioranza dei punti dell'edificio e non è più presente il discomfort termico in prossimità delle finestre causato dalla ventilazione naturale. La distribuzione dell'aria risulta più omogenea se comparata alla ventilazione naturale, poiché i punti di immissione sono distribuiti nei vari locali. L'età dell'aria raggiunge un massimo di 2250s nella zona giorno ed un minimo di 750s nella camera matrimoniale.

Questa differenza è dovuta principalmente alle infiltrazioni. Di fatto, le stesse vengono calcolate in funzione della superficie vetrata. Il risultato evidenzia che il numero di ricambi orari della camera matrimoniale risulta maggiore rispetto agli altri, dato il rapporto aeroilluminante superiore alle altre stanze.

Scenario 4

Nell'ultima simulazione alle ore 8:15 del 20 Gennaio è stata impostata una portata pari

a 1,1 ac/h come calcolato secondo la normativa UNI EN 15251^[32].

La situazione di comfort nella maggior parte dei punti dell'ambiente rimane invariata rispetto alla simulazione precedente. Tuttavia, in corrispondenza delle bocchette di mandata, l'elevata velocità dell'aria immessa crea discomfort locale portando i valori di PMV e PPD al di fuori del range di neutralità termica. **Fig.46 - Fig.47.**

L'aumento di portata ha un effetto estremamente positivo sulla qualità dell'aria. Infatti il suo valore viene dimezzato in tutti gli ambienti rispetto alla simulazione precedente.

- *Orario di simulazione: 13:45, 27 Luglio*

Scenario 5

Questo scenario è rappresentativo della condizione estiva in cui la temperatura esterna è superiore a quella interna.

Nello specifico la temperatura esterna è di 29,2°C rispetto ai 26°C impostati perciò la differenza è di 3,2°C. **Fig.48a.**

La temperatura interna è leggermente superiore in corrispondenza delle finestre della zona giorno, le quali sono aperte dando accesso all'aria esterna.

I parametri di comfort rispecchiano questa situazione aumentando leggermente nella zona.

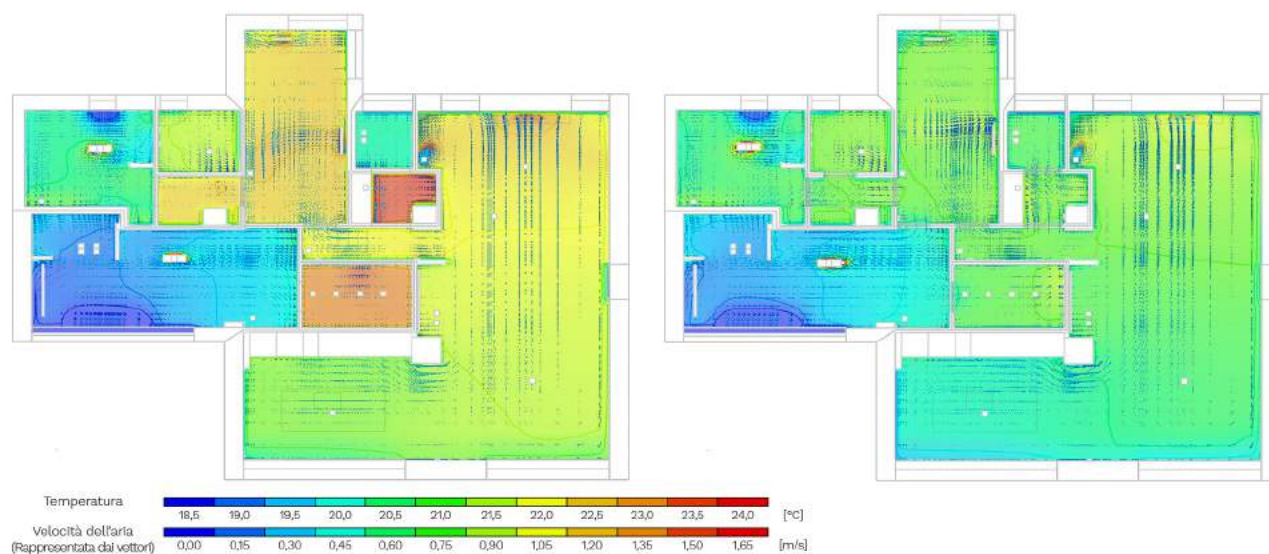


Fig.45 a) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 1; b) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 2

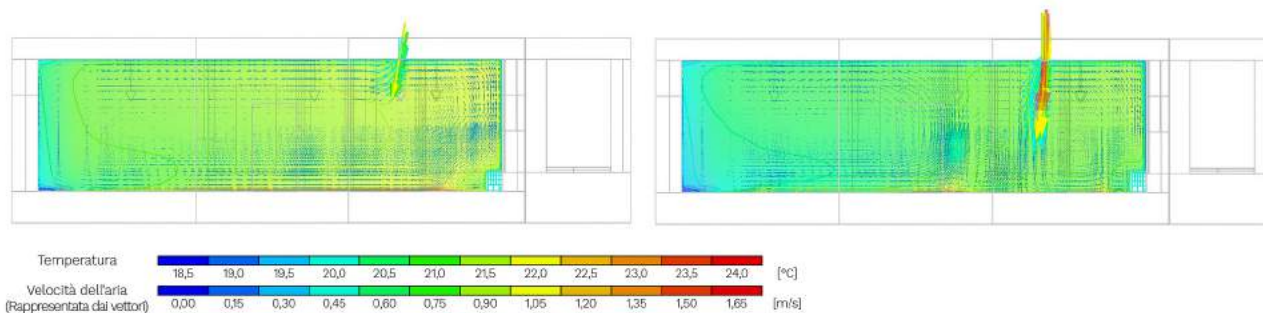


Fig.46 a) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 3; b) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 4

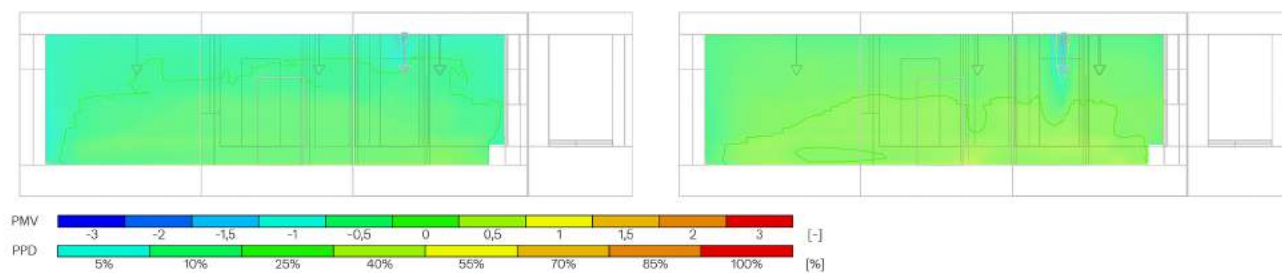


Fig.47 a) Distribuzione del PMV e PPD, scenario 3; b) Distribuzione del PMV e PPD, scenario 4

La distribuzione dell'aria è ottimale nella zona giorno con dei valori di età dell'aria inferiori a 1800s ma non riesce ad essere distribuita adeguatamente nella zona notte poiché le porte interne sono chiuse.

Scenario 6

Considerando che la temperatura di immissione delle bocchette di mandata è di circa 26°C non si vedono notevoli cambiamenti nelle temperature e nelle condizioni di comfort interne rispetto alla simulazione precedente se non per le zone in prossimità delle finestre aperte. **Fig.48b**. La distribuzione dell'aria, invece, è più omogenea rispetto a quella naturale riuscendo a ventilare adeguatamente anche la zona notte

con una riduzione dei valori di età dell'aria di circa 1000s.

- *Orario di simulazione: 19:45, 17 Agosto*

Scenario 7

Questo scenario, come già introdotto, considera il periodo estivo e utilizza la ventilazione naturale con temperatura esterna pari a 24,4°C, inferiore di solo 1,6°C rispetto alla temperatura di set-point (26°C).

In questo caso il comfort non è influenzato dall'aria immessa, come invece accade negli scenari 1 e 2 data la prossimità tra le temperature dell'aria interna ed esterna **Fig.49a**. Analizzando la sezione in prossimità delle finestre non si otterranno so-

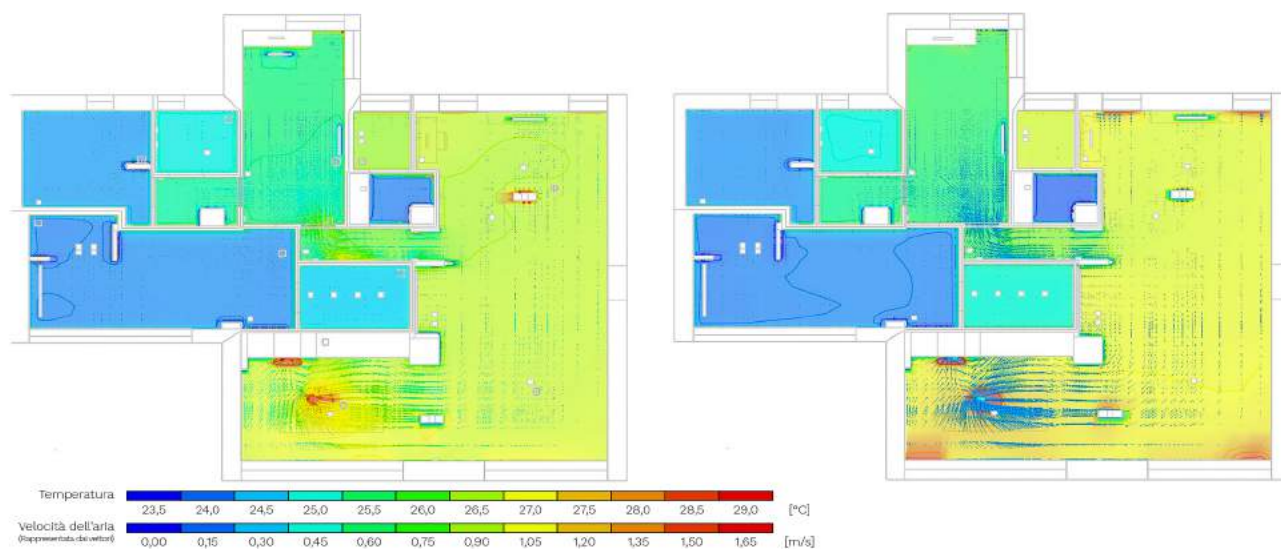


Fig.48 a) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 5; b) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 6

stanziali differenze con l'ambiente limitrofo sulla base dei valori di PMV e PPD.

Per quanto riguarda la distribuzione dell'aria si avrà un età dell'aria ottimale nella zona giorno. L'aria viene distribuita verso lo studio ma non riuscirà ad arieggiare adeguatamente le due camere a causa delle porte interne chiuse.

Scenario 8

In questo scenario viene impiegata la ventilazione meccanica e visto che la differenza di temperatura interna ed esterna è di soli 1,6°C non si verificheranno differenze sostanziali nei parametri di comfort. Infatti, i risultati saranno prossimi a quelli ottenuti con la ventilazione naturale nello scenario 5

sia nei riguardi del comfort che nei riguardi della temperatura **Fig.49b**.

Saranno decisamente diverse le condizioni riguardanti la distribuzione dell'aria. La situazione sarà migliorativa nella zona notte e peggiorativa nella zona giorno dove l'età dell'aria sarà omogeneo con un valore di circa 3000s.

Scenario 9

Nell'ultima simulazione per l'orario 19:45 del 17 Agosto, viene impiegata la ventilazione ibrida. Il locale ventilato naturalmente è la zona giorno in accordo con quanto riportato dal questionario delle attività^[70].

Considerando che il comfort e la temperatura hanno una configurazione simile im-

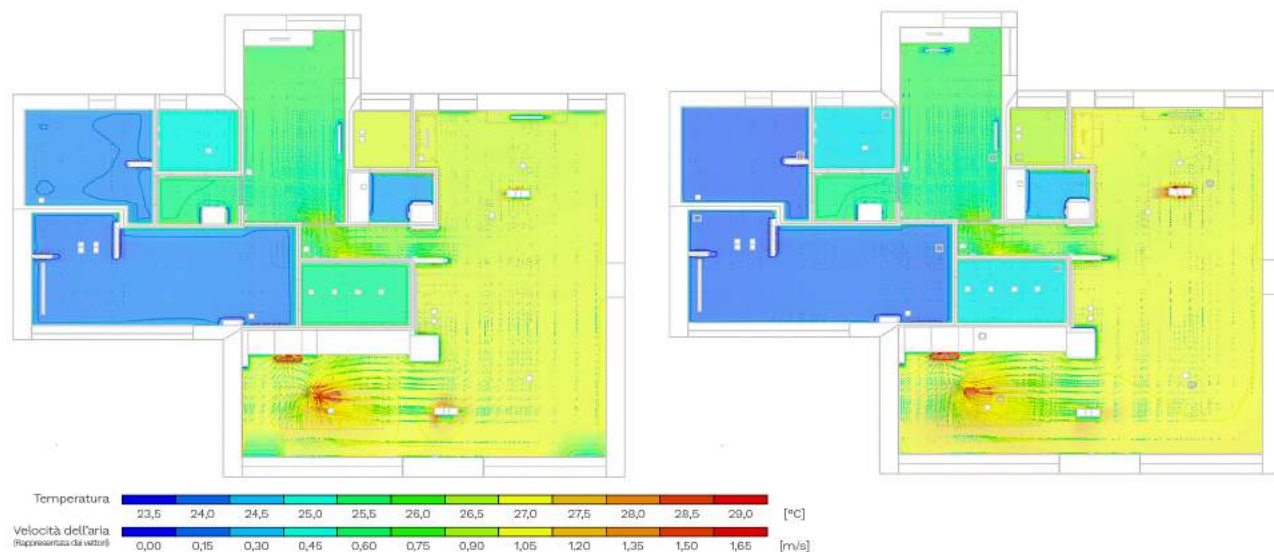


Fig.49 a) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 7; b) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 8

piegando la ventilazione meccanica o quella naturale, anche con la ventilazione ibrida non si avranno sostanziali variazioni **Fig.49c**. Dal punto di vista dell'età dell'aria combinare i risultati eccellenti forniti dalla ventilazione naturale con l'omogeneità creata dal sistema di ventilazione meccanica porta un notevole miglioramento in tutti i locali dell'edificio.

Infatti i valori di età dell'aria raggiungono un picco di soli 2400 s nella camera singola, rimanendo compresi tra i 1500 s ed i 300 s negli altri locali.

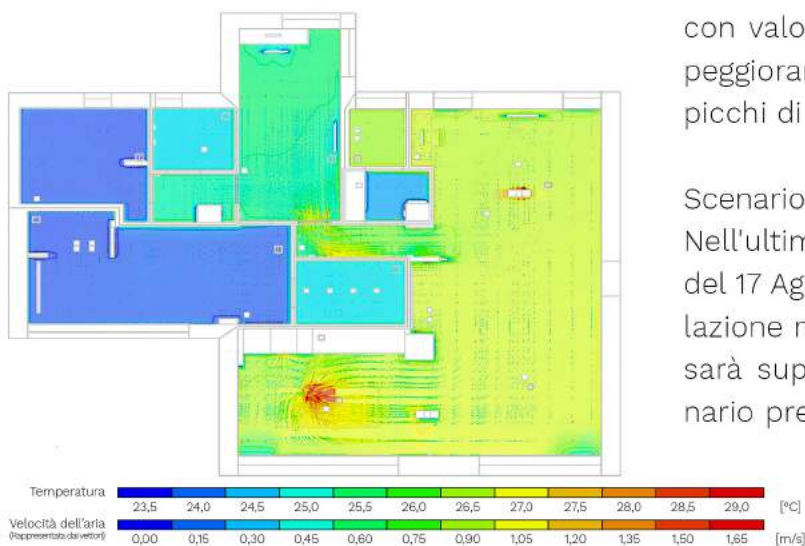


Fig.49 c) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 9

- *Orario di simulazione: 23:45, 17 Agosto*

Scenario 10

Nell'ultimo orario di simulazione (23:45 del 17 Agosto), la temperatura dell'aria esterna è di 17,05°C con una differenza di 9,95°C rispetto alla temperatura di set-point.

Grazie alla differenza di temperatura è possibile sfruttare il *free cooling* considerando che l'aria immessa ridurrà la temperatura e di conseguenza la richiesta energetica dell'impianto di raffrescamento. **Fig.50a**.

La situazione di comfort rientra nella neutralità termica nella maggioranza dei punti ad eccezione delle aree in prossimità delle finestre della zona giorno dalle quali è immessa l'aria.

L'età dell'aria è eccellente nella zona giorno con valori compresi tra i 600s ed i 1200s peggiorando nelle camere dove raggiunge picchi di 4500s.

Scenario 11

Nell'ultima simulazione per l'orario 23:45 del 17 Agosto l'edificio è servito dalla ventilazione meccanica. La temperatura interna sarà superiore se comparata con lo scenario precedente poichè la temperatura di

immissione è superiore a quella esterna, infatti la differenza di temperatura nella zona giorno è di circa 1°C mentre rimane quasi costante nella zona notte. **Fig.50b**.

La situazione di comfort rimane all'interno della sensazione termica, si avvertirà una condizione migliore in prossimità delle finestre della zona giorno mentre risulterà pressoché invariato nella zona notte.

Nei riguardi della distribuzione dell'aria la ventilazione meccanica garantirà un omogeneità nella distribuzione con dei valori compresi tra i 1200s ed i 2500s.

6.2.2 Considerazioni finali

Dal punto di vista del comfort lo scenario che soddisfa al meglio la neutralità termica è lo scenario 3, il quale rappresenta la configurazione in cui l'edificio è servito dalla ventilazione meccanica con portata pari a 0,5 ac/h in accordo con la normativa UNI 10339^[48].

Il motivo per cui prevale sulle condizioni di comfort degli altri orari analizzati risiede nell'efficacia del pavimento radiante di garantire un riscaldamento omogeneo all'interno dell'ambiente e perché gli apporti interni della cucina sono assenti, il che non comporterà un apporto termico concen-

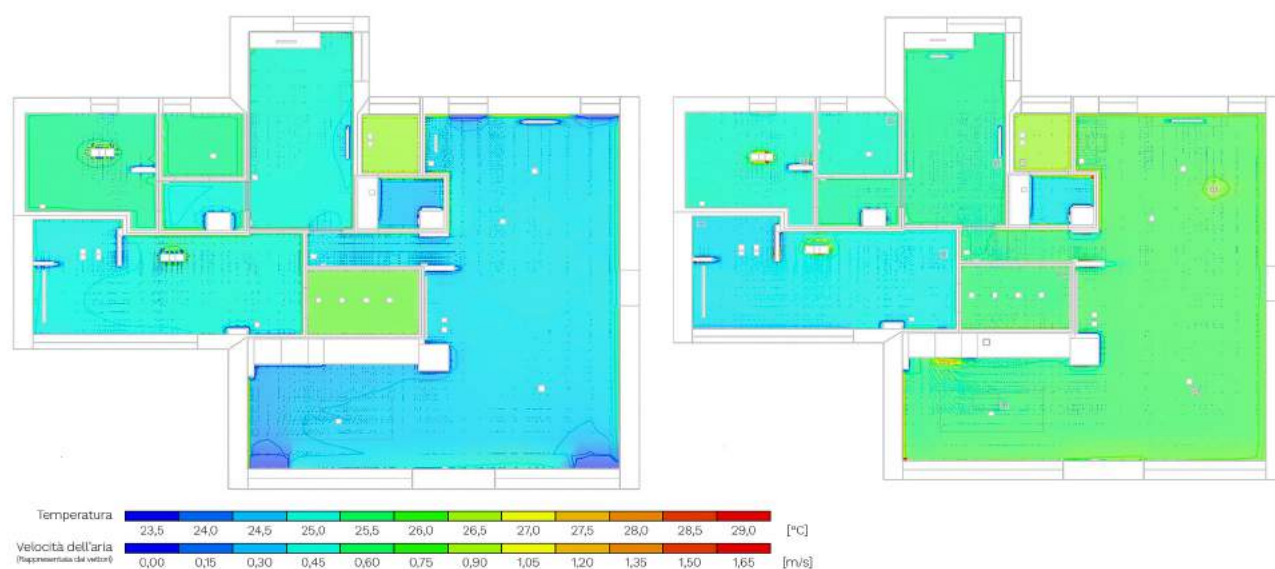


Fig.50 a) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 10; b) Distribuzione della temperatura e velocità dell'aria, scenario 11

trato nella zona giorno.

La condizione di comfort peggiore si ha nello scenario 2, dove l'aria immessa ha una temperatura molto bassa, la quale viene distribuita all'interno dell'ambiente a causa dell'apertura delle porte interne. Questo incide notevolmente sulle condizioni di comfort portando le zone limitrofe alle finestre ad un valore pari a -3 nell'indice del PMV.

Per quanto riguarda la distribuzione dell'aria, lo scenario 9 risulta il migliore, dimostrando l'efficacia della ventilazione ibrida nel garantire la distribuzione dell'aria ottimale.

La situazione peggiore si crea nello scenario 5 e nello scenario 7, nei quali l'edificio è

servito dalla ventilazione naturale e le porte interne sono chiuse, impedendo così la distribuzione dell'aria.

Lo scenario 1 avrà una condizione migliore se comparato con i precedenti data l'elevata differenza di temperatura tra ambiente esterno ed interno. Infatti, in generale l'età dell'aria risente notevolmente della differenza di temperatura tra interno ed esterno poiché più la differenza di temperatura sarà prossima allo zero più il movimento dell'aria sarà ridotto. Questo fenomeno è causato dal modo in cui l'aria si muove all'interno dell'ambiente in funzione della differenza di densità, la quale è a sua volta legata strettamente alla temperatura come dimostrato dalla comparazione tra gli scenari 1, 5 e 7.

An abstract graphic composed of numerous thin, blue, curved lines that intersect to form a dense, three-dimensional wireframe structure. The lines flow from the top left towards the bottom right, creating a sense of depth and movement. The overall effect is that of a complex, organic form, possibly representing a network or a futuristic architectural element.

7.CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI

Gli edifici sono responsabili del 25% del consumo energetico globale e di circa un terzo delle emissioni di CO₂^[22]. Per ridurre il loro impatto nel 2010 è stata introdotta la direttiva europea EPBD con l'obiettivo di efficientare il patrimonio edilizio esistente e di nuova costruzione attraverso un'efficiente produzione dell'involucro edilizio, un'appropriata scelta di tecnologie impiantistiche e l'utilizzo di risorse rinnovabili locali. Sebbene l'efficientamento dell'involucro riduca la dispersione di calore, rischia anche di trattenere all'interno dell'ambiente i contaminanti e il calore in eccesso nei periodi di raffrescamento riducendo quindi la qualità dell'aria e peggiorando la condizione di comfort. Per questo motivo la ventilazione assume un ruolo di primaria importanza nella progettazione di un edificio NZEB, in quanto risulta capace di regolare temperatura, umidità e qualità dell'aria. Questi parametri sono di grande importanza; infatti, nel 2018, l'EPBD è stata aggiornata per includere il comfort, la salute dell'occupante e la qualità dell'aria nella definizione di NZEB.

Questa tesi ambisce a valutare questi elementi attraverso l'utilizzo di software di computazione fluidodinamica (CFD). Il lavoro si è concentrato sullo studio dell'effetto di diverse strategie di ventilazione sul

comfort e la distribuzione dell'aria interna. Il software studiato ed applicato nei capitoli precedenti è DesignBuilder poiché racchiude la modellazione, la simulazione energetica e quella CFD all'interno dello stesso programma.

Dai risultati emersi dalle simulazioni e dagli scenari, la ventilazione naturale risulta decisamente efficace nell'immettere aria fresca all'interno dell'ambiente; tuttavia, non riesce ad essere distribuita equamente in tutti gli ambienti, specialmente se è ventilato un solo locale e le porte interne sono chiuse, rischiando di creare zone con aria stagnante. Inoltre è decisivo valutare le condizioni dell'ambiente esterno per utilizzare efficacemente la ventilazione naturale poiché se la temperatura esterna è nettamente inferiore rispetto a quella interna si possono creare fenomeni di discomfort con picchi in prossimità delle finestre; al contrario immettere aria con una temperatura più bassa durante l'estate sarà utile per raffrescare passivamente l'edificio.

La ventilazione meccanica non influirà né positivamente né negativamente sulle condizioni di comfort ad eccezione di portate eccessive, le quali definiranno una velocità di immissione elevata che creerà fenomeni di discomfort locale. Il suo impiego garan-

tisce un numero corretto di ricambi orari e un'adeguata distribuzione dell'aria in ambiente riducendo le possibilità che siano presenti aree stagnanti con un quantitativo di contaminanti superiore. Tuttavia, i costi di installazione ed i consumi energetici necessari per il funzionamento dell'impianto saranno superiori se comparati a quelli della ventilazione naturale.

La ventilazione ibrida combina le potenzialità della ventilazione naturale e della ventilazione meccanica. In particolare può sfruttare le potenzialità della prima per ricambiare rapidamente l'aria e l'omogeneità garantita tramite la seconda.

Da un'analisi critica del software DesignBuilder è sorta la sua limitazione principale dovuta all'incapacità di assumere i valori di infiltrazione come condizioni al contorno derivanti dalla simulazione energetica. Considerando che l'analisi CFD è impiegata principalmente per valutare i flussi di ventilazione, questa limitazione appare essere importante. Infatti, nei diversi scenari le infiltrazioni, parametro essenziale per un'accurata valutazione dei flussi d'aria, sono state ponderate manualmente e non da DesignBuilder.

L'analisi CFD si dimostra efficace e difficilmente sostituibile nello studio della distribuzione dell'aria. Tuttavia, se il suo potenziale risiede nella descrizione dettagliata dei flussi, le limitazioni provengono dai tempi di computazione e dal numero di informazioni richieste per raggiungere una precisione adeguata nella definizione dei risultati. Tale approccio del programma non è da definirsi critico ma necessario vista la mole di dati da processare.

Combinare la simulazione energetica e la simulazione CFD semplifica l'inserimento delle condizioni al contorno ma le tempistiche di computazione rimangono elevate, raggiungendo anche diverse ore per arrivare alla convergenza dei risultati.

Con l'aumentare delle richieste prestazionali degli edifici, prevedere il comportamento delle variabili in modo dettagliato diventerà sempre più decisivo per raggiungere una progettazione che garantisca efficienza, comfort e qualità dell'aria, perciò la simulazione CFD ha le potenzialità per diventare un'analisi necessaria al pari della simulazione energetica.

Per questi motivi, l'analisi e l'applicazione pratica svolta in questo progetto di tesi risulta innovativa. Tuttavia, i risultati ottenuti riguardano un edificio NZEB residenziale, particolarmente efficiente se compara-

to con lo stock immobiliare attualmente presente. Per questo, l'applicazione della simulazione CFD su edifici esistenti, caratterizzati da involucri poco efficienti, potrà risultare di interesse, permettendo uno studio dettagliato dei flussi d'aria con un'attenzione particolare alle infiltrazioni. Inoltre, come sottolineato in precedenza,

l'analisi CFD può essere utilizzata per studiare ambienti di grandi dimensioni, come atri, impianti sportivi, teatri, ecc.

Lo studio di questi ambienti tramite la simulazione CFD, utilizzabile anche per assistere la progettazione, può essere un argomento interessante per gli sviluppi futuri della ricerca.



8.ALLEGATI

8.1 Input degli scenari CFD

- Input scenario 1-2

Temperatura set-point				Temperatura esterna		Temperatura superficiale pavimento	
20°C				0,4°C		29°C	
Apporti interni				Ventilazione naturale e infiltrazioni			
Occupanti				Locale	Portata immissione [l/s]	Portata estrazione [l/s]	
Attività	Abbigliamento	Posizione					
1 Met	1 clo	Zona notte		Bagno zona giorno	0,756	0,751	
Apparecchiature [W]				Zona giorno	6,895	5,927	
Fornelli	-	Asciugatrice	56	Bagno zona notte	0,177	0,190	
Forno	-	Lavatrice	56	Camera singola	7,497	7,592	
Frigorifero	60	TV e PC	206	Studio	1,293	2,228	
Illuminazione [W]				Camera matrimoniale	26,354	26,284	
Bagno z.g	-	Bagno z.n	98,74	TOTALE	42,971	42,971	
Zona giorno	-	Studio	374,52				
Antibagno z.g.	-	Antibagno z.g.	77,64				
Camera sing.	248,67	Camera matr.	525,18				
Cabina armadio	135,34	-	-				

- Input scenario 3

Temperatura set-point				Temperatura esterna		Temperatura superficiale pavimento	
20°C				0,4°C		29°C	
Apporti interni				Ventilazione meccanica e infiltrazioni			
Occupanti				Locale	Portata immissione [l/s]	Portata estrazione [l/s]	
Attività	Abbigliamento	Posizione					
1 Met	1 clo	Zona notte		Bagno zona giorno	0,756	4,640	
Apparecchiature [W]				Zona giorno	36,995	31,091	
Fornelli	-	Asciugatrice	56	Bagno zona notte	0,177	5,187	
Forno	-	Lavatrice	56	Camera singola	4,410	0,189	
Frigorifero	60	TV e PC	206	Studio	9,072	2,228	
Illuminazione [W]				Camera matrimoniale	10,484	18,558	
Bagno z.g	-	Bagno z.n	98,74	TOTALE	61,893	61,893	
Zona giorno	-	Studio	374,52				
Antibagno z.g.	-	Antibagno z.g.	77,64				
Camera sing.	248,67	Camera matr.	525,18				
Cabina armadio	135,34	-	-				

- Input scenario 4

Temperatura set-point				Temperatura esterna		Temperatura superficiale pavimento	
20°C				0,4°C		29°C	
Apporti interni				Ventilazione meccanica e infiltrazioni			
Occupanti				Locale	Portata immissione [l/s]	Portata estrazione [l/s]	
Attività	Abbigliamento	Posizione					
1 Met	1 clo	Zona notte		Bagno zona giorno	0,756	26,584	
Apparecchiature [W]				Zona giorno	75,305	31,761	
Fornelli	-	Asciugatrice	56	Bagno zona notte	0,177	26,023	
Forno	-	Lavatrice	56	Camera singola	9,797	0,189	
Frigorifero	60	TV e PC	206	Studio	18,973	2,228	
Illuminazione [W]				Camera matrimoniale	21,985	40,208	
Bagno z.g.	-	Bagno z.n	98,74	TOTALE	126,993	126,993	
Zona giorno	-	Studio	374,52				
Antibagno z.g.	-	Antibagno z.g.	77,64				
Camera sing.	248,67	Camera matr.	525,18				
Cabina armadio	135,34	-	-				

- Input scenario 5

Temperatura set-point				Temperatura esterna		Temperatura superficiale pavimento	
26°C				29,2°C		19°C	
Apporti interni				Ventilazione naturale e infiltrazioni			
Occupanti				Locale	Portata immissione [l/s]	Portata estrazione [l/s]	
Attività	Abbigliamento	Posizione					
1,2 Met	0,5 clo	Zona giorno		Bagno zona giorno	0,658	0,663	
Apparecchiature [W]				Zona giorno	38,218	39,205	
Fornelli	800	Asciugatrice	-	Bagno zona notte	0,183	0,183	
Forno	712	Lavatrice	-	Camera singola	0,179	0,179	
Frigorifero	60	TV e PC	-	Studio	2,270	1,279	
Illuminazione [W]				Camera matrimoniale	1,463	1,463	
Bagno z.g.	64,42	Bagno z.n	-	TOTALE	42,971	42,971	
Zona giorno	1783,56	Studio	-				
Antibagno z.g.	82,62	Antibagno z.g.	-				
Camera sing.	-	Camera matr.	-				
Cabina armadio	-	-	-				

• Input scenario 6

Temperatura set-point				Temperatura esterna				Temperatura superficiale pavimento			
26°C				29,2°C				19°C			
Apporti interni								Ventilazione meccanica e infiltrazioni			
Occupanti								Locale	Portata immissione[l/s]	Portata estrazione [l/s]	
Attività	Abbigliamento		Posizione								
1,2 Met	0,5 clo		Zona giorno		Bagno zona giorno	0,658	4,553				
Apparecchiature [W]								Zona giorno	36,090	32,140	
Fornelli	800	Asciugatrice		-		Bagno zona notte	0,183	5,180			
Forno	712	Lavatrice		-		Camera singola	4,412	0,179			
Frigorifero	60	TV e PC		-		Studio	10,05	1,279			
Illuminazione [W]								Camera matrimoniale	10,501	18,562	
Bagno z.g	64,42	Bagno z.n		-		TOTALE	61,893	61,893			
Zona giorno	1783,56	Studio		-							
Antibagno z.g.	82,62	Antibagno z.g.		-							
Camera sing.	-	Camera matr.		-							
Cabina armadio	-	-		-							

• Input scenario 7

Temperatura set-point				Temperatura esterna				Temperatura superficiale pavimento			
26°C				24,4°C				19°C			
Apporti interni								Ventilazione naturale e infiltrazioni			
Occupanti								Locale	Portata immissione[l/s]	Portata estrazione [l/s]	
Attività	Abbigliamento		Posizione								
1,2 Met	0,5 clo		Zona giorno		Bagno zona giorno	0,605	0,601				
Apparecchiature [W]								Zona giorno	40,159	39,141	
Fornelli	800	Asciugatrice		-		Bagno zona notte	0,180	0,180			
Forno	712	Lavatrice		-		Camera singola	0,231	0,231			
Frigorifero	60	TV e PC		-		Studio	0,683	1,705			
Illuminazione [W]								Camera matrimoniale	1,113	1,113	
Bagno z.g	64,42	Bagno z.n		-		TOTALE	42,971	42,971			
Zona giorno	1783,56	Studio		-							
Antibagno z.g.	82,62	Antibagno z.g.		-							
Camera sing.	-	Camera matr.		-							
Cabina armadio	-	-		-							

- Input scenario 8

Temperatura set-point				Temperatura esterna				Temperatura superficiale pavimento			
26°C				24,4°C				19°C			
Apporti interni								Ventilazione meccanica e infiltrazioni			
Occupanti								Locale	Portata immissione [l/s]	Portata estrazione [l/s]	
Attività	Abbigliamento		Posizione								
1,2 Met	0,5 clo		Zona giorno			Bagno zona giorno	0,605	4,490			
Apparecchiature [W]								Zona giorno	38,031	32,076	
Fornelli	800	Asciugatrice		-			Bagno zona notte	0,180	5,177		
Forno	712	Lavatrice		-			Camera singola	4,464	0,231		
Frigorifero	60	TV e PC		-			Studio	8,462	1,705		
Illuminazione [W]								Camera matrimoniale	10,152	18,213	
Bagno z.g	64,42	Bagno z.n		-			TOTALE	61,893	61,893		
Zona giorno	1783,56	Studio		-							
Antibagno z.g.	82,62	Antibagno z.g.		-							
Camera sing.	-	Camera matr.		-							
Cabina armadio	-	-		-							

- Input scenario 9

Temperatura set-point				Temperatura esterna				Temperatura superficiale pavimento			
26°C				24,4°C				19°C			
Apporti interni								Ventilazione naturale, meccanica e infiltrazioni			
Occupanti								Locale	Portata immissione [l/s]	Portata estrazione [l/s]	
Attività	Abbigliamento		Posizione								
1,2 Met	0,5 clo		Zona giorno			Bagno zona giorno	0,605	4,490			
Apparecchiature [W]								Zona giorno	38,031	32,076	
Fornelli	800	Asciugatrice		-			Bagno zona notte	0,180	5,177		
Forno	712	Lavatrice		-			Camera singola	4,464	0,231		
Frigorifero	60	TV e PC		-			Studio	8,462	1,705		
Illuminazione [W]								Camera matrimoniale	10,152	18,213	
Bagno z.g	64,42	Bagno z.n		-			TOTALE	61,893	61,893		
Zona giorno	1783,56	Studio		-							
Antibagno z.g.	82,62	Antibagno z.g.		-							
Camera sing.	-	Camera matr.		-							
Cabina armadio	-	-		-							

• Input scenario 10

Temperatura set-back				Temperatura esterna				Temperatura superficiale pavimento						
27°C				17,05°C				22°C						
Apporti interni						Ventilazione naturale e infiltrazioni								
Occupanti						Locale	Portata immissione[l/s]	Portata estrazione [l/s]						
Attività		Abbigliamento		Posizione										
1 Met		0,5 clo		Zona notte		Bagno zona giorno	0,711	0,710						
Apparecchiature [W]						Zona giorno	38,879	37,980						
Fornelli		-	Asciugatrice		-	Bagno zona notte	0,222	0,228						
Forno		-	Lavatrice		-	Camera singola	0,243	0,256						
Frigorifero		60	TV e PC		-	Studio	1,403	2,270						
Illuminazione [W]						Camera matrimoniale	1,514	1,526						
Bagno z.g		-	Bagno z.n		-	TOTALE	42,971	42,971						
Zona giorno		-	Studio		-									
Antibagno z.g.		-	Antibagno z.g.		-									
Camera sing.		-	Camera matr.		-									
Cabina armadio		-	-		-									

• Input scenario 11

Temperatura set-back				Temperatura esterna				Temperatura superficiale pavimento						
27°C				17,05°C				22°C						
Apporti interni						Ventilazione meccanica e infiltrazioni								
Occupanti						Locale	Portata immissione[l/s]	Portata estrazione [l/s]						
Attività		Abbigliamento		Posizione										
1 Met		0,5 clo		Zona notte		Bagno zona giorno	0,711	4,600						
Apparecchiature [W]						Zona giorno	36,751	30,915						
Fornelli		-	Asciugatrice		-	Bagno zona notte	0,222	5,226						
Forno		-	Lavatrice		-	Camera singola	4,476	0,256						
Frigorifero		60	TV e PC		-	Studio	9,182	2,270						
Illuminazione [W]						Camera matrimoniale	10,553	18,626						
Bagno z.g		-	Bagno z.n		-	TOTALE	61,893	61,893						
Zona giorno		-	Studio		-									
Antibagno z.g.		-	Antibagno z.g.		-									
Camera sing.		-	Camera matr.		-									
Cabina armadio		-	-		-									

8.2 Questionario attività

Rielaborato da:

Klaudia Izabela Penkala, Tesi di laurea magistrale (2018), "Occupant Behaviour vs energy consumption in a residential Building. Survey analysis of occupant behaviour in Italian residential context and application of Home Automation Scenarios to improve energy efficiency - CorTau House Case Study"^[70].

Dove e perché apri le finestre:	Soggiorno	Sala da pranzo	Cucina	Camera da letto	Bagno	Studio
Per far entrare l'aria fresca						
Per far uscire i cattivi odori						
Per cambiare la temperatura interna						
Per far entrare più luce naturale						
Per godersi l'ambiente esterno						
Per evitare la muffa						
Per ricambiare l'aria dal fumo di tabacco						
Per lasciare uscire gli animali domestici						
Ho abitudini specifiche legate all'apertura di finestre, in particolare apro le finestre:						
• In un certo momento del giorno:						
- Quando torno a casa						
- Quando esco di casa						
- Quando mi sveglio						
- Altro						
• Durante alcune attività						
- Quando sto cucinando						
- Quando finisco la doccia						
- Altro						

Dove e perché chiudi le finestre:	Soggiorno	Sala da pranzo	Cucina	Camera da letto	Bagno	Studio
Sta diventando troppo freddo/caldo						
È troppo ventoso						
Sto lasciando la stanza						
C'è troppo rumore fuori						
Diventa buio						
Per motivi di sicurezza						
Per risparmiare energia (riscaldamento/raffrescamento acceso)						
Ho abitudini specifiche legate all'apertura di finestre, in particolare apro le finestre:						
• In un certo momento del giorno:						
- Quando torno a casa						
- Quando esco di casa						
- Quando mi sveglio						
- Altro						
• Durante alcune attività						
- Quando sto cucinando						
- Quando finisco la doccia						
- Altro						
Altro						

 Settimana

 Week-end

 Settimana e week-end

Orario	Dormire	In bagno	Cucinare	Mangiare	Pulizia della casa	Tempo libero	Intrattenimento PC o TV	Lavoro manuale	Assente da casa	Altro
00:10										
00:20										
00:30										
00:40										
00:50										
01:00										
01:10										
01:20										
01:30										
01:40										
01:50										
02:00										
02:10										
02:20										
02:30										
02:40										
02:50										
03:00										
03:10										
03:20										
03:30										
03:40										
03:50										
04:00										
04:10										
04:20										
04:30										
04:40										
04:50										
05:00										
05:10										
05:20										
05:30										
05:40										
05:50										
06:00										

■ Settimana ■ Week-end ■ Settimana e week-end

Orario	Dormire	In bagno	Cucinare	Mangiare	Pulizia della casa	Tempo libero	Intrattenimento PC o TV	Lavoro manuale	Assente da casa	Altro
06:10	■									
06:20	■									
06:30	■									
06:40	■									
06:50	■									
07:00	■									
07:10	■									
07:20	■									
07:30	■									
07:40	■									
07:50	■									
08:00	■	■								
08:10	■	■								
08:20	■	■								
08:30	■									
08:40	■									
08:50	■									
09:00	■		■							
09:10			■							
09:20			■							
09:30			■							
09:40			■							
09:50			■							
10:00			■							
10:10										
10:20										
10:30		■								
10:40		■								
10:50		■								
11:00						■				
11:10						■				
11:20						■				
11:30						■				
11:40						■				
11:50						■				
12:00						■				

■ Settimana

■ Week-end

■ Settimana e week-end

Orario	Dormire	In bagno	Cucinare	Mangiare	Pulizia della casa	Tempo libero	Intrattenimento PC o TV	Lavoro manuale	Assente da casa	Altro
12:10						■				
12:20										
12:30			■							
12:40			■							
12:50			■							
13:00			■							
13:10				■						
13:20				■						
13:30				■						
13:40				■						
13:50										
14:00					■					
14:10					■					
14:20					■					
14:30										
14:40								■		
14:50								■		
15:00								■		
15:10								■		
15:20								■		
15:30								■		
15:40								■		
15:50								■		
16:00								■		
16:10								■		
16:20								■		
16:30								■		
16:40								■		
16:50								■		
17:00								■		
17:10								■		
17:20								■		
17:30								■		
17:40								■		
17:50								■		
18:00								■		

■ Settimana ■ Week-end ■ Settimana e week-end

Orario	Dormire	In bagno	Cucinare	Mangiare	Pulizia della casa	Tempo libero	Intrattenimento PC o TV	Lavoro manuale	Assente da casa	Altro
18:10								■		
18:20								■		
18:30								■		
18:40								■		
18:50								■		
19:00								■		
19:10								■		
19:20								■		
19:30			■					■		
19:40			■					■		
19:50			■					■		
20:00			■					■		
20:10			■					■		
20:20			■	■				■		
20:30				■				■		
20:40				■				■		
20:50				■				■		
21:00		■		■				■		
21:10		■		■				■		
21:20		■						■		
21:30							■	■		
21:40							■	■		
21:50							■	■		
22:00							■	■		
22:10							■	■		
22:20							■	■		
22:30							■	■		
22:40							■	■		
22:50							■	■		
23:00							■	■		
23:10							■	■		
23:20							■	■		
23:30							■	■		
23:40							■	■		
23:50							■	■		
24:00							■	■		

8.3 Saggio di ricerca

Laboratorio di Tesi: Metodologie e Misure per l'Ambiente Costruito

CFD for NZEB design: Application and software review

Studente: David Simula

Docenti: Becchio Cristina, Corgnati Stefano, Fabi Valentina

Politecnico di Torino

ABSTRACT

The Energy Performance of Buildings Directive (EPBD 2010/31/EU) focuses on the improvement of building energy performance to reach the standard nearly Zero Energy Buildings (nZEBs). These regulations direct the nZEB buildings to an airtight envelope which allows to reduce the heating need at the price of a risk of overheating during the summer with a consequent increase in cooling need and adequate ventilation to maintain a good level of comfort and Indoor Air Quality (IAQ) within the environment.

Careful planning is therefore required to maintain a suitable level of comfort and IAQ and to avoid that the energy savings acquired during the cold season are canceled by an additional expense during the summer due to the cooling need and mechanical ventilation. Furthermore, the impact of the interaction of the occupant with the building's technologies increases with building performance, which makes essential to implement it within the simulations.

Speaking of ventilation, comfort and IAQ, Computational Fluid Dynamic (CFD) software are the most complete thanks to their careful study of the airflow but they cannot perform in the dynamic analysis and integration of the occupant. For this they are often coupled with Building Energy Simulation (BES) software that overcome these shortcomings.

The objective of the paper is therefore the comparison between different CFD software through a review of research literature to evaluate their results on the topics previously listed.

Keywords: CFD, NZEB, Hermeticism, Comfort, IAQ, Occupant Behaviour, Natural Ventilation

1. Introduction

The Energy Performance of Buildings Directive (EPBD 2010/31/EU) [1] focuses on the improvement of building energy performance by setting minimum requirements for buildings and building components [2] and established that all of the new constructions, from 31st December 2020, will have to reach the standard nearly Zero Energy Buildings (nZEBs), which implies a large scale deployment of this kind of building.

As defined in the art.2 of the EPBD a 'nearly Zero Energy Building' is a building with very high-energy performance that should cover the nearly zero energy required by on site or nearby energy production from Renewable Energy Source (RES). [3] Such qualitative

definition leaves a lot of space for national interpretation and for the adoption of the quantitative indices to be considered (i.e. performance targets, amount of renewables to be integrated, CO₂ emissions, etc.). Due to this reason and to specific local conditions as well as construction practice, European countries have

adopted their own definition, and there are some relevant inconsistencies across Europe [3]. Although EPBD stated that minimum energy performance requirements shall take into account indoor climate conditions, many member states neglected indoor environmental issues while implementing energy conservation policies.

As a result, nZEB rush pushed towards high insulated and airtight buildings, which resulted in an increased overheating risk during warm seasons in both residential and non-residential buildings. [4].

The reduction of the U-value determines the decrease of the energy demand for space heating; by contrast, the super-insulation of the building might cause higher energy demand for space cooling and indoor overheating, above all in warm climates [5].

In certain conditions, when solar and internal gains are not adequately controlled, a highly insulated envelope may cause a rise in the indoor temperature, possibly above acceptable comfort limits [6]. This problem can be found more frequently in countries where summers have long

periods with high outdoor temperatures and high solar radiation exposure, which is the case of the southern European countries.

The concerns about overheating risk reawakened the interest in naturally ventilated buildings. Natural or hybrid ventilated buildings have the potential of a high appreciation by the occupants. Especially operable windows are essential, not only for physical but also for psychological reasons. The direct supply of outdoor air can lead to different improvements: improving IAQ, depending on the local environment of the building, cooling of the building, by using the outdoor temperature and increasing the local and average air velocity, when the indoor temperature is high. [7]

However, the obstacles to a more extensive use of natural and hybrid ventilation are posed mainly by the extreme variability of conditions, determined by climate, site characteristics and building features [8]. The higher risk on performance prediction and the lack of design standards compared to mechanical systems, make natural ventilation systems difficult to evaluate. [4] Furthermore, the occupant behaviour influences the energy balance prediction of a ZEB for both passive and mechanical system; with an improper use of technologies, such as opening windows, changing the operative temperature or not providing the right maintenance of system which make the prediction even more difficult. [9] From

the problems highlighted above it is clear that a program capable of evaluating them in a precise way is needed. Therefore, the aim of this article is a review and comparison of programs capable of supporting the design by offering the possibility of analyze the various parameters necessary for the study of ventilation, comfort and IAQ and able to predict the quality of the building from an energy point of view so as to have a more targeted design considering its interaction with the occupant.

BES software can calculate the data needed to predict the behaviour of airflow through walls and windows giving an average value within the environment but cannot calculate them for each point, making it difficult to interpret the results as too general, especially for comfort and ventilation where it is important to understand how the flow behaves within the environment. CFD software, on the other hand, increases the accuracy of the analysis by calculating the parameters at each point in the zone; therefore, the results allow to analyze a detailed flow that can be used to improve the comfort and ventilation. However, as will be explained in more detail later, the two types of software have capabilities and limitations, so it will also follow the analysis of the coupling method which, by combining the potential of the two programs, reaches a holistic solution that also integrates the occupant behaviour into the simulation.

2. CFD approach

Computational fluid dynamics is a branch of physics that deals with the study of the mechanics of fluid and forces acting on them. It is based on Navier-Stroke equations that describe how pressure, velocity, density and temperature of a moving fluid are related. This gives insight into flow patterns that would be difficult, expensive or impossible to study using traditional techniques. [10]

In order to analyze fluid flows, flow domains are split into smaller subdomains which allows to study very complex geometries [11]. The governing equations are then discretized and solved inside each of these subdomains. The subdomains are often called elements or cells, and the collection of all elements or cells is called a mesh or grid. [12]. Due to the fact that a complete detailed 3Ddescription of the building with a very fine mesh is absolutely required, the CFD approach require an huge computation time [13] which increases along with the accuracy of the mesh. Moreover, the gridding process require a deep knowledge and usually it is decisive for the accuracy of the results and for the convergence of the computation. However, some software are able to automatically create the grid by the model which is less time consuming and to increase the accuracy. Once the grid is defined, boundary conditions need to be set to define the inputs of the simulation model. Some conditions,

like velocity and volumetric flow rate, define how a fluid enters or leaves the model. Other condition like heat flux, defines the interchange of energy between the model and its surroundings. Boundary conditions connect the simulation model with its surroundings. Without them, the simulation is not defined, and in most cases cannot proceed. [14]. Furthermore, setting appropriate boundary conditions is the main complexity of CFD since a small change could lead to a great shift in the results [15].

The CFD method allows to study very complex geometries and is mainly employed for its ability to produce a detailed description of the airflows which allows a more in-depth analysis of temperature, ventilation, comfort and IAQ. Its limitation is that it does not have, sophisticated, or rigorously validated models to determine the dynamic boundary conditions in buildings. Thus, in standalone CFD simulations, users can study only a few design or operational scenarios by adopting fixed boundary conditions, such as fixed supply airflow rate and temperature, fixed wall temperature or heat flux through the envelopes, even though the actual boundary conditions are dynamically changing [16].

3. CFD application

CFD software were originally created for industrial and engineering components design and analysis; however, these tools are

increasingly spreading also in the building sector. The CFD method is mainly employed for its ability to produce a detailed description of the different flows inside or outside buildings and could be used in this field for different application, as reported in following subsections.

3.1 Site planning

Site planning is the first stage of building design. CFD can help in optimizing building sites identification and evaluation, by predicting the distributions of air velocity, temperature, moisture, turbulence intensity and contaminant concentration around buildings. An efficient site planning can effectively protect building groups from adverse impacts of surrounding pollution and can help predicting the urban heat island circulation. This phase is also important for increasing energy efficiency in buildings, by allowing to put in place passive strategies, as the use of natural ventilation. Weihong Guo et al. [17] used CFD analysis to obtain the best external airflow distributions analyzing different solutions of disposition of connections between buildings using FLUENT and PHOENICS (Fig.1). The airflow speed changes from 1 m/s to 2 m/s - 2,5 m/s, depending on the different compositions.

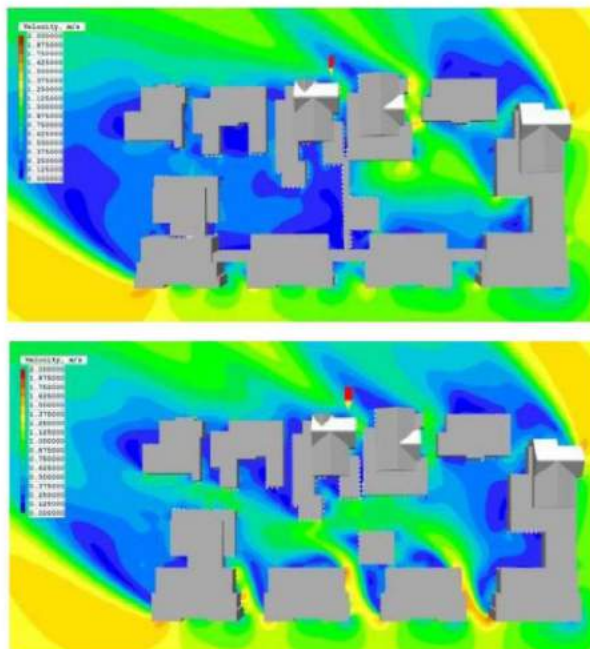


Fig.1. Site design using the CFD to improve ventilation currents [17]

3.2 Natural ventilation

In Mediterranean climate, controlled natural or hybrid ventilation is particularly effective in the reduction of energy consumption and in the improvement of IAQ, even in winter and in intermediate seasons. Fabrizio Tucci et. al [8], performed an analysis on the possible energy savings obtained through natural ventilation and passive cooling in two residential buildings in Florence using EnergyPlus to simulate the overall performance while natural ventilation design, airflow features and internal comfort have been assisted by CFD tool of EnergyPlus. Fig.2. The

complex of passive cooling measure (cross ventilation, underground slab and shading systems) is expected to reduce energy demand for cooling by 74%. These savings have been quantified by comparing the consumption of the actual buildings with those of correspondent reference buildings.

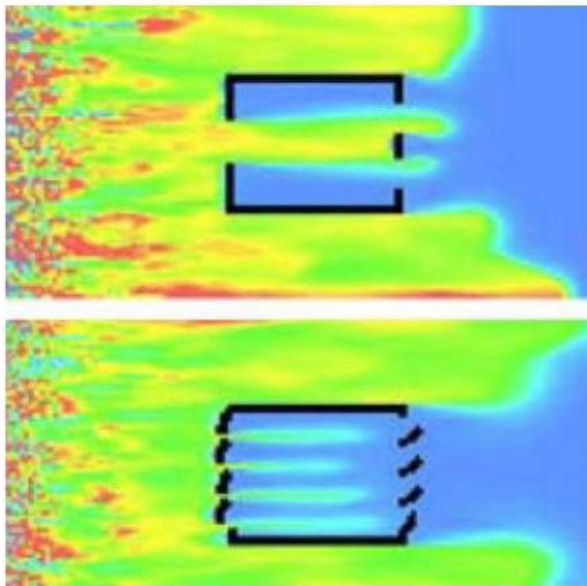


Fig.2. positioning and sizing of the openings using the CFD to distribute the ventilation inside the environment [8]

3.3 HVAC System Design

CFD is a powerful tool to evaluate IAQ and thermal comfort guaranteed by diverse HVAC systems, leading to an effective and efficient system design. It is superior to the conventional design approach that typically relies on the use of charts provided by diffuser manufacturers developed

from laboratory data. The use of such empirical data can result in great uncertainties when they are applied to large spaces (such as atria, concert halls and sports facilities) [18] or applications that are dissimilar from those upon which the laboratory data were developed. When an innovative Heating,

Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) system is used, there are inevitably no data available for the engineering design. I.e. Displacement ventilation provides a cleaner indoor environment with less energy consumption. supplies fresh air at or near floor level at a very low speed and a temperature slightly below room temperature while exhausts are located at or near the ceiling. The supply air spreads across the floor and rises as it is heated by sources such as people and equipment. The CFD results help to understand the physics of the displacement ventilation being able to evaluate the stratification of the air in every point of the room which is also necessary for building energy calculation. Moreover, the supply air conditions can be optimized in CFD to reach the best comfort for occupants. [019]

3.4 Pollution Dispersion

The geometry and structure of a building, as well as the HVAC system used in the building, have a dominant influence on the dispersion of indoor contaminants. Partitions, furniture and passageways between indoor spaces can also distort the airflow and the contaminant distributions. It is particularly useful for predictive studies in extreme conditions (for instance, extreme-hot or toxic scenarios) and it can be easily employed to investigate the impact of a particular flow parameter, such as wind speed or air temperature, on the dispersion of a certain contaminant [19]. So CFD prediction can be used to locate the best sensor positions in a building, to indicate the safe paths for evacuating occupants, and to develop the effective emergency response strategies to isolate and clean the contaminated air.

3.5 Conceptual design phase

CFD can be used to support building design decision using different graphics to understand the airflow distribution. Emanuele Naboni [20] uses the CFD to determine Mean Radiant Temperatures (MRT) Map for analyzing different scenarios. This study highlight how internal partition are an opportunity to improve thermal conditions. As shown in Fig.3b. It is possible to create spaces and adjacent rooms where mean radiant temperature (MRT) varies by 5°C just by

acting on the arrangement of partitions. Furthermore, movable partitions can be seasonally adapted to create areas with moderate MRT in summer and with higher MRT in winter (Fig.3c).

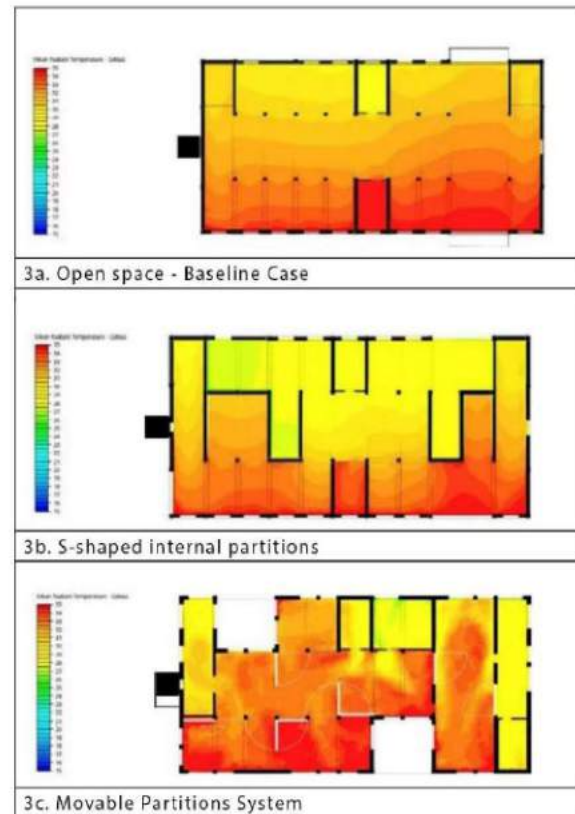


Fig.3. Comparison of different internal compositions using the MRT calculated from the CFD simulation to improve the distribution of temperatures within the environment. [21]

3.6 Component design

CFD software can be used for designing specific component. Fig.4 presents the analysis results that Elia Colombo et al. [21] obtained from a coupled method between BES and CFD software to evaluate the internal temperature and airflow distributions of a double glazed façade, in order to prevent problems of overheating, due to the elevate temperature, or of dust entrance, due to the airflow speed.

4. Coupling method

As shown in table.1 [22] both programs have capacities and limitations. To decrease the computation time, to improve the boundary conditions and to consent dynamic simulation with the integration of Occupant Behaviour (OB) models, CFD method is frequently coupled with less timeconsuming thermal building simulation techniques, usually with BES software that use the nodal method which considers each building zone as an homogeneous volume characterized by uniform state variables. Thus, one zone is approximated to a node that is described by a unique temperature, pressure, concentration, etc.

The coupling mechanisms can be divided in two categories according to how the models are solved: internal coupling and external coupling [23]. Internal coupling is theoretically the most

precise as it solves all the equation simultaneously and allows static and dynamic simulations. It is the technique used by programs that integrate the CFD tool. However, this technique is not limited to these programs; two different programs can be merged into a single model with only one solver but the developer must have access to the source code for both programs. Furthermore, the merge process is very complex and requires, so external coupling is often used as a substitute.

Table.1. Capabilities and limitations of BES and CFD software [22]

	BES	CFD
Weather and solar impact	x	
Envelope thermal behaviours	x	
HVAC system	x	
Energy consumption	x	
Occupant Behaviour	x	
Dynamic simulation	x	
Thermal comfort (air temperature, air velocity, air humidity and airflow turbulence)		x
Indoor Air Quality		x
Air distribution		x

As shown in Fig.4. [22] there are several external coupling process but for the sake of this article only Quasi-Dynamic Coupling and Full-Dynamic Coupling will be investigated as they are the best methods to consider the parameters which vary over time. For example, the influence of ventilation on comfort and IAQ, considering that the conditions of the outdoor environment and

the interaction of the occupant with the windows are dynamically changing.

The Quasi-dynamic coupling, in which BES and CFD mutually exchange data for each time step. This technique can be further divided into loose quasi-dynamic scheme and cross quasi-dynamic scheme [027]. In the loose quasi-dynamic scheme BES and CFD run sequentially, which means one program would run only when the exchanged data from the other is available while in the cross quasidynamic scheme, BES and CFD run parallel and perform data exchange simultaneously at the data synchronization time point. The first scheme is the most used as CFD can be used few times to run a steady simulation to save computation time. [24]. The Full-Dynamic coupling required iteration at each time step until both simulations are converged. Thus, it is theoretically the most accurate scheme and may generate the same results as the internal coupling. The process is very similar to Quasi-

Dynamic coupling except that a greater number of iterations are needed.

5. Methodology

The aim of this article is the review and comparison of CFD software and their application in a NZEB building; especially a software which can assess how the IAQ and comfort within the environment are influenced by the propensity of NZEB buildings towards hermeticism. Initially, a research was carried out, mainly on the ScienceDirect scientific database, about how hermeticism affects the quality of the internal environment using terms such as "NZEB, hermeticism, envelope, IAQ, comfort and airtight," which has shown that this tendency leads to a risk of overheating and consequently a reduction of comfort. Then, this problem has been deepened searching for "overheating" and its solution. The literature has underlined two important factor. First, the improvement of

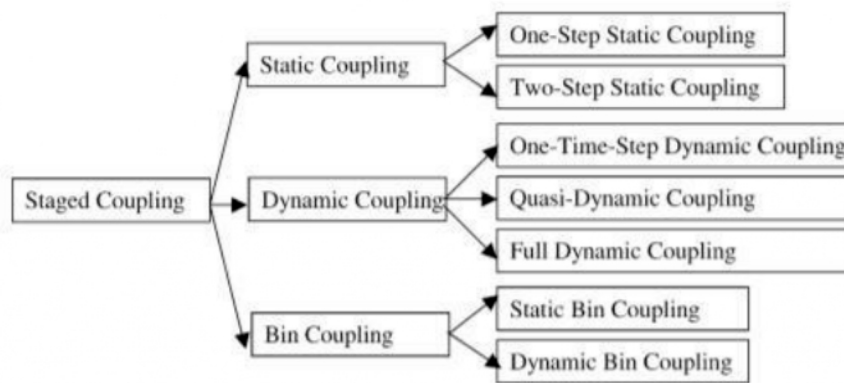


Fig.4. External coupling process [22]

tightness requires an appropriate ventilation which increases the attention for natural ventilation as it is effective and cheaper method to reduce this phenomenon and improve the conditions of comfort and air quality within the environment. Second, As the building performance increases, the interaction of the occupant with the building's technologies becomes consequently more impacting. So the literature review proceeds looking for "software for occupant behaviour, software for natural ventilation and software for design support" with the aim of finding a program able to support the design for eliminate or at least reduce the problem of overheating and to verify the effect of natural ventilation on comfort and IAQ while considering the interaction of the occupant with the technologies of the building. The last step highlight CFD as the best software to analyze the airflow and BES to integrate occupant behavior; moreover, the majority of the articles uses the coupling method between the two software. Finally, from the literature review DesignBuilder, IDA-ICE and TRNSYS (often coupled with FLUENT) were the most used and those with more capabilities to address the topics listed above.

5.1 Design Support

As highlighted previously in the section 3, the applications of the CFD are many, not only for the calculation of the airflow as verification but also at the design level. CFD can be used to create an internal composition able to better distribute ventilation [25], to design an adequate insulation of the envelope that balances the heating and cooling demand [26] , to size and properly position the openings to improve the performance of natural ventilation [27] or to better position the ventilation openings of the HVAC system to obtain a good level of comfort and IAQ adequately distributed in the environment, especially for the most complex cases (halls, open-space) where the stratigraphy of the air is too varied and a simple energy simulation that assumes a value for the whole environment is not reliable [21].

The ideal program to carry out design assistance, in addition to a detailed energy simulation and airflow, preferably integrates a 3D modeling module able to modify the model geometry and related parameters or that allows the import of models from external software like Building Information Model (BIM) or CAD and containing a library of components for HVAC, walls, windows, etc.

5.1 Natural Ventilation

As said in sub-section 3.2, natural ventilation can improve energy savings, IAQ and thermal comfort inside a building. However, not being a mechanical system, its efficiency relies on different factors that are not constant in time such as the climate that determines the conditions of the outdoor airflow (temperature, pressure, UR, wind direction and speed) which influences the airflow that permeates through the windows and occupant behaviour (window interaction) in addition to the composition of the building, windows location and dimension, etc. Surely, the simulation needs to take into account these data in a dynamic system, but CFD are incapable of working in a dynamic situation so a coupling method has to be implemented. [28]

5.2 Occupant Behaviour

Occupant Behaviour (OB) in buildings refers to occupants' presence, movement, and interactions with building systems that have an impact on building performances. The interactions include adjusting thermostat settings, opening or closing windows, dimming or turning on/off lights, pulling up or down window blinds, switching on or off plug loads, and consuming domestic hot water. OB inside buildings strongly affects energy consumption and it may lead to differences in energy

consumptions of over 300% [29]. Therefore, the consideration of occupant behaviour becomes a crucial aspect and should be addressed accurately as standard practice in low-energy design. Traditionally, in BES programs, OB inputs are deterministic and less indicative of real world scenarios, contributing to discrepancies between simulated and actual energy use in buildings [30]. For this reason, the challenge of implementing OB modelling in BES programs lies in the implementation of models of human behaviour based on statistical and probabilistic algorithms [31] that predict the probability of an action or event based on its correlation with other events. for example, the observation of the interactions with the windows according to the conditions of the external and internal environment, time of the day, season, etc. [32]

There are four different integration of OB models in BES [33]:

- direct Input or control. In this approach, the user defines schedules for the occupants with a deterministic approach.
- built-In OB models. This method uses the OB models already implemented in the BES programs usually in a dedicated software module and allow both deterministic and stochastic OB model.
- user function or custom code. In this approach, the user can write functions or custom code, as part of a building energy model input file, to implement new building operation.

This approach allows both deterministic and stochastic OB models.

- co-simulation. This method is a simulation methodology that allows distinct components to be simulated by different simulation tools running simultaneously and switching information. Usually using the functional mock-up interface (FMI), which is a tool-independent standard for the exchange of dynamic models and for co-simulation. In this case, all models implementing FMI can be integrated with all the BES programs adopting the FMI standards.

6. Software review

From the literature review 3 programs have been chosen: DesignBuilder, IDA-ICE and TRNSYS as the reviewed articles highlight them as the most complete software capable of performing all three required topics: design support, natural ventilation and occupant behavior.

6.1 DesignBuilder

DesignBuilder is a 3D modelling software that offers all the necessary features for the architectural project and for the energy simulation. It is developed in England since 2005, as the first graphical interface to the EnergyPlus simulation engine which is an open-source

dynamic energy simulation software developed from US government since 2001, usually employed to improve building design or to evaluate its energy performances providing all the element of BES software such as determining the temperature, control of the energy ventilation system, etc. in both static and dynamic simulation. [34].

DesignBuilder implement a CFD module in the Pro Engineering which it automatically generates the mesh from the model and can integrate the results data from the energy simulation as boundary conditions for the subsequent calculation of the airflow within the environment. DesignBuilder can provide weather data, internal and external surface temperature for the entire envelope, the average air temperature and the characteristics of windows as boundary condition for CFD simulation of natural ventilation.

The CFD module can provide data on temperature, comfort such as Predicted Mean Vote (PMV), Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), Air Exchange Efficiency, Mean Radiant Temperature (MRT) and Operative Temperature and airflow inside and outside the buildings, in a static and dynamic simulation. [35]

Thanks to the 3D modelling, EnergyPlus simulation and an internal CFD module, DesignBuilder is a complete and very versatile program capable of supporting the design in every phase. Furthermore, it includes a detailed library of components of HVAC system,

envelope, materials, etc. It is also capable of importing BIM model using Green Building XML (gbXML), which is a software developed to facilitate the transfer of building information stored in CAD-based building information models. DesignBuilder is limited to using deterministic schedules. For more accurate OB models, the analysis must be performed directly on EnergyPlus where the users can write the code or import schedules as Input Data File (IDF) format to include OB models with stochastic nature (i.e. Markovchain process) [36].

Furthermore, it can use the external interface that provides FMI to co-simulate with an external OB tool Occupant Behaviour Functional Mockup Unit (obFMU). [37]

6.2 IDA ICE

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) is a whole year detailed and dynamic multi-zone simulation software, developed by EQUA which launched the first version in 1998, mainly used for the study of the indoor climate, as well as of energy. It is mainly designed for HVAC designers and sustainable design engineers. Its features are the calculation of the full zone heat and moisture balance, the calculation of the air and surface temperatures, the estimation of thermal comfort by providing PMV and PPD indices, the operating temperature for the estimation of asymmetric comfort conditions and the air temperature

stratification in displacement ventilation systems.

IDA ICE implement an internal CFD tool but in the current version (IDA ICE v.4.8) is in a beta phase [38]. Therefore, given the current state of art, it is advisable to consider the use of the coupling method for advanced simulation. However, automatic mesh generation and the import of boundary conditions from the energy simulation are already implemented for both static and dynamic simulation. From the energy simulation it can provide weather data, internal and external surface temperature, average zone air temperature, and characteristics of windows to set up boundary condition for the CFD analysis which calculate air velocity, air temperature, surface heat flux and pressure.

The results obtainable are both for a static and dynamic simulation.

It results as a complete program from the point of view of design assistance. It includes the 3D modelling on which the simulations are based and has a large library of components. Furthermore, it uses the IFC format to import BIM models maintaining all the information about geometry and sets of property.

IDA ICE provides flexibility for the implementation of OB models. Predefined deterministic schedules can be used, or the user can build up a control macro where rules can be defined using various inputs, including data import, sensors output, and other environmental

parameters [030]. Also, users can access the semantics of the software to code algorithms to model OB. Some research projects have used this approach [39,40]. I.e Fabi et al. [32] uses logistic regression to evaluate the probability of occupant interaction with windows. As result, four different user's behaviour patterns have been defined on the base of their ownership and the ventilation type which have been included in the program through equations that describe the probability of user interfering with the control of the indoor environmental quality and the event taking place.

6.3 TRNSYS

Transient System Simulation (TRNSYS) is a transient system simulation program, developed by the University of Wisconsin which launched the first version in 1998, with a modular structure that was designed to solve complex energy system problems, by breaking the problem down into a

series of smaller components. The vast majority of simulations are focused on assessing the performance of thermal and electrical energy systems [41] but TRNSYS can equally be used to model other dynamic systems such as traffic flow, or biological processes. In building simulations, all

HVAC system components are solved simultaneously with the building envelope

thermal balance and the air network at each time step. TRNSYS does not have an integrated CFD tool; for this reason, it must be coupled with an external CFD software to which the boundary condition can be sent after the energy simulation has been completed. In order to analyze the results FLUENT has been chosen to perform the external coupling based on the results of the literature review that propose this coupling in several studies and on the capabilities of FLUENT which can achieve a detailed airflow with more flexible and precise results compared with other commercial CFD software [42]. It is a general CFD simulation tool that uses the governing Navier-Stokes equation to provide result that contains the broad physical modelling capabilities needed to model airflow, heat transfer and comfort. TRNSYS can set up the boundary condition for CFD but for natural ventilation it require a further extension TRNFLOW, which is an interface that allows the calculation of the parameters needed for natural ventilation, passive night cooling, double facades and exhaust air shafts [43] using the solver COMIS which is a multizone air infiltration and ventilation simulation program [44]. The results of CFD simulation depend on the program utilized for external coupling, in the specific case FLUENT provides all the data necessary for a complete analysis of the properties of air and comfort. However, the results related to comfort require a post-simulation calculation to be evaluated.

TRNSYS does not have an internal 3D modeler but it offers the possibility of using a SketchUp plugin named Trnsys3d which is used to design the building geometry but does not have a component library [45]. Instead, it is present directly in the TRNSYS interface whose includes components for solar thermal and photovoltaic systems, low energy buildings and HVAC systems, renewable energy systems, cogeneration, fuel cells, etc. The modular nature of TRNSYS facilitates the addition of new mathematical models to the program.

Regarding OB models, TRNSYS can use the deterministic model employing schedules, or develop a stochastic models using a library called TESS. TRNSYS does not adopt FMI or other data exchange framework for users to implement cosimulation directly but allows advanced users to develop their own middleware for exchanging data with other tools.

7. Discussion of results

All three programs are able to provide the boundary conditions to CFD simulation for natural ventilation as shown in Table.1. The differences lie in the different methods to calculate the weather: DesignBuilder uses the data arranged by the World Meteorological Organization region and Country, IDA ICE calculates them using an algorithmic model and TRNSYS collects them through the calculation of

the monthly average conditions that is used to generate hourly date. Furthermore, TRNSYS also requires a further extension named TRNFLOW to be able to calculate them while DesignBuilder and IDA ICE can define them directly from the energy simulation.

DesignBuilder and IDA ICE have an internal coupling system, which makes the assumption of boundary conditions more linear while TRNSYS does not have an internal CFD module and requires external coupling. As for the results, DesignBuilder and TRNSYS coupled to FLUENT are more complete and able to calculate all the parameters related to airflow and comfort than IDA ICE which not include the comfort parameters as shown in

Table.2.

The application as a support to the design is more direct for DesignBuilder and IDA ICE as they have an internal 3D modeler that communicates directly with both the energy simulation and the CFD simulation while TRNSYS requires a plug-in .for SketchUp called Trnsys3d. All programs offer a complete library of components that facilitate and speed up the creation of the model.

As shown in Table.3. [33] DesignBuilder is less performing than IDA ICE and TRNSYS because it can only use deterministic schedules within its interface. To use more in-depth OB models, the model must be exported to EnergyPlus from which OB models can be used stochastic by

writing the code. While IDA ICE and TRNSYS allow to consider both types of models.

Table.2. Comparison of Boundary conditions for CFD simulation for natural ventilation

CFD Boundary condition for natural ventilation	DesignBuilder	IDA ICE	TRNSYS + FLUENT
Weather data	Weather data are arranged by World Meteorological Organization region and Country.	The climate model is an algorithmic model	Weather data arranged by the calculation of the monthly average conditions
Internal surface temperature	x	x	x
External surface temperature	x	x	x
Internal surface window temperature	x	x	x
Average zone air temperature	x	x	x
Aperture position (Referred to the openable portion of the window)	x	x	x
Aperture size (% total opening area) (Referred to the openable portion of the window)	x	x	x

Table.3. Comparison of output provided by CFD simulation

CFD OUTPUT	DesignBuilder	IDA ICE	TRNSYS + FLUENT
Air velocity	x	x	x*
Air temperature	x	x	x*
Surface Heat Flux	x	x	x*
Pressure	x	x	x*
Mean radiant temperature	x		x*
Age of air	x		x*
PMV	x		x*
PPD	x		x*

x* the results may vary depending on the program used for the coupling

Table.4. Comparison of OB implementation [33]

Occupant Behaviour	DesignBuilder	IDA-ICE	TRNSYS
Direct input or control	x	x	x
Built-in OB models			
User function or custom code	x* ¹	x	x
Co-simulation	x* ¹	x	x* ²

x*¹available only on the EnergyPlus interface
x*²does not implement FMI

8. Conclusion

The design of NZEB buildings challenges to meet the energy standards set by the regulations while maintaining adequate comfort and IAQ. The literature highlighted natural ventilation, the integration of occupants within the simulation and an accurate design of the building, as methods to achieve this goal. Therefore, the literature review was done to compare software capable of dealing with these techniques.

The research underline CFD software as the most capable programs which offers excellent features to support the design of these buildings.

However, using CFD tools as standalone software is difficult, due to the required precision in terms of boundary conditions. Therefore, a coupling method seems to be the best solution because most of the input for CFD simulation are the results of the energy simulation carried out by the BES software. Furthermore, CFD is a very specific program for airflow and most of its output, related also to industrial and engineering sector (temperature, speed, etc.), are present in each CFD software; the parameters, which can be

missing, are mainly related to comfort and occupant that are usually integrated within BES software. So, choosing the correct BES software is as important as choosing the correct CFD software.

From the results of the literature review, DesignBuilder, IDA ICE and TRNSYS have been chosen to be further analyzed for their capabilities to set up boundary condition for a dynamic simulation, that takes into account the occupant in depth, to assist the design and to simulate natural ventilation.

DesignBuilder is the most complete to address the topics presented as a standalone software; it integrates the 3D modeler, the energy simulation provided by EnergyPlus and an integrated CFD module. Its main limitation lies in the integration of the occupant; it includes schedule for deterministic OB models but more advanced models must be set directly on EnergyPlus to be

properly analyzed. IDA ICE as DesignBuilder, integrates 3D modeling, energy simulation and CFD. It is more efficient when used for the implementation of the occupant but it has less developed CFD module compared with the other two programs, as it cannot calculate the comfort parameters. TRNSYS, on the other hand, manages to analyze all the arguments presented but requires high interoperability with other software, both for 3D modeling and CFD simulation, and the use of different extensions to find the results. In this specific case the coupling between TRNSYS and

ANSYS FLUENT offers excellent opportunities for CFD simulation. However, the search for problems can be complex and the interoperability between programs can lead to problems such as loss of data or inaccuracies in the transition between the two software.

9. Reference

- [1] Stergiani Charisi, (2017), "The Role of the Building Envelope in Achieving Nearly-Zero Energy Building (nZEBs)", *Procedia Environmental Sciences* 38 (2017) 115 – 120
- [2] K.Loukaidou, A. Michopoulos, Th. Zachariadis, 2017, "Nearly-Zero Energy Buildings: Cost-Optimal Analysis of Building Envelope Characteristics, *Procedia Environmental Sciences* 38 (2017) 20 – 27
- [3] Giulia Paoletti *, Ramón Pascual Pascuas, Roberta Perneti and Roberto Lollini, 2017, "Nearly Zero Energy Buildings: An Overview of the

- Main Construction Features across Europe”, Buildings 2017, 7, 43
- [4] Roberto Lollini, 2018, “New standards for designing natural ventilation in buildings”, The European Portal For Energy Efficiency In Buildings
- [5] Ballarini I, Corrado V, 2012, “Analysis of the building energy balance to investigate the effect of thermal insulation in summer conditions.” Energy and Buildings 2012; 52:168-180
- [6] Chvatal, Karin Maria Soares and Corvacho, Helena,(2009), “The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption”, Journal of Building Performance Simulation, 2: 4, 267 — 282
- [7] Peter Van Den Engel, Remco Kemperman, Heleen Doolaard, (2012), Natural and hybrid ventilation principles based on buoyancy, sun and wind, REHVA Journal – August 2012 p. 25
- [8] Fabrizio Tucci, Alessandra Battisti, Marco Cimillo, Filippo Calcerano, (2015), “Natural ventilation and passive cooling for energy efficiency of residential buildings in Mediterranean climate”, Energy Efficiency in Buildings and Districts
- [9] Liddament M.V. (2001), “Occupant Impact on Ventilation”, AIVC Technical Report 53. INIVE EEIG, SintStevens-Woluwe (Bruxelles)
- [10] <https://www.techopedia.com/definition/18247/computational-fluid-dynamics-cfd>, last consultation 08/05/2018
- [11] Aure' lie Foucquier, SylvainRobert, Fre' de' ric Suard, LouisSte' phan, ArnaudJay, (2013), “State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 23 (2013) 272–288
- [12] <https://www.cfd-online.com/Wiki/Meshing>, last consultation 08/05/2018
- [13] Tan Gang, Glicksman Leon R. (2005), “Application of integrating multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction”. Energy and Buildings 2005;37:1049–57.
- [14] <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-F1CF2005-3FD3-4A0C-9224-0093F875D697-htm.html>, last consultation 14/05/2018
- [15] Rui Zhang, Khee Poh Lam, Yongjie Zhang, (2012), Annual coupled EnergyPlus and computational fluid dynamic simulation of natural ventilation, Conference paper – August 2012
- [16] Djunaedy, E., Hensen, J. L. M., Loomans, M. G. L. C. (2003). “Towards External Coupling of Building Energy and Airflow Modeling Programs” .ASHRAE Transactions, 109(2), pp. 771 – 787

- [17] Weihong Guo, Xiao Liu, Xu Yuan, (2015), "Study on Natural Ventilation Design Optimization Based on CFD Simulation for Green Buildings", *Procedia Engineering* 121 573 – 581
- [18] Fan, Y., and K. Ito. (2012). "Energy Consumption Analysis Intended for Real Office Space with Energy Recovery Ventilator by Integrating Bes and CFD Approaches". *Building and Environment*, 5
- [19] Emanuele Naboni, Daniel Sang-Hoon Lee, Kristian Fabbri, (2017), "Thermal Comfort-CFD maps for Architectural Interior Design", *Procedia Engineering* 180, p.5
- [20] Zhai Z, Srebric J, Chen Q (2003), "Application of CFD to predict and control chemical and biological agent dispersion in buildings": *Intl J Vent*;2(3):251–264.
- [21] Elia Colombo, Moritz Zwahlen, Manuel Frey, Johann Loux, (2017), "Design of a glazed double-façade by means of coupled CFD and building performance simulation", *Energy Procedia* 122 (2017) 355–360
- [22] Zhiqiang John Zhai, Qingyan Yan Chen, (2005), "Performance of coupled building energy and CFD simulations", *Energy and Buildings* 37 (2005) 333–344
- [23] Marija Trcka, Jan L.M. Hensen, Micheal Wetter, (2009), "Co-simulation of innovative integrated HVAC systems in buildings, *Journal of Building Performance Simulation*, Vol2, 2009, Issue 3
- [24] Wangda Zuo, Qingyan Chen, (2010), "Fast and informative flow simulations in a building by using fast fluid dynamics model on graphics processing unit", *Building and Environment*, Vol. 45, Issue 3, Pp. 747-757
- [25] Pradip Aryal, Thananchai Leephakpreeda, (2015), CFD analysis on thermal comfort and energy consumption effected by partitions in air-conditioned building". *Energy Procedia* 79 (2015) 183-188
- [26] Chvatal S K M, Corvacho H, (2009). "The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption". *Journal of Building Performance Simulation* 2009; 4:267-282.
- [25] Ava Fatah, Martha Tsigkari, Angelos Chronis, (2013), "Façade's Aperture Optimization, Integrating Cross ventilation performance analysis in fluid dynamics simulation.", conference paper. April
- [26] Wei Tian, Xu Han, Wangda Zuo, Michael D. Sohn, (2018), "Building Energy Simulation Coupled with CFD for Indoor Environment: A Critical Review and Recent Applications", *Energy and Buildings*
- [27] Andersen RV, Olesen BW, Toftum J., (2007) Simulation of the effects of occupant behaviour on indoor climate and energy consumption. *Proceedings of the 9th REHVA World Congress: WellBeing*
- [28] *Indoors*, Helsinki, Finland, July 10–14, 2007
- [29] Tianzhen Hong, Tionsan Sun, Tixing Chen, Sarah C. Taylor Lange, Da Yai, (2016), "An occupant behavior modeling tool for co-simulation", *Energy and Buildings* 117 (2016) 272-281

- [30] Da Yan, Tianzhen Hong, Bing Dongc, Ardeshir Mahdavi, Simona D'Oca, Isabella Gaetani, Xiaohang Feng, (2017), IEA EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings, *Energy and Buildings* 156 (2017) 258-270
- [31] Valentina Fabi, Rune Vinther Andersen, Stefano P. Corgnati, Bjarne W. Olesen, (2013, " A methodology for modelling energy-related human behaviour:
- [32] Application to window opening behaviour in residential buildings", *Building Simulation*
- [33] Tianzhen Hong, Yixing Chen, Zsofia Belafi, Simona D'Oca, (2017), "Occupant behavior models: A critical review of implementation and representation approaches in building performance simulation programs", *Building simulation*
- [34] <https://energyplus.net>, last consultation 14/05/2018
- [35] <https://www.designbuilder.co.uk/cfd>, last consultation 14/05/2018
- [36] Chen Y, Luo X, Hong T (2016). An agent-based occupancy simulator for building performance simulation. In: *Proceedings of ASHRAE Annual Conference*, St. Louis, MO, USA.
- [37] Hong T, Sun H, Chen Y, Taylor-Lange SC, Yan D (2016). "An occupant behavior modeling tool for cosimulation". *Energy and Buildings*, 117: 272–281.
- [38] <https://www.equa.se/de/events/previous/event/228-release-of-ida-ice-4-8-feature-highlights>, last consultation 14/05/2018
- [39] Valentina Fabi, Rune Vinther Andersen, Stefano Corgnati, Bjarne W. Olesen, (2012), "Occupants' window opening behaviour: a literature review of factors influencing occupant behaviour and models", *Building and Environment*, vol.58, pp. 188-198
- [40] Tiziana Buso, Valentina Fabi, Rune K. Andersen, Stefano P. Corgnati, (2015), "Occupant behaviour and robustness of building design", *Building and Environment* vol.94, pp. 694-703
- [41] <http://www.trnsys.com>, last consultation 14/05/2018
- [42] <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent/ansys-fluent-features>, last consultation 14/05/2018
- [43] http://trnsys.de/docs/trnflow/trnflow_uebersicht_en.htm, last consultation 14/05/2018
- [44] Helmut E, Feustel, (1999), "COMIS – an international multizone air-flow and contaminant transport model"
- [45] http://trnsys.de/docs/trnsys3d/trnsys3d_uebersicht_en.htm, last consultation 14/05/2018



9. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. <https://climate.nasa.gov/evidence/> Consultato il 27/05/2019
2. IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
3. IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R.Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
4. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data> Consultato il 27/05/2019
5. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
6. <https://www.giss.nasa.gov> Consultato il 04/05/2019
7. <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series> Consultato il 28/05/2019
8. <https://climate.nasa.gov/effects/> Consultato il 06/05/2019
9. [https://www.unimondo.org/Guide/Ambiente/Cambiamento-climatico/\(desc\)/show](https://www.unimondo.org/Guide/Ambiente/Cambiamento-climatico/(desc)/show) Consultato il 4/05/2019
10. Donella H. Meadows and others. The Limits To Growth; a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. New York :Universe Books, 1972.
11. <https://www.unenvironment.org> Consultato il 04/05/2019

12. <http://www.ipcc.ch> Consultato il 04/05/2019
13. <https://unfccc.int/process>
Consultato il 28/02/2019
14. Protocollo di Kyoto sui cambiamenti climatici
15. <https://www.diplomatie.gouv.fr/en/french-foreign-policy/climate-and-environment/2015-paris-climate-conference-cop21/cop21-the-paris-agreement-in-four-key-points/>
16. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_it
Consultato il 04/05/2019
17. Jorge Núñez Ferrer, Cristian Stroia, Noriko Fujiwara, Monica Alessi; (2016); “Pocacito Roadmap – A policy Framework for post-carbon cities”
18. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/progress_it
Consultato il 04/05/2019
19. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
Consultato il 08/07/2019
20. International Energy Outlook 2017 (IEO2017)
21. IEA (2016), World Energy Outlook 2016, IEA, Paris
22. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Consumption_of_energy
Consultato il 08/05/2019
23. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households#Energy_consumption_in_households_by_type_of_end-use
24. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings>
Consultato il 15/05/2019

25. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_it
Consultato il 15/05/2019
26. EU, Directive 2010/31/EU, European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (recast), Official Journal of the European Union, 2010
27. Delia D'Agostino, Livio Mazzarella, (2019), "What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions", Journal of Building Engineering 21 pp. 200-212
28. BPIE, "Indoor Air Quality, Thermal Comfort and Daylight: Analysis of residential building regulations in eight EU Member States," Brussels, 2015
29. Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency
30. BPIE, "How to integrate indoor environmental quality within national long-term renovation strategies, Buildings Performance Institute Europe"
31. UNI EN ISO 7730:2006. Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale
32. UNI EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics
33. De Dear, Richard Brager, G. S., 1998, Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference
34. ASHRAE Standard 55. "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
35. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>
Consultato il 30/05/2019
36. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>
Consultato il 30/05/2019

37. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/improving-indoor-air-quality>
Consultato il 30/05/2019
38. BPIE, "How to integrate indoor environmental quality within national long-term renovation strategies, Buildings Performance Institute Europe"
39. Kyeong-seok, Kwon et al, (2011), "Analyzing Ventilation efficiency using Age of air theory and CFD technology,"
40. ISO 16000-8:2007, Indoor air -- Part 8: Determination of local mean ages of air in buildings for characterizing ventilation conditions
41. C.Buratti, R.Mariani, E. Moretti, (2011), "Mean age of air in a naturally ventilated office: Experimental data and simulations"
42. Kemal Gungor, M.AIRAH, of Norman Disney & Young, 2013, Guide to air change effectiveness
43. UNI EN 12792:2005, Ventilazione degli edifici - Simboli, terminologia e simboli grafici
44. Decreto Ministeriale 5 Luglio 1975 (G.U 18-7-1975, N. 190) modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 Giugno 1896 relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico sanitari principali dei locali d'abitazione
45. UNI EN ISO 13790:2008, Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento
46. UNI EN ISO 13788:2013, Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo
47. UNI EN 15242:2008, Ventilazione degli edifici - Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni
48. UNI 10339:1995, Impianti aerulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.
49. 2005 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI), Chapter 27 Ventilation and infiltration

50. <https://www.airtechservice.it/service/vmc/>
Consultato il 15/06/2019
51. Yangrui Song, Yuexia Sun, Shugang Luo, Jing Hou, Jungsoo Kim, Thomas Parkinson, Richard de Dear, (2017), "Indoor environment and adaptive thermal comfort models in residential buildings in Tianjin, China"
52. James Atkinson, Yves Chartier, Carmen Lúcia, Pessoa-Silva, Paul Jensen, Yuguo Li, Wing-Hong Seto, (2009), "Natural ventilation for infection control in health-care settings"
53. Aurélie Foucquier, Sylvain Robert, Frédéric Suard, Louis Stéphan, Arnaud Jay, (2013), "State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23 (2013) 272–288
54. <https://www.techopedia.com/definition/18247/computational-fluid-dynamics-cfd>
Consultato il 08/05/2018
55. Weihong Guo, Xiao Liu, Xu Yuan, (2015), "Study on Natural Ventilation Design Optimization Based on CFD Simulation for Green Buildings", *Procedia Engineering* 121 573 – 581
56. Fabrizio Tucci, Alessandra Battisti, Marco Cimillo, Filippo Calcerano, (2015), "Natural ventilation and passive cooling for energy efficiency of residential buildings in Mediterranean climate", *Energy Efficiency in Buildings and Districts*
57. Fan, Y., and K. Ito. (2012). "Energy Consumption Analysis Intended for Real Office Space with Energy Recovery Ventilator by Integrating Bes and CFD Approaches". *Building and Environment*, 5
58. Elia Colombo, Moritz Zwahlen, Manuel Frey, Johann Loux, (2017), "Design of a glazed double-façade by means of coupled CFD and building performance simulation", *Energy Procedia* 122 (2017) 355–360
59. <https://www.cfd-online.com/Wiki/Meshing>,
Consultato il 08/05/2018
60. <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-F1CF2005-3FD3-4A0C-9224-0093F875D697-htm.html>,
Consultato il 14/05/2018

61. Rui Zhang, Khee Poh Lam, Yongjie Zhang, 2012, Annual coupled EnergyPlus and computational fluid dynamic simulation of natural ventilation, Conference paper
62. Djunaedy, E., Hensen, J. L. M., Loomans, M. G. L. C. (2003). "Towards External Coupling of Building Energy and Airflow Modeling Programs" .ASHRAE Transactions, 109(2), pp. 771 – 787
63. Zhiqiang John Zhai, Qingyan Yan Chen,2005, Performance of coupled building energy and CFD simulations,
64. <http://www.trnsys.com>, Consultato il 14/05/2018
65. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
66. <https://www.equa.se/de/events/previous/event/228-release-of-ida-ice-4-8-feature-highlights>, Consultato il 14/05/2018
67. <https://www.designbuilder.co.uk/cfd>, Consultato il 14/05/2018
68. <https://energyplus.net>, Consultato il 14/05/2018
69. UNI TS 11300-1, Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale
70. Klaudia Izabela Penkala, Tesi di laurea magistrale (2018), "Occupant Behaviour vs energy consumption in a residential Building. Survey analysis of occupant behaviour in Italian residential context and application of Home Automation Scenarios to improve energy efficiency - CorTau House Case Study".
71. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016 -- Energy Standard for Buildings
72. UNI EN 1264-4:2009 Sistemi radianti alimentati ad acqua per il riscaldamento e il raffrescamento integrati nelle strutture - Parte 4: Installazione
73. Verena M.Barthelmes, Cristina Becchio, Valentina Fabi, Stefano P. Corgnati, (2017), Occupant behaviour lifestyles and effects on building energy use: Investigation on high and low performing building features

9.1 Riferimenti immagini

Fig.1. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>
Consultato il 27/05/2019

Fig.2. <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series>
Consultato il 28/05/2019

Fig.3. International Energy Outlook 2017 (IEO2017)

Fig.4. IEA (2016), World Energy Outlook 2016, IEA, Paris

Fig.5. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Consumption_of_energy
Consultato il 08/05/2019

Fig.6. EU, Directive 2010/31/EU, European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (recast), Official Journal of the European Union, 2010

Fig.7. Delia D'Agostino, Livio Mazzarella, (2019), "What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions", Journal of Building Engineering 21 pp. 200-212

Fig.8. BPIE, "How to integrate indoor environmental quality within national long-term renovation strategies, Buildings Performance Institute Europe"

Fig.9. Delia D'Agostino, Livio Mazzarella, (2019), "What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions", Journal of Building Engineering 21 pp. 200-212

Fig.13.-Fig.14. UNI EN ISO 7730:2006. Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale

Fig.15. UNI EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics

Fig.16. de Dear, Richard Brager, G. S., (1998), Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference

Fig.17. UNI EN ISO 7730:2006. Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale

Fig.18. "How to integrate indoor environmental quality within national long-term renovation strategies, Buildings Performance Institute Europe"

Fig.21.-Fig.22. 2005 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI), Chapter 27 Ventilation and infiltration

Fig.23. ASHRAE 1999

Fig.24. Yangrui Song, Yuexia Sun, Shugang Luo, Jing Houa, Jungsoo Kim, Thomas Parkinson, Richard de Dear, (2017), "Indoor environment and adaptive thermal comfort models in residential buildings in Tianjin, China"

Fig.25.-Fig.26. Aurélie Fouquier, Sylvain Robert, Frédéric Suard, Louis Stéphan, Arnaud Jay, (2013), "State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 23 (2013) 272–288

Fig.28. Zhiqiang John Zhai, Qingyan Yan Chen, (2005), "Performance of coupled building energy and CFD simulations"

Fig.29. V.M. Barthelmes, C. Becchio, S.P. Corgnati, C. Guala, (2015) "Design and construction of an nZEB in Piedmont Region, North Italy", Energy Procedia 78 1925 – 1930

9.2 Riferimenti tabelle

Tab.1.-Tab.3. UNI EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics

Tab.4. James Atkinson, Yves Chartier, Carmen Lúcia, Pessoa-Silva, Paul Jensen, Yuguo Li, Wing-Hong Seto, (2009), "Natural ventilation for infection control in health-care settings"

Tab.5. Aurélie Fouquier, Sylvain Robert, Frédéric Suard, Louis Stéphan, Arnaud Jay, (2013), "State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 23 (2013) 272–288

Tab.6. Zhiqiang John Zhai, Qingyan Yan Chen, (2005), "Performance of coupled building energy and CFD simulations"

Tab.8. UNI TS 11300-1, Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale

Ringraziamenti

Grazie alla professoressa Cristina Becchio, a Giulia e a Carola per avermi accompagnato in questo progetto e grazie a tutti i professori che ho incontrato nel mio percorso per aver contribuito alla mia crescita.

Grazie agli amici che mi hanno sostenuto ed incoraggiato durante questi anni. Grazie a tutti i parenti che hanno creduto nelle mie potenzialità ed infine un grazie ai miei genitori che con il loro supporto ed i loro sacrifici mi hanno permesso di concludere questo percorso per concedermi la possibilità di avere un futuro migliore.

David