

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di ingegneria industriale DII

Corso di laurea magistrale in ingegneria energetica

**Impatto energetico della ventilazione nel terziario
alla luce della prUNI10339**

Relatore: Prof. Michele De Carli

Correlatore: Dott. Ing. Wilmer Pasut

Laureando: **Girardi Fabio**

Anno accademico 2014/2015

Sommario

1. INTRODUZIONE	1
2. VENTILAZIONE E QUALITA' DELL'ARIA	5
2.1 QUALITA' DELL'ARIA INDOOR	5
2.2 PRINCIPALI SORGENTI INQUINANTI INDOOR.....	6
2.2.1 SORGENTI ANTROPICHE - BIOEFFLUENTI.....	9
2.2.2 SORGENTI NON ANTROPICHE	11
3. VENTILAZIONE NEGLI EDIFICI	19
3.1 VENTILAZIONE NATURALE	19
3.2 VENTILAZIONE FORZATA	22
3.3 FUNZIONAMENTO IMPIANTI VMC.....	24
4. CONSUMI DI ENERGIA PER LA VENTILAZIONE	27
4.1 PERDITE DI VENTILAZIONE	28
4.2 COSTI-BENEFICI DELLA VENTILAZIONE.....	31
4.3 FATTORE CLIMATICO E RISPARMIO ENERGETICO	34
4.4 RECUPERATORE DI CALORE.....	36
4.4.1 RECUPERATORE DI CALORE A FLUSSI INCROCIATI	36
5. NORMATIVE VENTILAZIONE	41
5.1 NORMA UNI10339	41
5.2 NORMA prUNI10339.....	44
5.2.1 BENESSERE TERMO IGROMETRICO	48
5.2.2 QUALITA' DELL'ARIA INTERNA	49
5.2.3 TEMPERATURA OPERATIVA E UMIDITA'	51
5.2.4 METODO PRESCRITTIVO E PRESTAZIONALE.....	52
5.3 ASHRAE 62.....	56
6. ANALISI PANORAMA NORMATIVO ITALIANO	57
7. SOFTWARE COMMERCIALE TRNSYS	69
7.1 COS'E' TRNSYS?	69
7.2 INTERFACCIA GRAFICA DELL'EDIFICIO (Trnbuild)	69

7.3 Simulation Studio	69
8. DEFINIZIONE EDIFICIO IN TRNSYS.....	71
9. CONDIZIONI TERMOIGROMETRICHE	77
10. MODELLO IN SIMULATION STUDIO	83
11. RISULTATI SIMULAZIONI.....	89
11.1 Clima B	89
11.2 Clima D	94
11.3 Clima E.....	98
12. ANALISI RISULTATI	105
12.1 Carichi interni e isolamento	105
12.3 Temperatura esterna e recuperatore	106
13. CONSUMI AUSILIARI.....	111
14. CONCLUSIONI.....	115
15. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	117

1. INTRODUZIONE

In un sistema come quello odierno basato su fonti esauribili è di fondamentale importanza ottimizzare l'utilizzo dell'energia. Nell'ambito della progettazione termotecnica sono protagonisti i temi dell'efficienza energetica e del risparmio energetico.

Il risparmio energetico trova terreno fertile in una società sempre più sensibile alle questioni ambientali e all'impatto che l'uomo ha sull'ecosistema. L'utilizzo efficace dell'energia è un vincolo imprescindibile per l'uomo, che viene sempre più a contatto con esigenze territoriali e ambientali riguardanti da un lato le risorse esauribili e dall'altro le emissioni d'inquinanti. È proprio il protocollo di Kyoto una prova di questa crescente sensibilità verso i temi riguardanti le minori emissioni inquinanti e la minor dipendenza dalle fonti energetiche esauribili. Il protocollo sancisce l'impegno da parte dei paesi industrializzati che vi hanno aderito, a ridurre mediamente entro il 2012 del 5% le emissioni di alcuni gas a effetto serra, responsabili del riscaldamento del pianeta. In tal senso nei paesi contraenti sono state istituite o rafforzate delle politiche nazionali di riduzione delle emissioni.

L'unione europea ha promulgato misure specifiche di medio/lungo periodo che proseguono e implementano l'impegno assunto con il protocollo di Kyoto attraverso il "pacchetto clima-energia 20-20-20". Questo piano, contenuto nella Direttiva 2009/29/CE, è entrato in vigore nel giugno 2009 e sarà valido dal gennaio 2013 al 2020; prevede:

- Ridurre del 20% le emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990
- Alzare al 20% la quota di energia proveniente da fonti rinnovabili
- Aumentare del 20% l'efficienza energetica, riducendo della stessa misura il fabbisogno di energia primaria

Il settore dell'edilizia rappresenta un elemento chiave per il raggiungimento degli obiettivi indicati dal Paese al 2020, in quanto il consumo di energia nell'edilizia residenziale e commerciale è all'origine di circa il 40% del consumo totale di energia finale e del 36% delle emissioni totali di CO₂ nell'Unione Europea [1]. È evidente come il settore dell'edilizia abbia un gran potenziale di efficientamento energetico (fig 1.1) e, infatti, a testimonianza di ciò, si vede quali sono, a livello italiano, i risparmi attesi per settore in energia finale al 2020 [2].

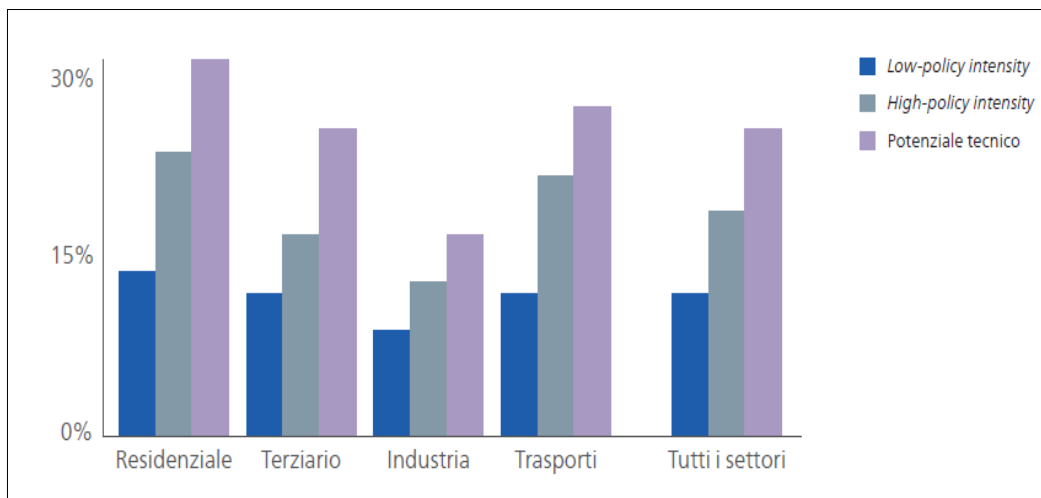


Figura 1.1 Potenziamento energetico di energia finale nei Paesi UE-27 al 2020 [1]

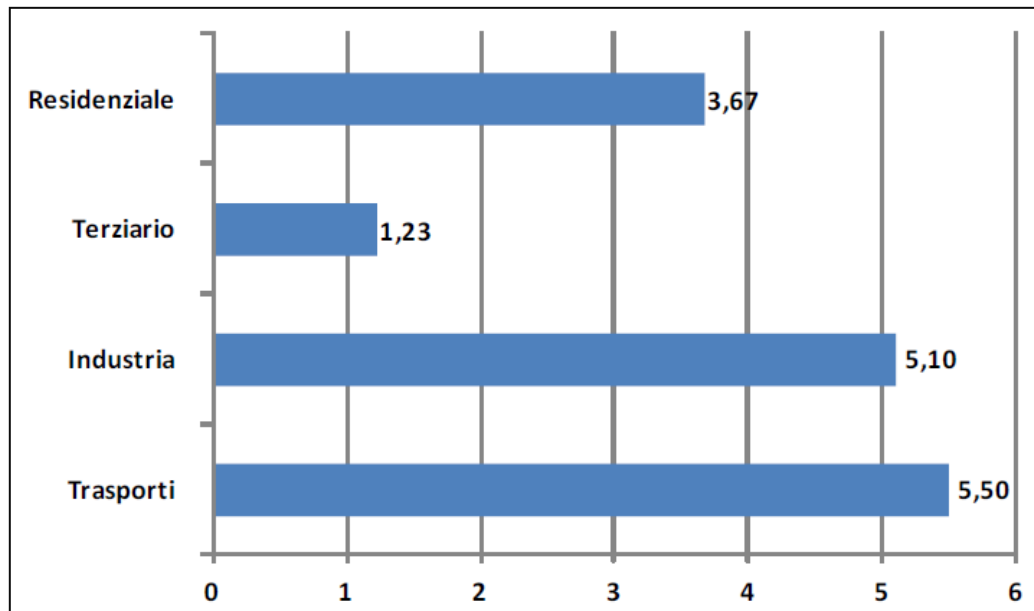


Figura 1.2 Risparmi attesi in energia finale (Mtep) al 2020 per settore [2]

È necessario che le amministrazioni divulghino la “cultura del risparmio energetico” e rendano accessibili ad un numero crescente di persone le possibili tecnologie e soluzioni volte all’efficienza energetica; questo si traduce in emanazione di leggi e decreti che ne regolamentano il mercato e la diffusione.

Nell’ultimo decennio si è assistito a un cambiamento significativo nel settore delle politiche energetiche con particolare riferimento all’applicazione di nuovi strumenti normativi e nuove metodologie per l’applicazione di misure tecnico-normative finalizzate all’uso razionale dell’energia. La Direttiva Europea 2002/91/CE, Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), è stata emanata

con l'obiettivo di migliorare le prestazioni energetiche del settore civile, da anni causa dei maggiori consumi negli usi finali di energia e delle maggiori emissioni di gas climalteranti a livello europeo e nazionale. In Italia la tematica di risparmio energetico nel settore edilizio è stata trattata prima nel DLgs 192/2005 e successivamente nel DLgs 311/2006 dove è stato previsto l'obbligo di dotare gli edifici di un attestato di qualificazione energetica.

Gli interventi di riqualificazione energetica hanno avuto un notevole risvolto commerciale perché hanno portato a proporre prodotti e soluzioni impiantistiche efficienti tra cui ingenti isolamenti e l'impiego di pompe di calore o caldaie a condensazione ed eventuale integrazione da fonti rinnovabili. Sempre più importanza, sia in ambito industriale che residenziale, è stata data alla tematica della qualità dell'aria interna. Infatti, con il miglioramento delle capacità d'isolamento degli edifici, la necessità di adeguati ricambi d'aria all'interno degli ambienti commerciali e residenziali ha assunto un ruolo di sempre maggior importanza. Devono essere rispettati requisiti termo igrometrici e requisiti di inquinamento ambientale ben precisi stabiliti da norme sempre più dettagliate e sempre più vicine a questi aspetti. Sono stati sviluppati nuovi prodotti e soluzioni per garantire sempre più complessi parametri ambientali in modo da garantire livelli di confort e qualità dell'aria soddisfacenti per gli occupanti.

Le normative nazionali che regolano i parametri termo igrometrici e le portate di aria all'interno dei locali sono la norma UNI 7730 che riguarda il confort e la norma UNI10339 che riguarda il dimensionamento dei sistemi aeraulici.

Una prima parte della tesi riguarda inizialmente un'analisi delle sostanziali modifiche apportate a quest'ultima norma, oggi oggetto di revisione e in fase di pubblicazione, e in seguito un'analisi, a livello italiano, delle disposizioni vigenti in materia di ventilazione nei principali comuni italiani in particolar modo negli edifici destinati al "terziario".

L'obiettivo della seconda parte è analizzare i fabbisogni di energia richiesti per la ventilazione di un tipico edificio adibito ad ambiente di lavoro, applicando i nuovi tassi di ventilazione imposti dalla norma "revisionata". Le portate di aria di rinnovo sono basate infatti su tre diverse classi di qualità dell'aria da mantenere all'interno di varie tipologie di edifici, tra cui gli ambienti destinati ad attività lavorative (uffici, ecc.). Attraverso la creazione e simulazione di un modello con il software Trnsys si sono riusciti a stabilire quindi i consumi energetici della ventilazione per 3 diversi climi italiani.

2. VENTILAZIONE E QUALITÀ DELL'ARIA

L'aumento delle prestazioni energetiche degli edifici attraverso una crescita dei livelli di isolamento ha portato alla creazione di ambienti sempre più ermetici nei confronti delle possibili infiltrazioni d'aria e quindi ad un graduale peggioramento della qualità dell'aria interna. Se da un parte sono stati fatti grandi progressi nella "chiusura" degli edifici, dall'altra, si è registrata una crescita delle malattie del tratto respiratorio e, in generale, una sempre maggiore insoddisfazione nei confronti del comfort interno. È compito del progettista quindi, sulla base delle regole imposte dalle normative, cercare di trovare il giusto compromesso tra una buona qualità dell'aria e le esigenze crescenti di risparmio energetico.

2.1 QUALITÀ DELL'ARIA INDOOR

L'importanza del mantenimento di una determinata qualità dell'aria interna è legata al fatto che le persone vi trascorrono più dell'85% del loro tempo all'interno; in assenza quindi di sistemi di controllo diretto sugli inquinanti, il principale metodo per la rimozione e diluizione degli stessi è attraverso l'immissione in ambiente di aria pulita, attraverso quindi una ventilazione, naturale o meccanica [1].

È possibile sinteticamente classificare come sorgenti inquinanti i materiali edili utilizzati nell'edificio, gli arredi, la presenza (eventuale) di impianti di ventilazione, di macchinari, di elettrodomestici, gli occupanti e le attività che essi svolgono, compresa la gestione del sistema edificio-impianto.

L'inquinamento indoor si presenta come una forma di inquinamento estremamente complessa, difficilmente controllabile. La qualità dell'ambiente interno è infatti funzione di parecchi fattori quindi, spesso interagenti in maniera complessa e ancora non completamente nota: condizioni di illuminazione, acustiche, termo igrometriche e, in termini più generali, di qualità dell'aria. Gli ultimi due sono tuttavia le principali cause di insoddisfazione degli utenti.

La qualità dell'aria di un ambiente può essere controllata intervenendo sia sulle sorgenti inquinanti che sulla ventilazione. Un'adeguata ventilazione, meccanica o naturale, consente infatti di rimuovere e/o diluire i contaminanti ivi generati e di ottenerne la qualità desiderata. Per ogni ambiente bisogna determinare la massima concentrazione ammissibile per i diversi contaminanti e prevedere, in base alle attività che vi si svolgono, tassi di ventilazione adeguati, commisurati alla

quantità di sostanze emesse nell'unità di tempo e alla loro tossicità, che consentano di mantenere livelli accettabili di qualità dell'aria.

Le norme UNI 10339:1995 , ASHRAE 62-2004 e EN 15275 definiscono rispettivamente come obiettivi *“la riduzione degli inquinanti noti negli ambienti confinati in concentrazioni tali da non arrecare danno alla salute e da non causare condizioni di malessere”* o *“ di portarle a concentrazioni non dannose e tali che una notevole percentuale di persone non esprima insoddisfazione”*.

2.2 PRINCIPALI SORGENTI INQUINANTI INDOOR

Essendo la ventilazione uno strumento di fondamentale importanza per la diluizione o rimozione degli inquinanti, è necessario analizzare quali sono le tipologie e le fonti di sostanze inquinanti all'interno degli edifici e quali sono i principali sintomi che le persone percepiscono.

L'inquinamento indoor può causare effetti indesiderati che vanno dal disagio sensoriale a gravi conseguenze sullo stato di salute. Si menzionano, a tal proposito, le patologie correlate all'inquinamento indoor: Sick Building Syndrome (SBS), ovvero sindrome dell'edificio malato, e Building Related Illness (BRI), vere e proprie malattie correlate alla permanenza nell'edificio. Nella tabella 2.1 sono elencati alcuni dei sintomi più comuni della SBS [2].

Sintomi comuni della “Sick Building Syndrome”
Nausea e mal di testa
congestione nasale
congestione del torace (carezza di fiato, senso di costrizione toracica)
problemi agli occhi (secchezza, lacrimazione, bruciore, problemi con lenti a contatto)
Problemi alla gola (raucedine, gola secca)
Affaticamento (stanchezza, sonnolenza)
Brividi e febbre
Spasmi neurologici (dolori muscolari o alle articolazioni, intorpidimenti, formicolii)
Sintomi neurologici (difficoltà di concentrazione e memorizzazione, depressione, nervosismo)
Vertigini

Tabella 2.1 Sintomi più comuni della SBS [2]

Il giudizio degli occupanti è quindi l'unico modo per avere informazioni relative al comfort e ai sintomi specifici della Sick Building Syndrome.

Fanno parte del secondo gruppo le seguenti patologie: alveoliti allergiche estrinseche, asma bronchiale, febbre da umidificatori, febbre di Pontiac e legionellosi.

Gli esseri umani hanno un impatto considerevole in quelle che sono le condizioni interne sia in termini di condizioni termo igrometriche, sia in termini di sostanze introdotte.

Per stimare il carico termico dovuto alla presenza di persone negli ambienti, che sono funzione della tipologia di attività svolta dagli occupanti, vengono utilizzati dei coefficienti proposti dalla norma ISO 7730.

Attività	Metabolismo energetico	
	W/m ²	met
Distesi	46	0,8
Seduti, rilassati	58	1,0
Attività sedentarie (ufficio, abitazione, scuola, laboratorio)	70	1,2
In piedi, attività leggere (shopping, laboratorio, industria leggera)	93	1,6
In piedi, attività medie (commesso, lavori domestici, lavori alle macchine)	116	2,0
Camminare in piano alla velocità di:		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Tabella 2.2 Tassi metabolici in funzione dell'attività

Esiste una resistenza termica aggiuntiva dovuta al maggiore o minore isolamento relativo all'abbigliamento che si esprime attraverso il parametro "clo" (1 clo corrisponde a 0.155 m²K/W).

In funzione dei valori di attività metabolica (Metabolic Equivalent of Task, MET), di isolamento del vestiario (clo), di velocità e temperatura dell'aria, di temperatura media radiante e umidità relativa la norma ISO 7730 [3] riporta una procedura per il calcolo dei due principali indici utilizzati per valutare l'accettabilità delle condizioni interne da parte degli occupanti.

- PMV: voto medio previsto (Predicted Mean Vote)
- PPD: percentuale delle persone non soddisfatte (Predicted Percentage Vote)

Il primo varia tra -3 e +3 che corrispondono rispettivamente ad una sensazione di molto freddo e di molto caldo, mentre il secondo è la percentuale di persone che si ritengono non soddisfatte delle condizioni interne in termini di comfort generale. La relazione tra i due parametri è visibile nel sottostante grafico; in condizioni ottimali a valori di PMV intorno alle zero (neutro) corrispondono percentuali molto basse di PPD.

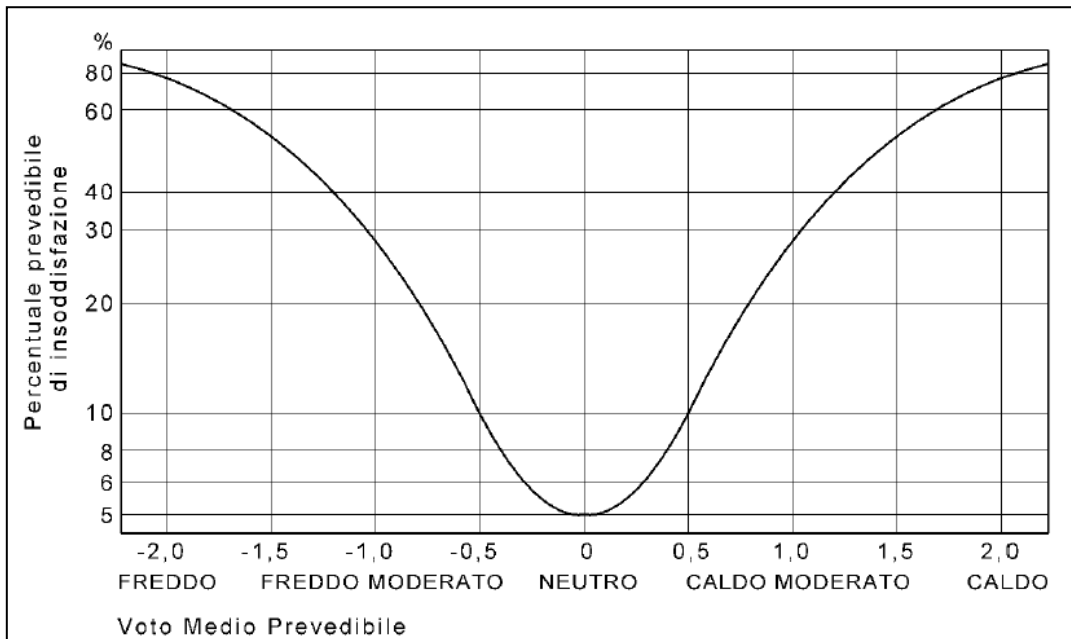


Figura 2.3 Relazione PMV-PPD [3]

Nella ASHRAE Standard 62.1-2010 si può trovare una interessante definizione di qualità dell'aria interna: *la qualità dell'aria interna è considerata accettabile quando in essa non sono presenti inquinanti in concentrazioni dannose, secondo quanto stabilito dalle autorità competenti e quando una notevole percentuale di persone (maggiore del 80%) non esprime insoddisfazione verso di essa.* [4]

In termini di sorgenti inquinanti, gli occupanti emettono una serie di sostanze, legate alle funzioni metaboliche dell'organismo, che vanno a peggiorare le condizioni dell'aria interna chiamati bioeffluenti. Questi contribuiscono in maniera significativa a degradare le condizioni percepite di qualità interna, e quindi ad aumentare il coefficiente PPD.

Oltre agli inquinanti emessi dagli occupanti esistono anche inquinanti emessi da materiali e/o macchinari all'interno dell'ambiente. Vedremo in seguito le due tipologie;

2.2.1 SOSTANZE ANTROPICHE - BIOEFFLUENTI

I processi metabolici degli occupanti di un ambiente richiedono ossigeno e producono i cosiddetti bioeffluenti, composti da anidride carbonica, umidità, aldeidi, esteri ed alcoli: quello prodotto in misura maggiore è di gran lunga la CO₂.

Anidride Carbonica

Gli esseri umani producono anidride carbonica in misura proporzionale alla velocità del loro metabolismo. Non è un gas dannoso o lesivo per la salute a bassi livelli di concentrazione, tuttavia, viene riconosciuto come uno dei gas indici della qualità dell'aria interna per il suo legame con i restanti bioeffluenti prodotti dall'uomo; esso viene prodotto essenzialmente nei processi di respirazione. È un gas ubiquitario in natura, si trova infatti in atmosfera con una concentrazione di circa 380 ppm (in tendenziale crescita negli anni), variabile in funzione del luogo. Valori standard in termini di emissioni per persona sono quelli riportati in tabella 2.4 , essi dipendono essenzialmente dall'attività svolta [5].

Attività	Respirazione per persona (m³/h)	Emissione di CO₂ per persona (m³/h)
Dormire	0.3	0.013
Riposo o poca attività	0.5	0.020
Lavoro normale	2-3	0.08-0.13
Lavoro pesante	7-8	0.33-0.38

Tabella 2.4 Emissioni di anidride carbonica per persona [5]

Nel complesso quindi, la concentrazione di CO₂ viene utilizzata come indicatore per la ventilazione in relazione alle valutazioni di adeguatezza della diluizione degli inquinanti prodotti dagli occupanti, e come parametro di controllo dei tassi.

In particolare, secondo la norma ASHRAE 62.1 2004 la relazione fra la concentrazione di CO₂ e l'apporto di aria esterna è dato dalla formula:

$$Q = \frac{N}{C_s - C_o}$$

In cui

Q = tasso di ventilazione per occupante

N = tasso di generazione di CO_2 per persona

C_s, C_o = concentrazione rispettivamente nell'ambiente interno ed esterno

Una formula analoga viene proposta anche dalla nuova norma UNI10339.

La massima concentrazione ammissibile in ambienti chiusi è di 5000 ppm (9 g/m^3) in termini di MAC e di 1000-2500 ppm ($1.8\text{-}4.5 \text{ g/m}^3$) in termini di AIC.¹ [4]

Lo standard ASHRAE 62 raccomanda tuttavia, per garantire il comfort in relazione agli odori corporali, di non superare le 1000 ppm, che corrispondono a $8 \frac{l}{s \cdot px}$ per uno standard occupazionale di 7 persone su 89 m^2 . Comunque, nella norma tale valore di ventilazione viene raccomandato come valore minimo da adottare per la gran parte degli ambienti occupati. Superando valori di 700 ppm gli insoddisfatti crescono significativamente (Figura 2.5). All'aumentare dell'inquinamento prodotto dagli esseri umani aumenta l'insoddisfazione da parte degli utenti secondo una legge esponenziale.

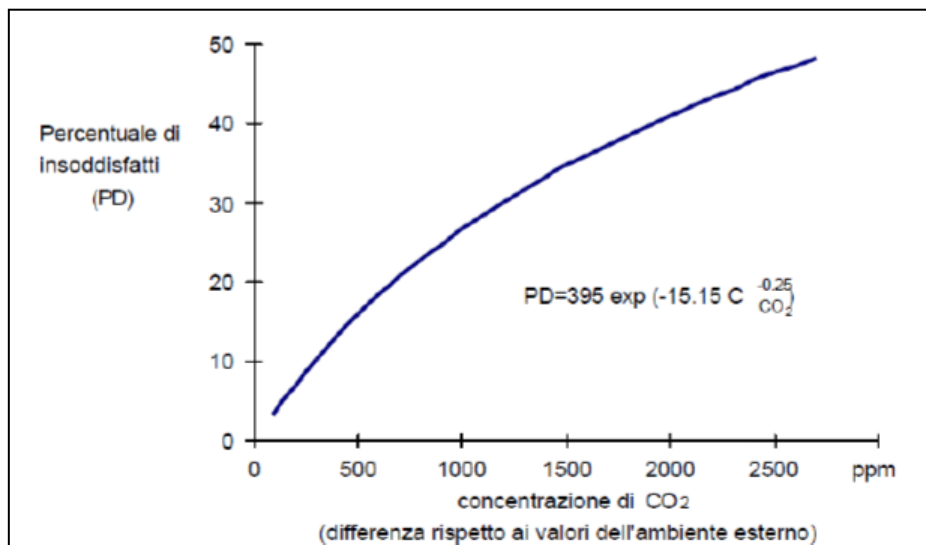


Tabella 2.5 PD vs ppmCO₂[6]

¹ MAC (Maximum Allowable Concentration): concentrazione massima ammissibile, parametro usato per ambienti di valore

AIC (Acceptable Indoor Concentration): concentrazione interna accettabile, parametro usato per ambienti residenziali

In termini di impatto sulla salute, la CO₂ non ha effetti diretti. In caso di concentrazioni elevatissime si possono riscontrare difficoltà respiratorie e al di sopra dei 30000 ppm possono insorgere nausea e mal di testa oltre a difficoltà nella percezione del moto.

Vapore acqueo

L'eccesso di vapore d'acqua (e quindi di umidità) all'interno degli ambienti confinati è determinato prevalentemente dagli occupanti e dagli apparecchi di combustione che funzionano in assenza di un'adeguata ventilazione. La quantità di vapore acqueo emesso dipende dall'attività svolta dagli occupanti, e sarà tanto maggiore quanto maggiore è il numero di met. I problemi principali che possono originarsi non riflettono in dannosità all'essere umano quanto in un ambiente troppo umido da risultare non confortevole e ideale per la proliferazione di microorganismi e formazione di condense e muffe. Oltre all'attività degli occupanti è stato dimostrato che anche le superfici e i materiali igroscopici immagazzinano il carico di vapore per poi rilasciarlo durante un periodo di tempo più lungo. È necessario considerare quindi l'intera quantità immessa, e non solo la portata istantanea [7]

Si possono trovare dei riferimenti per quanto riguarda l'emissione di vapore acqueo: vengono riportati infatti valori tra i 30 e 300 g/h in dipendenza del tipo e dell'intensità dell'attività svolta. In generale condizioni di benessere sono generalmente caratterizzate da valori di umidità relativa attorno al 50%; un ambiente eccessivamente secco o umido può causare effetti sgradevoli.

Altri bioeffluenti di origine umana provenienti da attività metaboliche sono alcoli, esteri, e composti solforati, presenti in quantità minori rispetto ad anidride carbonica e acqua.

2.2.2 SOSTANZE NON ANTROPICHE

Le sostanze presenti negli ambienti indoor possono essere di tipo chimico, fisico o biologico: per comodità di riferimento possono essere accorpate in 4 raggruppamenti, comprendenti:

- *Sostanze chimiche*
- *Particolato*
- *Radionuclidi*
- *Organismi microbiologici*

Le sostanze chimiche comprendono una serie di composti organici ed inorganici, soprattutto gas e vapori. Fra le sostanze organiche citiamo, in particolare, i composti organici volatili (VOCs), fra i quali il più pericoloso è la formaldeide, mentre tra quelli inorganici ricordiamo gli ossidi di carbonio e di azoto e l'ozono, fra i quali il più dannoso è l'ozono.

Le sostanze riscontrabili all'interno di un ambiente sono quindi molto numerose e di natura diversa, le principali sono riassunte nella tabella 2.6 [8].

Inquinante	Principali sorgenti
Allergeni	Polvere, animali domestici, insetti
Monossido di carbonio	Combustione, fumo di tabacco
Formaldeide	Isolamenti, arredamenti, pannelli
Microrganismo	Persone, animali, piante, sistemi di condizionamento
Biossido d'azoto	Aria esterna, combustione, veicoli
Sostanze organiche	Adesivi, solventi, materiali da costruzione
Ozono	Reazioni fotochimiche
Particolato	Prodotti di combustione, sospensione di particelle
Idrocarburi aromatici policiclici	Combustione, fumo di tabacco
Pollini	Aria esterna, alberi, erba, piante
Radon	Terreno, materiali da costruzione
Spore	Terreno, piante, superfici interne
Biossido di zolfo	Aria esterna, combustione

Tabella 2.6 Principali inquinanti e relative sorgenti [8]

Vediamo quali sono i principali inquinanti non antropici presenti all'interno di ambienti di lavoro non industriali.

Formaldeide

La formaldeide o aldeide formica (HCHO) fra i composti organici è l'aldeide più semplice e più comune. Essa si forma dalla combustione incompleta di molte sostanze organiche (anche di

idrocarburi semplici come il metano). A temperatura ambiente si presenta come un gas incolore, altamente reattivo, caratterizzato da un odore acuto molto irritante.

La formaldeide è presente nell'aria esterna, generandosi per fotossidazione del metano e di altri composti organici naturali o antropogenici o ancora come prodotto metabolico delle piante. Ulteriori contributi provengono dai gas di scarico delle automobili, dai processi di combustione e dalle attività industriali, soprattutto dalla produzione di resine. La formaldeide presente negli ambienti interni non-industriali proviene tuttavia solo in minima parte da fonti esterne, essendo la gran parte emessa da vari tipi di sorgenti interne.

L'emissione dovuta ai materiali si verifica maggiormente durante la prima fase di vita degli edifici ed è dovuta prevalentemente alle resine contenute in vari prodotti, soprattutto di legno, quali il truciolato contenente adesivi composti da resine di urea-formaldeide o isolanti di schiume della stessa sostanza. L'emissione viene favorita da aumenti di temperatura, dall'umidità e dal ricambio d'aria. Lo standard ASHRAE 62.1 [4] fornisce come valore limite 0.081 ppm basato su irritazione di persone particolarmente sensibili con una esposizione di 30 minuti. Viene stabilito dalla norma il valore di 0.05 ppm per evitare l'insorgenza di irritazioni e patologie collegate. In tabella 2.7 si possono osservare i principali sintomi causati dall'esposizione a concentrazioni crescenti di questo gas[9].

Concentrazione (ppm)	Effetti osservati
< 0.05	Nessuno
0.05-1	Soglia di percezione olfattiva
0.05-1.5	Effetti neurofisiologici
0.01-2	Irritazione degli occhi
0.10-25	Irritazione dell'apparato respiratorio superiore
5-30	Irritazione dell'apparato respiratorio inferiore, danni polmonari
50-100	Edema polmonare, infiammazione, polmonite
>100	Coma, morte

Tabella 2.7 Effetti sulla salute dell'esposizione alla formaldeide [9]

Composti Organici Volatili (VOCs)

Un composto organico può essere chiamato tale se contiene almeno un atomo di idrogeno e carbonio nella sua struttura molecolare. Questo a sua volta può essere suddiviso in diversi composti organici volatili (VOCs), semi-volatili (SVOCs) e non volatili (NVOCs). Il fatto che i materiali che li contengono abbiano ottime caratteristiche in termini di isolamento termico, resistenza al fuoco, facilità di installazione ed economia ha portato ad una larga diffusione degli stessi. Negli ambienti chiusi tali sostanze sono generate principalmente da materiali edili, isolanti, arredi, rivestimenti e simili e possono consistere di centinaia di composti diversi. Data la grande eterogeneità di tali sostanze e la difficoltà d'analisi che ne deriva, non sono presenti linee guida generali.

Esistono comunque delle categorie di VOC particolarmente presenti all'interno di ambienti confinati e/o pericolose per la salute dell'uomo, che si riportano nella tabella 2.8. [6]

Composto	Concentrazione massima raccomandata
Benzene	1
Diossano	2.5
Stirene	5
Cloruro di Metilene	10
Toluene	10
Refrigeranti	50 (eccetto R 123)
Acetone	75

Tabella 2.8 Concentrazioni massime ammissibili per i principali composti organici volatili raccomandate dall'ASHRAE 62-89 per il raggiungimento del confort [6]

Il benzene è un idrocarburo aromatico molto tossico. La presenza prolungata in ambienti contenenti vapori di benzene può provocare anche anemia o leucemia.

Lo stirene è un composto organico liquido, derivato dal benzene. È una materia prima per la produzione di materie plastiche come il polistirolo o di gomme sintetiche.

Il toluene è un idrocarburo aromatico liquido utilizzato come solvente per le vernici, i cui vapori sono tossici, anche se in misura minore di quelli del benzene.

I refrigeranti sono sostanze utilizzate negli impianti di raffreddamento.

L'acetone è un liquido volatile ed infiammabile di odore caratteristico. E' uno dei solventi commerciali più diffusi, e come tale trova largo impiego nell'industria delle vernici oltre che delle fibre artificiali.

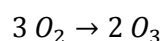
Nelle direttive europee sulla qualità dell'aria interna (EEC, 1992) [10] si può far riferimento a una procedura che si riferisce al livello dei VOC totali (TVOC); in base al livello vengono stabilite delle classi di comfort interno, riportate in tabella 2.9.

Range	Concentrazione (mg/m3)
Di comfort	<200
Di esposizione multifattoriale	200-300
Di discomfort	3000-25000
Tossico	>25000

Tabella 2.9 Classificazione del range di esposizione dei VOC totali in base ai libelli di concentrazione [10]

Ozono

L'ozono (O_3) è una molecola formata dall'unione di 3 molecole di ossigeno. È un gas velenoso dall'odore penetrante, di color azzurro pallido. Tuttavia, esso è essenziale per la vita della'uomo sulla terra in quanto contribuisce all'assorbimento della radiazione ultravioletta proveniente dal Sole. A livello degli ambienti chiusi, l'ozono viene a formarsi in prossimità di apparecchiature che utilizzano voltaggi elevati a partire da molecole d'ossigeno secondo la relazione:



All'interno degli ambienti, uffici in primis, la principale fonte di ozono è rappresentata dall'eventuale presenza di impianti di trattamento aria che sono dotati di filtri elettrostatici, di stampanti e fotocopiatrici ma anche di appositi generatori di ozono. L'esposizione ad ambienti caratterizzati da elevate concentrazioni di ozono può comportare infiammazione delle vie respiratorie e compromettere le funzionalità polmonari [4].

Concentrazioni	Tempo esposizione
0.08 ppm	8 ore

Tabella 2.10 Tempi esposizioni e limiti concentrazioni di ozono [4]

Radon

Il radon è un gas radioattivo incolore e insapore derivato dal radio (elemento abbastanza comune nella crosta terrestre) che appartiene al gruppo 0 della tavola periodica, quello dei gas nobili, cioè elemento particolarmente stabile. Per tale stabilità nella propria configurazione elettronica, il radon è caratterizzato da una notevole inerzia chimica, per cui si diffonde nell'ambiente senza combinarsi con altri elementi per formare composti. Deriva dal decadimento α del radio 226, a sua volta originatosi da due diversi isotopi dell'uranio. Si conoscono ventisei isotopi radioattivi, tra cui il più importante è il Radon-222. A livello di ambienti chiusi, la presenza di radon all'interno degli edifici è dovuta sostanzialmente ad apporti esterni, principalmente gas proveniente dal sottosuolo, ma anche a fonti interne quali i materiali da costruzione. Generalmente la presenza o meno di tale gas dipende molto dalle condizioni e caratteristiche geologiche del sito interessato. Il tasso di ingresso negli edifici dipende dalla permeabilità del suolo ai flussi d'aria, da fattori geologici, meteorologici e strutturali. Nelle tabelle 2.11 e 2.12 sono riassunti alcuni valori di concentrazione di radon in diversi suoli e nei principali materiali da costruzione.

Tipo di suolo	Ra226 (Bq/kg)	Rn (Bq/m ³)
Suoli con contenuto normale di radio	15-65	5000-30000
Suoli con frammenti di granito	130-125	10000-60000
Suoli con frammenti di granito ricco di uranio	125-360	10000-200000
Ghiaia	30-75	10000-150000
Sabbia	5-35	2000-20000
limo	10-50	5000-60000
argilla	10-100	10000-100000

Tabella 2.11 Concentrazioni medie di ²²⁶Ra e ²²²Rn nei suoli a un metro di profondità [11]

Materiale	Tasso di emissione intrinseco (mBq/m²s)
Calcestruzzo	0.803
Calcestruzzo con cinder	11.302
Calcestruzzo poroso	0.571
Mattoni forati	5.927
Balck soil brick	0.325

Tabella 2.12 Tassi di emissione di ²²²Rn [12]

Concentrazioni elevate di questo gas sono responsabili da un parte di elevata tossicità indotta da inalazione e dall'altra una importante attività nucleare elevata. La presenza di radioattività è causa di effetti patogeni alle zone bronco-polmonari ed in particolare favorisce l'insorgere del cancro alla gola ed alle parti alte del sistema bronchiale. [13]

Particolato

È costituito da un insieme di fini particelle solide o liquide disperse in un mezzo omogeneo, per esempio un gas. Il particolato è distinto, a seconda del diametro medio delle particelle che lo costituiscono, in PM_{2,5} o PM₁₀ che corrispondono rispettivamente a diametri inferiori a 2,5 micron e 10 micron. Il particolato può essere di varia natura, come ad esempio polveri che si liberano dalla naturale disgregazione di materiali o dalle polveri che vengono emesse da determinate apparecchiature (es. attrezzature d'ufficio). Infatti, a livello interno degli edifici, parte del particolato che si può trovare proviene dall'esterno, parte proviene dai materiali di costruzione e dalle diverse attività che vi si possono svolgere.

Le concentrazioni limite per il PM_{2,5} e per il PM₁₀ si possono trovare nello standard ASHRAE 62.1.[4]

Particolato	Concentrazione (µg/ m³)
PM 2,5	15
PM 10	50

Tabella 2.13 Concentrazioni sicurezza particolato [4]

Gli effetti sulla salute umana dipendono essenzialmente dalla natura delle particelle inalate. Il particolato aerodisperso può provocare un effetto irritante e nocivo per le vie respiratorie, ostruzione degli alveoli polmonari, disturbi cardiaci e la possibilità di indurre alterazioni del sistema immunitario. È buona regola mantenere l'ambiente confinato il più pulito possibile e minimizzare il

livello delle polveri disperse, soprattutto in caso di attività che ne liberano in notevole quantità, attraverso una buona ventilazione e un buon funzionamento degli impianti di aspirazione.

È necessario citare anche i microrganismi come forma di inquinamento negli ambienti indoor sebbene si sviluppino principalmente in ambienti domestici e non in luoghi di lavoro (uffici, ecc.). Batteri, virus e funghi sono i microrganismi più diffusi e trovano ambiente favorevole alla proliferazione in caso di elevati livelli di umidità. L'esempio più noto è il batterio *Legionella Pneumophila*; vive e prolifera in ambienti caldi (si attiva tra 22 °C e 50 °C) e umidi con presenza di acqua stagnante e favorito dalla presenza di sedimenti e biofilm : tali caratteristiche possono sussistere negli impianti di trattamento aria (umidificatori, torri evaporative, serbatoi di accumulo ma anche doccioni e sistemi antincendio). Efficaci strategie progettuali per combatterne la proliferazione sono quelle di evitare formazione di ristagni, in particolar modo con acqua.

3. VENTILAZIONE NEGLI EDIFICI

Abbiamo visto riassunte nelle pagine precedenti le principali sostanze inquinanti e i principali sintomi che ne derivano all'interno degli ambienti confinati. La ventilazione è un buon metodo per rimuovere gli inquinanti dall'ambiente e raggiungere una determinata qualità dell'aria oltre ad un basso livello di insoddisfazione degli occupanti interni nei confronti del comfort percepito. Garantire quindi adeguate portate di ricambio dell'aria è fondamentale. Ciò si può ottenere, a seconda della destinazione d'uso del locale, attraverso una ventilazione/aerazione naturale o una ventilazione meccanica (controllata).

3.1 VENTILAZIONE NATURALE

Con il termine "ventilazione naturale" o aerazione naturale si intendono gli scambi d'aria tra il locale in esame e l'ambiente circostante che avvengono sotto la spinta della pressione generata sia per l'effetto della diversa temperatura dell'aria tra interno ed esterno dell'edificio, sia per effetto della diversa pressione d'aria tra l'interno e l'esterno del locale. Questo tipo di ventilazione è quindi ottenibile attraverso aperture dell'edificio costituite nella maggior parte dei casi dai serramenti che vengono aperti o chiusi il più delle volte manualmente; esistono tuttavia dei sistemi automatici come serrande o finestre con apertura meccanica reimpostata. I due fenomeni che governano il ricambio naturale dell'aria sono uno termico e uno anemologico. Vediamo brevemente i due meccanismi su cui si basa appunto la ventilazione naturale.

Effetto camino gradiente termico

L'effetto camino identifica la normale tendenza invernale dell'aria calda (più leggera e meno densa) di salire verso l'alto e di uscire dalle zone a debole tenuta inserite nella sommità dell'edificio e dell'aria fredda (più pesante e più densa) di entrare dalle zone in prossimità del basamento per sostituire l'aria dispersa.

In estate, quando l'aria esterna ha una temperatura maggiore di quella interna, il fenomeno si manifesta in senso opposto. Maggiore è la differenza di temperatura tra le masse d'aria, maggiore è la differenza di pressione che si genera e la velocità del movimento verticale dell'aria. Creando infatti delle aperture di ventilazione alla base e alla sommità dell'edificio si può favorire l'insorgenza

dell'effetto camino. Questo effetto consente di attuare una ventilazione naturale. In figura viene riportato un esempio di schema di funzionamento del meccanismo di ventilazione per effetto camino.

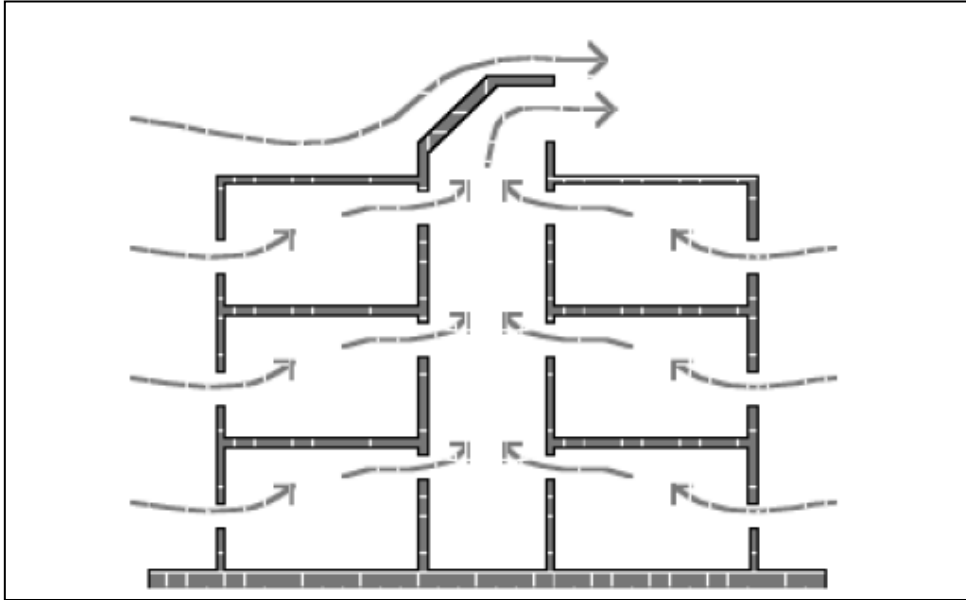


Figura 3.1 Schema di funzionamento ventilazione effetto camino [1]

Gradiente anemologico

Il gradiente anemologico è causato dall'incidenza del vento sull'edificio. Il vento giunge infatti sulle facciate in diverso modo: le parti dell'edificio direttamente esposte all'aria subiranno la pressione del vento, trovandosi quindi in sovrappressione, mentre gli altri lati saranno caratterizzati da condizioni di depressione dovute alla scia causata dall'edificio stesso. Ciò instaura un notevole passaggio d'aria dalle zone prospicienti il vento alle zone in depressione. È il fenomeno all'origine della tipologia della ventilazione naturale trasversale, detta anche "wind-driven ventilation" o "cross ventilation".

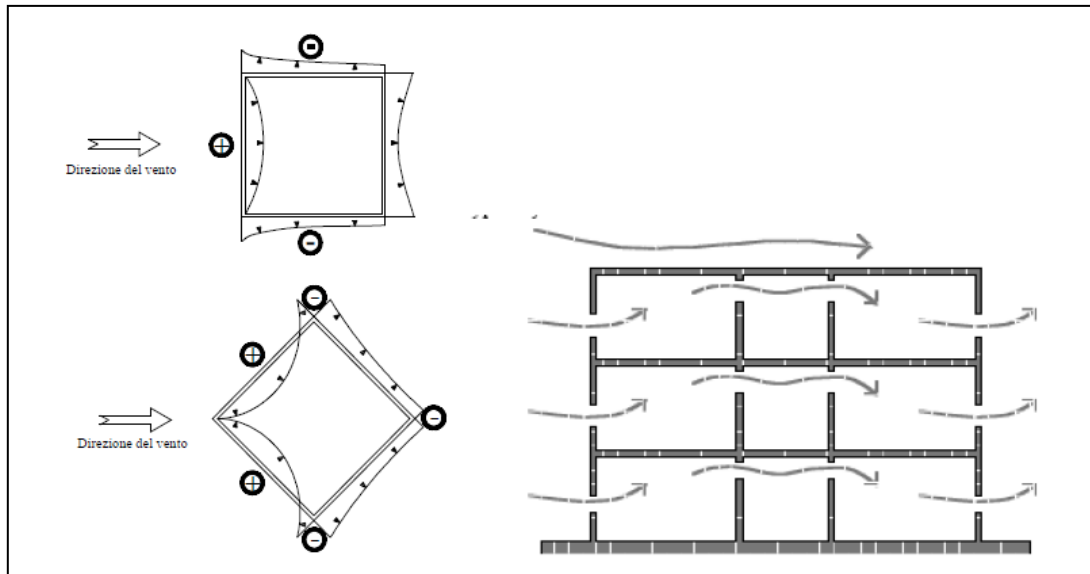


Figura 3.2 schema di funzionamento per gradiente anemologico [1]

L'azione del vento dipende dall'altezza e ciò è tanto più vero quanto più affollato è il contesto in cui sorge l'edificio. Tipica distribuzione del profilo di velocità del vento è quella riportata in figura 3.3 [2]. Il modo in cui il vento fluisce attorno ad un edificio è fortemente influenzato dalla geometria della costruzione e dagli ostacoli circostanti, oltre che dalla caratteristiche di ventosità del sito. In presenza di un contesto urbano di grande densità ed edifici bassi, l'apporto della ventilazione naturale è ridotto.

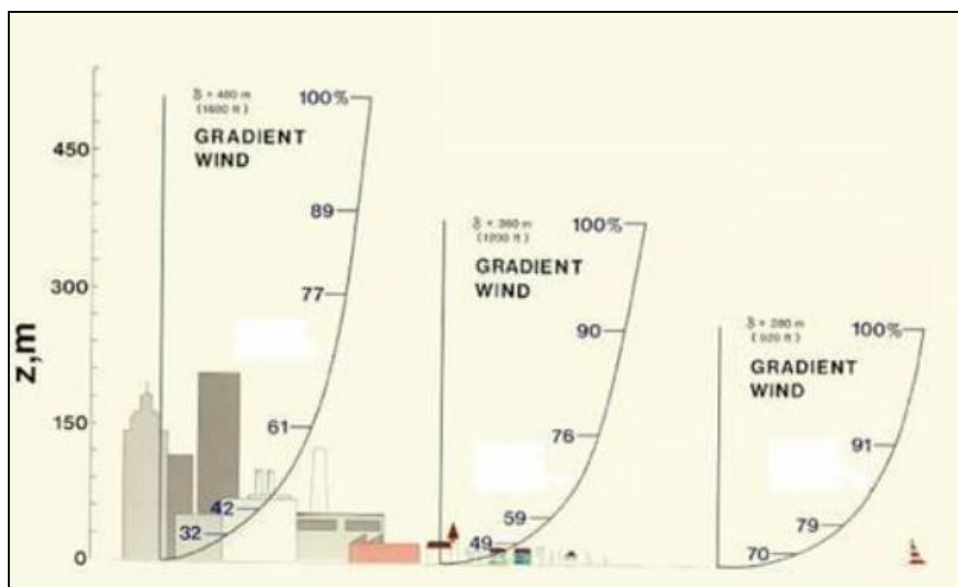


Figura 3.3 Andamento velocità vento un funzione dell'altezza [2]

È opportuno precisare i limiti di applicabilità del raffrescamento naturale. Da un punto di vista fisico, l'ambiente urbano, in particolar modo se densamente costruito, presenta degli aspetti che possono costruire degli ostacoli, se non addirittura degli impedimenti, all'applicazione della ventilazione naturale. Da un punto di vista energetico, se è vero che l'aerazione naturale non richiede energia attiva, è anche vero che non rende possibile un recupero di calore sulla massa d'aria che viene fatta fuoriuscire all'esterno. Inoltre non è consentito un controllo in termini di filtrazione dell'aria esterna.

Le grandezze utilizzate per descrivere l'aerazione naturale sono [3] :

rapporto aerante (R.A): rappresenta il rapporto tra la superficie apribile delle finestre in un ambiente e la sua area in pianta. Si tratta di un parametro relativamente semplice e comunemente adottato nei regolamenti edilizi;

ricambi d'aria (n): Tale quantità, moltiplicata per il volume dell'ambiente stesso, determina la quantità d'aria che attraversa il locale in oggetto in 1 ora, e dunque il numero di "lavaggi" che, nell'ipotesi di perfetto miscelamento, si verifica nel locale in tale periodo; di seguito è riportata la formula:

$$n = \frac{V}{\dot{V}} \quad [\text{h}^{-1}]$$

con

V = volume dell'ambiente occupato

\dot{V} = portata volumetrica di aria nell'ambiente occupato

3.2 VENTILAZIONE FORZATA

La ventilazione meccanica (o "forzata") è la soluzione impiantistica classica in cui il movimento dell'aria è realizzato con ventilatori, a volte inseriti in un sistema di condizionamento o trattamento dell'aria (HVAC, Heating Ventilating Air Conditioning), che prelevano aria all'esterno dell'edificio e la distribuiscono utilizzando, almeno parzialmente, una canalizzazione. La ventilazione meccanica garantisce un buon controllo sull'efficacia e sull'intensità dei ricambi d'aria, rendendo anche possibile il recupero di una parte del calore attraverso un recuperatore. Generalmente l'impianto di ventilazione meccanica controllata (VMC) consta di una macchina con ventilatori e canali di adduzione ed estrazione aria.

Nello specifico, a seconda della funzione svolta dai ventilatori, la ventilazione meccanica si distingue in:

- **Estrazione**, in cui il ventilatore aspira l'aria dai locali da mantenere in depressione (es. bagni, cucine, ecc.) e l'aria esterna non trattata viene immessa direttamente da aperture collegate con l'esterno o dai locali confinanti;
- **Immissione**, in cui l'aria esterna (generalmente trattata) viene spinta nei locali dal ventilatore di mandata, mentre la fuoriuscita dell'aria all'esterno avviene per semplice sovrappressione attraverso le fessurazioni dell'involucro;
- **Ventilazione bilanciata**, in cui l'impianto realizza sia l'immissione che l'estrazione dell'aria, mantenendo una condizione controllata di parità o di differenza di pressione tra l'interno e l'esterno degli ambienti serviti.

La corretta progettazione di un impianto di ventilazione presuppone:

- a. Mantenimento della purezza dell'aria tramite l'immissione nell'ambiente di un'adeguata quantità di aria di rinnovo;
- b. Mantenimento della purezza dell'aria mediante l'appropriata scelta del punto di prelievo e la filtrazione dell'aria movimentata;
- c. Efficace distribuzione dell'aria in modo da ottenere un ricambio omogeneo in ogni parte del locale e in modo da evitare la formazione di fastidiose correnti d'aria.

In linea di massima si deve ricorrere ad un impianto di ventilazione forzata se:

- L'aerazione naturale non è sufficiente e non esiste la possibilità concreta di adeguarsi ai requisiti
- Si devono rimuovere inquinanti diffusi a bassa tossicità e non è possibile ricorrere all'aspirazione localizzata.
- Sono richiesti parametri certi di qualità dell'aria in termini di rinnovo e/o filtrazione /depurazione.

I parametri generalmente utilizzati per descrivere la ventilazione forzata sono [2]:

1. *Ricambi/ora, o volumi/ora, (n);*
2. *Portate specifiche per persona (Q_p);*

3. Portate specifiche per unità di superficie del locale (Q_s);

Piuttosto che ricorrere al parametro dei ricambi orari, l'attuale tendenza, ripresa oramai dalle più recenti normative (UNI 10339/95 e prUNI10339) è quella di precisare le portate specifiche per persona (Q_p in m^3/h o in l/s pers), moltiplicandole per l'affollamento previsto (n_s in persone/ m^2) oppure per unità di superficie moltiplicandole per la superficie dell'ambiente.

3.2.1 FUNZIONAMENTO IMPIANTI VMC

Il nostro studio è focalizzato non sugli edifici residenziali ma sui locali adibiti ad uffici che, in generale, comprendono uffici singoli, uffici open space e locali da riunione. Per questa tipologia di edifici, il mantenimento di determinati parametri ambientali è affidato, nella maggior parte dei casi, ad impianti di ventilazione meccanica controllata che assicurino adeguati tassi di ventilazione; generalmente l'impianto di VMC per uffici prevede una macchina con ventilatori, un numero adeguato di canalizzazioni di immissione ed estrazione dell'aria ed una unità di recupero termico. A fronte di una spesa in termini di costi d'esercizio a causa dell'energia richiesta per l'azionamento di ventilatori, è possibile andare a controllare le condizioni di qualità dell'aria con la possibilità di variare la portata in funzione delle effettive esigenze degli occupanti all'interno dell'ambiente; questi sistemi si chiamano Demand Controlled Ventilation (DCV). Questa tipologia di sistemi può funzionare anche basandosi sul comportamento di un sensore tarato per uno specifico inquinante, in tal caso i sistemi si chiamano Sensor Based Demand Controlled Ventilation.

Negli ambienti "terziari" i sistemi di ventilazione meccanica controllata sono generalmente centralizzati e abbastanza simili agli impianti destinati al settore residenziale. Il loro principio di funzionamento può essere a semplice o a doppio flusso.

Vediamo ora, a livello generale, quali sono i sistemi più diffusi di ventilazione meccanica controllata.

Sistema a Semplice Flusso

È il sistema più semplice. Prevede un sistema di estrazione meccanica in alcune stanze (bagni, cucine) mentre l'afflusso di aria di rinnovo viene garantito da bocchette disposte sulle pareti esterne o sugli infissi delle stanze principali dotate di dispositivi di autoregolazione della portata (figura 3.4). Le bocchette possono essere igroregolabili, cioè la loro apertura o chiusura dipenderanno dal grado di

umidità presente all'interno, oppure autoregolabili cioè con apertura proporzionale in funzione della differenza di pressione percepita dalla membrana che costituisce la bocchetta. In figura 3.5 è riportata la caratteristica di regolazione di una tipica bocchetta igroregolabile. Il sistema a semplice flusso non consente quindi un controllo sulla qualità dell'aria di rinnovo e non consente un eventuale recupero di calore.

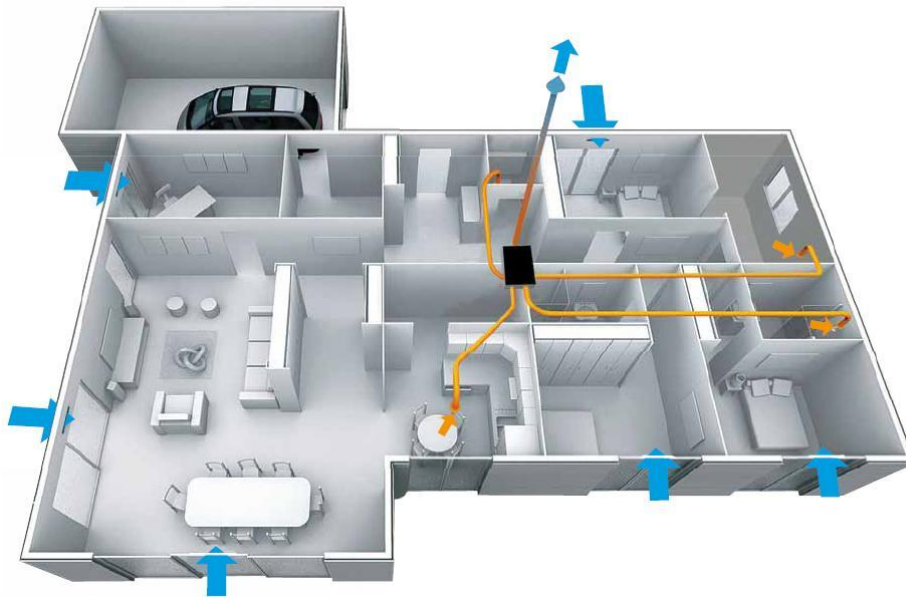


Figura 3.4 esempio di VMC a semplice flusso [4]

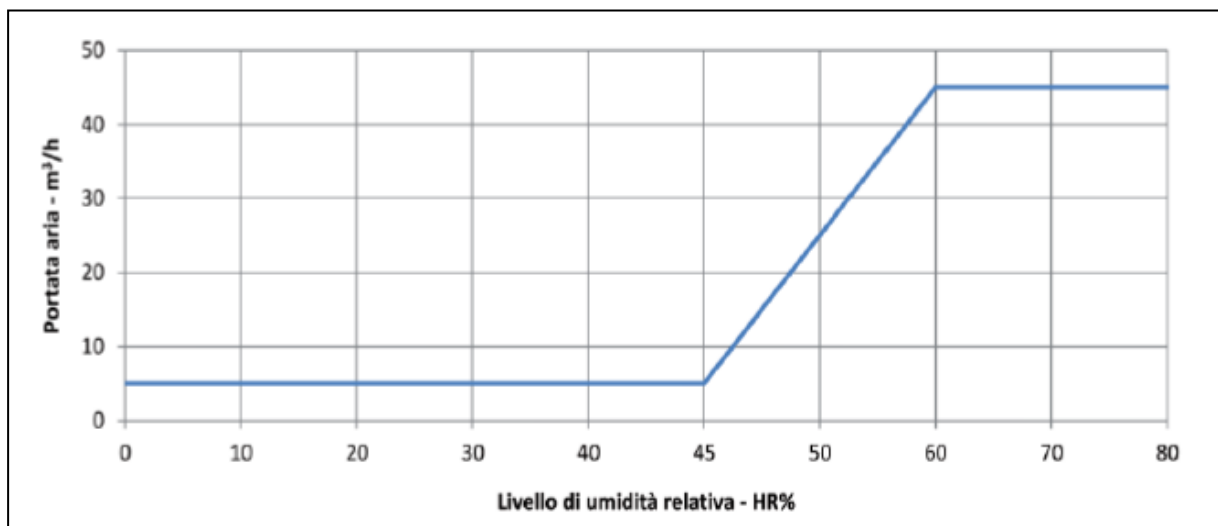


Figura 3.5 caratteristica di regolazione bocchetta igroregolabile

Sistema a doppio flusso

È un sistema, che a differenza del precedente, prevede sia l'estrazione che l'immissione meccanica dell'aria di rinnovo. La ventilazione meccanica a doppio flusso si caratterizza per avere un doppio impianto di ventilazione, formato da canali di distribuzione separati. Un condotto controlla e regola l'immissione dell'aria, mentre l'altro è dedicato all'aria in estrazione. In questo caso i flussi in immissione e in estrazione possono essere regolati e gestiti da due diversi ventilatori elettrici e vi è la possibilità di effettuare un recupero energetico sull'aria in espulsione, accorgimento che consente di risparmiare energia per riscaldare l'aria in inverno e raffreddarla in estate. Un' ulteriore differenza rispetto ai sistemi a semplice flusso è la presenza di un opportuno filtraggio dell'aria in ingresso.

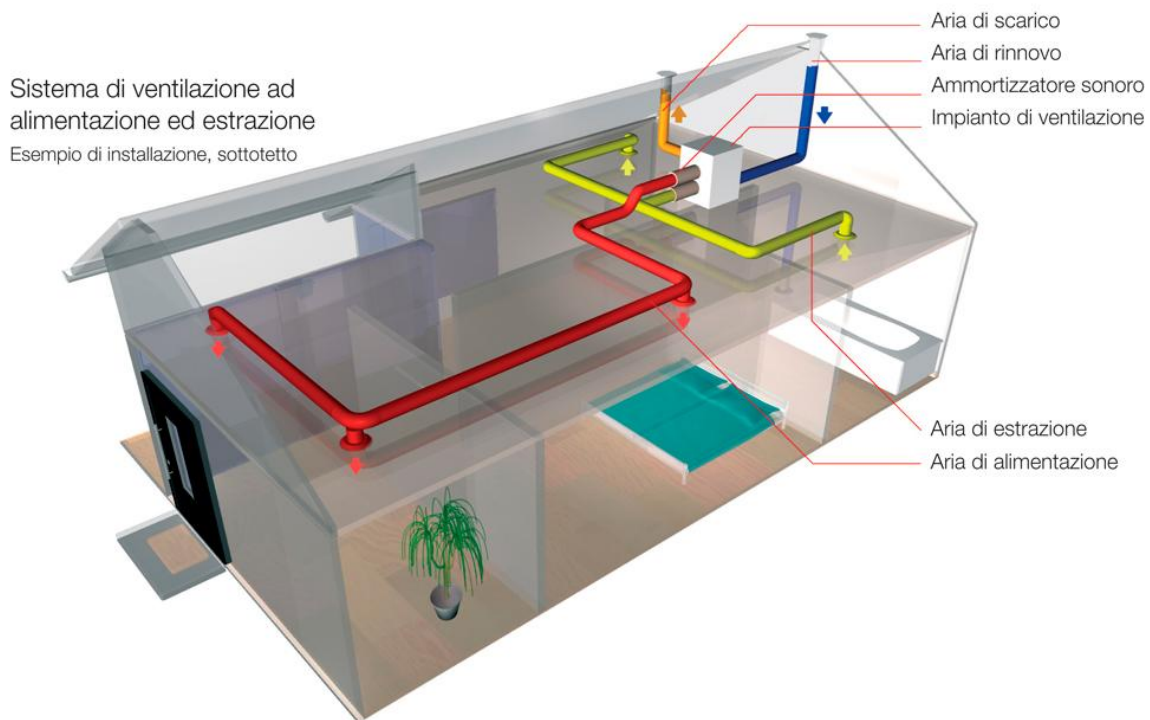


Figura 3.6 esempio di VMC a doppio flusso [5]

Generalmente i componenti di un impianto VMC destinato a luoghi di lavoro è costituito da:

- Impianto di ventilazione con unità di recupero termico e opportuna sezione di filtraggio
- Plenum
- Valvole/terminali di ripresa e di mandata
- canalizzazioni di mandata
- canalizzazioni di ripresa

4. CONSUMI DI ENERGIA PER VENTILAZIONE

Il fabbisogno energetico dovuto alla ventilazione negli uffici e in misura sempre maggiore nel residenziale merita grande attenzione a fronte di una crescente richiesta di risparmio energetico. Nella valutazione dei consumi globali di energia primaria destinati agli edifici, la ventilazione rappresenta circa il 40% della totale utilizzata, nei paesi industrializzati. In questi paesi è stato dimostrato che i fabbisogni di energia primaria per il riscaldamento, la ventilazione e il raffrescamento sia in ambito residenziale che terziario, nella maggior parte dei casi, rappresentano più della metà del totale [1]. In modo specifico, come riportato dal dipartimento energetico americano, il 22% è consumato negli edifici residenziali principalmente dal riscaldamento mentre il 18% negli edifici commerciali/terziari. Il 9,1 % di quest'ultimo rappresenta l'energia primaria destinata alla ventilazione. [2]

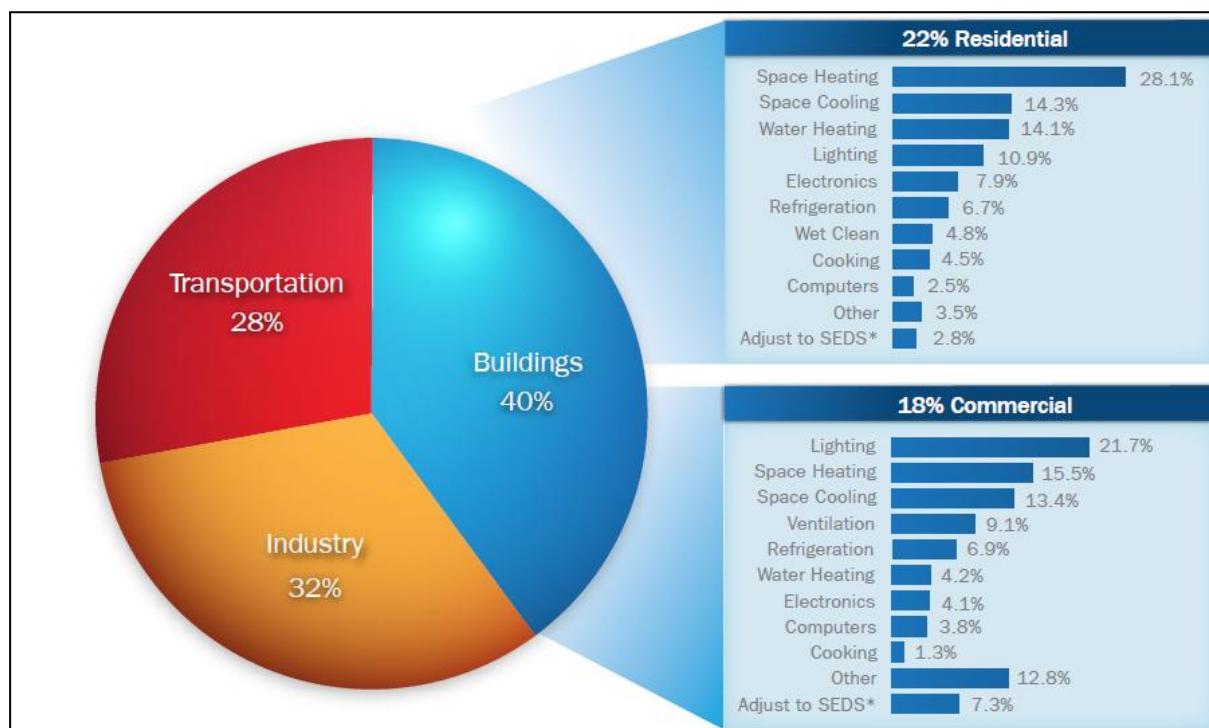


Figura 4.1 Energia primaria destinata a residenziali e commerciale [2]

4.1 PERDITE DI VENTILAZIONE

Circa un 50% dell'energia primaria destinata agli edifici residenziali (scuole, uffici, case, ecc.) risulta essere dissipata dagli edifici attraverso dispersioni di varia natura [3]. A fronte del crescente isolamento dell'involucro edilizio la quota di perdita di energia (sia per riscaldamento che raffrescamento) associata alla ventilazione e all'infiltrazione d'aria è diventata il meccanismo dominante di dispersione termica.

I parametri che influenzano in maniera significativa il bilancio energetico di un edificio sono la coibentazione dell'edificio e la ventilazione. Entrambi sono strettamente correlati alla tenuta all'aria dell'involucro edilizio ovvero al grado di ermeticità del sistema involucro costituito da vari elementi costruttivi interconnessi in vario modo. Queste connessioni rappresentano delle vie preferenziali per il passaggio di calore con conseguente aumento delle dispersioni termiche all'interno dell'edificio.

La scarsa ermeticità dell'involucro causa:

- Aumento delle dispersioni termiche nel periodo invernale per convezione con conseguente aumento del fabbisogno di riscaldamento
- Riduzione del comfort negli ambienti interni per la presenza di "spifferi"
- Riduzione del rendimento degli impianti di ventilazione meccanica con recuperatore di calore. Il calore contenuto nell'aria calda una volta disperso all'esterno attraverso le fessure non potrà ovviamente essere recuperato

Sono elevate infatti le perdite di energia attraverso ricambi d'aria incontrollati ed è necessario quindi cercare di minimizzarle. L'impatto energetico della ventilazione è caratterizzato da 3 tipi di perdite:

- Ventilazione del calore di scarto, cioè del calore in eccesso sviluppato all'interno degli edifici dovuto alla generazione di calore interna (apparecchiature da ufficio, carichi da radiazione solare, ecc.)
- Emissione di fumi
- Perdite di aria condizionata (riscaldata o raffrescata) dallo spazio occupato; queste corrispondono alla perdita di aria intenzionalmente condizionata

Per valutare l'impatto energetico dovuto alla ventilazione è necessario conoscere sia le portate di massa d'aria tra interno ed esterno dell'edificio, sia il contenuto entalpico di queste portate.

Viene di seguito riportato un esempio di impatto energetico di ventilazione per vari fabbisogni e condizioni climatiche [3].

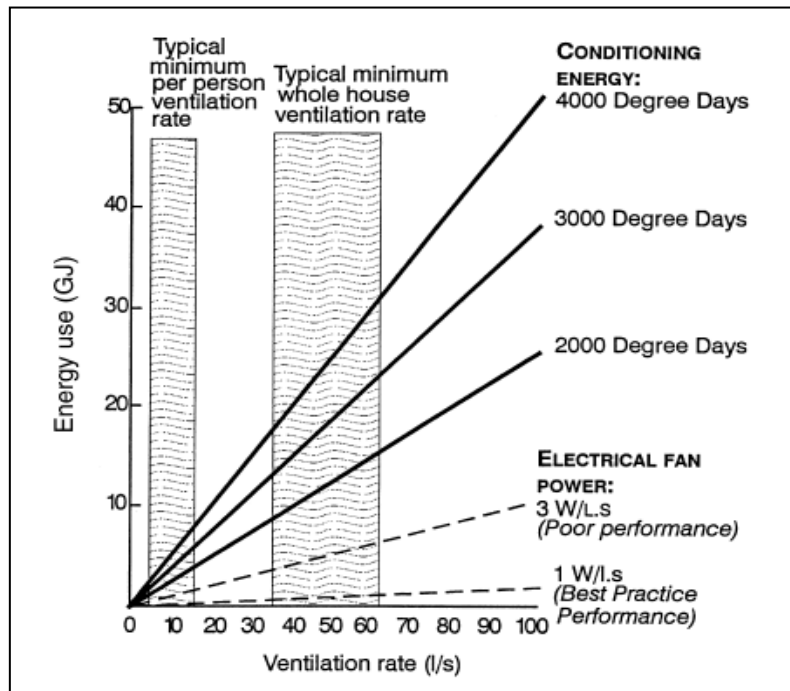


Figura 4.2 Esempi di impatti energetici della ventilazione [3]

La prima area tratteggiata rappresenta il tasso tipico di ventilazione per persona adottato per gli uffici (tasso per persona) mentre la seconda, il tasso di ventilazione adottato per il residenziale. La figura riporta tre rette corrispondenti a diverse località e quindi a diversi gradi giorno e diversi fabbisogni energetici per la ventilazione. Per migliorare il controllo sulla ventilazione utilizzando i valori minimi di portate di rinnovo imposti da varie normative, si può vedere graficamente quale sia il potenziale di riduzione di energia spesa per la ventilazione; Sapendo per esempio quali sono il consumo reale di energia, dato dalla somma delle dispersioni termiche dovute al ricambio d'aria e le perdite associate alle apparecchiature, oltre alla portata di aria esterna di rinnovo, è facile ottenere il livello al quale può essere ridotto teoricamente il consumo di energia per un dato tasso di ventilazione, rappresentato dalla linea continua in figura 4.3. In questo caso il riferimento sulla portata di rinnovo è alla normativa ASHRAE 62.1, che prevede un valore di 7,5 l/s per persona, ma altri valori tratti da altre normative possono essere utilizzati.

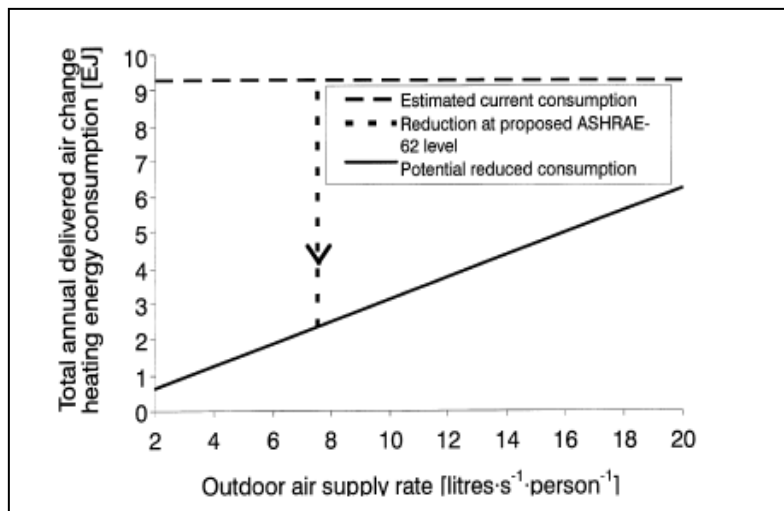


Figura 4.3 Potenziale di risparmio energetico per ventilazione per settore residenziale e terziario [3]

Considerando uno stock di edifici non industriali di 13 diversi paesi, W.Liddament e M.Orme [3] hanno infatti scoperto che la totale perdita annuale di energia dovuta alla ricambio d'aria è circa il 48% della totale energia destinata al condizionamento degli edifici. Inoltre, il ricambio d'aria associato alle perdite di energia è importante tanto quanto la perdite di conduzione e impiantistiche nel dissipare l'energia destinata alla spazio condizionato.

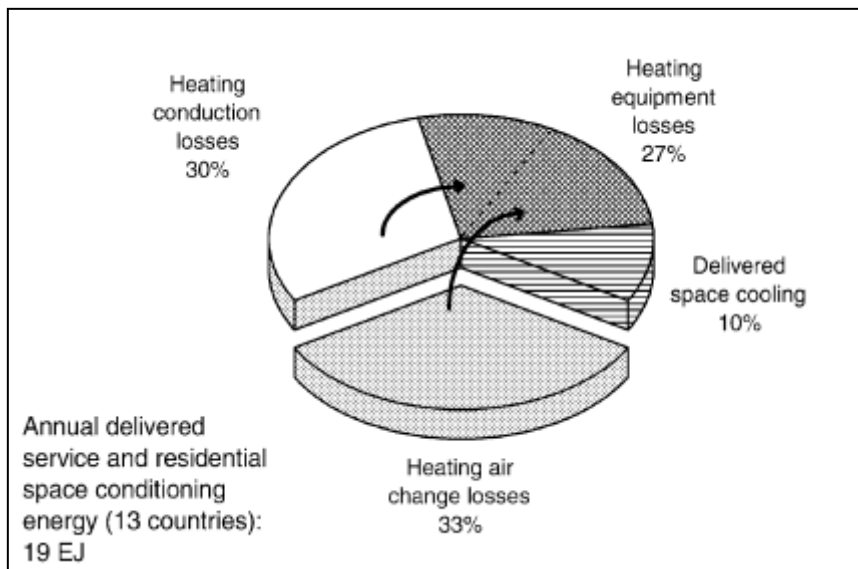


Figura 4.4 Dissipazione dell'energia destinata al condizionamento nel residenziale e terziario [4]

Devono essere adottati tutti gli accorgimenti pratici possibili per ridurre il consumo di energia dovuto al ricambio d'aria. Ne deriva che, compatibilmente con le esigenze dettate dal livello di qualità dell'aria prescelto, ai fini del risparmio energetico è necessario quindi:

- Evitare scambi d'aria non necessari
- Introdurre buone strategie di controllo per la ventilazione
- Minimizzare i carichi termici durante il regime di raffrescamento
- Ottimizzare l'efficienza dei ventilatori

4.2 COSTI-BENEFICI DELLA VENTILAZIONE

La qualità dell'aria interna è strettamente legata al livello di ventilazione impiegato, in particolare maggiori sono i tassi di ventilazione, maggiore risulta essere la qualità dell'aria. Tuttavia questo ha una ricaduta abbastanza importante sul fabbisogno energetico, perché a maggior ventilazione corrisponde una maggiore richiesta di energia; questo maggiore fabbisogno si spiega con la maggiore energia necessaria per i sistemi di ventilazione meccanica, ove presenti, ma soprattutto con la maggiore quantità di aria immessa in ambiente, che dovrà essere opportunamente trattata termoigrometricamente prima dell'immissione. [5]

Un maggior livello di ventilazione contribuisce ad aumentare la produttività degli occupanti all'interno dell'ambiente chiuso e a diminuire la percentuale di persone insoddisfatte, oltre a ridurre l'intensità dei sintomi correlati alla SBS. A testimonianza di ciò, un esperimento condotto da P.Wargocki e P.OleFanger per un semplice ufficio open space standard, ha dimostrato che utilizzando tre valori di portate crescenti, 3,10,30 l/s per pers., all'aumentare di queste, si registrano una migliore qualità dell'aria, una diminuzione dei sintomi di SBS, una decrescita monotona del numero di persone insoddisfatte e infine un aumento di produttività. [6]

Diversi lavori sperimentali hanno cercato di studiare l'andamento del fabbisogno di energia per la ventilazione al variare delle portate d'aria, oltre ad analizzare la variazione della quantità di inquinanti nell'ambiente indoor. Prendendo infatti come riferimento un elevato numero di uffici situati in U.S.A, lo studio considera 4 scenari in cui partendo dal tasso minimo di ventilazione richiesto dalla tipologia di ambiente, si va a variare la portata d'aria, vedendo quali sono i risvolti in termini di produttività, salute, costi dei benefici e costi energetici. Riportiamo qui di seguito una tabella riassuntiva dello studio: se cresce il tasso di ventilazione si hanno una maggiore performance,

una diminuzione dei sintomi SBS, numero minore di assenze dal lavoro e un maggior consumo energetico. Viceversa se il tasso di ventilazione diminuisce [7].

SCENARIO	COSTI E BENEFICI	BENEFICI ECONOMICI (\$ BILION)
Aumento della portata VR ² minima da 8 a 10 L/s px	Performance: + 0.33% Sintomi SBS: 5.2% Assenza persone a breve termine Aumento del consumo energetico Totale beneficio economico	\$10.1 \$0.09 \$2.9 -\$0.05 \$13
Aumento della portata VR minima da 8 a 15 L/s px	Performance: + 0.91% Sintomi SBS: 15% Assenza persone a breve termine Aumento del consumo energetico Totale beneficio economico	\$28 \$0.26 \$9.4 -\$0.19 \$37.5
Decrescita della portata minima da 8 a 6,5 L/s px	Performance: + 0.32% Sintomi SBS: 4.5% Assenza persone a breve termine Decremento del consumo energetico Totale beneficio economico	-\$9.8 -\$0.08 -\$2.3 \$0.04 -\$12.1

Tabella 4.5: Costi e benefici annuali di 3 scenari [7]

Se da una parte l'aumento della portata di ventilazione comporta ovviamente aumenti dei consumi energetici, dall'altra comporta svariati benefici in termini di salute, qualità dell'aria e condizioni lavorative; unendo i risultati di molti studi sperimentali [8], si è scoperto che 25 l/s pers. risulta essere il valore minimo di ventilazione al di sotto del quale aumenta il rischio di sintomi SBS, aumentano le assenze per malattie a breve termine e decresce la produttività degli occupanti all'interno dell'ufficio.

L'aspetto su cui maggiormente rifletteremo sarà vedere quale sia l'andamento dei consumi energetici al variare delle portate di ventilazione proposte dalla prUNI10339.

² VR = Ventilation Rate

Riuscire a trovare delle relazioni valide che leghino ventilazione e fabbisogno di energia non è semplice, e dipende da molti fattori, che riguardano il clima, le caratteristiche dell'edificio e le caratteristiche del sistema HVAC.

Il seguente schema rappresenta un'ottima sintesi di uno studio condotto a livello europeo non solo per uffici ma anche scuole, case ed appartamenti [1]. Sono state accorpate le diversità di clima, le varie tipologie di edificio, le caratteristiche degli edifici e sistemi di ventilazione presenti in alcune città europee caratterizzate da climi molto diversi tra loro.

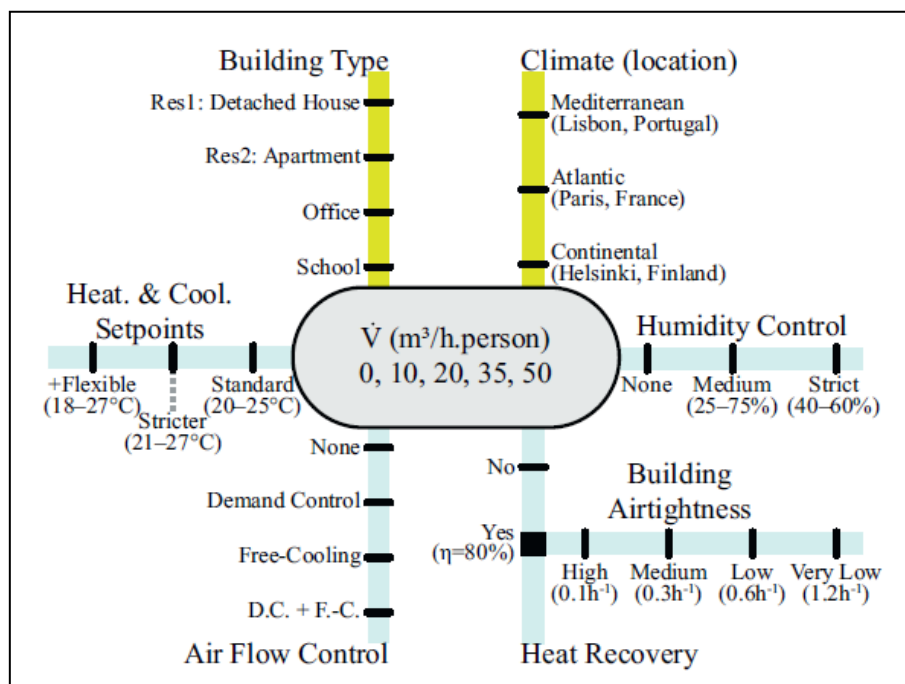


Figura 4.6 schema delle variabili collegate alla ventilazione [1]

In particolare le otto variabili considerate sono: tasso di ventilazione, tipo di edificio, clima, temperature di setpoint di riscaldamento e raffrescamento, controllo del flusso d'aria, infiltrazioni nell'edificio, esistenza di un recuperatore di calore e controllo di umidità. I risultati di questo lavoro sono riportati in termini di ICV (impact of changing ventilation) cioè il rapporto tra i consumi energetici per la ventilazione e la portata di ventilazione per persona. Attraverso l'analisi di 3 città europee, Helsinki, Lisbona e Parigi, considerate essere le più diverse in quanto a condizioni climatiche nel contesto europeo, è stato dimostrato che tendenzialmente sono gli edifici residenziali a richiedere più energia per il riscaldamento piuttosto che per il raffrescamento, viceversa invece per quando riguarda i locali del terziario (service buildings). Le differenze climatiche tra le 3 città sono significative, tuttavia tendono ad essere ridotte dai diversi livelli di isolamento termico e dalle strategie di ventilazione, considerando la presenza o meno di un recuperatore. Per esempio, il clima

di Lisbona (971 GG) è decisamente più caldo di Parigi (2605 GG), ma il notevole isolamento termico e l'uso del recuperatore portano ad avere simili fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento tra le due città, in misura maggiore nel residenziale. Se le differenze strutturali sono piccole invece, il solo clima risulterà essere il fattore che decreta un maggiore o minore fabbisogno.

A livello di energia termica, è stato dimostrato che l'impatto del cambio di ventilazione per il riscaldamento varia da 0.2 e 0.6 KWh/(m³anno)/(m³/hpers) negli edifici residenziali mentre circa 0,2 per gli uffici. In regime di raffrescamento l'impatto della ventilazione varia tra 0.01 e 0.16 KWh/(m³anno)/(m³/hpers).

4.3 FATTORE CLIMATICO E RISPARMIO ENERGETICO

L'aria esterna necessaria alla ventilazione ha un doppio costo energetico, da un lato perché incide direttamente sulla potenza assorbita dal sistema, dall'altro perché essa è disponibile, generalmente a condizioni termo igrometriche, assai diverse da quelle richieste per l'ambiente. Pertanto, prima della sua immissione nell'ambiente i carichi termici connessi all'aria esterna dovranno essere neutralizzati, ciò significa che:

- nella stagione invernale, essa dovrà essere riscaldata ed eventualmente umidificata dalle condizioni iniziali fino alle condizioni desiderate in ambiente
- nella stagione estiva, essa dovrà essere raffreddata, deumidificata ed eventualmente post-riscaldata, dalle condizioni iniziali a quelle richieste per l'ambiente.

Ne deriva che il consumo di energia per la ventilazione è molto dipendente dal clima (e quindi dai GG) infatti i paesi caratterizzati da un clima rigido d'inverno e mite d'estate presentano un maggior fabbisogno di energia per il riscaldamento dell'aria mentre nei paesi con un clima tropicale, estati calde e inverni non rigidi, il fabbisogno maggiore è richiesto in estate per raffrescare e deumidificare l'aria. In un clima tropicale quindi, elevati tassi di ventilazione richiedono grandi fabbisogni che vanno ad incidere sui consumi energetici dell'edificio. [9]

Poiché il progresso tecnologico nel settore della ventilazione ha portato a soluzioni impiantistiche sempre più efficienti, vediamo ora alcuni accorgimenti che consentono di andare a ridurre la richiesta energetica riuscendo a sfruttare condizioni naturali favorevoli, sia in regime di riscaldamento che raffrescamento.

Funzionamento invernale - esigenza di riscaldamento

Durante la stagione invernale la temperatura esterna è generalmente minore di quella interna, l'aria di rinnovo da immettere in ambiente si trova ad una temperatura più bassa di quella ambiente e quindi esiste la necessità di fornire input termico maggiore all'interno dell'edificio per bilanciare l'apporto di aria fredda; ne consegue che la richiesta energetica nel caso di rinnovo dell'aria sarà maggiore rispetto alla modalità di semplice ricircolo. Dal punto di vista del calore latente, l'aria esterna si trova spesso ad una umidità relativa inferiore o superiore rispetto al valore desiderato e quindi deve essere opportunamente umidificata/ deumidificata, a seconda delle caratteristiche climatiche del luogo. L'aria estratta, in medesima quantità a quella di rinnovo per non mettere in pressione o depressione l'ambiente, è la cosiddetta "aria viziata", è carica quindi di agenti inquinanti e umidità, ed esce alla temperatura dell'ambiente interno, superiore a quella esterna.

La presenza di un recuperatore entalpico permette di far avvenire all'interno di esso uno scambio rigenerativo tra le due portate, in modo tale che il flusso d'aria in espulsione ceda quanto più calore possibile al flusso d'aria di rinnovo. Questo calore, se non sfruttato, rappresenta una perdita energetica notevole.

Funzionamento estivo- raffrescamento e deumidificazione

Durante la stagione estiva la temperatura esterna è solitamente maggiore di quella interna, l'aria di rinnovo proveniente dall'esterno deve essere raffrescata e deumidificata nella maggior parte dei casi, prima di essere immessa nell'ambiente interno; è necessario un surplus energetico, come nel caso precedente, rispetto alla semplice modalità di ricircolo. Anche in questo caso è consigliato l'utilizzo di un recuperatore nel caso si voglia che il flusso in espulsione vada a raffreddare parzialmente il flusso di rinnovo in modo da diminuire la richiesta energetica necessaria all'impianto.

4.4 RECUPERATORI DI CALORE

L'unità di recupero termico è fondamentale, in entrambe le condizioni di funzionamento, perché consente di conseguire un notevole risparmio energetico ed economico, recuperando parte del calore contenuto nell'aria esausta e trasferendolo alla corrente di rinnovo.

Questi sistemi di recupero sono detti scambiatori rigenerativi. Ne esistono diverse tipologie [10]:

- recuperatori statici a piastre a flusso incrociato mono e bistadio
- recuperatori rotativi
- recuperatori a batterie con pompa (run around)
- recuperatori a tubi di calore (heat pipe)
- recuperatori termodinamici

Ci soffermeremo sui recuperatori di calore statici aria-aria a piastre, uguali a quello che utilizziamo per il modello di simulazione, nella seconda parte della tesi.

4.4.1 RECUPERATORE DI CALORE A FLUSSI INCROCIATI

Questi tipi di recuperatori hanno la possibilità di recuperare sia il calore sensibile che quello latente. Sono costituiti, geometricamente, da strati piani, con spaziature variabili a seconda del tipo di impiego e apposite sigillature permettono di mantenere separati i flussi di espansione e di immissione. La resistenza termica globale offerta al passaggio di calore del recuperatore risulta composta dalle resistenze termiche convettive sui due lati della piastra (interno ed esterno) e dalla resistenza termica conduttiva della piastra stessa. Poiché i coefficienti convettivi risultano molto più piccoli rispetto alla conducibilità termica delle piastre, ne consegue che l'efficienza dello scambio termico non è sostanzialmente influenzata dallo spessore e dal materiale con cui è realizzato il recuperatore; questo fatto si riscontra analizzando la formula della trasmittanza dello scambiatore di calore:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$

Il materiale con cui le piastre vengono comunemente realizzate è l'alluminio per le sue caratteristiche di resistenza alla corrosione, facilità di realizzazione, infiammabilità e durata; in ambienti più corrosivi l'alluminio può essere protetto con vernice acrilica; in presenza di alte temperature vengono impiegate leghe di acciaio; per esigenze di bassi costi si impiegano materiali plastici.

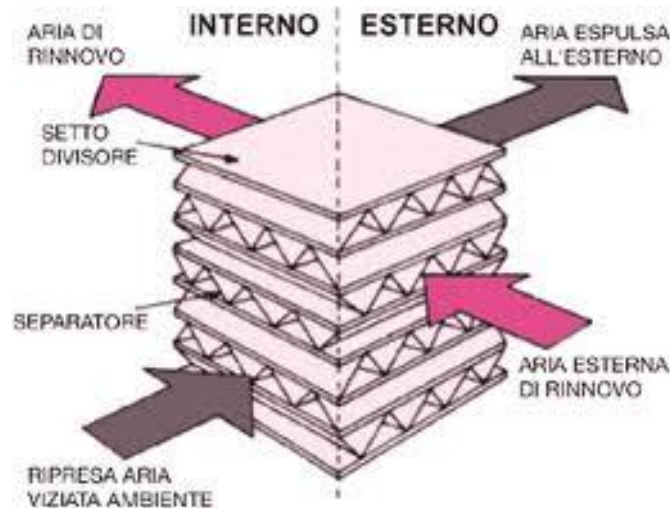


Figura 4.7 Pacco di scambio recuperatore a flussi incrociati

Esistono anche tipi di recuperatori a flussi incrociati che hanno una diversa costruzione del pacco di scambio, costituito dalla sovrapposizione di vari strati di speciale carta trattata, ondulata e permeabile all'umidità. Questa caratteristica consente di adoperare uno scambio termico simultaneo di calore sensibile e latente ma può comportare al contempo una contaminazione tra le portate dal momento che ci sono perdite per trafileamento del flusso di aria viziata espulsa verso quello dell'aria di ventilazione.

La sezione di scambio termico presenta tuttavia una perdita di carico, che deve essere compensata dalla prevalenza dei ventilatori appositamente dimensionati. La perdita di carico dipende dalla velocità dei fluidi ed eventualmente dalla presenza di elementi di filtraggio per l'aria in ingresso [10]. Può esistere inoltre una certa portata di fuga nel caso in cui i fluidi di immissione ed espulsione si trovino a pressioni differenti. E' bene quindi che il flusso d'aria di rinnovo si trovi ad una pressione superiore a quella del flusso d'aria in espulsione, in modo tale da evitare che l'aria di rinnovo venga contaminata anche in presenza di una portata di trafileamento.

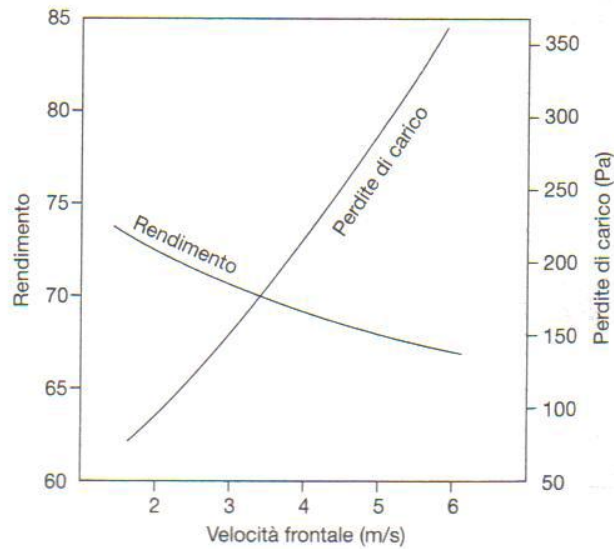


Figura 4.8 Rendimento e perdite di carico recuperatore a flussi incrociati [10]

I recuperatori entalpici presentano un'efficienza termica e un'efficienza igrometrica. I criteri per definire questi due parametri sono riportati nella norma UNI EN 308 "Scambiatori di calore- Procedimenti di prova per stabilire le prestazioni dei recuperatori di calore aria/aria e aria/gas"; considerando quindi un recuperatore entalpico, si hanno:

$$\text{efficienza termica: } \eta_t = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}$$

$$\text{efficienza igrometrica } \eta_x = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}}$$

dove:

t_{11} = temperatura interna del flusso d'aria in espulsione che attraversa il recuperatore;

t_{21} = temperatura esterna del flusso d'aria in ingresso a valle del recuperatore;

t_{22} = temperatura del flusso d'aria in ingresso a valle del recuperatore;

x_{11} = umidità specifica interna del flusso d'aria in espulsione che attraversa il recuperatore;

x_{21} = umidità specifica esterna del flusso d'aria in ingresso al recuperatore;

x_{22} = umidità specifica del flusso d'aria in ingresso a valle del recuperatore.

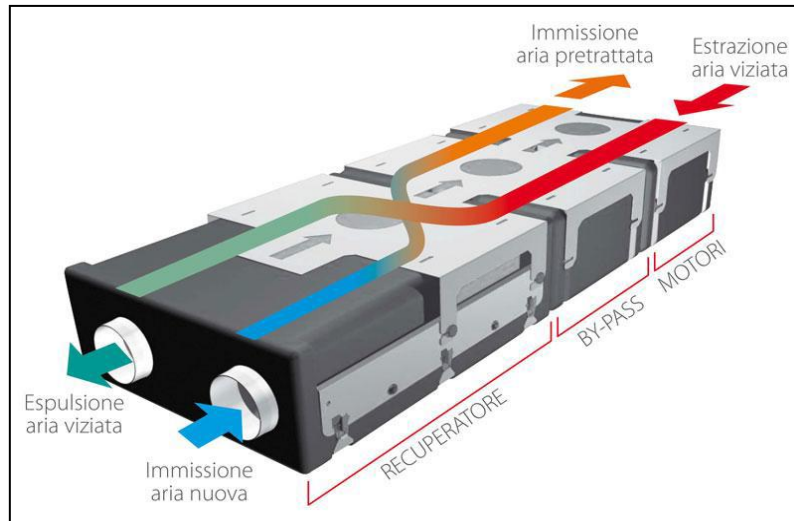


Figura 4.9 schema recuperatore a flussi incrociati

La norma prevede 7 punti di misura diversi in funzione della portata di massa nominale e del rapporto tra portata di aria di rinnovo e portata di aria di espulsione. Un recuperatore di calore, quindi, è caratterizzato da un numero infinito di valori di efficienza, in funzione delle portate di massa di rinnovo ed espulsione. [10]

In determinate condizioni ambientali esterne, può risultare vantaggioso non utilizzare il recuperatore quindi è possibile ed è conveniente bypassare lo scambiatore e immettere nell'ambiente direttamente l'aria esterna. Si parla in questo caso di "free cooling" ed è una modalità di funzionamento che abbiamo ampiamente utilizzato nel modello dell'edificio utilizzato per le simulazioni. L'immissione diretta di aria esterna in ambiente può comportare anche un risparmio energetico qualora ci si trovi in modalità di raffrescamento e vi sia una condizione tale per cui l'entalpia (o semplicemente la temperatura nel caso di recuperatore sensibile) sia inferiore rispetto a quella dell'aria interna. Ne deriva che in questo caso l'energia necessaria sia solamente quella legata alla movimentazione dell'aria attraverso i ventilatori. Il fenomeno del "free cooling" può verificarsi anche nella stagione di riscaldamento nel caso di condizioni di sovratemperatura interna dovute a particolari carichi termici interni o esterni agenti sulla struttura.

5. NORMATIVE VENTILAZIONE

Oggi giorno, nella progettazione e realizzazione degli impianti, si pone sempre maggior attenzione al benessere delle persone che frequentano ambienti chiusi. Questi aspetti sono strettamente legati alla salubrità dell'aria che si respira ed è per questo che diventa fondamentale garantire adeguate condizioni termo igrometriche, ricambi d'aria e filtraggio della stessa, in modo tale che l'inquinamento interno agli ambienti si possa considerare quantomeno accettabile.

Di questi aspetti si occupa la norma UNI10339, in vigore dal 1995 e attualmente oggetto di revisione. Come già accennato al cap.1 , l'Unione Europea ha emanato diverse direttive tra cui la EPDB 2002/91/CE sull' "architettura energetica degli edifici", sulla base della quale il CEN (Comitato Normatore Europeo) ha preparato svariate norme applicative per il calcolo del fabbisogno energetico dei sistemi di riscaldamento, dei sistemi di climatizzazione e ventilazione; una di queste è la EN 13779, base per la modifica della UNI10339 da parte del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) che a breve verrà resa pubblica. Vedremo in seguito la spiegazione dettagliata della stessa norma nella versione vigente e revisionata.

5.1 NORMA UNI10339

La norma UNI10339 è del 1995 e come recita il titolo, recependo le norme emesse dal CEN (Comitato Europeo Normazione) tratta gli "impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, Classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'ordine e la fornitura".

Potrebbe essere considerata quindi una norma di settore che da delle indicazioni di buona tecnica relativamente a come progettare gli impianti ad aria, come presentare i documenti relativi all'offerta per l'installazione e quali parametri dove indicare il committente nella formulazione delle sue richieste. In realtà è diventata una norma cogente, poiché da quando il DPR 59/09 ha stabilito l'obbligo di applicare la norma UNI TS 11300 indirettamente ha reso obbligatoria anche l'applicazione della UNI10339 nella parte riguardante i ricambi d'aria.

La norma ha come principale obiettivo quello di fornire indicazioni per la classificazione e la definizione dei requisiti minimi degli impianti e dei valori delle grandezze di riferimento durante il loro funzionamento; prevede che gli impianti aeraulici debbano garantire il mantenimento di alcune

fissate condizioni ambientali, al fine di garantire accettabili livelli di benessere per gli occupanti contemperando le esigenze di contenimento dei consumi energetici, quali:

- un'immissione di aria esterna pari o maggiore ai valori minimi, per ciascun tipo di destinazione d'uso
- una filtrazione minima convenzionale dell'aria (esterna e ricircolata) tramite impiego di filtri di classe appropriata, per ciascun tipo di locale
- una movimentazione dell'aria nel volume convenzionalmente occupato entro determinati limiti

Questa normativa suddivide in due contributi la quantità minima di aria di rinnovo da fornire. In modo specifico, il termine Q_{op} rappresenta una portata di aria esterna specifica per persona, mentre Q_{os} è una portata di aria esterna specifica per unità di superficie. Relativamente agli uffici di cui la norma ne riporta quattro tipologie, la norma riporta valori che variano da $11 \cdot 10^{-3}$ a $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ persona per il termine Q_{op} e valori nulli per Q_{os} .

EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI	Portata di aria esterna o di estrazione	
	$Q_{op} \left(10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s} * \text{pers}} \right)$	$Q_{os} \left(10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s} * \text{pers}} \right)$
Uffici singoli	11	-
Uffici open space	11	-
Locali riunione	10	-
Centri elaborazione dati	7	-

Tabella 5.1 Portate di estrazione uffici [1]

La UNI fornisce infatti i valori degli indici di affollamento (ossia il numero di persone presenti, ai fini progettuali, per ogni metro quadrato di superficie calpestabile). Gli indici si intendono convenzionali e vengono fissati unicamente per i locali in cui sia previsto stazionamento di persone. Non vengono definiti quindi per transiti, corridoi, servizi, ecc.

EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI	n_s
Uffici singoli	0.06
Uffici open space	0.12
Locali riunione	0.6
Centro elaborazione dati	0.08

Tabella 5.2 Indici di affollamento uffici [1]

I valori delle portate possono essere corretti in funzione dell'altitudine sul livello medio del mare. Per il soddisfacimento dei requisiti imposti dalla norma, assumono un ruolo fondamentale anche la posizione della presa d'aria esterna e l'opportuna filtrazione dell'aria. Questa norma presenta inoltre dei valori limite in termini di velocità di distribuzione dell'aria: la velocità non deve superare i 0.30 m/s in corrispondenza della superficie del luogo dei punti distanti 0.60 m dal perimetro della griglia. Deve comunque essere verificata la compatibilità tra la velocità frontale della griglia e le condizioni di rumorosità richieste nell'ambiente. Vengono riportati di seguito i valori della velocità massima dell'aria ammessa all'interno del volume convenzionale occupato

EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI	Velocità aria (m/s)	
	riscaldamento	Raffrescamento
Uffici in genere, locali riunione, centro elaborazione dati	0.05	0.15

Tabella 5.3 Velocità dell'aria nel volume convenzionalmente occupato [1]

Vengono brevemente riportate dalla norma anche le condizioni termo igrometriche invernali ed estive da mantenere all'interno degli ambienti. Non vi è distinzione tra gli ambienti da questo punto di vista; vediamo di seguito quali sono le prescrizioni.

STAGIONI	Temperatura (°C)	Umidità (%)
INVERNO	$\leq 20^3$	35-45%
ESTATE	$\geq 26^4$	50-60%

Tabella 5.4 Parametri termoigrometrici nel volume convenzionalmente occupato [1]

La norma riporta infine i parametri relativi ai principali contaminanti dell'aria esterna al fine di giungere ad una valutazione della qualità dell'aria stessa.

³ Una temperatura minor di 20 gradi può essere consentita a causa di diversi valori di:

- Attività fisica
- Resistenza termica del vestiario
- Temperatura media radiante

⁴ Una temperatura dell'aria maggiore di 26 gradi può essere consentita a causa di una temperatura media radiante nel locale diversa da quella di riferimento

Contaminante	Lungo termine			Breve termine		
	Concentrazione media			Concentrazione media		
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm	periodo	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	ppm	periodo h
Biossido di zolfo (SO_2)	80	0,03	1 anno	365	0,14	24
Particolato totale	75*	-	1 anno	260	-	24
Monossido di carbonio (CO)	-	-	-	40 000	35	1
Monossido di carbonio (CO)	-	-	-	10 000	9	8
Ossidanti (O ₃) (Ozono)	-	-	-	235	0,12	1
Biossido di azoto (NO_2)	100	0,055	1 anno	-	-	-
Piombo	1,5	-	3 mesi	-	-	-

Tabella 5.5 Parametri di qualità accettabile dell'aria [1]

5.2 NORMA prUNI10339

La nuova versione della UNI 10339 risulta essere assai modificata rispetto alla precedente soprattutto per quanto riguarda i parametri di qualità dell'aria ed il suo controllo negli ambienti confinati. Risulta essere, come la normativa vigente, intimamente connessa con la norma europea EN 13779 che rappresenta, in ambito di ventilazione e qualità dell'aria, il più potente e completo strumento a disposizione del tecnico progettista per individuare le soluzioni impiantistiche più appropriate; molto viene ripreso anche dalla norma UNI EN 15251.

La grande diversità rispetto alla norma precedentemente spiegata è che non si parla in modo univoco di semplici portate di aria esterna di ventilazione ma di benessere termo igrometrico degli ambienti e di qualità dell'aria, cioè la ventilazione è in funzione del raggiungimento di determinati standard ambientali che la norma suddivide in tre classi. La qualità dell'aria interna è correlata con le caratteristiche e con le concentrazioni dei contaminanti in esse presenti, in quanto prodotti da sorgenti di contaminazioni interne o in quanto entranti con l'aria esterna. Per svolgere le funzioni relative alla qualità dell'aria interna e all'ottenimento di determinate classi di qualità, gli impianti aeraulici utilizzano la ventilazione meccanica e impiegano obbligatoriamente sia la diluizione (ricambio) con aria esterna sia la filtrazione per la separazione e l'abbattimento di contaminanti. Oltre a queste funzioni di ventilazione, essi possono svolgere una o più delle seguenti funzioni: riscaldamento, raffrescamento, umificazione, deumidificazione.

È giusto ribadire che, la presente norma costituisce l'implementazione e la contestualizzazione a livello nazionale delle norme UNI EN 15251 e UNI EN 13779, con riferimento anche ad altre normative, su tutte la UNI EN ISO 7730; vengono citate in seguito brevemente:

UNI EN 15251: Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica

UNI EN 13779: ventilazione degli edifici non residenziali- requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione.

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

Per la nuova norma, è possibile identificare e denominare differenti tipologie di aria relative all'ambiente od agli ambienti sottoposti a trattamento. Con riferimento allo schema di figura 4.1, esse risultano:

N.	Tipologia di aria	Rif.
1	Esterna	ODA
2	Immessa	SUP
3	Interna	IDA
4	Trasferita	TRA
5	Estratta	ETA
6	Ricircolata	RCA
7	Espulsa	EHA
8	Secondaria	SEC
9	Di trafilamento	LEA
10	Infiltrata	INF
11	Efiltrata	EXF
12	Miscelata	MIA
1.1	Esterna per singolo locale	SRO
2.1	Immessa per singolo locale	SRS
5.1	Estratta per singolo locale	SET
7.1	Espulsa per singolo locale	SEH
Nel caso di impianti misti con trattamento centralizzato della sola aria esterna, l'aria immessa viene detta aria primaria; negli stessi impianti l'aria trattata dai terminali locali viene detta aria secondaria		

Tabella 5.7 Tipologia dei flussi d'aria [2]

Descriviamo brevemente le tipologie d'aria più importanti:

- **Aria esterna:** aria che entra nell'impianto aeraulico e da questo nell'ambiente interno, oppure direttamente nell'ambiente interno attraverso aperture nell'involucro edilizio (comprese eventuali infiltrazioni);
- **Aria immessa:** aria trattata immessa in ambiente; può essere tutta aria esterna oppure una miscela di aria esterna e aria di ricircolo
- **Aria interna:** aria nel locale o nella zona trattata;
- **Aria trasferita:** aria interna che passa da un locale trattato a un altro locale trattato;
- **Aria estratta:** aria che lascia il locale trattato;
- **Aria ricircolata:** aria estratta da un locale e successivamente reimessa nello stesso locale e/o in altri locali dopo aver subito un qualsiasi trattamento;
- **Aria espulsa:** aria scaricata nell'ambiente esterno
- **Aria secondaria:** aria ricircolata che viene reimessa solo nel locale di provenienza;
- **Aria infiltrata:** aria esterna che entra nell'ambiente interno attraverso soluzioni di continuità presenti nell'involucro;

- **Aria esfiltrata:** aria interna che esce dall'ambiente interno attraverso soluzioni di continuità presenti nell'involucro;
- **Aria miscelata:** flusso d'aria ottenuto mediante miscela di due o più flussi d'aria differenti per origine e/o condizioni;

Nella prUNI10339 si classificano i livelli di qualità ambientale con riferimento:

- Al benessere termo igrometrico
- Alla qualità dell'aria interna

5.2.1 BENESSERE TERMOIGROMETRICO

Il benessere termo igrometrico, anche detto benessere termico, è definito come quello stato psicofisico in cui il soggetto esprime soddisfazione nei riguardi del microclima, oppure come la condizione in cui il soggetto non ha né sensazione di caldo né sensazione di freddo; le cause più comuni di disagio locale sono l'asimmetria della temperatura radiante, le correnti d'aria, la differenza verticale della temperatura dell'aria, i pavimenti caldi e freddi;

La valutazione del benessere termico globale e del disagio termico locale è oggetto della norma UNI EN ISO 7730, che prescrive come indici da utilizzare, il Voto Medio Previsto (PMV) e la Percentuale Prevista di insoddisfatti (PPD) per quanto riguarda il benessere termoigrometrico globale e la percentuale di insoddisfatti (PD) e il rischio da corrente d'aria (DR) per quanto riguarda il disagio termico locale (vedi cap. 2)

Viene riportata di seguito la classificazione della qualità dell'ambiente termo igrometrico interno in riferimento sia al benessere termico globale che al disagio termico locale. Si fa riferimento alla norma UNI EN 15251:2008 che considera una quarta classe di qualità caratterizzata da valori di PMV esterni all'intervallo $-0.7 < PMV > +0.7$, non ripresi però da questa normativa. Risulta quindi:

Classe di qualità dell'ambiente termico	Corrispondenza con la UNI EN ISO 7730	Benessere termoigrometrico globale ¹		Disagio termico locale			
		PPD [%]	Voto medio Previsto PMV	Rischio da corrente d'aria, DR [%]	Differenza verticale di temperatura dell'aria PD [%]	Pavimenti freddi o caldi PD [%]	Asimmetria della temperatura radiante PD [%]
Elevata	A	< 6	- 0,2 < PMV < + 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
Media	B	< 10	- 0,5 < PMV < + 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
Bassa	C	< 15	- 0,7 < PMV < + 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

¹ tale classificazione è ripresa dalla UNI EN 15251:2008, che introduce una quarta classe (PMV < -0,7 o PMV > +0,7) nella quale rientrano gli ambienti che possono essere occupati solo per brevi periodi dell'anno.

Tabella 5.8 Classificazione della qualità dell'ambiente termico [2]

5.2.2 QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA

È necessario dire che:

- La qualità dell'aria interna è connessa con le caratteristiche e con le concentrazioni dei contaminanti presenti negli ambienti o perché in essi prodotti da sorgenti interne o perché contenuti nell'aria esterna entrante;
- la ventilazione modifica la qualità dell'aria interna mediante di meccanismo di diluizione con aria esterna e tramite l'impiego di filtri e altri sistemi di filtrazione o eliminazione dei contaminanti.

Per la classificazione dell'aria interna vengono adottate 3 classi di qualità (Elevata, Media, Bassa), come riportato nella tabella seguente, nella quale è indicata la corrispondenza tra tali classi e quelle previste nella norma UNI EN 13779

Classe di qualità dell'aria interna	Corrispondenza con la UNI EN 13779
Elevata	IDA1
Media	IDA2
Bassa	IDA3
- *	IDA4

*nella presente norma si raccomanda il raggiungimento di una delle categorie di qualità dell'aria interna comprese tra elevata e bassa. La classe IDA 4, pur prevista nella UNI EN 13779, non viene considerata accettabile per il raggiungimento degli scopi previsti dalla presente norma.

Tabella 5.9: Classificazione della qualità dell'aria interna adottata nella presente norma e corrispondenza con quella della UNI EN 13779 [2]

La qualità dell'aria interna è influenzata anche dalla qualità dell'aria esterna per la quale si adottano 3 classi di qualità: Elevata, Media, Bassa.

Classe di qualità dell'aria esterna	Corrispondenza con la UNI EN 13779
Elevata	ODA1
Media	ODA2
Bassa	ODA3

Tabella 5.10 Classificazione della qualità dell'aria esterna adottata nella presente norma e corrispondenza con quella della UNI EN 13779 [2]

Esiste anche una procedura all'interno della norma per determinare le classi di qualità dell'aria interna in base al valore della concentrazione della CO₂. Il livello di attività fisica svolta da una persona determina il tasso di consumo di ossigeno e il tasso di produzione di anidride carbonica; partendo da un singolo ambiente in cui siano presenti N persone, viene riportata un'equazione di bilancio di massa in condizioni stazionarie che mette in relazione la variazione di concentrazione di anidride carbonica con la portata di rinnovo V (diluizione con aria esterna), con le persone presenti e il loro livello di attività fisica:

$$C_i - C_o = \frac{N * gCO_2}{V} \quad (1)$$

C_i = concentrazione di anidride carbonica in ambiente indoor (e nell'aria estratta)

C_o = concentrazione di anidride carbonica nell'aria esterna utilizzata per il rinnovo

N = numero di persone presenti

gCO_2 = tasso volumico di produzione di anidride carbonica per persona

V = portata volumica di rinnovo

La differenza tra la concentrazione di anidride carbonica nell'aria presente nell'ambiente indoor e quella nell'aria all'esterno può essere considerata un indicatore della capacità della ventilazione di diluire l'anidride carbonica e gli altri contaminanti prodotti dalle persone presenti in ambiente in relazione con il loro livello di attività fisica. Quindi la differenza di concentrazione di anidride carbonica può essere utilizzata per definire le classi di qualità dell'aria interna, come risulta dalla seguente tabella.

Classe di qualità dell'aria	Corrispondenza UNI EN 13779:2008	Differenza di concentrazione di CO ₂ tra aria interna e aria esterna [ppm]
Elevata	IDA 1	≤ 400
Media	IDA 2	400 – 600
Bassa	IDA 3	601 – 1000
-	IDA 4	> 1000

Tabella 5.11 Classificazione della qualità dell'aria interna sulla base del valore della differenza di concentrazione di CO₂ tra aria interna ed esterna [2]

Abbiamo già menzionato che tra le varie tipologie di impianti che permettono una ventilazione meccanicamente controllata esiste anche quella basata sui sensori di CO₂. L'adozione di questo tipo di impianto permette di assicurare un soddisfacente livello di qualità percepibile dell'aria, utilizzando una minore quantità di aria esterna, e quindi di energia, rispetto ad un impianto a portata costante, soprattutto negli ambienti caratterizzati da notevoli carichi termici e da elevati livelli di affollamento; ciò non toglie che il risparmio di energia conseguibile possa comunque variare ampiamente in rapporto alle condizioni climatiche, al tasso di affollamento, al periodo giornaliero di operatività dell'impianto e ad altre variabili dipendenti dall'edificio e dall'impianto stesso.

5.2.3 TEMPERATURA OPERATIVA E UMIDITA'

I parametri di temperatura operativa e umidità relativa sono determinanti nel raggiungere i diversi livelli di qualità dell'aria imposti dalla norma, infatti vengono forniti i valori da adottare ai fini del dimensionamento degli impianti.

In particolare sono riportati i valori di temperatura operativa da assumere per diverse classi di qualità dell'ambiente termo igrometrico, per tre principali valori di metabolismo energetico.

Metabolismo energetico	Classe di qualità dell'ambiente termico					
	Classe Elevata		Classe Media		Classe Bassa	
	Temperatura operativa minima di progetto invernale [°C]	Temperatura operativa massima di progetto estiva [°C]	Temperatura operativa minima di progetto invernale [°C]	Temperatura operativa massima di progetto estiva [°C]	Temperatura operativa minima di progetto invernale [°C]	Temperatura operativa massima di progetto estiva [°C]
1,2 met – attività sedentaria, seduti (p.e. ufficio, abitazione, scuola, laboratorio)	21	25,5	20	26	19	27
1,4 met – attività sedentaria, in piedi (p.e. scuole materne)	19	24,5	18	25,5	17	26
1,6 met - in piedi, attività leggera (p.e. centri commerciali, grandi magazzini)	18	24	17	25	16	26

Nota: Nel fissare le condizioni per il dimensionamento degli apparati si assume che l'isolamento termico dell'abbigliamento dinamico sia pari in regime invernale a 0,156 m²K/W ovvero a 1 clo e in regime estivo a 0,078 m²K/W ovvero 0,5 clo); gli occupanti devono trovarsi in equilibrio termico con l'ambiente (ovvero devono essere esposti all'ambiente in questione per un periodo di permanenza maggiore di 15 min).

Tabella 5.12 Temperatura operativa di progetto [2]

Classe di qualità dell'ambiente termoigrometrico					
Classe Elevata		Classe Media		Classe Bassa	
Umidità relativa minima di progetto invernale	Umidità relativa massima di progetto estiva	Umidità relativa minima di progetto invernale	Umidità relativa massima di progetto estiva	Umidità relativa minima di progetto invernale	Umidità relativa massima di progetto estiva
45%	55%	40%	60	35	65%

Tabella 5.13 Umidità relativa interna di progetto ai fini del dimensionamento dell'impianto [2]

5.2.4 METODO PRESCRITTIVO E METODO PRESTAZIONALE

La norma fornisce ai progettisti degli impianti aeraulici la possibilità di seguire due strade per il raggiungimento dello stesso risultato:

- 1) una procedura prescrittiva
- 2) una procedura prestazionale

L'approccio prescrittivo tenderà a controllare la concentrazione dei contaminanti di origine interna ed esterna, le condizioni di umidità e temperatura dell'aria degli ambienti occupati. In questo tipo di

approccio l'impianto dovrà essere realizzato per assicurare portate d'aria esterna di rinnovo e una adeguata filtrazione.

L'approccio prestazionale, molto più complesso, ma sicuramente più preciso, anche se può essere utilizzato alla stregua del prescrittivo per qualunque tipologia di locale, è stato studiato prevalentemente per quegli ambienti dove il monitoraggio degli inquinanti dell'aria è più importante per evitare rischi alla salute delle persone presenti. Questo tipo di approccio consente di mantenere il livello degli inquinanti indoor al di sotto dei valori raccomandati.

Analizzeremo in seguito il metodo prescrittivo:

La portata di aria esterna nominale $Q_{v,o,n}$ da immettere in ambiente è suddivisa, come nella norma precedente, in due contributi e deve essere calcolata attraverso la seguente formula:

$$Q_{v,o,n} = n * q_{v,o,p} + A * q_{v,o,s} \quad (2)$$

Dove:

$Q_{v,o,n}$ portata volumica di aria esterna nominale, espressa in $10^{-3}m^3s^{-1}$

n affollamento di riferimento, cioè il numero di persone previste a progetto o calcolate mediante l'indice di affollamento per unità di superficie, n_s espressa in m^2 , con l'equazione

$$n = n_s * A \quad (3)$$

Con:

$q_{v,o,p}$ portata volumica di aria esterna minima per persona, espressa in $10^{-3}m^3s^{-1}persona^{-1}$

A area della superficie del locale in pianta, espressa in m^2

$q_{v,o,s}$ portata volumica di aria esterna minima per unità di superficie espressa in $m^3s^{-1}m^{-2}$

I valori di portata volumica di aria esterna minima per persona, $q_{v,o,p}$ e di portata volumica di aria esterna minima per unità di superficie $q_{v,o,s}$ sono indicati in tabella 5.15 in relazione con tipologia e destinazione d'uso degli ambienti e con le classi di qualità dell'aria interna.

DESTINAZIONE D'USO DELL' EDIFICIO E DELL'AMBIENTE	n_s [m ⁻²]
Uffici singoli	0.1
Uffici open space	0.12
Call-Center/Centro inserimento	0.4
Locali riunione	0.6

Tabella 5.14: Indice di affollamento per unità di superficie per uffici e assimilabili [2]

Tenendo conto dell'efficienza convenzionale di ventilazione che la norma stabilisce in 0,8, abbiamo che la portata volumica di aria esterna normale $Q_{v,o,n}$ deve essere corretta per determinare la portata volumica di aria esterna $Q_{v,o}$

$$Q_{v,o} = Q_{v,o,n} * \left(\frac{\varepsilon_{v,n}}{\varepsilon_{v,c}} \right) * C_1 * C_2 \quad (4)$$

Dove:

$Q_{v,o}$ portata volumica minima di aria esterna di progetto che tiene conto della distribuzione dell'aria in ambiente, espressa in $10^{-3}m^3s^{-1}$

$Q_{v,o,n}$ portata volumica nominale di aria esterna calcolata con la formula precedente, espressa in $10^{-3}m^3s^{-1}$

$\varepsilon_{v,n}$ efficienza nominale di ventilazione, pari a 0,8

$\varepsilon_{v,c}$ efficienza convenzionale di ventilazione

C_1 coefficiente correttivo per l'effetto della presenza di impianti misti

C_2 coefficiente correttivo per l'effetto dell'altitudine della località

EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI	Portata per persona $Q_{op} (10^{-3} \frac{m^3}{s \cdot pers})$			Portata per superficie $Q_{os} (10^{-3} \frac{m^3}{s \cdot pers})$		
	Elevata	Media	Bassa	Elevata	Media	Bassa
Uffici	8.5	7.5	5.5	0.5	0.4	0.3
Uffici collettivi/multipli tipo open space	8.5	7	5	0.7	0.6	0.4
Call center/Centro inserimento dati	8.5	7	5	0.8	0.7	0.5
Locali riunione	8.5	7	5	0.7	0.6	0.4

Figura 5.15 Valori di portata di aria volumica di aria esterna nominale [2]

Per il soddisfacimento dei requisiti imposti dalla norma, assumono un ruolo fondamentali anche la posizione della presa d'aria esterna e l'opportuna filtrazione dell'aria.

Diversamente dalla norma UNI 10339/95, vanno adottati livelli di filtrazione dell'aria in relazione con la classe di qualità dell'aria interna desiderata, con la classe di qualità dell'aria esterna e con la destinazione d'uso degli ambienti serviti dall'impianto. La tabella 5.17 riporta i livelli di filtrazione minimi previsti.

DESTINAZIONE D'USO DELL'EDIFICIO E DELL'AMBIENTE	CLASSE DI QUALITA' DELL'ARIA ESTERNA	CLASSE DEI FILTRI FINALI		
		Classe di qualità dell'aria interna		
		Elevata	Media	Bassa
Uffici in genere	Elevata	F7	M6	M5
Locali riunione	Media	F8	F7	M6
Centri elaborazione dati	Bassa	F9	F7	M6

Tabella 5.16 filtrazione minima prevista [2]

5.3 ASHRAE 62

La normativa ASHRAE 62.1-2004 tratta dei tassi di ventilazione atti a garantire una qualità dell'aria interna accettabile e a minimizzare i rischi per possibili implicazioni sulla salute degli occupanti. Le portate di aria esterna richieste nelle zone sensibile di uno spazio occupato, o di una zona di uno spazio occupato, che indichiamo con V_{bz} (breathing zone outdoor air flow) sono determinate, come per le due precedenti norme, attraverso due contributi:

$$V_{bz} = R_p P_z + R_a A_z \quad (5)$$

Con:

A_z = area netta calpestabile del pavimento in m^2

P_z = il più grande numero di persone che ci si aspetta occupino la zona durante il suo tipico uso

R_p = portata di aria esterna richiesta per persona

R_a = portata di aria esterna richiesta per unità di area

Occupancy Category	People Outdoor air rate		Area outdoor air rate Ra	
	Cfm/person	L/s person	Cfm/ft ²	L/sm ²
Office space	5	2.5	0.06	0.3
Reception areas	5	2.5	0.06	0.3
Telephone/data entry	5	2.5	0.06	0.3
Main entry lobbies	5	2.5	0.06	0.3

Tabella 5.17: tassi minimi di ventilazione nelle zone occupate [3]

6. ANALISI PANORAMA NORMATIVO ITALIANO

Uno degli obiettivi della tesi è quello di analizzare la situazione italiana, in modo capillare, relativamente ai tassi di ventilazione negli ambienti “terziari” (uffici pubblici, luoghi di lavoro non destinati ad attività industriali). Ad oggi, la normativa vigente che regola le quantità di aria di immissione negli ambienti è la UNI10339. Come già vista al capitolo precedente, la presente norma fornisce la classificazione degli impianti, la definizione dei requisiti minimi degli impianti e dei valori delle grandezze di riferimento per gli stessi. Si applica agli impianti aeraulici destinati al benessere delle persone, installati in edifici chiusi.

Sono stati analizzati per ogni provincia italiana il regolamento edilizio, redatto dal comune del paese considerato e il regolamento igiene e salute/sanità, redatto dalla U.L.S./A.S.L. territoriale di competenza oppure Leggi regionali o provinciali vigenti. Solitamente all’interno di questi documenti ampio spazio viene dedicato alla ventilazione (naturale o forzata) che si rende necessaria nei luoghi di lavoro, industriali, commerciali, artigianali, dove l’indice di affollamento e quindi anche di inquinamento, sono elevati.

In alcuni comuni sono stati trovati dati non significativi o comunque molto generali che si limitano ad obbligare l’installazione di impianti di ventilazione forzata nel caso in cui l’aerazione naturale non sia sufficiente ad assicurare il ricambio d’aria previsto dalla normativa.

In altri comuni si fa semplicemente menzione delle norme a cui fare riferimento per la progettazione e la definizione di parametri dei sistemi di ventilazione forzata. Di seguito valuteremo una serie di casi per vedere il maggior o minore adeguamento alle normative vigenti.

Nel capitolo successivo vengono descritte le due normative e analizzate le loro differenze.

Facendo riferimento appunto alla norma UNI10339/95, abbiamo che, come si vede dalla tabella 5.1, le portate di aria esterna in edifici per uffici e assimilabili variano da **un minimo di 7 ad un massimo di 11 ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)** e quindi da un minimo di $25.2 \text{ m}^3/(\text{h pers})$ ad una massimo di $39.6 \text{ m}^3/(\text{h pers})$ a seconda del tipo di ufficio.

La seguente lista riporta i principali valori di temperatura, velocità e portata d’aria e le norme a cui fanno riferimento le principali città italiane di cui è stata trovata documentazione:

ABRUZZO

PESCARA

Fonte	Portata di Ventilazione Prevista	Norme di Riferimento	Temperatura Umidità Velocità Aria
Regolamento igiene e sanità [1]	$\geq 15 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ Parziale ricircolo fino ad 1/3 del totale	ASHRAE UNI 8852 UNI 10339	v.aria < 0.15 m/s

BASILICATA

VIBO VALENTIA

Fonte	Portata di Ventilazione Prevista	Norme di Riferimento	Temperatura Umidità Velocità Aria
Regolamento igiene e sanità [2]	$15 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ minima (senza presenza fumatori) $50 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ massima (presenza fumatori)	ASHRAE UNI 10339	v.aria < 0.15 m/s

SALERNO

Viene seguita totalmente la norma UNI10339 per impianti di climatizzazione e ventilazione forzata nel caso l'aerazione naturale debba essere integrata.

EMILIA ROMAGNA

FERRARA

FONTE	PORTATA DI VENTILAZIONE PREVISTA	NORME RIFERIMENTO	TEMPERATURA UMIDITA' VELOCITA' ARIA
Regolamento igiene e sanità [3]	$15 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ minima (senza presenza fumatori) $50 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ massima (presenza fumatori)	ASHRAE	v.aria < $0.15 \frac{m}{s}$ Tmin = 18 °C-20 °C

RAVENNA

FONTE	PORTATA DI VENTILAZIONE PREVISTA	NORME RIFERIMENTO	TEMPERATURA UMIDITA' VELOCITA' ARIA
Regolamento igiene e sanità [4]	$15 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ (senza presenza fumatori) $20-30 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ massima (presenza fumatori)	ASHRAE ACGIH	v.aria < $0.15 \frac{m}{s}$ Tmin=18 °C-20 °C

FRIULI VENEZIA GIULIA

Vengono esclusivamente seguite le norma di settore per la ventilazione meccanica

LAZIO

RIETI

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento igiene e sanità [5]	ASHRAE ACGIH

LIGURIA

GENOVA

Fonte	Portata di Ventilazione Prevista	Norme Riferimento	Temperatura Umidità Velocità Aria
Regolamento igiene e sanità [6]	$36-40 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ (con UNI 10339)	ASHRAE UNI 10339	v.aria < $0.15 \frac{m}{s}$ Tmin=18 °C-20 °C

LA SPEZIA

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento igiene e sanità [7]	UNI 10339 UNI 8852

LOMBARDIA

Esiste un regolamento locale di igiene che stabilisce che gli impianti di condizionamento dell'aria e di ventilazione devono essere in grado di assicurare e mantenere negli ambienti le condizioni termiche, igrometriche, di velocità e di purezza dell'aria idonee ad assicurare il benessere delle persone.

FONTE	PORTATA DI VENTILAZIONE PREVISTA	TEMPERATURA UMIDITA' VELOCITA' ARIA
Regolamento igiene e sanità [8]	$\geq 1 \text{ Vol/h}$ (nel caso di condizionamento) Parziale ricircolo fino ad 1/3 del totale	v.aria < 0.20 m/s Tmin = 20 °C Condizionamento inverno T=20 °C con U.R.=40-60% estate T= 25-27 °C con U.R. = 40-60%

SONDRIO

FONTE	PORTATA DI VENTILAZIONE PREVISTA	NORME DI RIFERIMENTO	TEMPERATURA UMIDITA' VELOCITA' ARIA
Regolamento igiene e sanità locale [9]	$>1\text{Vol/h} \simeq 30 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{pers}}$ (sia per condizionamento e ventilazione) Parziale ricircolo fino ad 1/3 del totale	UNI 10339/1995	v.aria < 0.15 m/s condizionamento: <u>inverno</u> T=20-24 °C con U.R.=40-60% <u>estate</u> T= 23-27 °C con U.R. = 40-60% (con $\Delta t_{INT-EST} \leq 7 \text{ °C}$)

CREMONA

FONTE	NORME RIFERIMENTO
Regolamento edilizio [10]	UNI 10339
N.B. la ventilazione meccanica controllata prevede sempre il recuperatore di calore	

MILANO

FONTE	PORTATA DI VENTILAZIONE	TEMPERATURA UMIDITA' VELOCITA' ARIA
Regolamento igiene e sanità [11]	$> 20 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ (caso di condizionamento) Parziale ricircolo fino ad 1/3 del totale	v.aria < 0.20 m/s Tmin=18 °C condizionamento T=19 °C con U.R.=40-60% <u>Inverno</u> T= 25-27 °C con U.R. = 40-60% <u>estate</u>

Nel regolamento igiene e sanità di Milano, per aerazione si intende il condizionamento o la ventilazione meccanica controllata; solitamente quest'ultima è consentita solo per i servizi igienici, quindi il valore di portata di rinnovo a cui si fa riferimento è quello per il condizionamento

MARCHE

ANCONA

FONTE	NORME RIFERIMENTO
Regolamento edilizio [12]	UNI 10339

PIEMONTE

NOVARA

FONTE	PORTATA DI VENTILAZIONE	NORME RIFERIMENTO
Normativa igiene e salute [13]	>1 Vol/h	UNI 10339 UNI8852

TORINO

Fonte	Norme Riferimento
LINEE GUIDA "valutazione dei progetti edili per i locali di lavoro da adibire all'esercizio di attività produttive" [14]	UNI 10339 UNI8852 D.M. 37/08 ⁵

BIELLA

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento igiene e salute [15]	UNI 10339

ALESSANDRIA

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento igiene e salute [16]	UNI 10339

CUNEO

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento igiene e salute [17]	UNI 10339

⁵ DM 37/2008: Regolamento concernente l'attività di installazione degli impianti all'interno degli edifici

PUGLIA

LECCE

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento igiene e sanità [18]	UNI 10339

SARDEGNA

ORISTANO

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento edilizio [19]	UNI 10339

TOSCANA

LIVORNO

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento edilizio [20]	UNI 10339

LUCCA

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento igiene e sanità [21]	UNI 10339

FIRENZE

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento edilizio [22]	UNI 10339

TRENTINO ALTO-ADIGE

Vengono seguite tutte le norme di settore per gli impianti di ventilazione

UMBRIA

PERUGIA

Fonte	Norme Riferimento
Regolamento edilizio [23]	UNI 10339

VENETO

I locali destinati ad uffici, attività commerciali, culturali, ricreative nei quali non sia possibile effettuare un'adeguata ventilazione naturale devono essere condizionati o ventilati a seconda delle caratteristiche morfologiche delle attività previste, rispettando quanto disposto dall'articolo 9 della Circolare Regionale n.13 del 1° luglio 1997

Fonte	Portata di Ventilazione	Temperatura Velocità Aria Umidità Relativa
Circ. n13 1°luglio 1997 [24]	$>32 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ (ventilazione)	v. aria < 0.15 m/s U.R. > 30% T min =20 °C
Circ. n13 1°luglio 1997 [24]	$>20 \frac{m^3}{h \cdot pers}$ (condizionamento)	v. aria < 0.15 m/s T=16-18 °C con U.R. =40-60% (con $\Delta t_{INT-EST} < 7$ °C)

Analisi:

- La ricerca fatta su base nazionale partendo dalle fonti legislative locali e dai regolamenti provinciali e regionali specifici per luoghi di lavoro dimostra che, nel 90% dei casi si rispettano i range dei tassi di ventilazione proposti dalla normativa UNI 10339/95; esistono comunque dei casi in cui i valori previsti per alcuni comuni scendono al di sotto del limite inferiore giustificandoli come valori “minimi”.
- Per alcune località non si fa solo riferimento alla norma UNI10339 ma anche alle tabelle ASHRAE, la corrispondente normativa americana sulla ventilazione e alle tabelle ACGIH (Association Advancing Occupational and Environmental Health).
- In Lombardia e Veneto principalmente si parla in modo congiunto di ventilazione meccanica controllata e di condizionamento; non è comprensibile perché siano previste portate d’aria diverse a seconda che debba essere svolta una o l’altra funzione.
- Sono stati trovati valori simili a quelli proposti dalla normativa italiana; sotto vengono riportati tutti i parametri termoigrometrici risultanti dalla ricerca;

Aerazione naturale	Classe dei filtri	Inverno			estate		
		T (°C)	UR (%)	V (m/s)	T (°C)	UR (%)	v (m/s)
n > 0.5 R.A.>1/8	5-7	20±2	30-70	0.05-0.15	26 ±1	50-60	0.05-0.20

Tabella 6.1 Parametri termo igrometrici

Vengono ora confrontati i valori massimi e minimi di portata di rinnovo trovati nel territorio italiano con i valori proposti dalla normativa vigente italiana e dal regolamento americano;

PORTATE (m ³ /h pers)	REGOLAMENTI ITALIANI	NORMA UNI10339/95	ASHRAE
PORTATA MIN	15	25.2	18,11
PORTATA MAX	50	39.6	-

Tabella 6.2 confronto portate di ventilazione

I valori trovati attraverso i regolamenti vanno da un minimo di 15 m³/(h pers) a 50 m³/(h pers); si può fare subito un paragone diretto con la norma UNI 10339/95 dal momento che questa prevede solo il termine di portata per persona per quanto riguarda gli uffici; la prUNI10339 e la norma

ASHRAE invece prevedono infatti un termine (non nullo) legato al numero di persone e uno legato alla superficie; per poter fare un confronto utilizziamo come superficie quella di un tipico edificio per il terziario uguale a quello considerato nel modello di simulazioni al capitolo 8 ; verrà quindi svolto il calcolo previsto dalla normativa e in aggiunta, anche se non è calcolo normato, suddividiamo per il numero di persone. Si dovrebbe ottenere una stima abbastanza buona in termini appunto di $m^3/(h \text{ pers})$.

Esempio: UFFICIO OPEN SPACE (3 piani da 540 m² di superficie occupata)

UNI10339: $11 * 10^{-3} * 3600 = 39.6 \frac{m^3}{h * pers}$

prUNI10339: $8.5 * 10^{-3} * 3600 * 64 + 0.7 * 10^{-3} * 3600 * 540 = 51.86 \frac{m^3}{h * pers}$

$7 * 10^{-3} * 3600 * 64 + 0.6 * 10^{-3} * 3600 * 540 = 43.425 \frac{m^3}{h * pers}$

$5 * 10^{-3} * 3600 * 64 + 0.4 * 10^{-3} * 3600 * 540 = 30.15 \frac{m^3}{h * pers}$

ASHRAE 62: $2.5 * 3.6 * 64 + 0.3 * 3.6 * 540 = 18.1125 \frac{m^3}{h * pers}$

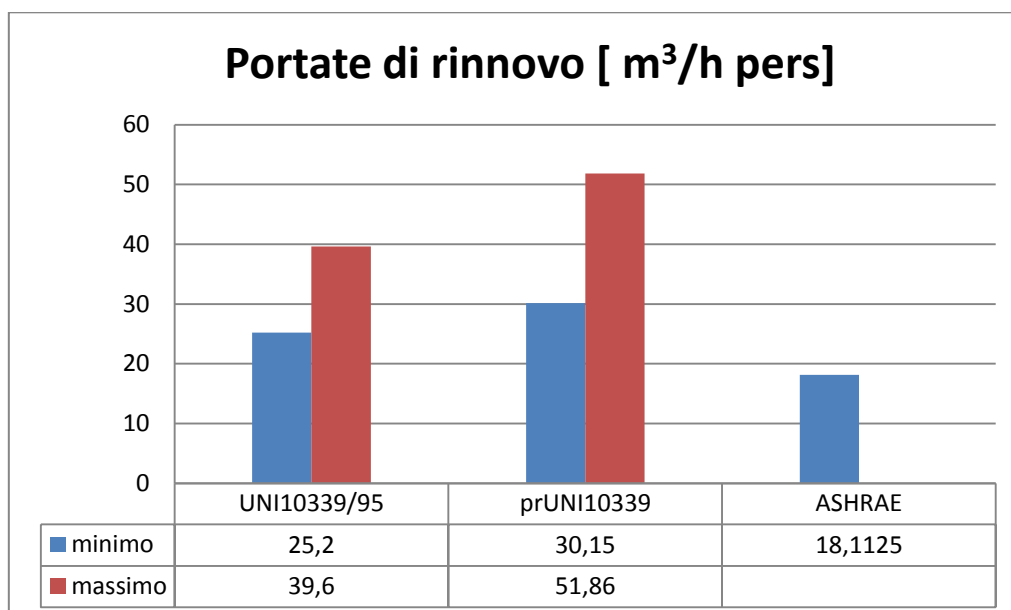


Tabella 6.3 Differenti valori di portate per varie normative per edificio di 600m²

Alla luce delle analisi fatte risulta che nelle città in cui non è espressamente dichiarato l'adeguamento ai valori delle portate espresse dalla normativa italiana (o americana), ma esistono semplicemente valori al di sotto dei quali non si deve scendere, non sarà possibile progettare un impianto aeraulico in tutte le classi di qualità dell'aria. Per esempio, in Veneto, salvo modifiche alla circolare regionale vigente, non si potrà progettare /dimensionare un impianto aeraulico in classe bassa di qualità dell'aria.

Analizzeremo in seguito l'impatto della ventilazione in un edificio adibito a luoghi di lavoro, implementando, con il programma Trnsys, le portate di rinnovo tipiche delle 3 classi di qualità dell'aria interna proposte da prUNI10339.

7. IL SOFTWARE COMMERCIALE TRNSYS

7.1 COS'È TRNSYS?

Il software Trnsys è un completo ambiente di simulazioni dinamiche di sistemi, che comprende anche edifici multizona. È usato da ingegneri e ricercatori di tutto il mondo per convalidare nuovi concetti di energetica, da semplici sistemi ad edifici con i loro impianti integrando strategie di controllo, comportamento degli occupanti, sistemi ad energia alternativa (eolico, solare, fotovoltaico, sistemi a idrogeno, ecc.). Il programma permette di risolvere la maggior parte delle problematiche connesse ad aspetti di tipo energetico, attraverso un approccio modulare.

Il codice sorgente, come i modelli dei vari componenti sono aperti all'utilizzatore finale. Questo semplifica la modifica ed estensione dei modelli esistenti al fine di renderli adatti agli scopi specifici dell'utilizzatore. Il programma contiene al suo interno codici in grado di identificare il comportamento termico di componenti sia di involucro che di impianto, descritto da una serie di librerie (Types) all'interno del programma.

L'architettura basata sui file con estensione DLL, permette facilmente di aggiungere modelli personalizzati di componenti, utilizzando tutti i più comuni linguaggi di programmazione (C, C++, PASCAL, FORTRAN, etc.). Trnsys, inoltre, può essere facilmente connesso con molte altre applicazioni (per esempio Microsoft, Excel, Matlab, Comis, etc.) [1]

7.2 INTERFACCIA GRAFICA DELL'EDIFICIO (TRNbuild)

TRNbuild è lo strumento utilizzato per caricare i dati relativi agli edifici. Esso permette di specificare tutti i dettagli della struttura e tutto ciò che è necessario a simulare il comportamento termico dell'edificio, come ad esempio le proprietà ottiche delle finestre, i settaggi per la climatizzazione, il riscaldamento, la ventilazione, gli apparati tecnici, i carichi interni, ecc. [1]

7.3 SIMULATION STUDIO

Costituisce la principale interfaccia grafica del software all'interno della quale viene costruito ogni nuovo progetto semplicemente selezionando e trascinando i vari componenti da un elenco allo spazio di lavoro, connettendoli insieme ed impostando i parametri globali della simulazione.

Ogni Type (componente) è descritta da un modello matematico e presenta una serie di parametri, ingressi ed uscite (parameters, inputs, outputs). [1]

8. DEFINIZIONE EDIFICIO IN TRNSYS

L'edificio preso in considerazione nel nostro lavoro è un ufficio open space non esistente nella realtà, ma concepito appositamente per le simulazioni.

Per la sua modellazione si è fatto riferimento al decreto LGS n.311/2006 che indica quali sono, dal 2010 in poi, i valori delle trasmittanze termiche minime da rispettare per le strutture opache e vetrate che variabili in base alla zona climatica. Saranno variate quindi, in base al clima considerato, le composizioni della struttura solo nello spessore in modo da rispettare, per ogni zona climatica, il valore delle trasmittanze stabilite dal decreto [1].

Sono stati inseriti nel software, all'interno della type56, tutti i dati relativi all'edificio. In modo specifico, si è partiti con il definire prima l'orientazione delle varie pareti perimetrali esterne e le coperture e poi le loro dimensioni (area). Lo stesso è avvenuto per gli elementi trasparenti. Successivamente si è provveduto ad inserire all'interno del TRNBuild i vari materiali da costruzione (layers) e loro caratteristiche. Attraverso questi layers è stato possibile definire tutti gli elementi opachi costituenti la struttura (wall types), essendo in possesso della loro stratigrafia.

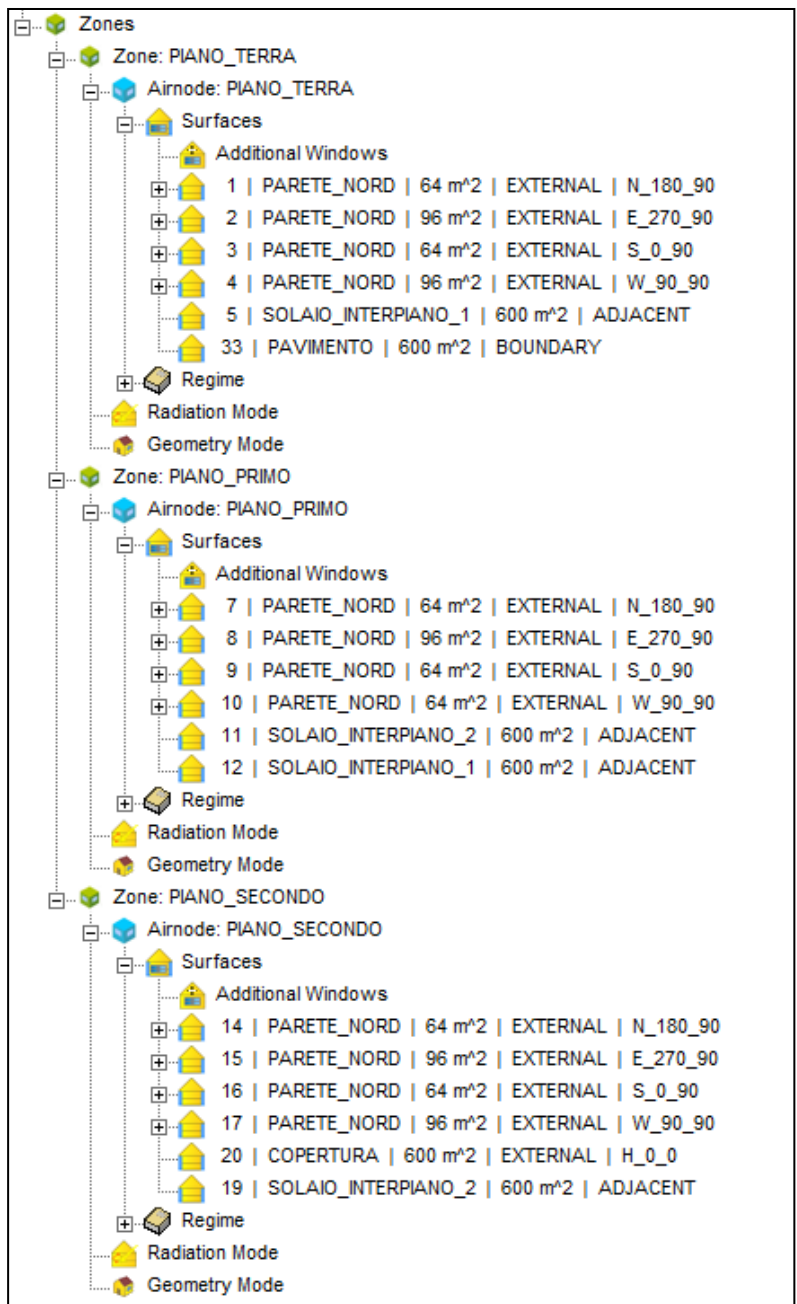
L'edificio è costituito da 3 piani: piano terra, piano primo e piano secondo. Sono uguali tra loro e con una superficie in pianta di 600 m² calpestabili ed un'altezza di 3.20 m , che risultano essere parametri abbastanza ricorrenti per edifici di questo tipo. Il volume complessivo di ogni piano è quindi di 1920 m³. L'edificio è costituito quindi da un pavimento di area pari all'area in pianta di ogni piano, da 2 solai interni, da pareti esterne e da una copertura piana. Per quanto riguarda le zone vetrate queste sono previste nelle dimensioni di un terzo delle superfici opache.

Nel TRNbuild sono state create 3 zone termiche, cioè zone con le stesse caratteristiche termigrometriche, corrispondenti ai 3 piani di cui è costituito l'edificio; in particolare:

- ZONA PIANOTERRA
- ZONA PIANOPRIMO
- ZONAPIANOSECONDO

Dopo aver fornito dunque, al software le caratteristiche strutturali di ogni elemento opaco, ne sono state indicate le dimensioni. Si crea, quindi, una schermata "TRNbuild Navigator" che racchiude tutte

le informazioni per ogni zona termica. Nella figura sottostante è riportata una parte della schermata in cui sono presenti tutti i dati relativi alle zone termiche, sia per quanto riguarda le dimensioni dei componenti opachi sia dei componenti vetrati. Ad ogni componente opaca è stata assegnata la rispettiva categoria di muratura, indicando con EXTERNAL i componenti opachi perimetrali (coperture incluse), con ADJACENT i due componenti divisori tra le 3 zone termiche, e con BOUNDARY il pavimento contro terra a contatto con il terreno.



⁶ Dal momento che le pareti esterne sono tutte uguali a livello strutturale sono state indicate tutte con il termine PARETE NORD, ma si riferiscono comunque ai quattro diversi punti cardinali

GRANDEZZE, SIMBOLI ED UNITA' DI MISURA ADOTTATI

DEFINIZIONE	SIMBOLO	UNITA' DI MISURA
Massa volumica dello strato. Densità	D	(kg/m ³)
Spessore	S	cm
Conduttività utile di calcolo	λ	W/mK
Calore specifico/Capacità	c	KJ/kgk

I valori di trasmittanza da rispettare riportati nel decreto legislativo non sono comprensivi delle resistenze termiche interna ed esterna, quindi i valori di U da rispettare in Trsys sono leggermente più bassi per quanto riguarda le pareti esterne, i pavimenti e le coperture.

Attraverso una semplice inversione della formula della trasmittanza, si riescono a calcolare i nuovi valori sapendo che:

$$\alpha_i = \frac{1}{R_i} = 7.7 \frac{Wk}{m^2} \quad (1)$$

$$\alpha_e = \frac{1}{R_e} = 25 \frac{Wk}{m^2} \quad (2)$$

$$U_{TRNSYS} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (3)$$

Verranno riportati nelle successive tabelle i parametri dei vari componenti opachi e vetrati costituenti l'edificio. Sono calcolati sia i valori di trasmittanza da decreto sia i valori di trasmittanza considerati da Trnsys, calcolati cioè (3) comprensivi delle resistenze termiche interna ed esterne.

Per determinare i vari parametri dei vari strati costituenti i vari componenti ci si è riferiti alle normative di settore, in particolare:

NORMA UNI 10351: Materiali da costruzione- conduttività termica e permeabilità al vapore [2]

NORMA UNI 10355: Murature e solai- valori della resistenza termica e metodi di calcolo [3]

NORMA UNI EN ISO 6946-2008: Componenti ed elementi per edilizia Resistenza termica e trasmittanza termica; Metodo di calcolo [4]

STRUTTURA: PARETE ESTERNA

Composizione	Spessore			Densità	Capacità	Conduttività
	CLIMA B	CLIMA D	CLIMA E			
Intonaco interno	0.02	0.02	0.02	1400	0.9	0.7
Mattoni forati	0.12	0.12	0.12	800	0.84	0.3
Isolante_styrodur	0.025	0.045	0.055	35	1.45	0.03
Mattoni forati	0.25	0.25	0.25	800	0.84	0.3
Intonaco esterno	0.02	0.02	0.02	1800	0.9	0.9
SPESSORE TOTALE	0.435	0.455	0.465			
TRASMITTANZA DECRETO	0.48	0.36	0.34			
TRASMITTANZA EFFETTIVA	0.437	0.339	0.304			

STRUTTURA : SOLAIO INTERPIANO

Per i due solai interpiani presenti non sono state rispettate le prescrizione del decreto DLS 311 e la loro stratigrafia è uguale nei 3 casi climatici.

Composizione	Spessore	Densità	Capacità	Conduttività
Parquet	0.1	1400	0.9	0.7
Massetto	0.035	800	0.84	0.3
Isolante styrodur	0.040	35	1.45	0.03
Laterocemento	0.2	800	0.84	0.3
Intonaco interno	0.02	1800	0.9	0.9
TOTALE SPESSORE	0.305			
TRASMITTANZA	0.511			

STRUTTURA: PAVIMENTO

Composizione	Spessore			Densità	Capacità	Conduktività
	CLIMA B	CLIMA D	CLIMA E			
Parquet	0.01	0.01	0.01	350	2.7	0.15
Massetto	0.035	0.035	0.035	2600	0.84	0.47
Isolante_styrodur	0.04	0.065	0.07	35	1.45	0.03
Laterocemento	0.1	0.1	0.1	1600	0.84	0.7
ghiaia	0.4	0.4	0.4	1800	0.84	0.9
TOTALE	0.586	0.610	0.615			
TRASMITTANZA DECRETO	0.441	0.326	0.312			
TRASMITTANZA EFFETTIVA	0.46	0.36	0.33			

Come accennato in precedenza per il componente pavimento è stata assegnata la categoria BOUNDARY; il pavimento è a contatto con il terreno la cui temperatura non è un valore costante, bensì è collegata alla Type 77 che ne descrive l'andamento attraverso una funzione.

STRUTTURA: COPERTURA

Composizione	Spessore			Densità	Capacità	Conduktività
	CLIMA B	CLIMA D	CLIMA E			
Intonaco interno	0.02	0.02	0.02	1400	0.9	0.7
Massetto	0.15	0.15	0.15	2600	0.84	0.47
Isolante lana di roccia	0.08	0.095	0.105	30	1.03	0.036
laterocemento	0.1	0.1	0.1	1800	0.84	0.7
TOTALE	0.350	0.365	0.375			
TRASMITTANZA DECRETO	0.38	0.32	0.30			
TRASMITTANZA EFFETTIVA	0.347	0.303	0.280			

Come valori dei coefficienti di scambio termico sono stati utilizzati valori standard per tutte le componenti opache; per il pavimento il valore è molto più basso perché a contatto con il terreno:

$$\text{INTERNO: } 11 \frac{\text{KJ}}{\text{hm}^2\text{K}}$$

$$\text{ESTERNO: } 64 \frac{\text{KJ}}{\text{hm}^2\text{K}}$$

$$\text{BOUNDARY WALL: } 0.001 \frac{\text{KJ}}{\text{hm}^2\text{K}}$$

STRUTTURA: FINESTRE

Le tipologie di strutture finestrate sono state opportunamente scelte dalle librerie presenti all'interno del TRNbuild rispettando i valori limite della trasmittanza delle chiusure trasparenti comprensive sia degli infissi sia dei singoli vetri. Per rimanere in sicurezza sono state fissate le trasmittanze della coppia vetraio-telaio (C_value) mentre sono state scelte le finestre sulla base della trasmittanza dei vetri (U_value). Per evitare che la diversità di finestre, nel rispetto dei valori limite, influenzasse molto i calcoli dell'irraggiamento solare e quindi dei consumi, si è cercato di scegliere finestre aventi un fattore solare (g-factor) molto simile tra loro.

Data una struttura vetrata, il fattore solare (FS) rappresenta la quantità di energia (calore) trasmessa dalla vetrata, espressa in percentuale ed è la somma della trasmissione diretta (TED) e dell'energia ceduta dalla vetrata all'ambiente interno a seguito del riscaldamento dovuto all'assorbimento energetico (AE). Più è alto questo valore, maggiore sarà la trasmissione di "calore" all'interno dei locali. In tabella vengono riportati i principali parametri delle finestre considerate per ciascun clima;

FINESTRE	CLIMA B	CLIMA D	CLIMA E
MODELLO	FL3+A6+EFL3	Saint GobainCLIMAPLUS FUTUR. A.R. 4/15/4	Saint GobainCLIMAPLUS FUTUR. A.R. 4/15/4
U_value (W/m2k)	2.57	1.43	1.43
G_factor	0.599	0.604	0.604
C_value (W/m2k)	3	2.4	2.2

9. CONDIZIONI TERMOIGROMETRICHE

Analizziamo ora le condizioni termo igrometriche impostate per i tre piani dell'edificio, i settaggi per la climatizzazione, il riscaldamento, la ventilazione ed in particolare per i 3 piani.



Figura 9.1 Quadro riassuntivo type dell'edificio

VALORI INIZIALI

Le simulazioni inizieranno con i valori di temperatura interna di set-point di $T=21\text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa di $\varphi=50\%$.

INFILTRAZIONI

Per indicare la quantità di aria che entra nell'edificio per ventilazione naturale è utilizzata una type indicando per tutti i climi e per tutte zone termiche considerate un numero di ricambi orari di 0,1 Vol/h; questo valore rappresenta il tasso di ricambio d'aria per infiltrazioni nei nuovi edifici, con serramenti sempre più ermetici.

RISCALDAMENTO

Viene qui indicata la temperatura di setpoint da mantenere in regime di riscaldamento, cioè 21 gradi. Quest'ultima rappresenta la temperatura media tra le temperature minime di progetto proposte dalla normativa per le 3 classi di qualità dell'ambiente termico. È stata inserita una schedule "SETTIMANA _RISC" che definisce i momenti in cui il riscaldamento è acceso o spento durante l'arco della settimana e di conseguenza per tutto l'anno. Si è scelto di accendere il riscaldamento solo nei giorni lavorativi (lunedì-venerdì) dalle 7 del mattino alle 18 della sera e non nel week end (sabato-domenica)



Figura 9.2 Type RISCALDAMENTO

RAFFRESCAMENTO

Viene qui indicata la temperatura di setpoint da mantenere in regime di raffrescamento, cioè 26 gradi. Quest'ultima rappresenta la temperatura media tra le temperature massime di progetto proposte dalla normativa per le 3 classi di qualità dell'ambiente termico. Anche in questo caso è stata inserita una schedule "SETTIMANA_RAFF", che come per il riscaldamento, definisce il funzionamento del cooling solo durante i giorni lavorativi dalle 7 del mattino alle 18 della sera.

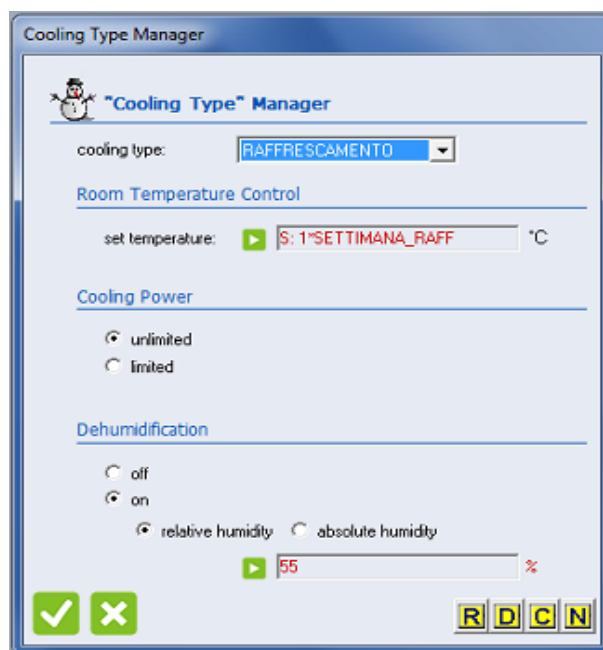


Figura 9.3 Type RAFFRESCAMENTO

È prevista una certa deumidificazione durante il regime di raffrescamento, in particolare il livello di umidità relativa massima da mantenere è 55% che rappresenta una media delle umidità massime previste per le tre classi di qualità dell'ambiente termo igrometrico.

Non sono stati introdotte type riguardanti singoli impianti di riscaldamento o raffrescamento perché l'oggetto della tesi si discosta da ciò, quindi definendo semplicemente le temperature 21°C-26°C, troveremo i fabbisogni energetici richiesti dell'edificio necessario per mantenere internamente queste temperature.

CARICHI TERMICI INTERNI

Le principali sorgenti termiche all'interno di un edificio sono generalmente gli occupanti, le apparecchiature elettriche, di illuminazione e di cottura.

- PERSONE

Attraverso la ISO 7730 vengono stabiliti, a seconda del grado di attività di una persona e a seconda dell'ambiente preso in considerazione, le quote di calore sensibile e latente generate dalla presenza di persone. Anche il tempo di permanenza degli occupanti all'interno dell'edificio è governato da una schedule "SETTIMANA" che prevede 60 persone per piano, dalle ore 8 alle ore 17.

- PC

Tra le principali apparecchiature elettriche consideriamo la presenza per ogni lavoratore di un PC ; anche la presenza dei PC è governata dalla schedule "SETTIMANA".

- LUCI

I carichi termici dovuti alla presenza di luci sono riferiti ad un'area leggermente inferiore all'area in pianta, circa il 10% in meno; è stato stabilito un valore di 5 W/m² di totale carico termico, da dividere per metà in contributo convettivo e per metà in contributo radiativo. La "control strategy" per quanto riguarda la luce artificiale è attuata attraverso una schedule che implementa valore 1 durante l'accensione delle luci e 0 durante lo spegnimento.

CONFORT

Basandosi sulla prUNI10339 sono state implementate in questa type una serie di condizioni riguardanti il confort:

Resistenza termica dell'abbigliamento = 1 clo

Tasso metabolico = 1,2 met (tipico di attività sedentarie [2])

Velocità dell'aria= 0,1 m/s

VENTILAZIONE

Nella ventilation type manager vengono inserite attraverso opportune schedule i valori delle portate d'aria che corrispondono rispettivamente alla Classe Elevata, Classe Media, classe Bassa della nuova prUNI10339; i valori sono riportati in kg/h , cioè in m^3/h derivanti dal calcolo sottostante per la densità dell'aria in condizioni ambientali standard.

La formula utilizzata per il calcolo delle portate, ripresa dal capitolo 5, è la seguente:

$$Q_{v,o,n} = n * q_{v,o,p} + A * q_{v,o,s}$$

Per i valori di portata per persona e il numero di persone viene calcolato con il coefficiente di affollamento; sapendo che gli indici di affollamento sono fissati unicamente per i locali in cui sia prevista la permanenza di persone e non quindi per locali di transito, corridori, locali di servizi a altri, calcoliamo le portate con un numero di persone basato su una superficie leggermente inferiore rispetto all'area in pianta.

Per i valori di portata per superficie consideriamo quest'ultima un 10% inferiore rispetto all'area in pianta calpestabile proprio per non considerare le zone " non occupate".

Dal calcolo risulta un numero di persone per piano pari a:

$$0.12 * 540 = 64 \text{ persone}$$

Categoria edificio	Portata per persona [m ³ /s]	Portata per superficie [m ³ /s*m ²]
A	$8.5 * 10^{-3}$	$0.7 * 10^{-3}$
B	$7 * 10^{-3}$	$0.6 * 10^{-3}$
C	$5 * 10^{-3}$	$0.4 * 10^{-3}$

Tabella 9.4 Valori di ventilazione per uffici openspace proposti dalla prUNI10339

Ricordando la formula $Q_{v,o} = Q_{v,o,n} * \left(\frac{\varepsilon_{V,n}}{\varepsilon_{V,c}}\right) * C_1 * C_2$,

la portata nominale risultante deve essere corretta con coefficienti che considerino l'efficienza convenzionale di ventilazione, l'eventuale presenza di impianti misti e l'altezza sul livello del mare. Nel caso in esame, l'impianto è a tutta aria e l'edificio si trova sul livello del mare, quindi i rispettivi coefficienti sono pari a 1. Per quanto riguarda l'efficienza di ventilazione, vengono proposti dei coefficienti che considerano l'efficienza nominale di ventilazione (sempre pari a 0,8) da dividere per l'efficienza convenzionale di ventilazione, che dipende dalla modalità di immissione in ambiente dell'aria. Nel caso in esame l'aria viene immessa attraverso diffusori (circolari o quadrati) a coni o settori concentrici quindi il coefficiente proposto è 0.8, una media tra stagione invernale ed estiva. Dal momento che i fattori correttivi risultano tutti unitari le portate nominali coincidono con le portate effettive. Risultano quindi le seguenti portate di ventilazione:

Categoria edificio	Portata effettiva di ventilazione [m ³ /h]	Portata effettiva di ventilazione [kg/h]	n (Vol/h)
A	3319.2	3983.04	1.72
B	2779.2	3335.04	1.44
C	1929.6	2315.52	1.005

Tabella 9.5 Portate di ventilazione secondo prUNI10339

Sono stati impostati nelle schedule "SETTIMANA VENTILAZIONE_CLASSE A,B,C" i valori di queste portate (in Kg/h) per le 9 ore lavorative dei giorni lavorativi e 0 per tutti il resto del tempo. Queste portate rappresentano quindi i valori di aria immessa nell'ambiente. Per un fine puramente pratico le Classi Elevata, Media, Bassa sono state rinominate rispettivamente A,B,C.

10. MODELLO IN SIMULATION STUDIO

Si procede all'analisi di tutti i componenti del modello edificio-impianto e i reciproci collegamenti creati attraverso il Simulation Studio (figura 10.1) ; l'edificio descritto al capitolo 8 prevede la presenza di un impianto di ventilazione meccanica controllata dotato di recuperatore statico sensibile di calore. In seguito viene riportato il modello oggetto di simulazione; è graficamente uguale per tutte le casistiche considerate ma vengono di volta in volta però implementati climi ed edifici diversi a seconda della zona climatica considerata.

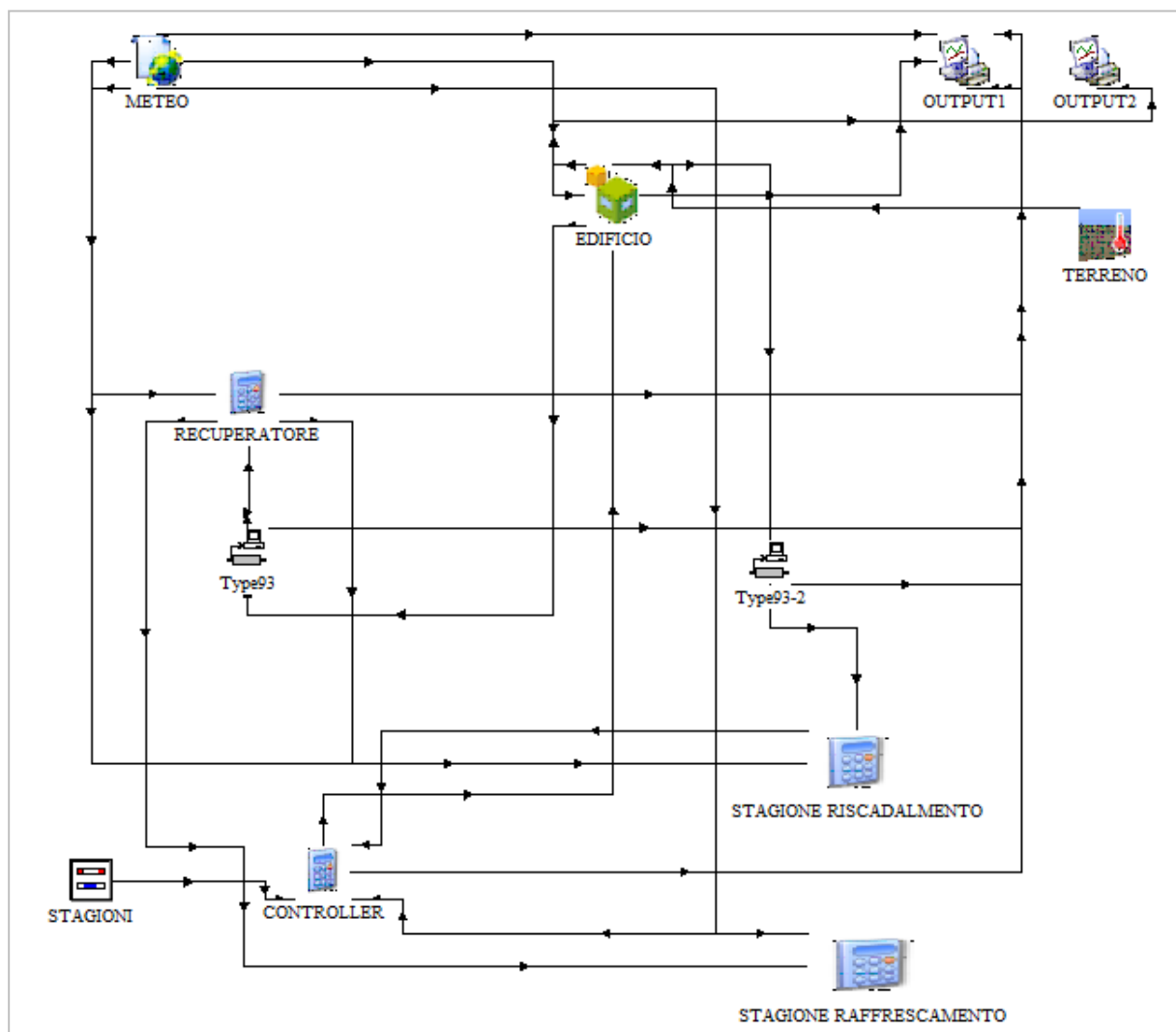


Figura 10.1 Modello TrnsysStudio edificio-impianto

TYPE 56-EDIFICIO

Questa type racchiude tutte le nozioni e i parametri descritti nel capitolo precedente. Attraverso opportuni collegamenti da e verso questa type vengono trasferite le informazioni necessarie per poter simulare il modello. Sono stati creati 9 tipologie di edificio, tre per ogni tipo di clima per le 3 diverse portate. Gli output di questo componente costituiscono i risultati che ci interessano delle simulazioni svolte; il software calcola e fornisce come output di default le temperature delle zone termiche e il calore sensibile necessario per mantenere le stesse zone tra le temperature di set point stabilite; sono stati aggiunti i valori di calore latente in quanto è previsto, durante il regime di raffrescamento una certa deumificazione e infine, quindi, i valori di umidità relativa corrispondenti ai 3 piani.

- TEMPERATURA PIANOTERRA
- TEMPERATURA PIANOPRIMO
- TEMPERATURAPIANOSECONDO
- CALORE SENSIBILE PIANOTERRA
- CALORE SENSIBILE PIANOPRIMO
- CALORE SENSIBILE PIANOSECONDO
- CALORE LATENTE PIANOTERRA
- CALORE LATENTE PIANOPRIMO
- CALORE LATENTE PIANOSECONDO
- UMIDITA' RELATIVA PIANOTERRA
- UMIDITA' RELATIVA PIANOPRIMO
- UMIDITA' RELATIVA PIANOSECONDO

TYPE 15-6

È il componente che definisce tutti i parametri climatici relativi al luogo selezionato al suo interno. Viene collegato ad altre type in richiedono il valore della temperatura esterna principalmente; il collegamento principale è con la type 56 in cui vengono correlati radiazione totale, radiazione diffusa ed angoli in incidenza con le varie superfici dell'edificio. Sono state scelte 3 principali città rappresentative delle zone climatiche B,D,E: Palermo, Roma, Milano.

CITTA'	GRADI GIORNO
PALERMO	751
ROMA	1451
MILANO	2404

Tabella 10.2 Gradi giorno

Questa type è opportunamente collegata con altri componenti e con un componente di output (stampante) che permette di visualizzare i risultati.

TYPE 77-TERRENO

Attraverso questo componente vengono definite le condizioni del terreno sul quale poggia il basamento dell'edificio. La componente opaca "PAVIMENTO" creata all'interno del TRNbuild era stata identificata con BOUNDARY attraverso una funzione "T_TERRENO" il cui input è costituito proprio dalla type in questione.

Per semplicità è stata utilizzata come temperatura del terreno la media della temperatura esterna durante l'anno, ottenibile attraverso la type che definisce la località e quindi il suo meteo. Vari studi sono soliti riportare come intervallo di variabilità della temperature quello di 4 °C ; così è stato fatto anche nelle nostre simulazioni. Non essendoci piani interrati si calcola la temperatura del terreno alla profondità alla quale si trova l'ultimo strato che costituisce la wall type del pavimento.

ZONE	TEMPERATURA TERRENO
B	18.6
D	15.2
E	11.3

Tabella 10.3 Temperature medie superficiali terreno

TYPE CALCOLATRICE- RECUPERATORE

È previsto per l'impianto di ventilazione meccanica controllata all'interno dell'edificio preso in considerazione un recuperatore statico di calore sensibile che abbiamo considerato avere un'efficienza media del 65%. Questo componente permette quindi di descrivere e di fungere da recuperatore, implementando in esso le opportune equazioni. Come già visto, il recuperatore preleva parte di calore dell'aria esausta in uscita per trasferirlo nell'aria "fresca" in entrata. La formula implementata nella type calcolatrice è l'efficienza termica del recuperatore è [2]:

$$\eta_t = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}$$

Dove:

t_{11} = temperatura interna del flusso d'aria in espulsione che attraversa il recuperatore

t_{21} = temperatura esterna del flusso d'aria in ingresso al recuperatore

t_{22} = temperatura del flusso d'aria in ingresso a valle del recuperatore,

Esplicitando opportunamente t_{22} dalla formula abbiamo come output la temperatura dell'aria "fresca" passata attraverso il recuperatore che viene immessa nei 3 piani rispettivamente. Attraverso un opportuno collegamento l'output viene collegato alla type dell'edificio a cui arriva quindi il nuovo valore della temperatura dell'aria immessa. Le formule che vengono utilizzate sono quindi:

$$T_{\text{pianoterra_imm}} = (T_{\text{pianoterra_int}} - T_{\text{ariaext}}) * \eta_t + T_{\text{ariaext}}$$

$$T_{\text{pianoprimo_imm}} = (T_{\text{pianoprimo_int}} - T_{\text{ariaext}}) * \eta_t + T_{\text{ariaext}}$$

$$T_{\text{Pianosecondo_imm}} = (T_{\text{pianosecondo_int}} - T_{\text{ariaext}}) * \eta_t + T_{\text{ariaext}}$$

Dove $T_{\text{pianoterra_int}}$, $T_{\text{pianoprimo_int}}$ e $T_{\text{pianosecondo_int}}$ sono le temperature dei 3 rispettivi piani che sono gli output della type 56 e vengono ritardate di un time step, in modo da avere un valore iniziale necessario per fare il primo calcolo. Attraverso la type 93 gli input vengono "fermati" (stoppati) per il numero di time step desiderati (uno nel nostro caso), in modo che ad un certo time step si possa fare il calcolo con il parametro considerato fermo al time step precedente. Nel nostro specifico caso, al time step n vengono considerate la temperatura dell'aria esterna e la temperatura di immissione al momento n e la temperatura interna al time step n-1.

TYPE CALCOLATRICE-CONTROLLER

Il recuperatore presente all'interno dell'edificio non è settato per lavorare costantemente durante le ore di funzionamento dell'impianto di ventilazione, bensì per lavorare in alcuni periodi, quelli prettamente invernali, in un modo e diversamente negli altri mesi, in modo da ottimizzare al massimo i consumi richiesti dalla ventilazione al variare delle temperature esterna e degli ambienti.

Attraverso la *type 515* vengono definiti, per i climi B, D, E, due tipologie di periodi: stagione di riscaldamento e stagione di raffrescamento, periodi puramente indicativi che non vanno ad influenzare la necessità da parte dell'edificio di fare riscaldamento o raffrescamento bensì periodi per diversificare le logiche di funzionamento del recuperatore.

Le stagioni di riscaldamento sotto riportate, arbitrariamente scelte, non corrispondono effettivamente alle stagioni di riscaldamento previste da normativa per le stesse zone climatiche [3], poiché il riscaldamento è effettivamente ristretto a periodi più brevi complici gli elevati carichi interni e l'elevato isolamento termico dell'edificio.

CLIMA B: **1 dicembre-31 gennaio**

CLIMAD: **1 novembre-28 febbraio**

CLIMA E: **15 ottobre-31 marzo**

La *type CONTROLLER*, attraverso le sue funzioni implementate, comanda che il recuperatore funzioni tra due diverse modalità implementate nei due componenti descritti in seguito. L'output della *type* in questione rappresenta l'effettiva temperatura immessa piano per piano; graficamente questo si nota con un opportuno collegamento alla componente "edificio".

TYPE CALCOLATRICE - Stagione di riscaldamento

Durante i periodi sopraindicati per i 3 climi, la temperatura di immissione nell'edificio è costituita da:

- temperatura dell'aria esterna, se la temperatura dell'aria esterna è minore di 26 gradi e se il raffrescamento è acceso; in questo caso immettere nell'edificio la temperatura dell'aria in uscita dal recuperatore sarebbe svantaggioso quindi la portata d'immissione bypassa il recuperatore; questo fenomeno si chiama "free cooling".
- temperatura dell'aria di immissione calcolata nella *type RECUPERATORE*, se la temperatura dell'aria esterna è minore di 26 gradi e se non c'è necessità di raffrescamento. In questo caso non avviene il bypass del recuperatore.

TYPE CALCOLATRICE - Stagione di raffrescamento

Al di fuori dei periodi sopracitati per i 3 climi, la temperatura di immissione nell'edificio è costituita da:

- temperatura dell'aria esterna, se quest'ultima è minore di 26 gradi
- temperatura di immissione a valle del recuperatore, se la temperatura dell'aria esterna è maggiore di 26 gradi

Quest'ultima configurazione di funzionamento è un metodo per ottenere ulteriori risparmi in termini di consumi energetici rispetto al primo metodo di funzionamento: invece di immettere nell'edificio portate d'aria alla temperatura dell'aria esterna, nel caso in cui questa sia minore di 26, solo durante le ore di effettivo funzionamento del raffrescamento, viene utilizzata aria a temperatura esterna indipendentemente che questo sia effettivamente acceso o spento. Prevedendo che quasi sicuramente al di fuori dei mesi prettamente invernali e in misura maggiore nei climi mediamente caldi, il raffrescamento sarà sempre acceso durante le ore previste di funzionamento, invece di far passare l'aria attraverso il recuperatore, l'intento è quello di utilizzare l'aria più fresca possibile in modo da ritardare l'accensione del cooling. Se la stessa aria fosse fatta passare attraverso il recuperatore sarebbe comunque più calda e quindi si avvicinerebbe il momento di accensione del cooling. È una sorta di metodo preventivo di risparmio. Diminuendo quindi i momenti di raffrescamento funzionante si generano discreti risparmi sui consumi dell'ordine del 5%.

Queste modalità di funzionamento del recuperatore sono state implementate nel modello attraverso opportune calcolatrici, come si evince dalla figura 10.1.

TYPE 65c

Esistono infine delle componenti che permettono di stampare a video tutti gli output desiderati; in questo caso, per l'elevato numero di risultati desiderati ne sono state implementate due.

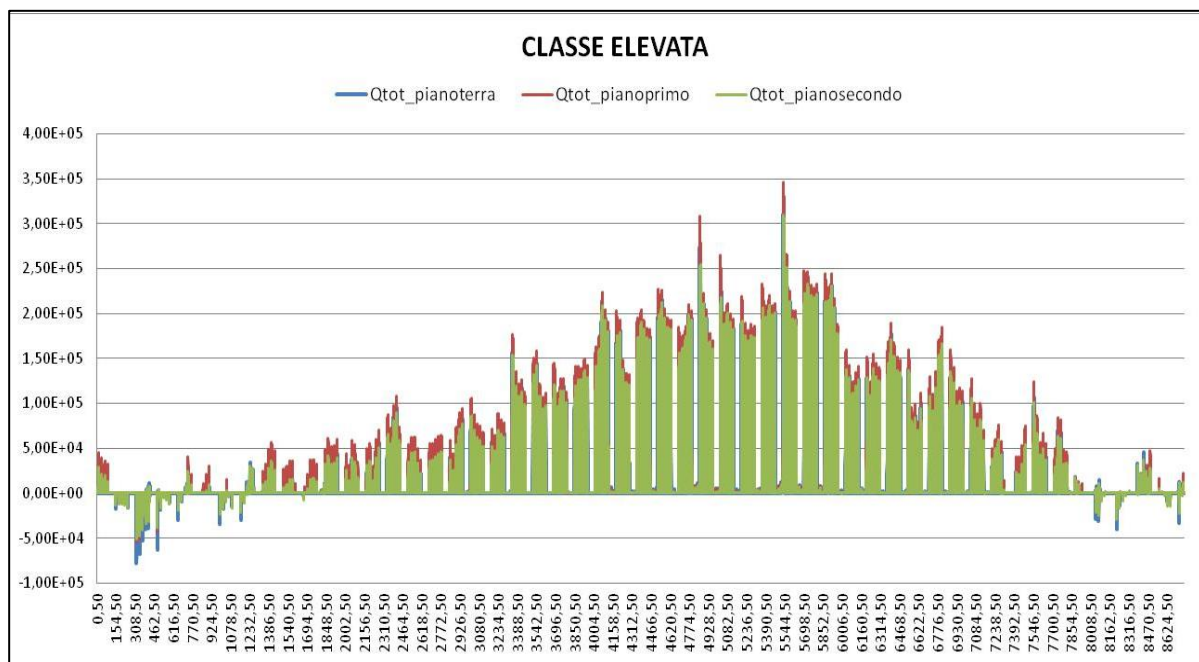
11. RISULTATI SIMULAZIONI

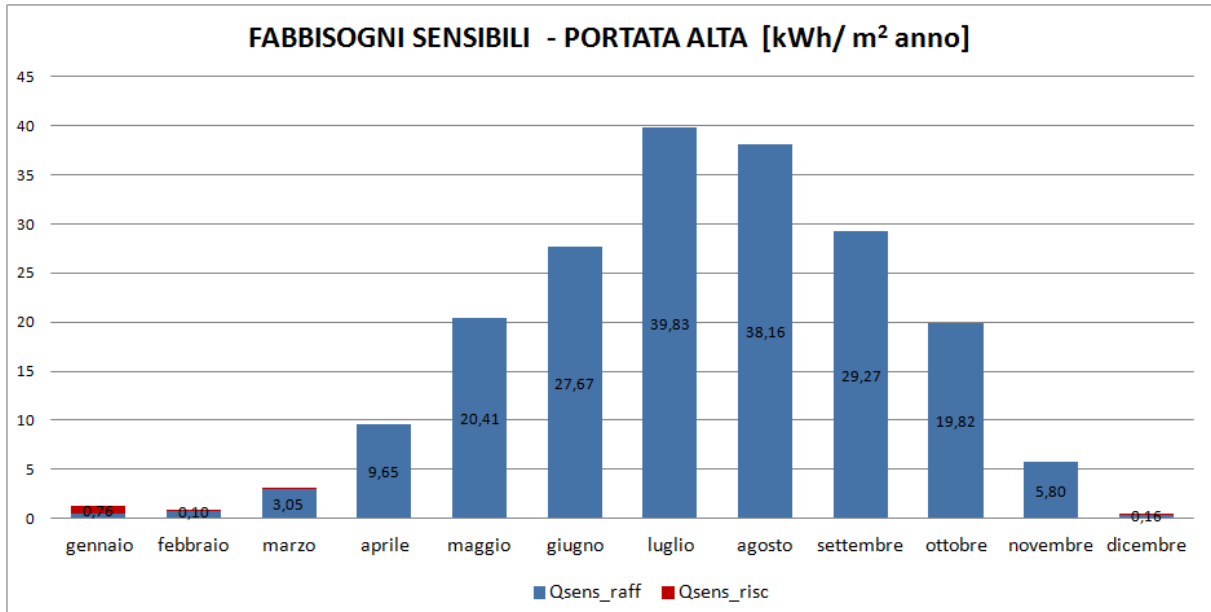
Sono di seguito riportati i risultati delle nove simulazioni effettuate con il modello in Simulation Studio. Vengono riportati i consumi totali di calore sensibile e latente annuali per i 3 piani e il calore sensibile totale di riscaldamento e raffrescamento durante i vari mesi dell'anno.

11.1 CLIMA B

CASO 1 : PORTATA ELEVATA

PORTATA EFFETTIVA DI VENTILAZIONE : **3983.04 kg/h**

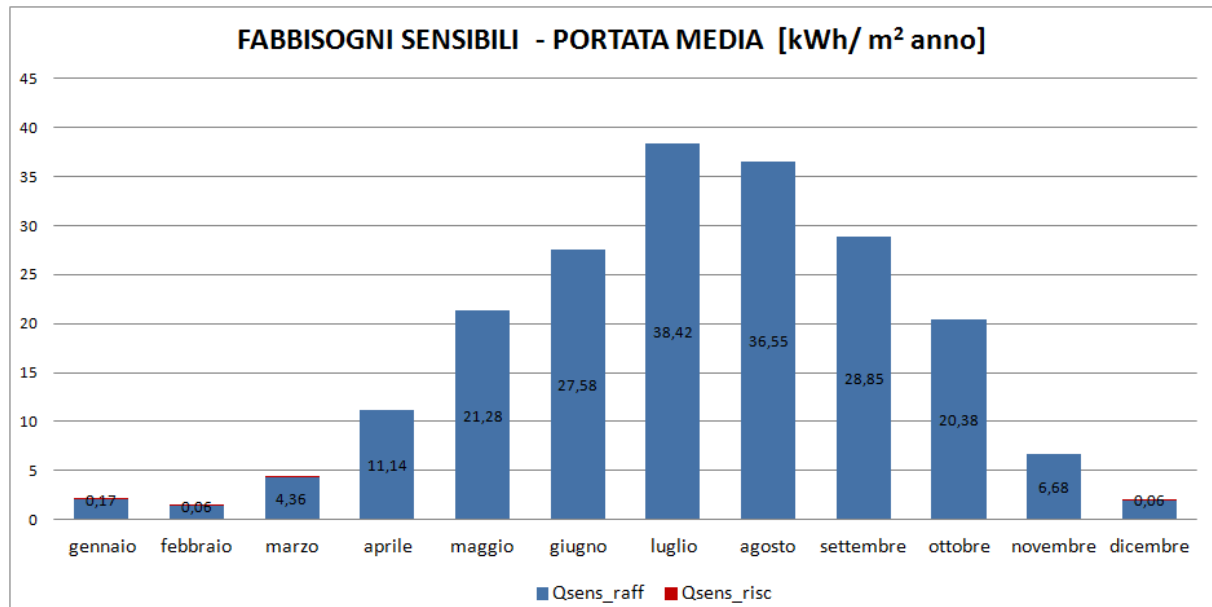
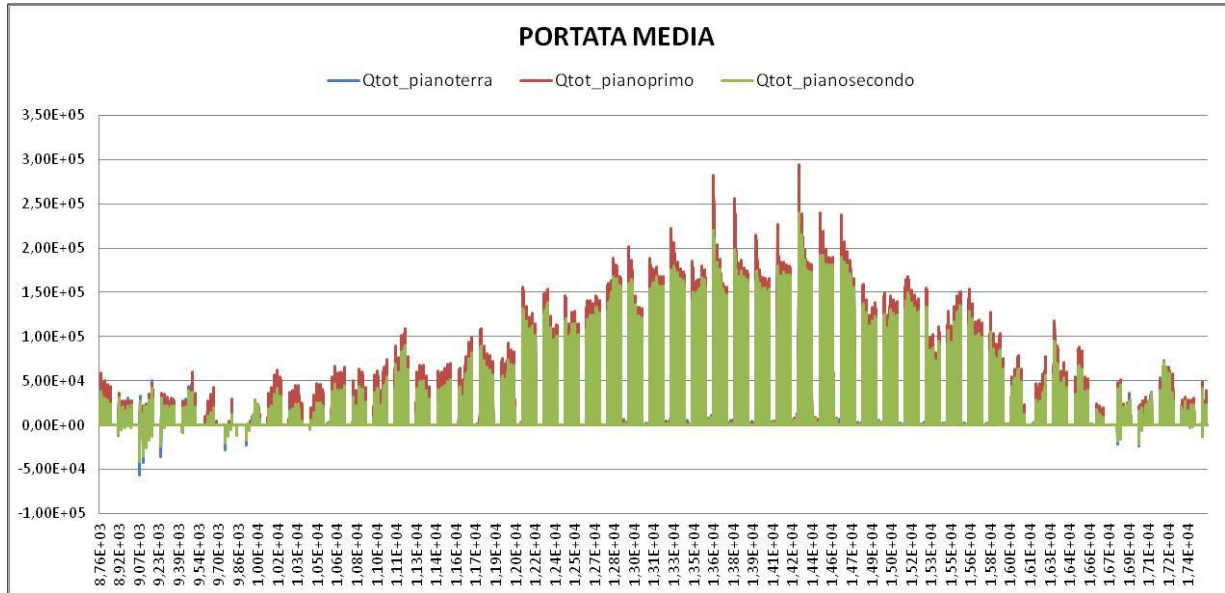




Q SENSIBILE (kWh/m ² anno)			Q LATENTE (kWh/m ² anno)	Q TOTALE (kWh/m ² anno)
Riscaldamento	Raffrescamento			
1.02	195.21			
Piano terra	Piano primo	Piano secondo		
60.59	73.79	61.85	62.53	258.76

CASO 2: PORTATA MEDIA

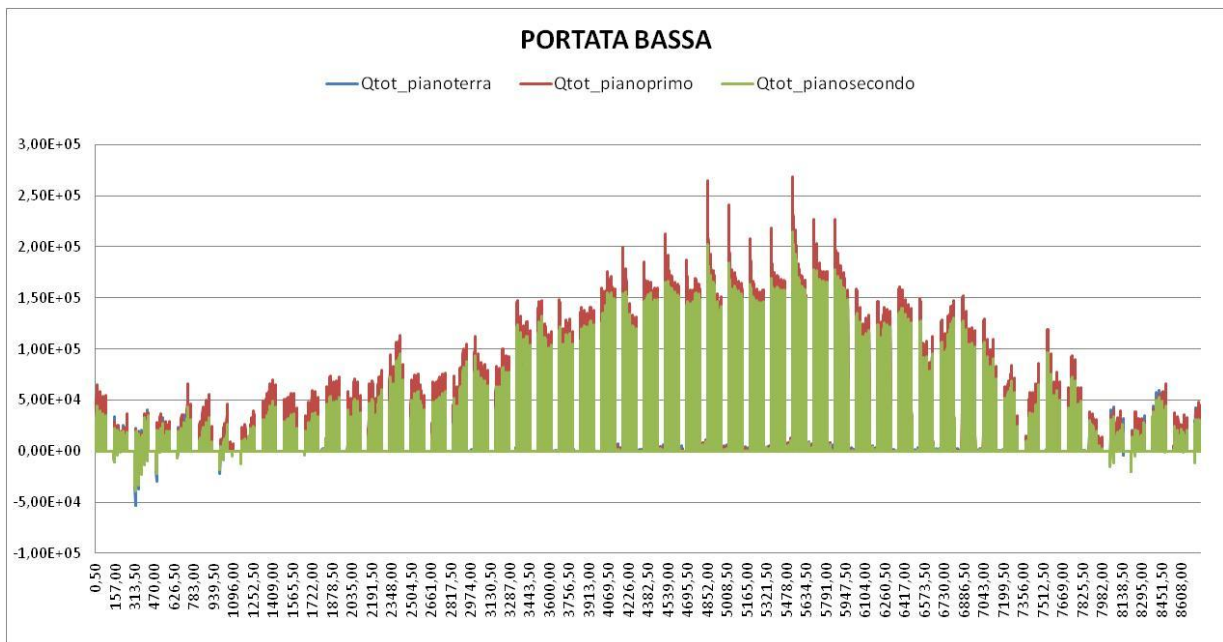
PORTATA EFFETTIVA DI VENTILAZIONE : **3335.04 kg/h**

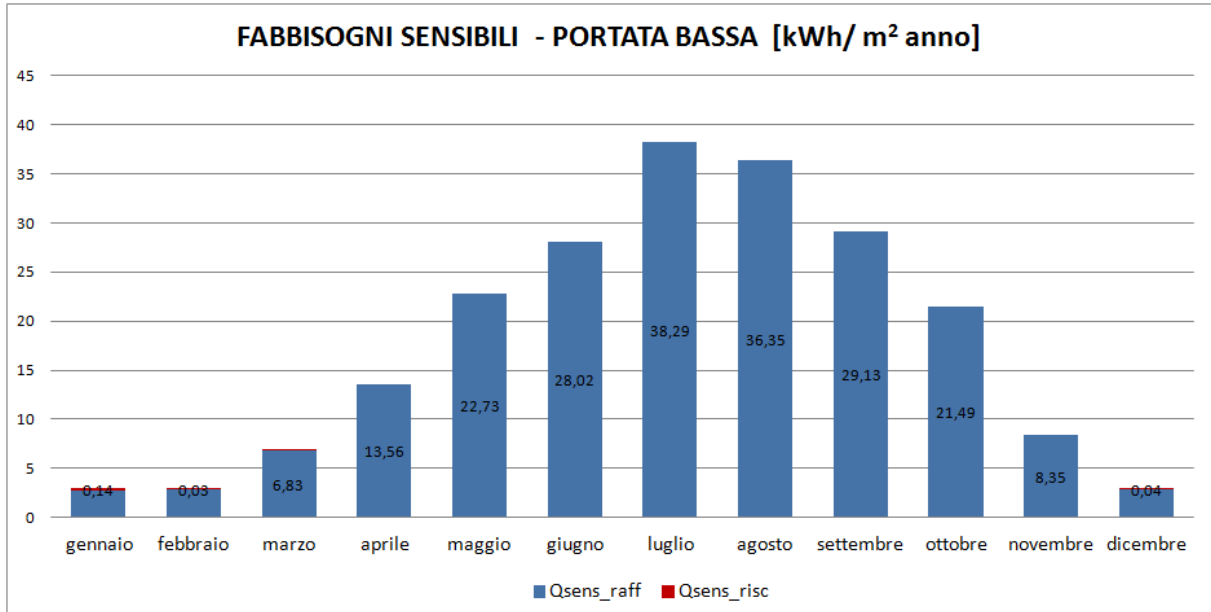


Q SENSIBILE (kWh/m ² anno)			Q LATENTE (kWh/m ² anno)	Q TOTALE (kWh/m ² anno)
Riscaldamento	Raffrescamento			
0.29	200.57			
Piano terra	Piano primo	Piano secondo		
61.59	76.09	63.17	59.40	260.26

CASO 3 : PORTATA BASSA

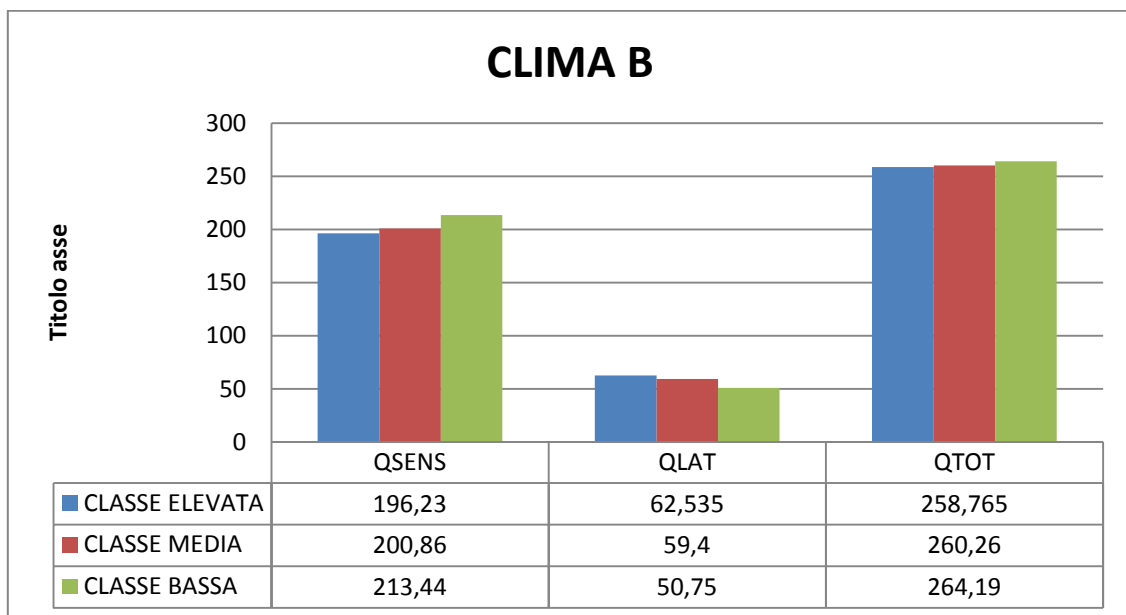
PORTATA EFFETTIVA DI VENTILAZIONE: **2315.52 kg/h**





Q SENSIBILE (kWh/m ² anno)			Q LATENTE (kWh/m ² anno)	Q TOTALE (kWh/m ² anno)
Riscaldamento		Raffrescamento		
0.22		213.21		
Piano terra	Piano primo	Piano secondo		
65.20	81.07	67.16	50.74	264.19

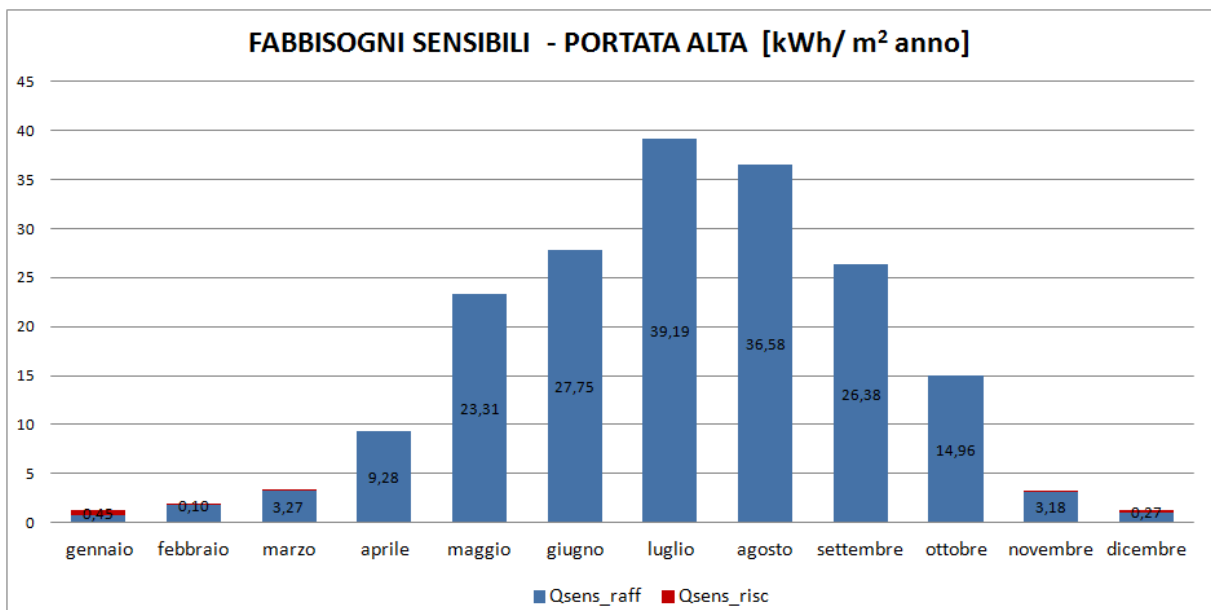
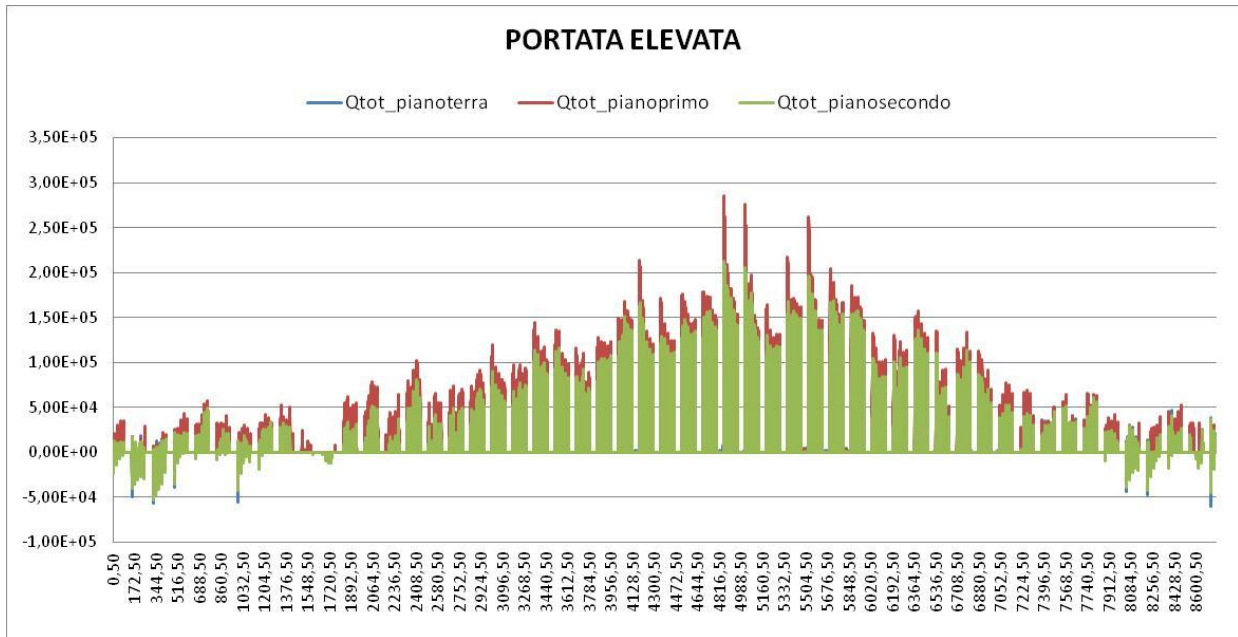
Vengono riassunti in fine i fabbisogni suddivisi in sensibile, latente e totale.



11.2 CLIMA D

CASO 1: PORTATA ELEVATA

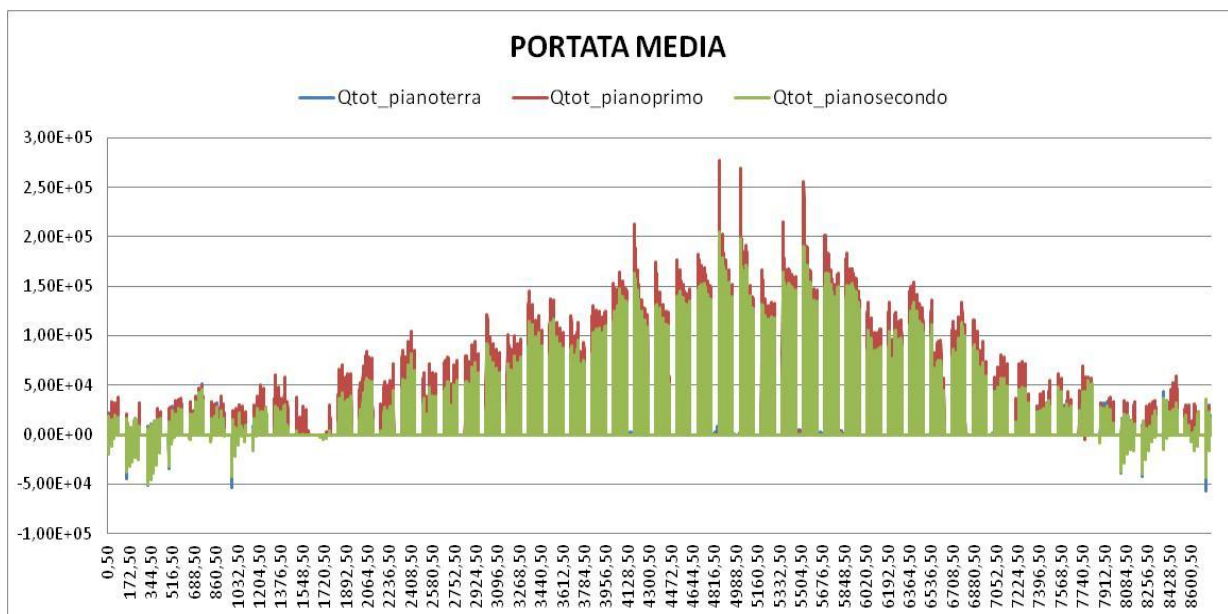
PORTATA EFFETTIVA DI VENTILAZIONE: **3983.04 kg/h**

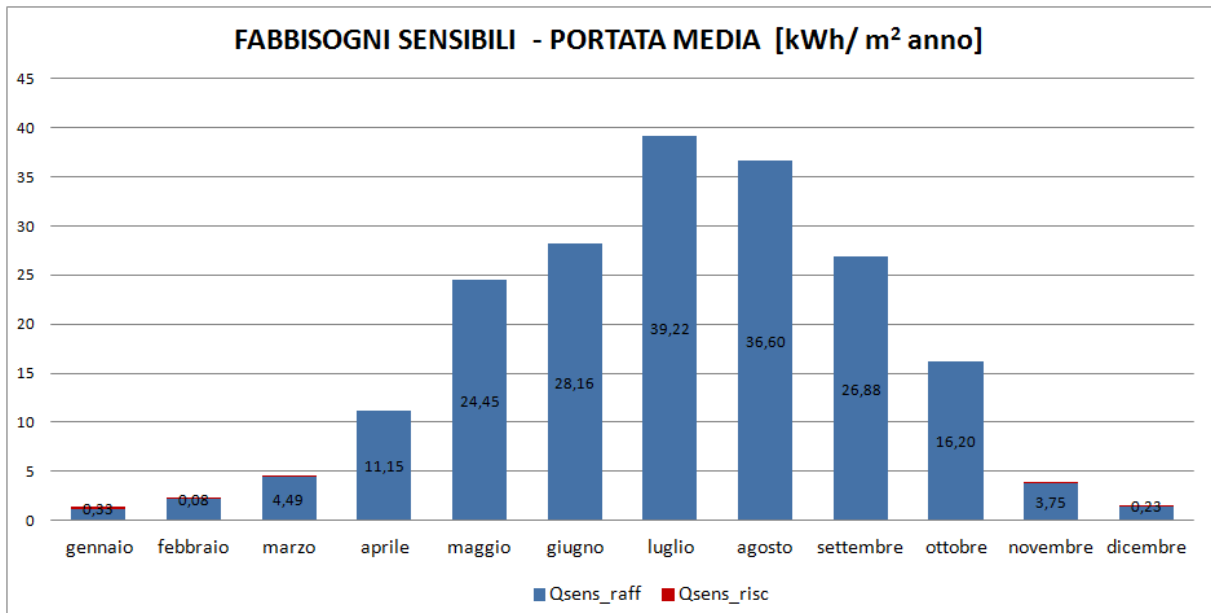


Q SENSIBILE (kWh/m ² anno)			Q LATENTE (kWh/m ² anno)	Q TOTALE (kWh/m ² anno)
Riscaldamento	Raffrescamento			
0.85	187.41			
Piano terra	Piano primo	Piano secondo		
58.06	72.98	57.22	24.9	213.16

CASO 2: PORTATA MEDIA

PORTATA EFFETTIVA DI VENTILAZIONE: **3335.04 kg/h**

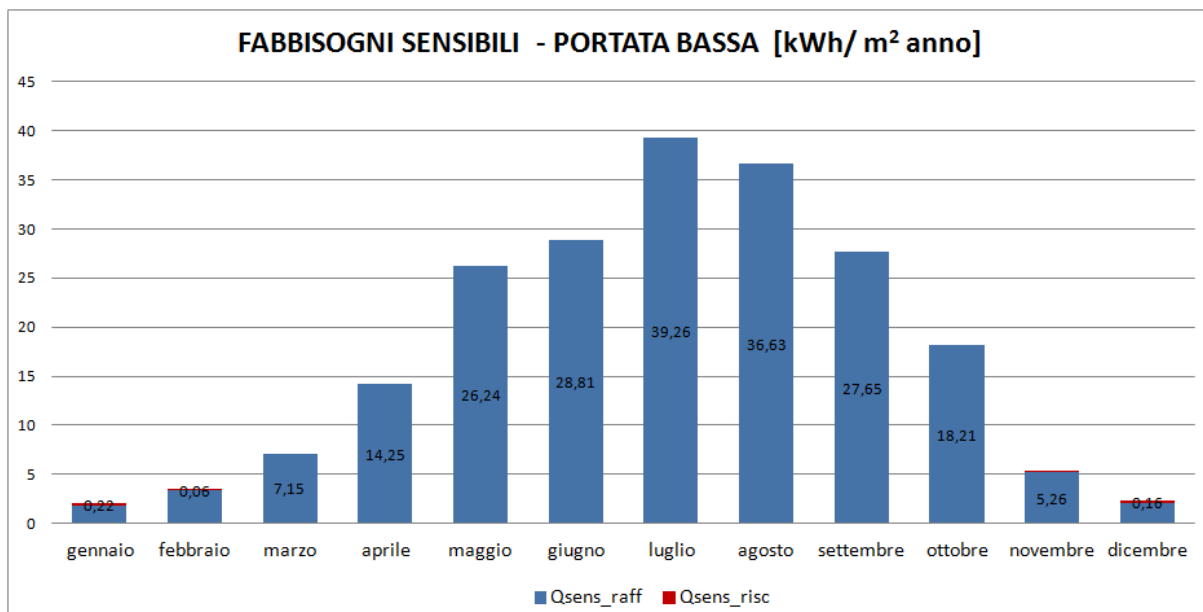
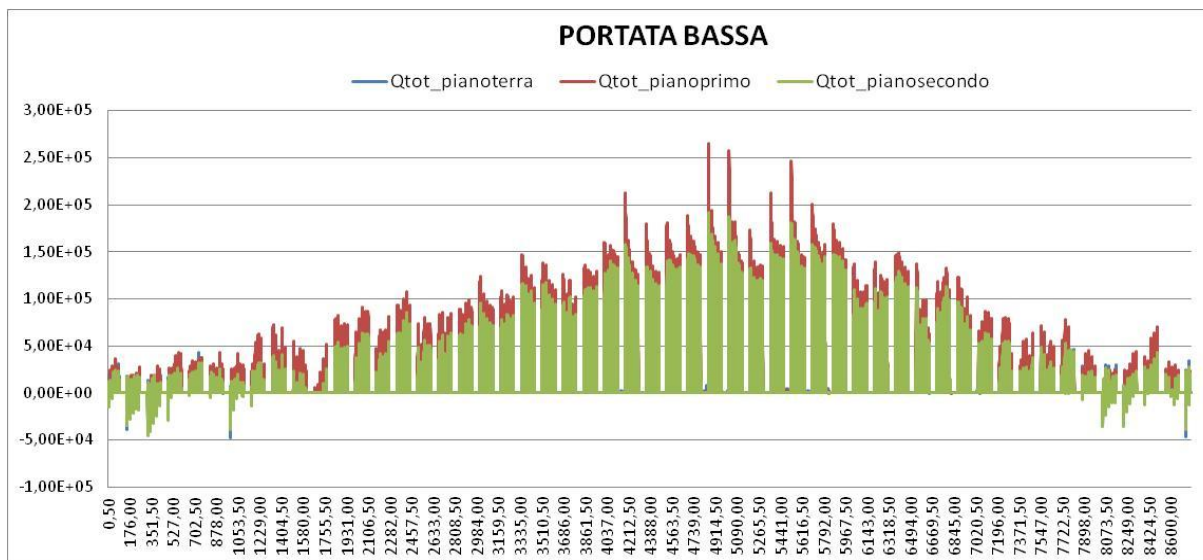




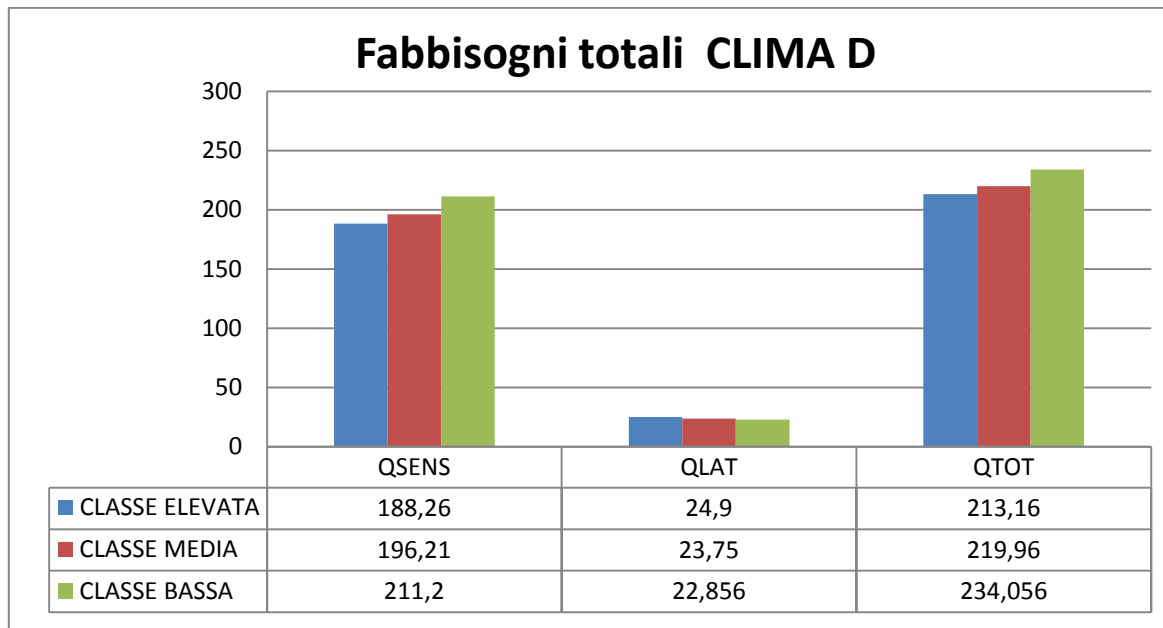
Q SENSIBILE (kWh/m ² anno)			Q LATENTE (kWh/m ² anno)	Q TOTALE (kWh/m ² anno)
Riscaldamento		Raffrescamento		
0.65		195.56		
Piano terra	Piano primo	Piano secondo		
60.46	76.22	59.54	23.75	219.96

CASO 3: PORTATA BASSA

PORTATA EFFETTIVA DI VENTILAZIONE: **2315.52 kg/h**



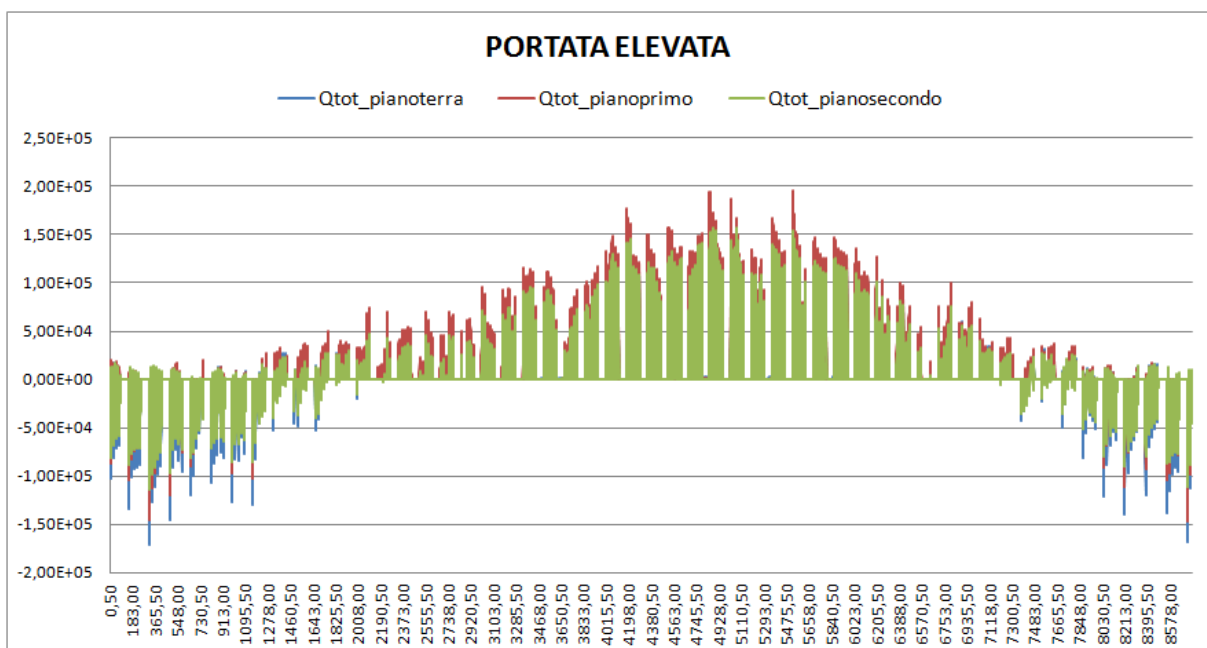
Q SENSIBILE (kWh/m ² anno)			Q LATENTE (kWh/m ² anno)	Q TOTALE (kWh/m ² anno)
Riscaldamento		Raffrescamento		
0.45		210.75		
Piano terra	Piano primo	Piano secondo		
65.08	82.23	63.88	22.86	234.06

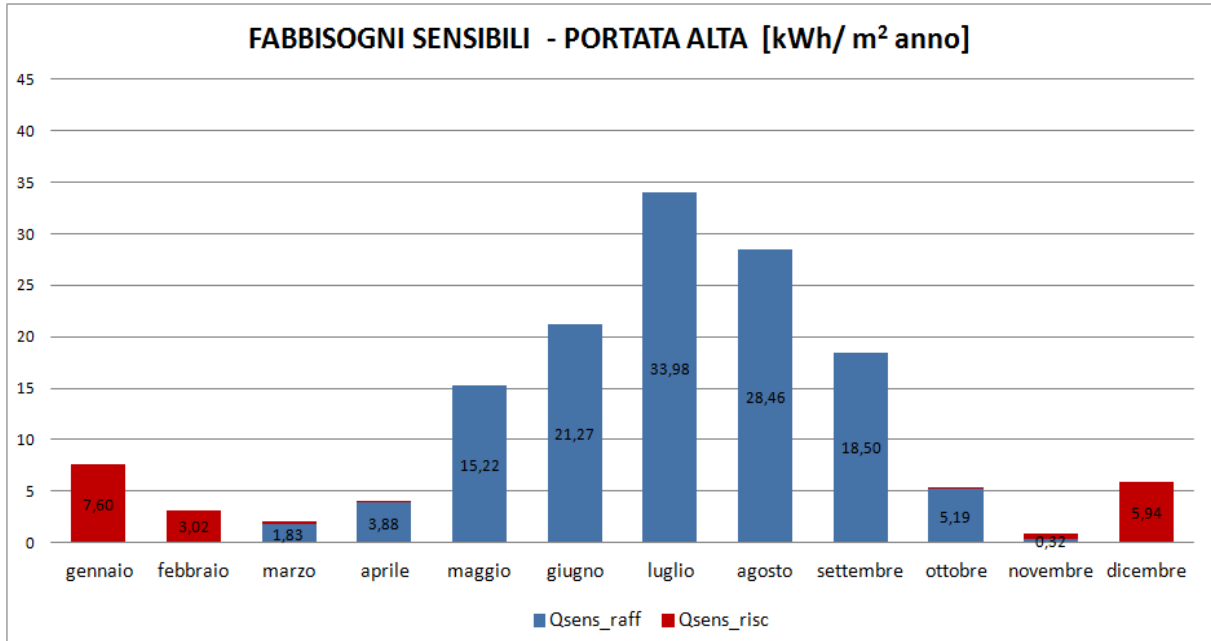


11.3 CLIMA E

CASO 1: PORTATA ELEVATA

PORTATA EFFETTIVA DI VENTILAZIONE: **3983.04 kg/h**

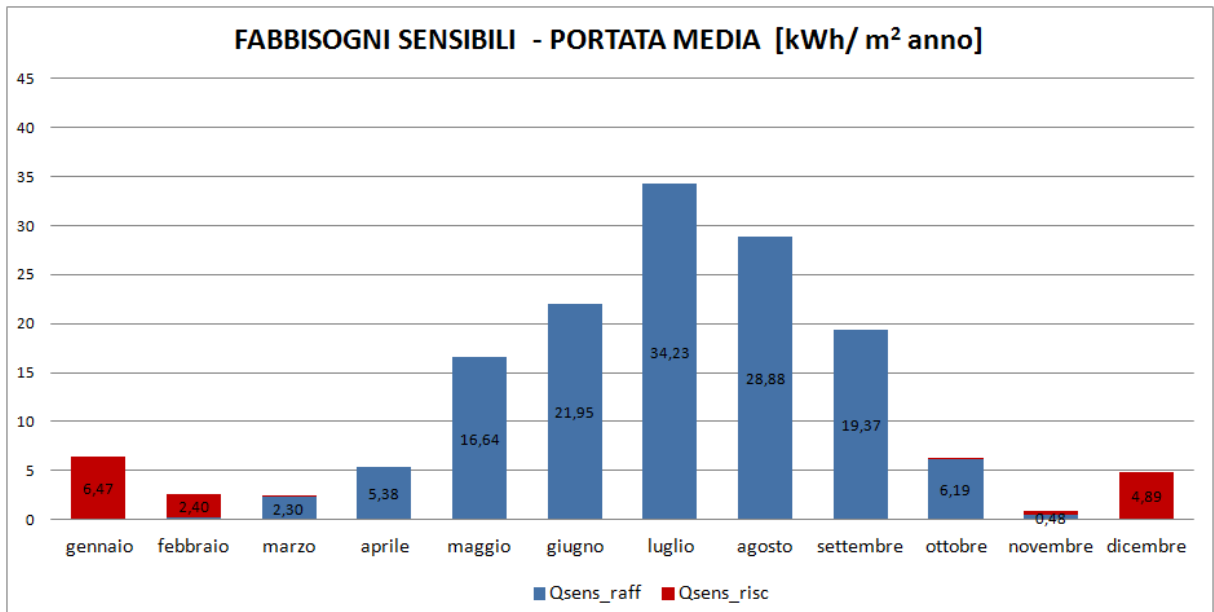
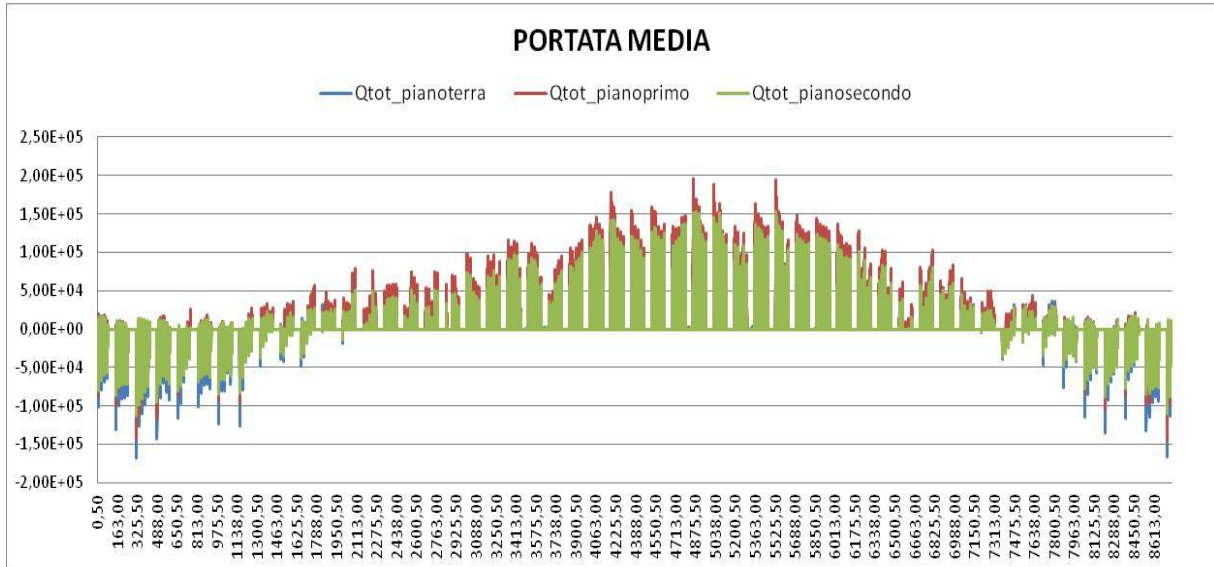




Q SENSIBILE (kWh/m ² anno)			Q LATENTE (kWh/m ² anno)	Q TOTALE (kWh/m ² anno)
Riscaldamento	Raffrescamento			
17.33	128.78			
Piano terra	Piano primo	Piano secondo		
43.87	55.12	47.12	12.52	158.63

CASO 2: PORTATA MEDIA

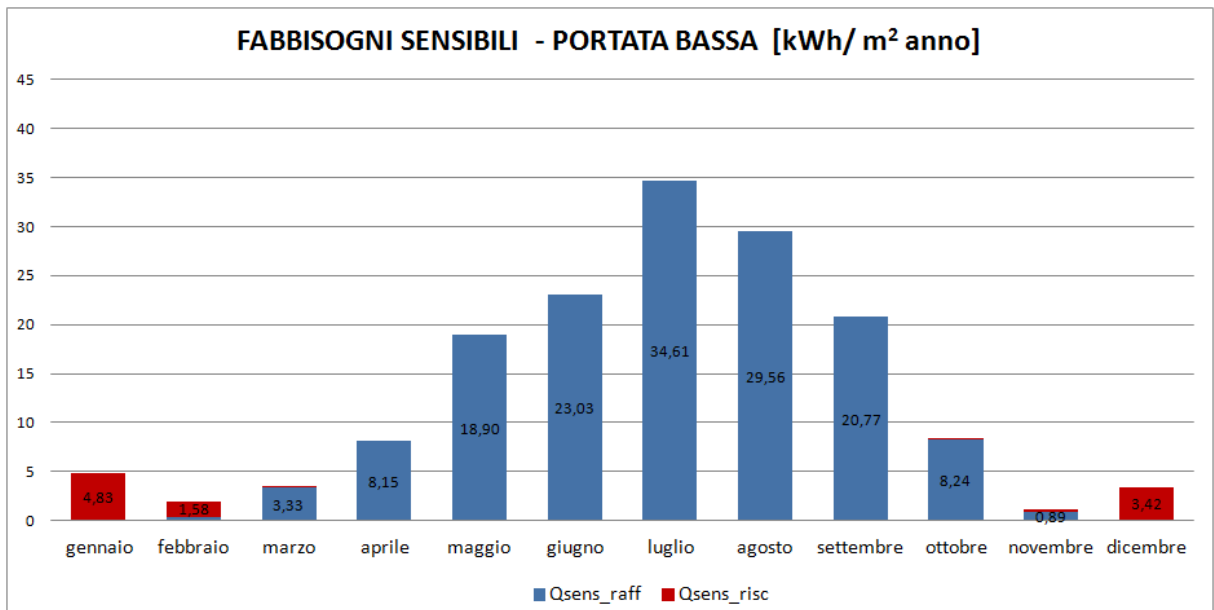
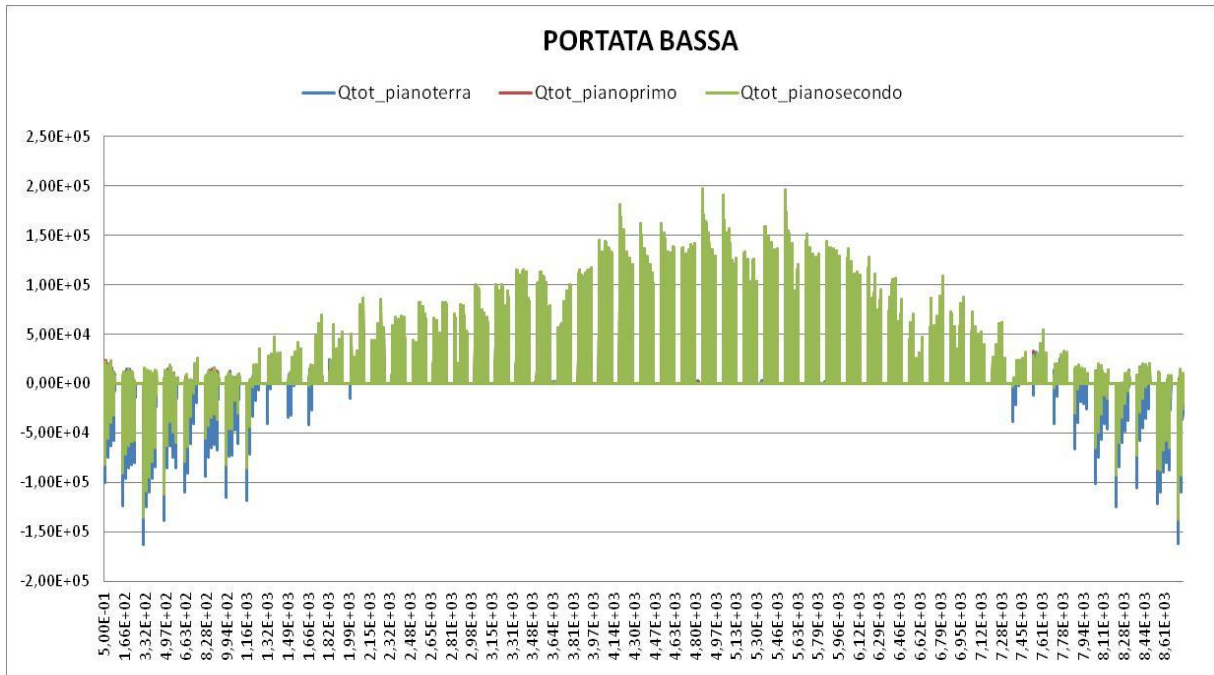
PORTATA EFFETTIVA DI VENTILAZIONE: **3335.04 kg/h**



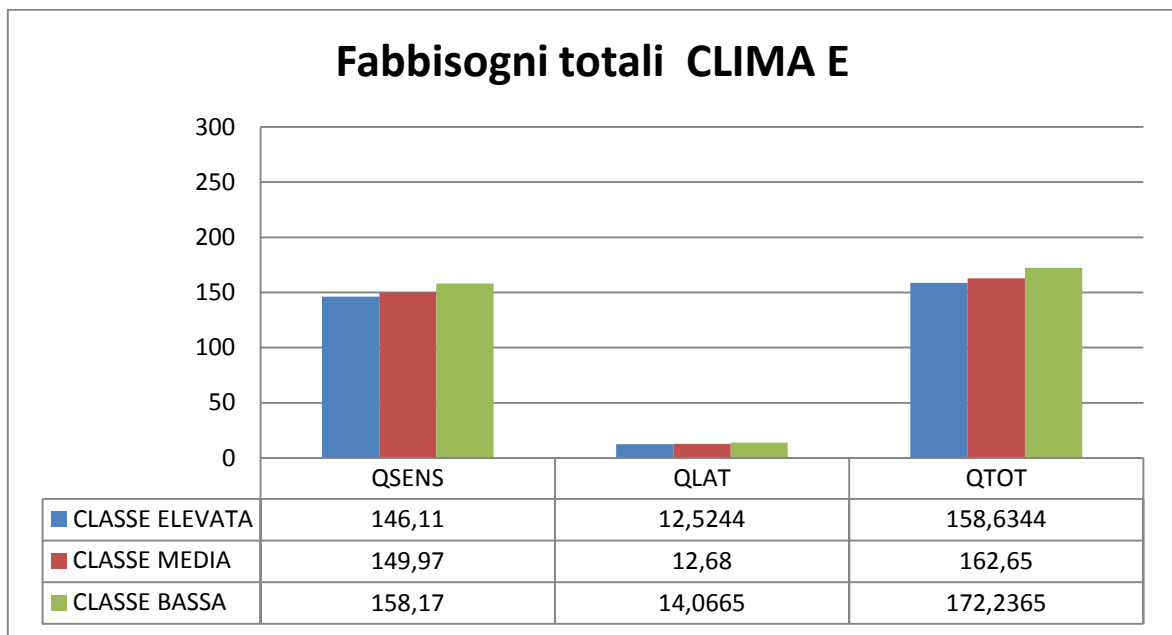
Q SENSIBILE (kWh/m ² anno)			Q LATENTE (kWh/m ² anno)	Q TOTALE (kWh/m ² anno)
Riscaldamento		Raffrescamento		
14.34		135.63		
Piano terra	Piano primo	Piano secondo		
44.81	57.08	48.08	12.68	162.65

CASO 3: PORTATA BASSA

PORTATA EFFETTIVA DI VENTILAZIONE: **2315.52 kg/h**



Q SENSIBILE (kWh/m ² anno)			Q LATENTE (kWh/m ² anno)	Q TOTALE (kWh/m ² anno)
Riscaldamento	Raffrescamento			
10.25	147.92			
Piano terra	Piano primo	Piano secondo		
47.01	60.78	50.38	14.06	172.23



Di seguito vengono riportate le rette di tendenza che descrivono l'andamento dei fabbisogni energetici al variare delle tre portate di ventilazione previste dalla prUNI10339

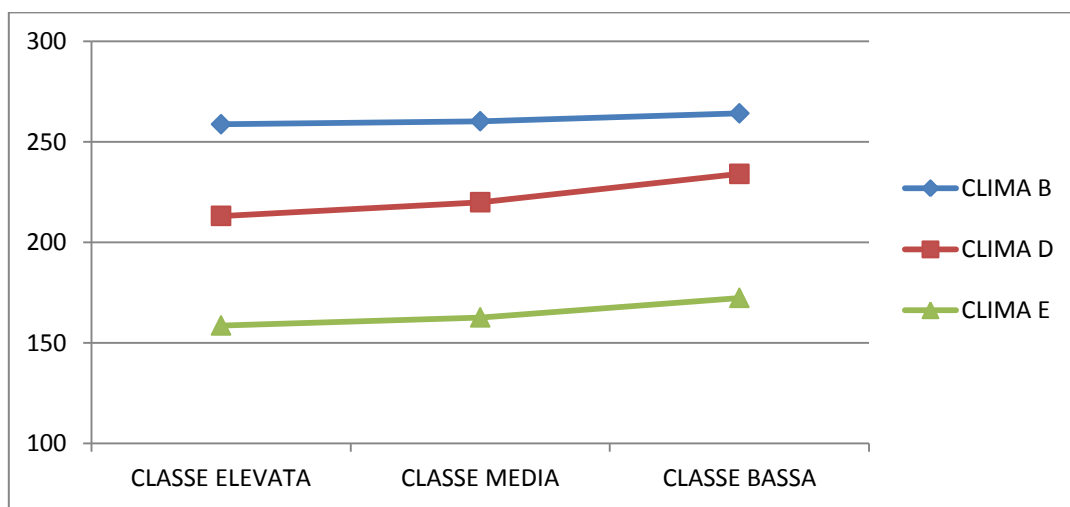


Figura 11.1 Andamento dei fabbisogni energetici al variare delle portate di ventilazione

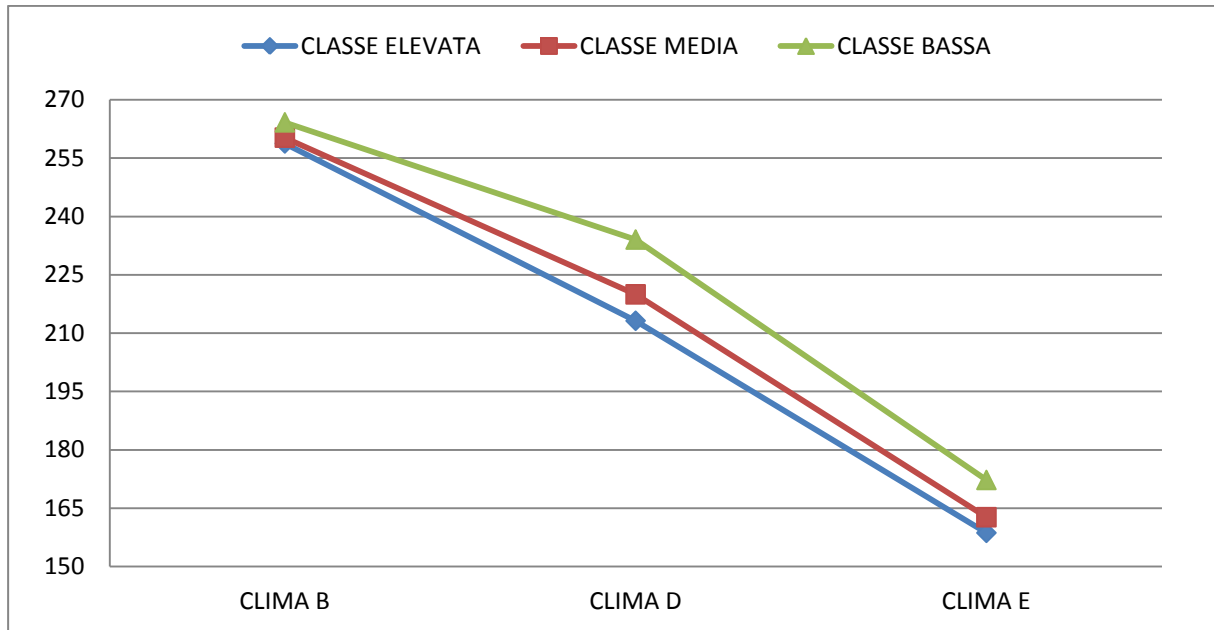


Figura 11.2 Andamento dei fabbisogni energetici al variare della zona climatica

12. ANALISI RISULTATI

I consumi risultanti rappresentano il fabbisogno di calore sensibile e latente necessario per mantenere ogni piano dell'edificio alle temperature di set point stabilite condizionando termicamente crescenti portate di ventilazione. Non viene valutato quindi il modo con cui le portate d'immissione vengono riscaldate o raffreddate, dal momento che l'obbiettivo è valutare l'impatto della ventilazione nei consumi di un eventuale sistema HVAC all'interno dell'edificio preso in considerazione.

Quanto ai risultati ottenuti, si riscontra una controtendenza rispetto a quello che inizialmente si poteva immaginare, e cioè che in tutti i casi climatici considerati, al diminuire delle portate di ventilazione i fabbisogni (sensibili) aumentano. Generalmente, i consumi, dovuti al raffrescamento principalmente, calano dal clima più caldo (B) al clima meno caldo (E).

12.1 CARICHI INTERNI ED INVOLUCRO EDILIZIO

Questi risultati sono principalmente dovuti al forte isolamento termico dell'involucro edilizio e alla presenza di elevati carichi interni, quindi persone, apparecchiature elettriche e illuminazione artificiale. Infatti è stata condotta una serie di simulazioni sullo stesso edificio preso come modello ma con trasmittanze molto più elevate in modo tale da renderlo poco performante dal punto dell'isolamento termico. Le prove sono state eseguite settando il clima della zona climatica E, essendo la situazione in cui la percentuale di riscaldamento è più elevata rispetto agli altri due climi. Si nota infatti che con un edificio di questo tipo la quota di riscaldamento è elevata e quindi il fatto che entri aria relativamente "fredda" e in quantità crescente, non fa che aumentare i consumi; in questa situazione quindi, all'aumentare del tasso di ventilazione, aumentano i fabbisogni

Un edificio molto performante invece, come quello considerato inizialmente, "sbilancia" i carichi sul regime di raffrescamento e di conseguenza anche in autunno ed in inverno si riscontrano fabbisogni di riscaldamento quasi trascurabili ed elevati fabbisogni di raffrescamento.

A sostegno del fatto che i carichi interni giocano un ruolo fondamentale nella determinazione della prevalenza di carico di raffrescamento è l'analisi dell'andamento delle temperature interne agli ambienti cioè le temperature dell'aria all'interno dei 3 piani dell'edificio, durante le ore in cui è prevista l'accensione del sistema di raffrescamento lasciando però spento quest'ultimo.

CLIMA	T_pianoterra > 26 °C	T_pianoprimo > 26 °C	T_pianosecondo > 26°C
B	67.47	75.8	69.47
D	67.08	73.68	66.9
E	57.49	67.35	59.71

Tabella 12.1 Temperature interne dei 3 piani con cooling spento (portata elevata

In tabella 12.1 sono riportate le percentuali delle volte in cui, per ogni singolo piano e clima e per semplicità solo per la portata più elevata proposta dalla normativa, le temperature dell'aria delle 3 zone termiche sono maggiori di 26 gradi con sistema di cooling spento. È evidente quindi, ragionando in modo opposto, di quanto rilevante sia il carico di raffrescamento richiesto annualmente, anche durante i mesi pienamente invernali. Le percentuali riportate per il clima B e D sono abbastanza vicine tra loro dal momento che i calori sensibili richiesti non si discostano molto; leggermente inferiori le percentuali per il clima E.

12.2 TEMPERATURA ESTERNA - RECUPERATORE

Il nostro modello è dotato, come già anticipato di un recuperatore statico di calore e di conseguenza nel range delle percentuali appena sopra trovate avrebbe senso immettere direttamente l'aria esterna in ambiente e quindi effettuare un bypass del recuperatore.

Dal momento che l'edificio in questione presenta forti carichi interni ed è fortemente isolato, si nota che il carico di raffrescamento è predominante lungo tutti i mesi dell'anno e spesso ciò avviene quando la temperatura dell'aria esterna risulta essere inferiore ai 26 gradi; ciò comporta un notevole svantaggio dal momento che immetto in ambiente aria più calda perché passa attraverso il recuperatore rispetto all'immissione diretta quindi l'utilizzo del recuperatore è sostanzialmente utile solo durante un limitato numero di ore. L'analisi di queste situazioni sono riportate nelle seguenti tabelle:

CLIMA	T ext < 26 °C (%)
B	82.73
D	87.53
E	95.74

Tabella 12.2 Temperatura aria esterna durante accensione cooling

La tabella riporta la percentuale di volte in cui la temperatura dell'aria esterna risulta essere inferiore a 26 gradi durante le ore in cui è prevista l'accensione del sistema di raffrescamento, indipendentemente che ci sia effettivo bisogno di cooling o meno. I calcoli riportati sono riferiti al piano intermedio cioè il primo piano.

CLIMA	T ext < 26 (%)		
	CLASSE ELEVATA	CLASSE MEDIA	CLASSE BASSA
B	70.1	73.8	75.92
D	79.23	80.67	82.40
E	80.63	81.68	83.35

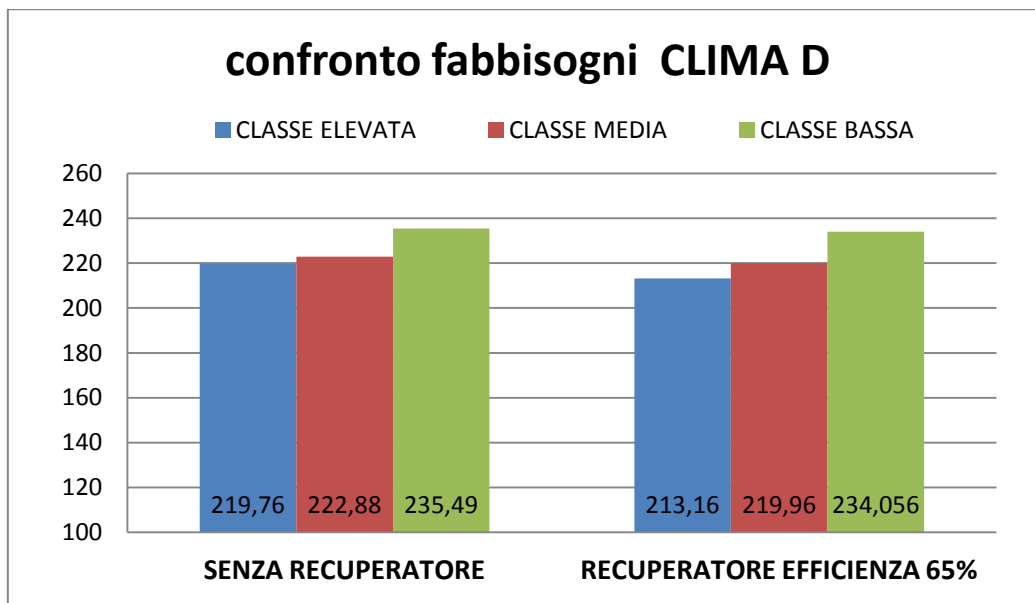
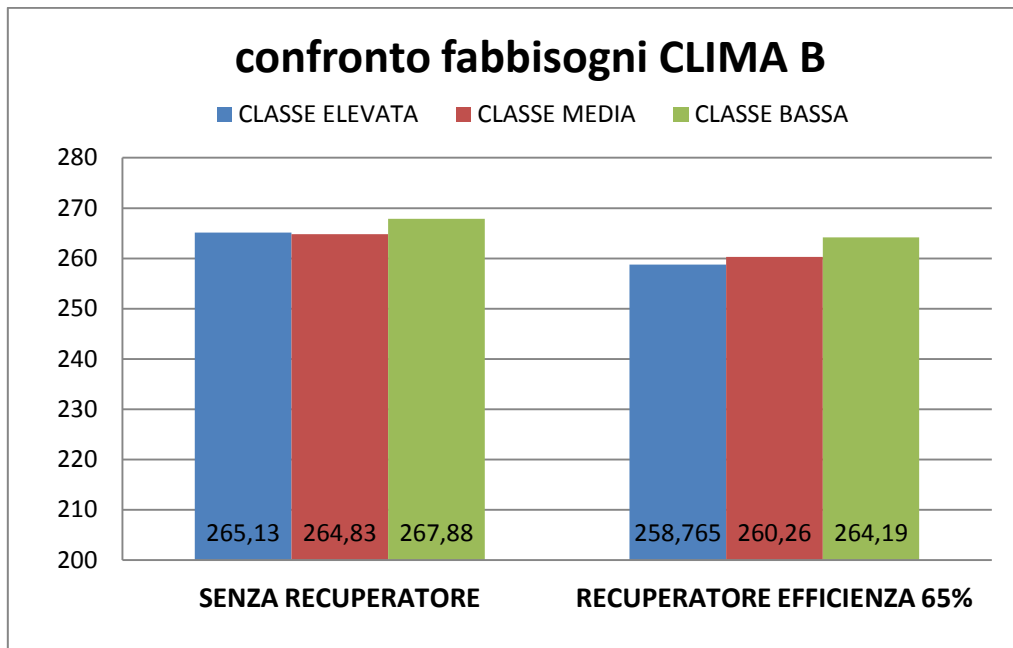
Tabella 12.3 Temperatura aria esterna durante effettiva accensione cooling

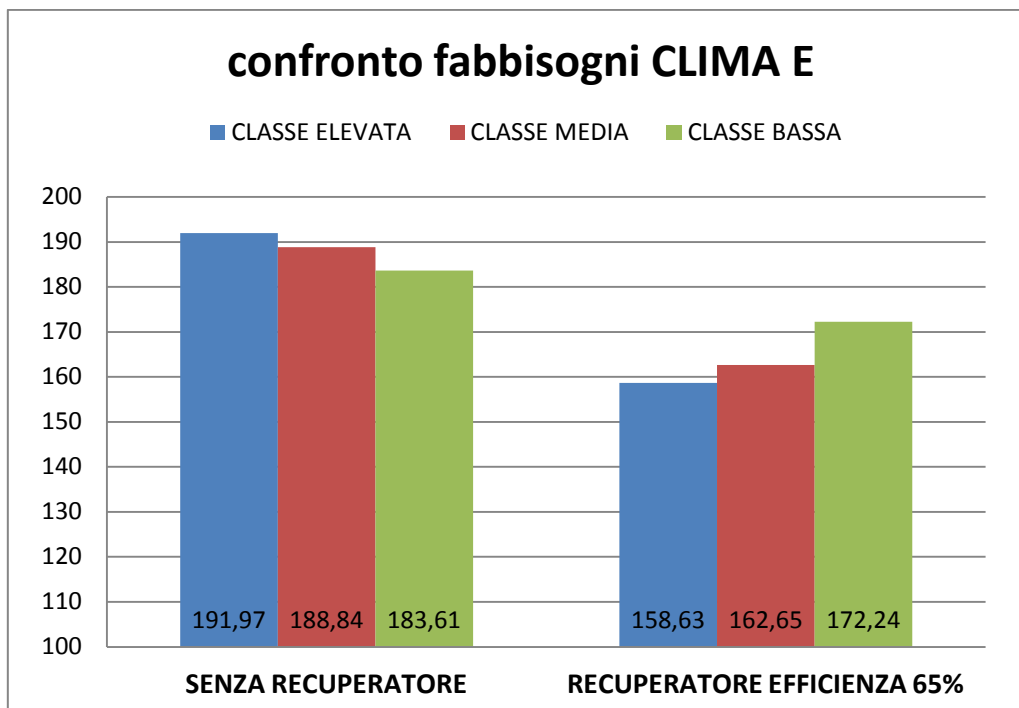
La tabella riporta le percentuali di volte in cui la temperatura dell'aria esterna risulta essere inferiore ai 26 °C in corrispondenza alle effettive ore , all'interno delle ore in cui il sistema di raffrescamento può funzionare, in cui l'edificio necessita di cooling.

Le percentuali trovate risultano molto elevate in tutte le zone climatiche a testimonianza dello svantaggio all'utilizzo del recuperatore per gran parte del tempo. Inoltre, spostandosi verso climi più "freddi", le percentuali aumentano.

Implementando la modalità di funzionamento in "free cooling" nel modello sono stati ottenuti consumi inferiori rispetto ad uno stesso modello in assenza di recuperatore. Le tabelle precedentemente riportate sembrerebbero indicare che l'eventuale assenza di un recuperatore, nelle date condizioni strutturali e occupazionali, costituirebbe una buona soluzione "impiantistica" dal momento che si ricorre molto spesso all'immissione diretta d'aria;facendo però funzionare il recuperatore in modo "intelligente" si è riusciti a sfruttare le condizioni naturali favorevoli quando necessario e si è ricorsi invece alla sua accensione per il resto del tempo.

Di seguito è riportato il grafico che confronta per i 3 diversi climi i casi con e senza recuperatore. Anche per quest'ultimo è stato attuato un controllo dell'umidità al 55% durante il regime di raffrescamento. I consumi confrontati sono quindi totali.





Il confronto dimostra che i consumi con il caso che prevede il recuperatore siano in media minori in tutte i casi climatici considerati rispetto al caso in assenza di recuperatore; in particolare si ha che:

CLIMA B: - **1,85%**

CLIMA D : - **1.67 %**

CLIMA E : - **14.57 %**

Nel clima E si ha la maggior diminuzione di fabbisogni di ventilazione; ciò può essere spiegato con il fatto che aumenta rispetto agli altri climi il numero di volte in cui l'aria immessa in ambiente sia quella "passata" attraverso il recuperatore e non quella esterna; sebbene la tabella 14 presupponga lunghi di periodi di non utilizzo del recuperatore, è altrettanto vero che il 10% delle volte che la temperatura è inferiore a 26 gradi, è minore di 0 gradi e ciò corrisponde ad un fabbisogno di riscaldamento e non più raffrescamento.

13. CONSUMI AUSILIARI

L'impianto VMC considerato nel modello prevede l'utilizzo di un recuperatore statico di calore a flussi incrociati e di opportuni ventilatori di estrazione e di mandata, solitamente centrifughi. Nel computo dei consumi totali è necessario stimare il fabbisogno di energia elettrica richiesto dai 2 ventilatori che devono avere caratteristiche tali da poter lavorare con i tre valori di portata d'aria calcolata attraverso normativa. Esiste un impianto VMC per ciascuno dei 3 piani. Per fare una stima corretta dei consumi degli ausiliari utilizzeremo diversi ventilatori a seconda della portata considerata mentre fisicamente i ventilatori installati saranno uguali per le diverse condizioni di funzionamento. La tipologia di ventilatori che può soddisfare le nostre esigenze di ventilatori è stata trovata da catalogo; è stata scelta una cassa di ventilazione auto/igroregolabile, disponibile in vari modelli che ha le seguenti caratteristiche [1]:

Fissando una prevalenza di 200 Pa dovuta alle canalizzazioni di adduzione ed estrazione dell'aria e considerando di volta in volta le 3 portate di ventilazione troviamo la potenza del ventilatore basandosi sulle curve caratteristiche proposte da catalogo, ipotizzando, nei 3 casi, costante portata d'aria;

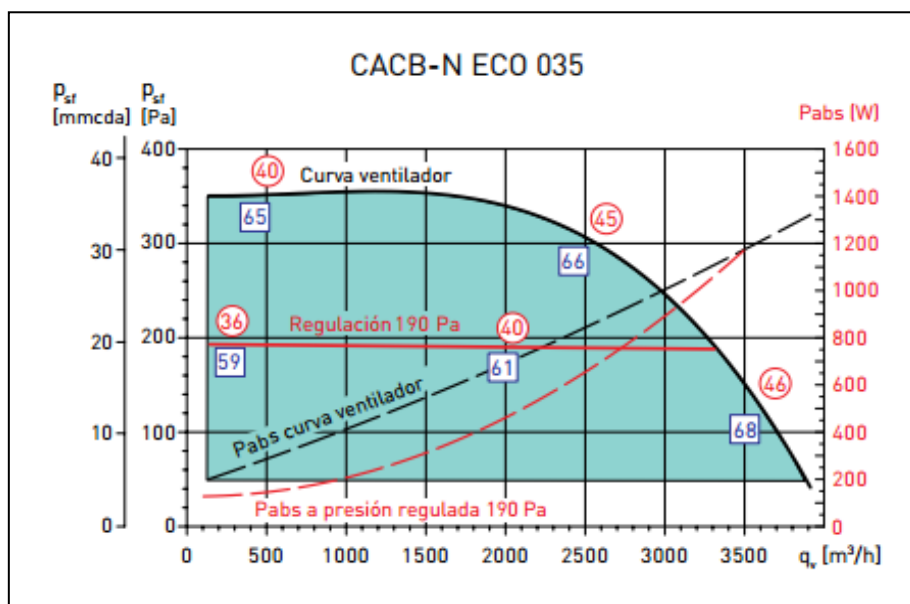


Figura 13.1 Curva caratteristica ventilatore CACB-N ECO 022 [1]

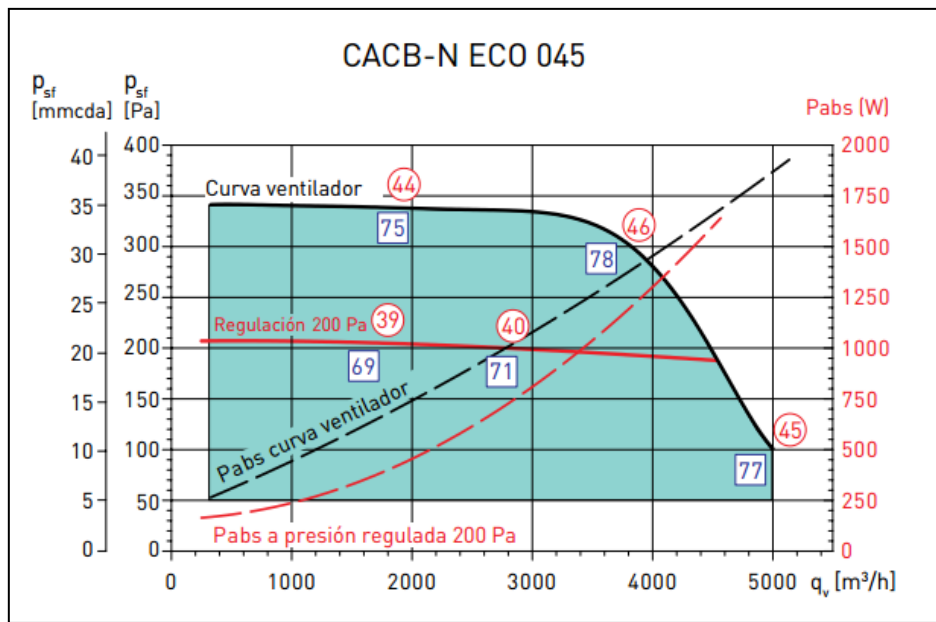


Figura 13.2 Curva caratteristica ventilatore CACB-N ECO 035 [2]

La potenza necessaria per ventilare la Portata Bassa prevista dalla normativa, data la prevalenza, è ricavata in figura 13.1, che da catalogo prevede:

portata d'aria (m³/h)	Min	140
	Max	3900
Potenza nominale (W)		550

Con:

Portata = 1929.6 m³/h

Prevalenza = 200 Pa

Si ha che:

Potenza = 450 W

Con

Portata = 2779,2 m³/h

Prevalenza = 200 Pa

Si ha che:

Potenza = 800 W

La Potenza necessaria per ventilare la portata elevata prevista dalla normativa, data la prevalenza, è ricavata dal grafico 13.2, che da catalogo prevede

portata d'aria (m³/h)	Min	400
	Max	5000
Potenza nominale (W)		1100

Con :

Portata = 3319.2 m³/h

Prevalenza = 200 Pa

Si ha che:

Potenza = 1000 W

Di seguito vengono calcolati i fabbisogni di energia degli ausiliari comprensivi dei 3 piani nei tre casi sapendo che:

Numero di ore in cui è accesa la ventilazione = 2349 ore

Numero di ventilatori per piano = 2 (estrazione ed immissione)

Numero di piani dell'edificio = 3

PORTATA MINIMA

fabbisogno di energia = 0.45 KW * 2 * 2349 h * 3 = 10.57 kWh/m² anno

PORTATA MEDIA

fabbisogno di energia = 0.8 KW * 2 * 2349 h * 3 = 18.792 kWh/m² anno

PORTATA MASSIMA

fabbisogno di energia = 1 KW * 2 * 2349 h * 3 = 23.49 kWh/m² anno

Per avere un'idea del consumo elettrico dei ventilatori è utile calcolare la potenza specifica dei ventilatori (SPF); è un parametro di consumo energetico per la valutazione degli impianti di ventilazione. Per ventilatori progettati con ottimi criteri di design e con costi di life cycle ottimizzati, il SPF varia tra 0,5 e 2 KWh/(m³/s) [2].

Essendo quindi $SPF = \frac{P}{\dot{V}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3/\text{s}} \right]$, si avranno:

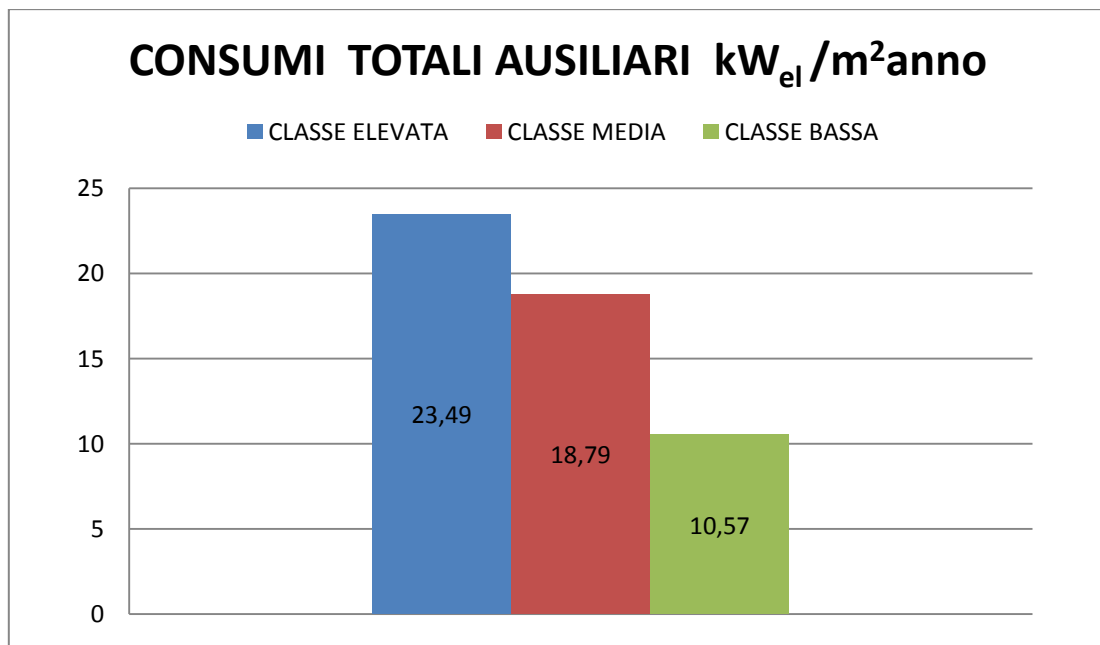
$$\text{CLASSE ELEVATA} \quad SPF = \frac{0.45}{0.922} = 0.488 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}}$$

$$\text{CLASSE MEDIA} \quad SPF = \frac{0.8}{0.772} = 1.036 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}}$$

$$\text{CLASSE A BASSA} \quad SPF = \frac{1}{0.536} = 1.865 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3/\text{s}}$$

Quindi siamo all'interno dei range consigliati.

Vengono di seguito graficati i consumi energetico degli ausiliari per le 3 Classi di qualità.



Si può facilmente notare che il fabbisogno degli ausiliari per ventilare la portata elevata prevista da normativa, risulta essere maggiore di circa il 122% rispetto alla spesa elettrica per la portata minima; per la portata media invece il fabbisogno cresce di circa il 25%.

14. CONCLUSIONI

La ricerca condotta su base nazionale dimostra un sostanziale rispetto delle prescrizioni stabilite dalla UNI10339/95 relativamente al dimensionamento degli impianti aeraulici; in più occasioni i regolamenti vigenti locali si rifanno a tabelle ASHRAE e ACGIH.

Talvolta sono previste portate d'aria di rinnovo diverse per gli stessi impianti aeraulici a seconda che la funzione sia ventilazione o condizionamento.

Per un edificio adibito a "terziario" dotato di impianto VMC e costruito seguendo parametri costruttivi diversi a seconda delle zone climatiche, i fabbisogni energetici (sensibili) per la ventilazione aumentano al diminuire delle portate, in tutti i casi climatici; Ciò è dovuto alla forte ermeticità dell'involucro edilizio e alla presenza di elevati carichi interni, oltre che, secondariamente, all'andamento della temperatura esterna durante le ore lavorative previste.

I consumi energetici calano, in generale, dal clima più caldo (B) al clima più freddo (E) per tutte le portate di rinnovo corrispondenti alle classi Elevata, media, e bassa di qualità dell'aria. Il carico di raffrescamento è prevalente.

Per ottimizzare i consumi spesso si ricorre al "free cooling" essendo elevato il numero di volte in cui la temperatura esterna è minore della temperatura di set point (26 gradi); nonostante ciò, il confronto con il modello senza il recuperatore dimostra che i consumi siano comunque minori (in media per le tre condizioni climatiche) di circa 6.03%.

Le spese elettriche degli ausiliari d'impianto risultano, partendo dalla portata di ventilazione più elevata andando alla più bassa, rispettivamente, 23, 19 e 11 kW_{el} / m²anno

15. BIBLIOGRAFIA

CAP 1

- [1] Energy Saving and indoor air quality in office buildings;
- [2] PAE, Piano d'Azione italiano per l'efficienza energetica, Luglio 2014

CAP 2

- [1] Spengler JD, Sexton K. Indoor air pollution: a public health perspective. *Science* 1983;221:9-1
- [2] Bardana Jr EJ. Sick Building Syndrome—a Wolf in Sheep's Clothing. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology* 1997;79:283-94.
- [3] ISO 7730-2005
- [4] ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004- Ventilation for acceptable indoor air quality
- [5] www.engineeringtoolbox.com/co2-persons-d
- [6] Barbieri D, Pietrafesa M, Rizzo G. Qualità dell'aria interna e requisiti di ventilazione, Classificazione degli inquinanti, riferimenti normativi, metodi di calcolo. Università di Reggio Calabria- Facoltà di Ingegneria, 1996
- [7] TenWolde A, Pilon CL. The effect of indoor humidity on water vapor release in homes. *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X 2007*
- [8] Spengler JD, Sexton K. Indoor air pollution: a public health perspective. *Science* 1983;221:9-17.
- [9] Hines AL. *Indoor air: Quality and control*. 1993.
- [10] EEC. Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings, European Concerted Action: Indoor Air Quality and its impact on man (COST Project 613), Report n. 11, Commission of the European Communities, Luxembourg
- [11] Rossetti M. Rilascio di radon: problematiche di rilevamento e valutazione dei fattori di rischio. *Rilascio di radon: problematiche di rilevamento e valutazione dei fattori di rischio* 2009.
- [12] Zhang L, Lei X, Guo Q, Wang S, Ma X, Shi Z. Accurate measurement of the radon exhalation rate of building materials using the closed chamber method. *Journal of Radiological Protection* 2012;32:315.
- [13] Scantamburlo Alessio- *Analisi sperimentale con gas tracciante di una unità per la ventilazione meccanica residenziale*, 2015

CAP 3

- [1] Villi-Zecchin-Bariani - Il moto dell'aria all'interno di ambienti confinati, 2009.
- [2] UNIVPM. <http://www.termofluido.univpm.it/ambienticostr.htm>
- [3] Barbieri D, Pietrafesa M, Rizzo G. Qualità dell'aria interna e requisiti di ventilazione, Classificazione degli inquinanti, riferimenti normativi, metodi di calcolo. Università di Reggio Calabria-Facoltà di Ingegneria, 1996
- [4] [www. Idrotermoesinese.it](http://www.Idrotermoesinese.it)
- [4] Lindab s.r.l. www.lindab.com
- [5] <http://www.vita-nova.it/sistemi-di-ventilazione-vmc/>

CAP 4

- [1] Energy vs. ventilation rate in buildings: A comprehensive scenario-based assessment in the European context, 2012, 54, 0, 111-121
- [2] US DOE Quadrennial Technology Review, <http://energy.gov/sites/prod/files/ReportOnTheFirstQTR>
- [3] M.W.Liddament, M.Orme-Energy and ventilation
- [4] Orme,M.-Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures: Energy Build., 2001, 33, 3, 199-205
- [5] Provata. E, Kolokotsa D.-energy saving and indoor air quality in office buildings
- [6] P.Wargocki, D.P.Wyon, J Sundell, G. Clausen, PO Fanger-The effects of Outdoor Air Supply Rate in an Office on Perceived Air Quality, Sick Building Syndrome (SBS) and Productivity, 2000.
- [7] W. J. Fisk, D. Black, G. Brunner- Changing ventilation rates in U.S. offices: implications for health, work, performance, energy and associated economics, 2011
- [8] Wargocki P¹, Sundell J, Bischof W, Brundrett G, Fanger PO, Gyntelberg F, Hanssen SO, Harrison P, Pickering A, Seppänen O, Wouters P.- Ventilation and health in non-industrial indoor environments: report from a European multidisciplinary scientific consensus meeting (EUROVEN). Indoor Air. 2002 Jun;12(2):113-28.
- [9] Donghyun Rim ,Stefano Schiavon, William W. Nazaroff- Energy and Cost Associated with Ventilating Office Buildings in a Tropical Climate
- [10] Joppolo CM, Leone C, Molinaroli L. Recuperatori di calore aria-aria: tecnologie e prestazioni. AICARR 2006.
- [11] UNI EN. UNI EN 308 "Scambiatori di calore – Procedimenti di prova per stabilire le prestazioni dei recuperatori di calore aria/aria e aria/gas".

CAP 5

[1] UNI 10339-Impianti aeraulici ai fini di benessere: Generalità, classificazione, requisiti; Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura

[2] prUNI10339 "Impianti aeraulici per la climatizzazione-Classificazione, prescrizione e requisiti prestazionali per la progettazione e la fornitura"

[3] ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004- Ventilation for acceptable indoor air quality

CAP 6

[1] Regolamento comunale Igiene e Sanità pubblica e Ambientale Approvato con Delibera di C.C. n. 19 del 16 Febbraio 2009 Pescara

[2] Regolamento di igiene e sanità pubblica-Comune di Vibo Valentia

[3] REGOLAMENTO DI IGIENE E SANITÀ PUBBLICA Approvato dal Consiglio Comunale nella Seduta dell' 8 Aprile 2002.

[4] Regolamento di igiene, sanità pubblica e veterinaria Approvato dal Consiglio Comunale con deliberazione n. 250 del 16 – 12 - 03, esecutivo dal 10 – 01 – 2004

[5] Regolamento edilizio ed urbanistico comunale tipo

[6] Azienda Sanitaria Genovese 3 : INDICAZIONI, APPROFONDIMENTI TECNICI E OPERATIVI IN MATERIA DI IGIENE NEI LUOGHI DI LAVORO E AMBIENTALE

[7] Azienda Sanitaria Locale n. 5 "Spezzino"- Indirizzi di riferimento per i requisiti igienico-sanitari e di sicurezza degli ambienti di lavoro Ottobre 2007

[8] Settore Sanità e Igiene Regolamento Locale di Igiene – tipo (ex art. 53 della L.R. 26 ottobre 1981, n° 64)

[9] Azienda sanitaria locale della provincia di Sondrio- regolamento locale di igiene

[10] Regolamento edilizio per la qualità paesaggistica la sostenibilità ambientale e l'efficienza energetica - Cremona

[11] Regolamento di igiene del comune di Milano

[12] Regolamento edilizio Ancona

[13] Dipartimento di prevenzione servizio igiene e sanità pubblica Novara- Impianto di Ventilazione e di condizionamento nei locali commerciali e di lavoro;

[14] Linee Guida "valutazione dei progetti edili per i locali di lavoro da adibire all'esercizio di attività produttive"

[15] Regolamento igiene e sanità pubblica Biella

[16] Regolamento comunale d'igiene- città di Alessandria

[17] Regolamento comunale di igiene e sanità Cuneo

[18] REGOLAMENTO DI IGIENE E SANITÀ PUBBLICA Approvato dal Consiglio Comunale nella Seduta del 28.07.2003 deliberazione n. 113 Art. 94 emendato nella seduta del 25.07.08 deliberazione n. 62-Lecce

[19] Regolamento edilizio Comune di Oristano

[20] Regolamento edilizio comune di Livorno

[21] indirizzi tecnici di igiene edilizia per i locali e gli ambienti di lavoro-Lucca

[22] Regolamento edilizio COMUNE di Firenze

[23] Regolamento edilizio comunale città di Perugia

[24] Circolare Regione Veneto del 1° luglio 1997 n. 13

CAP 7

[1] Dal Ben Stefano- Analisi energetiche mediante simulazioni dinamiche per la valutazione dei consumi energetici di un edificio residenziale, 2012.

CAP 8

[1] Decreto Legislativo n. 311 del 29.12.2006 Novità imposte dal decreto LGS n.311/2006 sulla certificazione energetica degli edifici.

[2] NORMA UNI 10351: Materiali da costruzione- conduttività termica e permeabilità al vapore

[3] NORMA UNI 10355: Murature e solai- valori della resistenza termica e metodi di calcolo

[4] NORMA UNI EN ISO 6946-2008: Componenti ed elementi per edilizia Resistenza termica e trasmittanza termica; Metodo di calcolo

CAP 9

[1] ISO 7730-2005

[2] UNI EN. UNI EN 308 “Scambiatori di calore – Procedimenti di prova per stabilire le prestazioni dei recuperatori di calore aria/aria e aria/gas”.

[3] D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412 . Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della L. 9 gennaio 1991, n. 10

CAP 13

[1] <http://www.solerpalau.it/product.jsp?PRODUCTID=525&CATEGORYID=48>

[2] Lars J.Nilsson- air handling energy efficiency and design practices Energy and Buildings volume 22, issue 1