POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Costi energetici di ventilazione associati alla filtrazione dell'aria: monitoraggio di filtri ad elevata efficienza applicati al Grattacielo Intesa San Paolo



Relatore

prof. Marco Simonetti

Candidato

Rolando Ismael Ramirez Lujan

Anno Accademico 2018/2019

Ringraziamenti

Per lo sviluppo di questa tesi è stata molto importante la consulenza di Michele Acerenza e Gabriele Bosco di Camfil, ai quali vanno i miei sentiti ringraziamenti.

Ringrazio particolarmente Marco Mandes, Paolo Barone e Gianluca Greco di CBRE (ex Geico Lender) per il tempo e la professionalità che mi hanno dedicato.

Ringrazio l'ing. Matteo Bo per l'accesso all'archivio dello studio Prodim.

Ringrazio la mia famiglia e i miei amici per avermi supportato e sopportato in questi anni.

Indice

Sc	ommario		1
1.	Introduzior	ne	2
2.	Qualità del 2.1 2.2 2.3 2.4	l'aria Il particolato atmosferico Legislazione Effetti sulla salute Qualità dell'aria in Italia	3 5 5
3.	La filtrazion 3.1 3.2 3.3	Meccanismi della filtrazione Tipologie di filtri Normative 3.3.1 EN 13779:2007 3.3.2 Differenze con la nuova EN 16798-3:2018 3.3.3 ISO 16890:2016 3.3.4 Raccomandazione Eurovent 4/23-2018	10 13 16 16 19
4.	4.1	e consumi energetici Effetto delle perdite di carico Teoria e studi sul consumo energetico dei filtri Raccomandazione Eurovent 4/21-2018	27 31
5.	5.1 5.2	test Componenti delle UTA Filtri testati Funzionamento e regolazione delle UTA Strumentazione	46 48 50
6.	Misure effe	ettuateStima dei volumi d'aria trattati	

6.2	Perdite di carico nel periodo di confronto	59
6.3	Consumo energetico secondo linee guida Eurovent .	65
6.4	Curve pressione-portata	66
6.5	Stima del rendimento medio	75
6.6	Consumo energetico dei filtri	78
7. Analisi dei	i dati del monitoraggio	82
9 Cooto ann	uale dei filtri	01
o. Costo ann	luale del IIIti	91
9. Conclusio	ni	96
10. Bibliograf	fia	98

Sommario

L'obiettivo di questa tesi è valutare l'incidenza del consumo energetico dei filtri nelle Unità di Trattamento Aria che variano la ventilazione in base alle effettive esigenze degli occupanti (a seconda dei livelli di CO₂), impiegate in un edificio moderno ed efficiente dal punto di vista energetico come il Grattacielo San Paolo di Torino

Sono stati testati filtri forniti dall'azienda Camfil S.p.A, interessata ad avere conferma delle minori perdite di carico, della maggiore durata e del minore consumo che il suo prodotto dovrebbe garantire grazie a un design che comporta una maggiore superficie filtrante, e confrontati con i filtri usati nel Grattacielo, che hanno minor costo d'acquisto.

Si è fatta dapprima un'introduzione al mondo della filtrazione dell'aria, spiegando l'importanza che ha acquisito negli ultimi anni e che ha portato a cambiamenti importanti, e poi una rassegna di ricerche e studi che hanno provato a quantificare gli effetti dei filtri sul consumo di energia negli impianti tradizionalmente usati nelle applicazioni civili (CAV, VAV) per vedere quali fossero le differenze tra i sistemi in esame.

L'analisi è stata fatta tramite il monitoraggio delle portate, del consumo energetico e delle potenze dei ventilatori delle identiche UTA in cui sono stati installati i filtri. Poiché non è stato possibile inserire dei data logger per registrare continuamente le cadute di pressione nei filtri, si è tentato un approccio teorico-pratico basato su misure periodiche delle perdite di carico dei filtri e sulla caratterizzazione dei filtri.

Sfortunatamente il periodo di monitoraggio è stato più breve di quanto previsto, ma si è potuto constatare che le perdite di carico siano molto minori per i filtri più innovativi, garantendo una durata di gran lunga maggiore e un minor aumento dell'assorbimento di potenza rispetto ai filtri tradizionalmente usati.

Su richiesta dell'azienda che si occupa della gestione del Grattacielo si è poi fatta una stima economica dei costi annuali delle soluzioni filtranti confrontate, dalla quale è risultato evidente il vantaggio che comportano filtri più efficienti, anche se con un costo d'acquisto più alto.

1. Introduzione

L'importanza della filtrazione dell'aria nelle applicazioni civili è ormai consolidata dal punto di vista della qualità dell'aria e del suo impatto sanitario, sociale ed economico.

Lo è forse meno dal punto di vista energetico, visto che il consumo di energia per la ventilazione dovuto ai filtri di solito non viene monitorato e viene tenuto in poco conto nelle valutazioni delle prestazioni.

Nonostante i molti interventi e le numerose normative degli ultimi anni, come la EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) che mira a migliorare le prestazioni energetiche degli edifici, c'è ancora molto spazio di intervento: nel settore residenziale i consumi di energia destinati al condizionamento degli ambienti corrispondevano al 53% del totale negli USA e al 68% nell'UE nel 2003. [1] Per gli edifici non residenziali, il consumo per i sistemi HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) è quasi del 50% per gli uffici, che insieme ai negozi impiegavano più del 50% del consumo energetico di questo settore (fonte IEA).

Considerando che tra i componenti degli impianti HVAC i filtri sono tipicamente quelli meno costosi e sui cui si può intervenire più facilmente, risulta interessante valutare che vantaggi possa comportare la scelta di filtri efficienti in termini energetici ed economici.

2. Qualità dell'aria

Il problema dell'inquinamento atmosferico ai giorni nostri continua ad essere di enorme importanza, nonostante molti provvedimenti siano stati presi sia a livello globale che locale.

Nel 2013 la IARC (International Agency fo Research on Cancer) ha stabilito che ci sono evidenze sufficienti per inserire l'inquinamento dell'aria e il particolato atmosferico, che ne è una delle componenti principali, nel Gruppo 1, quello delle sostanze cancerogene per l'uomo.

Secondo il Global Health Observatory (GHO), il portale del sito della WHO (World Health Organization) che analizza le statistiche relative alla salute, l'inquinamento dell'aria ha contribuito al 7,6% delle morti totali nel 2016.

Stando a dati aggiornati al 2018, più dell'80% delle persone che vivono nelle zone urbane monitorate sono esposte a un livello di inquinamento che supera i limiti stabiliti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità, e questo vale soprattutto per il 97% delle città con più di centomila abitanti in paesi poveri e in via di sviluppo (fonte: WHO)

2.1 Il particolato atmosferico

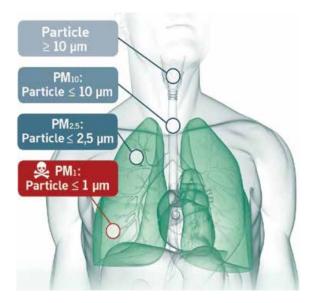
Il particolato, o pulviscolo, atmosferico è l'insieme di particelle organiche e inorganiche in sospensione nell'aria e di origine antropica o naturale (incendi, eruzioni vulcaniche, aerosol marino, pollini).

Viene detto primario se emesso direttamente in atmosfera (da processi industriali, riscaldamento domestico, traffico veicolare, ecc.) mentre il particolato secondario è quello che si forma attraverso reazioni chimiche tra altre specie inquinanti in atmosfera.

Le concentrazioni dei diversi inquinanti nel particolato dipendono oltre che dalle diverse sorgenti, dalla regione geografica in oggetto ma soprattutto da fattori metereologici (ventosità, piovosità, presenza di stabilità atmosferica, altezza media dello strato di dispersione degli inquinanti, ecc.). [2]

Si è soliti suddividerlo in tre categorie in base alla dimensione:

- particolato grossolano: costituito da particelle di diametro superiore a 10 µm (micrometri o micron), di cui la maggior parte sono trattenute dalla parte superiore dell'apparato respiratorio (naso, faringe, laringe)
- particolato fine: è ulteriormente suddiviso in PM10 se ha un diametro inferiore a 10 µm e in PM2,5 se il diametro è inferiore ai 2.5 µm. Il PM10 può superare la parte superiore dell'apparato respiratorio e arrivare nella regione tracheo-bronchiale, il PM2,5 è in grado di penetrare in profondità nei polmoni.
- Particolato ultrafine: un sottoinsieme del particolato fine, con diametro inferiore a 1 μm (PM1) in grado di raggiungere gli alveoli polmonari e, attraverso questi, addirittura il flusso sanguigno e, potenzialmente, raggiungere gli altri organi del corpo. Negli ultimi anni diversi studi hanno mostrato come queste particelle siano tra le più nocive, da cui deriva la necessità di una loro limitazione a livello legislativo come per il PM10 e il PM2,5



Fonte: Eurovent 4/23 - 2018 [3]

Il ruolo del particolato atmosferico più fine, infatti, è un argomento che deve essere ancora studiato e analizzato a fondo, ma dai dati in possesso si può già capire come esso sia con tutta probabilità il più pericoloso. Considerando inoltre che, da stime effettuate dall'OMS nel 2018 basate sui dati disponibili per l'anno 2016, il 91% della popolazione mondiale è esposta a

concentrazione medie annuali di PM2,5 (fonte: WHO) che superano le linee guida dell'OMS sulla qualità dell'aria, si può capire l'estensione del problema.

Le particelle con diametro inferiore ai 2,5 µm hanno una maggiore probabilità di formarsi durante la combustione, tendono ad assorbire più componenti tossici, si depositano con più efficienza nel tratto respiratorio, hanno una maggiore concentrazione numerica per metro cubo e così una superficie totale maggiore.

2.2 Legislazione

In Italia il Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n.155 ha recepito la direttiva europea 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa. In esso si stabiliscono gli inquinanti da monitorare, i loro valori limite e i valori obiettivo da raggiungere:

Valore massimo annuale	per la media	Valore massimo giornaliero		
PM10 [µg/m ³]	PM2.5 [µg/m³]	PM10 [g/m ³]	PM2.5 [µg/m ³]	
40 25		50	-	

Sono consentiti al massimo 35 superamenti del limite giornaliero in un anno per il PM10 mentre non è specificato per il PM2.5, per il quale tuttavia è posto come obiettivo di arrivare per il 2020 a un limite di 20 µg/m³.

2.3 Effetti sulla salute

Nelle Air Quality Guidelines del 2005 [4] vengono indicati i problemi più gravi per la salute umana legati all'inquinamento dell'aria per esposizioni a lungo termine: mortalità a causa di malattie respiratorie e cardiocircolatorie, malattie croniche respiratorie (asma, broncopneumopatia cronica ostruttiva, ecc.), cancro ai polmoni, malattie croniche cardiocircolatorie, restrizione della crescita intrauterina.

Per quanto riguarda il particolato, lo studio degli effetti sulla saluta risulta molto complicato a causa della grande varietà di elementi che lo compongono. L'OMS ha stabilito dei valori limite per esposizioni al particolato a lungo (un anno) e a breve (un giorno) termine.

Nel primo caso si tratta del minimo valore per il quale si hanno forti correlazioni tra un'esposizione al PM2,5 e la mortalità (nel caso a lungo termine si incominciano ad avere effetti significativi sulla salute per concentrazioni annuali medie nel range 11-15 µg/m³). Vengono inoltre segnalati degli obiettivi intermedi (Interim Target) da raggiungere gradualmente per arrivare al valore limite che servono anche a mostrare i rischi che si potrebbero avere al variare delle concentrazioni di particolato.

Per trovare il corrispondente valore limite per il PM10 si è usato un rapporto PM2,5/PM10 pari a 0,5.

	PM10 [µg/m³]	PM2,5 [µg/m³]	Effetti del livello di concentrazione
IT-1	70	35	Corrisponde a un aumento del 15% del rischio di mortalità a lungo termine rispetto all'AQG
IT-2	50	25	Riduce il rischio di mortalità prematura di circa il 6% rispetto al livello IT-1
IT-3	30	15	Oltre ad altri effetti benefici per la salute, riduce il rischio di mortalità del 6% rispetto al livello IT-2
Air Quality Guideline (AQG)	20	10	Livello più basso per il quale la mortalità cresce con una fiducia di oltre il 95%

Nel caso di esposizione a breve termine, studi su città in Europa, Stati Uniti e Asia hanno registrato valori simili a circa lo 0,5% di aumento di mortalità per ogni 10 μ g/m³ di incremento nella concentrazione giornaliera di PM10 (per cui a 150 μ g/m³ di PM10 corrisponderebbe un aumento di circa il 5% di mortalità che sarebbe di grande preoccupazione).

PM10	PM2,5	Effetti del livello di concentrazione
[µg/m ³]		
	[µg/m ³]	

IT-1	150	75	Corrisponde a un incremento di circa il 5% della mortalità a breve termine rispetto all'AQG	
IT-2	100	50	Corrisponde a un incremento di circa i 2,5% della mortalità a breve termine rispetto all'AQG	
IT-3	75	37,5	Corrisponde a un incremento di circa il 1,2% della mortalità a breve termine rispetto all'AQG	
Air Quality Guideline (AQG)	50	25	Si basa sulla relazione tra la concentrazione media giornaliera e quella media annuale	

Oltre alle problematiche sanitarie citate ce ne sono altre tipicamente dovute all'inquinamento indoor, che un efficiente sistema di filtrazione dovrebbe contribuire a ridurre, che interessano particolarmente edifici destinati a impiegati e lavoratori come il Grattacielo San Paolo.

Esse sono principalmente (fonte: Ministero della Salute):

• Sindrome dell'edificio malato: la Sick Building Syndrome è definita come un insieme di sintomi che si manifesta in un elevato numero di occupanti edifici moderni e che è legato non ad una malattia specifica ma al tempo passato nell'edificio. Questi sintomi sono: mal di testa, sonnolenza, difficoltà di concentrazione, nausea, irritazione agli occhi, al naso e alla gola, problemi respiratori, eruzioni cutanee, concomitanza di malattie infettive. Spesso per guarire basta allontanarsi dall'edificio "malato" per brevi periodi, ma se si tratta di ambienti lavorativi questo comporta un calo della produttività e quindi un costo sociale ed economico non indifferente.

Le cause sono soprattutto dovute a inefficienti sistemi di condizionamento e ventilazione, che fanno ricircolare aria viziata piena di batteri e inquinanti.

 Malattie associate agli edifici: per Building-Related Ilnesses si intendono quelle patologie causate o aggravate dall'esposizione a fattori di rischio indoor. Tra queste le principali sono: infezione da Legionella, asma occupazionale, polmonite da ipersensibilità, febbre da inalazione. Sindrome da sensibilità chimica multipla: la Multiple Chemical Sensitivity è definita come un disturbo cronico, reattivo all'esposizione a sostanze chimiche a livelli inferiori rispetto a quelli generalmente tollerati da altri individui. Sintomi più frequenti sono: malessere generale, senso di stanchezza, nausea, mal di testa, disturbi gastrointestinali e delle vie respiratorie.

2.4 Qualità dell'aria in Italia

Dal XIV Rapporto sulla Qualità dell'ambiente urbano dell'Ispra (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) [5], in particolare dal capitolo "Inquinamento dell'aria e cambiamenti climatici", possiamo ricavare un quadro informativo aggiornato e il più completo possibile sulle emissioni di particolato nelle regioni italiane.

Per quanto riguarda il PM10, nel Rapporto sono state analizzate 106 tra città e aree urbane italiane per il 2017, e sono stati registrati superamenti del valore limite giornaliero in 35 aree urbane, di cui 30 nel nord e 5 nel centrosud. La città con il maggior numero di superamenti giornalieri è stata Torino con 118.



Fonte: elaborazione ISPRA su dati APPA/ARPA

Tuttavia, dall'analisi delle serie storiche annuali di 90 stazioni di monitoraggio risulta che, per il periodo 2008-2017, c'è stata una tendenza alla riduzione della concentrazione di PM10 in 73 casi.

Per quanto riguarda le emissioni di PM2.5 si hanno, per il 2017, dati su 84 aree urbane: sono indicati superamenti del valore limite annuale in 13 aree urbane, tutte nel nord, e la città col valore più elevato registrato è stata Padova (34 μ g/m³).



Fonte: elaborazione ISPRA su dati APPA/ARPA

Anche per il PM2,5 si registra, per il periodo 2010-2017, una tendenza alla riduzione della concentrazione in 29 casi su 41 analizzati.

Si può concludere che c'è stata una tendenza alla riduzione del PM10 e del PM2,5 negli ultimi 10 anni in Italia, che indica come gli interventi per migliorare la qualità dell'aria abbiano dato risultati ma, soprattutto nell'area della pianura padana, le concentrazioni continuano ad essere elevate, in particolare a Torino.

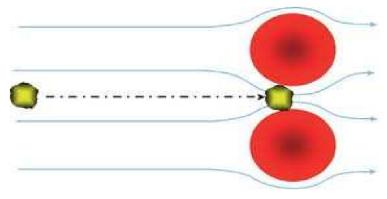
3. La filtrazione dell'aria

Il fine della filtrazione è quello di assicurare una buona qualità dell'aria che respiriamo, e considerando che statisticamente nei paesi sviluppati le persone passano il 90% della del loro tempo in ambienti confinati, il loro ruolo è fondamentale.

3.1 Meccanismi della filtrazione

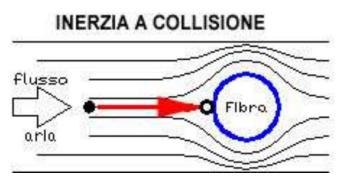
Sono essenzialmente cinque [6]:

I. meccanismo di setaccio: quando l'aria passa nel filtro, le particelle grossolane con diametro maggiore della distanza tra le fibre del filtro non riescono a passare e sono quindi catturate e si fermano nei punti d'intersezione delle fibre, mentre quelle più piccole (0,3÷0,4 μm) si depositano lungo le fibre stesse per l'azione di forze elementari di attrazione elettrostatica. Questo meccanismo non è influenzato dalla velocità delle particelle ed è il più efficiente per quelle con dimensioni maggiori di 5 μm.



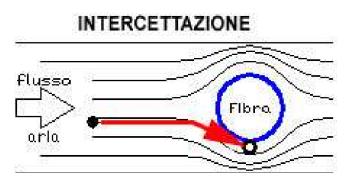
Fonte: brochure Camfil

II. meccanismo di inerzia: a causa della loro inerzia, le particelle trasportate dal flusso d'aria non seguono la direzione delle molecole del gas quando queste subiscono una brusca deviazione passando nel filtro, ma tendono a continuare la loro traiettoria quindi collidono con le fibre e vi aderiscono grazie alla viscosità degli oli o di altri agenti con cui sono trattate. L'efficienza di questo meccanismo, usato spesso come metodo di pre-filtrazione, aumenta all'aumentare della velocità dell'aria.



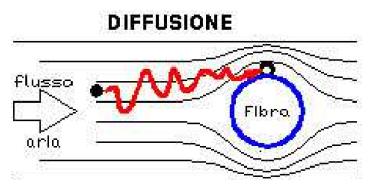
Fonte: brochure Camfil

III. meccanismo di intercettazione: sfrutta il fatto che il flusso d'aria in prossimità delle fibre del filtro tende a seguirne il contorno trascinando le particelle più fini (tra 1μm e 3 μm) e leggere, e se la traiettoria delle particelle passa a una distanza dalla fibra inferiore al loro diametro, vi si fissano per effetto delle forze di attrazione elettrostatica. L'efficienza di questo meccanismo aumenta all'aumentare del diametro e della distanza tra le fibre stesse mentre la velocità dell'aria, entro certi limiti, non ha influenza.



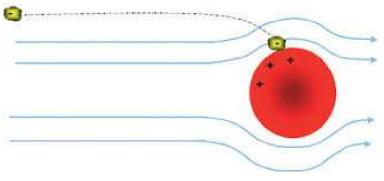
Fonte: brochure Camfil

IV. meccanismo di diffusione: si ha quando le particelle molto piccole (circa 0,1 μm), che in un flusso d'aria si comportano come le molecole di un gas e sono così soggette a moti oscillatori casuali di tipo browniano, grazie a questi moti lungo la direzione generale del flusso vengono a contatto con le fibre del filtro e vi aderiscono per effetto dell'azione elettrostatica, con una probabilità che cresce col diminuire del diametro, sia delle particelle che delle fibre, e col diminuire della velocità dell'aria. Questo meccanismo viene usato in filtri di efficienza elevata.



Fonte: brochure Camfil

V. azione elettrostatica: dovuta alla carica elettrostatica che viene data alle fibre del filtro (durante la produzione), attira le particelle dotate di carica opposta grazie all'attrazione Coulombiana, con un'efficienza tanto maggiore quanto più è grande la carica e quindi il campo elettrico, e quanto più è bassa la velocità dell'ara. I filtri che si basano su questo meccanismo, detti elettrostatici passivi, utilizzano fibre sintetiche di dimensioni grossolane, col tempo perdono efficienza perché le particelle accumulate neutralizzano la carica elettrostatica. Questo calo di efficienza può essere in parte bilanciato dall'intasamento delle particelle che si depositano nelle fibre, contribuendo così all'azione filtrante, il che porta però ad un aumento delle perdite di carico.



Fonte: brochure Camfil

La ISO 16890:2016, la nuova norma che regola le prestazioni dei filtri e la loro classificazione, tiene conto della carica elettrostatica passiva che può essere presente nei filtri a vari livelli.

Nella parte 4 della normativa, in cui si descrive la procedura dei test per trovare le efficienze minime, viene spiegato come la carica elettrostatica contribuisca all'efficienza iniziale, ma a certe condizioni, come l'accumulo di particelle oleose o derivanti dalla combustione, si ha un calo dell'efficienza iniziale che può essere anche considerevole, ma che può essere ridotto da un parziale aumento dell'efficienza meccanica dovuto all'accumulo delle particelle stesse, a seconda del tipo di filtro, del tipo di applicazione e delle condizioni atmosferiche.

Per determinare la quantità di carica elettrostatica e il suo ruolo si determina prima l'efficienza del filtro nuovo, poi si neutralizza la carica immergendo il filtro in vapori di isopropanolo e si misura l'efficienza dopo la scarica (senza quindi un aumento compensativo dell'efficienza meccanica), per ottenere un valore di efficienza media ai fini della classificazione.

3.2 Tipologie di filtri

— Filtri a pannello: di solito in fibra di vetro e usati come primo stadio di filtrazione (pre-filtri), posti a monte dei filtri fini a maggiore efficienza di filtrazione per proteggerli rimuovendo le particelle grossolane



Fonte: catalogo Camfil

— Filtri a tasche morbide: per catturare polveri fini con una maggiore quantità di media filtrante in tasche sagomate, in fibra di vetro



Fonte: catalogo Camfil

— Filtri a tasche rigide: organizzati in più diedri (forma a "V"), hanno lunga durata grazie al media filtrante pieghettato, in fibre di vetro, in base al design possono avere minori resistenze al moto dell'aria



Fonte: catalogo Camfil

— Filtri HEPA: formati da foglietti filtranti in microfibre, detti assoluti perché devono ottenere la massima efficienza di filtrazione raggiungibile, come nelle clean room nei laboratori di ricerca o nel settore sanitario.



Fonte: catalogo Camfil

Discorso a parte meritano i filtri a carboni attivi e i filtri elettrostatici:

- Filtri elettrostatici: sono alimentati continuamente da un alimentatore elettrico esterno. Il flusso d'aria viene fatto passare attraverso una sezione ionizzante in cui un campo elettrico ne ionizza prima le molecole e poi le particelle sospese, successivamente è inviato a una sezione di captazione dove si trovano collettori a piastre parallele, caricate alternativamente, per sfruttare l'azione repulsiva delle lamine positive che fanno precipitare le particelle con carica opposta sulle lamine collettrici connesse a terra. I filtri elettrostatici non richiedono di essere sostituiti come quelli a fibre ma richiedono frequenti ed accurati lavaggi per eliminare le incrostazioni e i depositi che disturberebbero il campo elettrico, per cui è necessaria una manutenzione periodica, inoltre necessitano di maggiori apparecchiature, come l'alimentatore ad alta tensione, che fanno aumentare il costo d'installazione. La ISO 16890 non cita esplicitamente questo tipo di filtri elettrostatici attivi né le loro caratteristiche ma fa riferimento solo alla carica elettrostatica passiva, per cui si può concludere che ad essi non si applica.
- Filtri molecolari: si basano sul fenomeno dell'adsorbimento tra il materiale adsorbente e l'inquinante che si vuole abbattere, che reagisce chimicamente (adsorbimento chimico) o viene trattenuto sulla superficie del materiale (adsorbimento fisico) che è estremamente poroso (come i carboni attivi).

3.3 Normative

Negli ultimi anni diverse normative sono state emesse a livello internazionale volte a migliorare il campo della filtrazione dell'aria, segno della crescente attenzione in questo settore. Di seguito saranno indicate le più rilevanti.

3.3.1 Normativa EN 13779:2007

Questa normativa europea si occupa della progettazione dei sistemi di ventilazione e condizionamento per edifici non residenziali, al fine di raggiungere un ambiente confortevole e salutare per gli occupanti, escludendo gli edifici a ventilazione naturale. [7]

Essa specifica i requisiti di prestazione richiesti al sistema di filtrazione per ottenere una buona qualità dell'aria interna partendo da quella dell'aria esterna, e dà le definizioni dei vari parametri e il modo in cui classificarli.

Vengono date le definizioni dei vari tipi di aria presenti: l'aria esterna è quella che entra nel sistema, l'aria di mandata è quella che entra nel locale dopo essere stata trattata, l'aria interna è quella nel locale o zona trattata.

L'aria esterna è classificata nel modo seguente:

Categoria	Descrizione
ODA 1	Aria pura ad eccezione degli inquinanti temporanei come il polline
ODA 2	Aria con alte concentrazioni di particolato e/o inquinanti gassosi
ODA 3	Aria con concentrazioni molto alte di particolato e/o inquinanti gassosi

Il modo di quantificare tale classificazione si basa sul superamento di valori che possono variare a seconda delle normative vigenti nei vari paesi.

Per rientrare nella categoria ODA 1 devono essere rispettate le linee guida del 1999 redatte dall'OMS sulla Qualità dell'Aria e ogni regolamentazione nazionale sulla qualità dell'aria esterna.

Si rientra nella categoria ODA 2 se le concentrazioni di inquinanti eccedono le linee guida dell'OMS o gli standard nazionali di un fattore fino a 1,5.

Si rientra nella categoria ODA 3 se si presentano concentrazioni di inquinanti che superano le linee guida dell'OMS o le normative nazionali di un fattore maggiore di 1,5

Per classificare la qualità dell'aria esterna viene consigliata una procedura specifica:

- 1. prima di tutto determinare quali inquinanti conviene prendere in considerazione e i loro limiti medi: i più critici sono SO₂, NO₂, CO₂, CO e VOCs, l'Ozono, essendo molto reattivo, non raggiunge l'interno dell'edificio in quantità rilevanti, mentre per il particolato viene suggerito di non limitarsi al solo PM10
- 2. avere a disposizione misure e rilevamenti vicino all'edificio
- 3. confrontare i dati rilevati e i valori limite e ricavare il fattore di superamento, se per tutti gli inquinanti è minore di 1 l'aria esterna rientra nell'ODA 1, se un inquinante supera il valore limite di un fattore minore di 1,5 l'aria ricade nell'ODA 2, altrimenti nell'ODA 3

La qualità dell'aria di mandata non è classificata in categorie ma deve avere caratteristiche tali da permettere di raggiungere il livello di qualità dell'aria interna voluto.

L'aria interna è classificata nel modo seguente:

Categoria	Descrizione
IDA 1	Alta qualità dell'aria interna
IDA 2	Media qualità dell'aria interna
IDA 3	Moderata qualità dell'aria interna
IDA 4	Bassa qualità dell'aria interna

Per quantificare queste categorie la normativa suggerisce diversi metodi

 classificazione indiretta in base alla portata di aria esterna per persona: metodo utilizzato nei casi in cui i locali sono destinati all'occupazione umana, i valori di portata dell'aria esterna devono essere quelli dati dalle linee guida o regolamentazioni nazionali esistenti, oppure possono essere quelli raccomandati nella tabella seguente

Categoria	Unità di	Portata d'aria esterna				
	misura	Area non fumatori		Area fuma	tori	
		Valori Valore di		Valori	Valore di	
		tipici	default	tipici	default	
IDA 1	l/s/persona	> 15	20	> 30	40	

IDA 2	l/s/persona	10 – 15	12,5	20 – 30	25
IDA 3	l/s/persona	6 – 10	8	12 – 20	16
IDA 4	l/s/persona	< 6	5	< 12	10

- classificazione indiretta in base alla portata d'aria per unità d'area del piano:
 - usato soprattutto per avere valori di progetto in locali non adibiti all'occupazione umana.
- Classificazione per livello di CO₂:
 la CO₂ è considerata un buon indicatore dei bioeffluenti emessi dall'uomo in zone occupate in cui non è permesso fumare e in cui l'inquinamento è dovuto principalmente al metabolismo umano

Categoria	Livello CO ₂ sul livello di aria esterna in ppm				
	Intervallo tipico	Valore di default			
IDA 1	≤ 400	350			
IDA 2	400 – 600	500			
IDA 3	600 – 1000	800			
IDA 4	> 1000	1200			

Classi dei filtri

La classe di filtri raccomandate per ottenere una determinata qualità di aria interna dipendono dalla categoria dell'aria esterna (le definizioni delle classi dei filtri sono date dalla EN 779). Non sono raccomandati i filtri G4 da usare come pre-filtro perché sostanzialmente inefficaci anche per una bassa qualità dell'aria.

Qualità	Qualità dell'aria interna				
dell'aria	IDA 1	IDA 2	IDA 3	IDA 4	
esterna					
ODA 1	F9	F8	F7	F5	
ODA 2	F7+F9	F6+F8	F5+F7	F5+F6	
ODA 3	F7+GF*+F9	F7+GF+F9	F5+F7	F5+F6	

^{*}GF = filtri per gas (filtri a carbone) e/o filtri chimici

Vengono inoltre date indicazioni sulle tempistiche con cui cambiare i filtri: si raccomanda soprattutto di non basarsi solo sulla perdita di carico finale

dovuta all'ostruzione dei filtri, ma per ragioni igieniche anche su un periodo definito, o in base alle ore di funzionamento, a seconda di quale limite viene raggiunto prima:

- I filtri nel primo stadio di filtrazione dovrebbero essere sostituiti dopo 2000 ore di esercizio o dopo un anno al massimo
- I filtri nel secondo stadio di filtrazione dovrebbero essere sostituiti dopo 4000 ore di esercizio o dopo 2 anni al massimo

3.3.2 Normativa EN 16798-3 – Differenze con la EN 13779

Lo standard EN 16798-3:2017 [8] è stata sviluppato per adempiere alla Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia (recast Energy Performance of Buildings Directive) emessa il 19 maggio 2010 dal Parlamento Europeo, e va a sostituire la EN 13779:2007, che a sua volta era stata sviluppata per adeguarsi alla direttiva 2002/91/CE (EPBD).

Questa normativa rientra in tutta una serie di standard che hanno lo scopo di armonizzare a livello internazionale le metodologie per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, in particolare si occupa dei requisiti di prestazione dei sistemi di ventilazione e condizionamento di edifici non residenziali (non includendo la ventilazione naturale) soggetti a occupazione umana, con l'obbiettivo di ottenere le migliori condizioni di confort e igiene negli ambienti interni per tutte le stagioni e allo stesso tempo accettabili costi operativi e di installazione.

Trattandosi di una revisione della precedente, la EN 16798-3 non va a stravolgere la vecchia normativa ma ne modifica e chiarisce alcuni aspetti. Presenta inoltre un rapporto tecnico supplementare (CEN/TR 16798-4:2017) che fa da guida per la progettazione, ed ha allegata un'appendice A definita normativa perché in essa sono specificati i parametri necessari per applicarla ma sono lasciati vuoti e devono essere riempiti dagli enti nazionali per ottemperare alle regolamentazioni vigenti, in alternativa si possono usare i valori di default presenti nell'appendice B detta informativa.

Per quanto riguarda la qualità dell'aria, la differenza principale è che non c'è più una classificazione della qualità dell'aria interna e viene introdotta una classificazione della qualità dell'aria di mandata, mentre per la qualità dell'aria esterna è cambiato solo il fatto che la classificazione va fatta separatamente per inquinanti gassosi e particellari.

L'aria di mandata è classificata nel modo seguente:

Categoria	Descrizione
SUP 1	Concentrazione molto bassa di particolato e/o gas
SUP 2	Concentrazione bassa di particolato e/o gas
SUP 3	Concentrazione media di particolato e/o gas
SUP 4	Concentrazione alta di particolato e/o gas
SUP 5	Concentrazione molto alta di particolato e/o gas

L'aria di mandata è di categoria:

- SUP 1 se adempire i valori limite tratti dalle linee guida dell'OMS del 2005 e ogni standard o regolamentazione nazionale di un fattore x0,25
- SUP 2 se adempie i valori limite tratti dalle linee guida dell'OMS del 2005 e ogni standard o regolamentazione nazionale di un fattore x0,5
- SUP 3 se adempie i valori limite tratti dalle linee guida dell'OMS del 2005 e ogni standard o regolamentazione nazionale di un fattore x0,75
- SUP 4 se adempie i valori limite tratti dalle linee guida dell'OMS del 2005 e ogni standard o regolamentazione nazionale
- SUP 5 se adempie i valori limite tratti dalle linee guida dell'OMS del 2005 e ogni standard o regolamentazione nazionale di un fattore x1,5

L'aria esterna è classificata nello stesso modo della precedente EN 13779:2007

Categoria	Descrizione
ODA 1	Aria pura ad eccezione degli inquinanti temporanei come il polline
ODA 2	Aria con alte concentrazioni di particolato e/o inquinanti gassosi
ODA 3	Aria con concentrazioni molto alte di particolato e/o inquinanti gassosi

In questa norma aggiornata per le definizioni delle categorie ci si basa sui limiti indicati nelle Air Quality Guidelines dell'OMS del 2005, oltre che sulle regolamentazioni nazionali in vigore per l'aria esterna: se vengono rispettate si rientra nella ODA 1, se sono superate di un fattore minore di 1,5 nella ODA 2, se il fattore è maggiore di 1,5 l'aria esterna ricade nella ODA 3.

Come già detto non è più data una classificazione dell'aria interna.

Classi dei filtri

Nella nuova normativa è richiesto che i filtri abbiano una minima efficienza di filtrazione totale, data dalle efficienze dei singoli stadi di filtrazione in serie (calcolate secondo la EN 779:2012) secondo la formula:

$$E_t = 100 * \left(1 - \left(\left(1 - \frac{E_{s1}}{100} \right) * \left(1 - \frac{E_{s2}}{100} \right) * \dots * \left(1 - \frac{E_{sn+1}}{100} \right) \right) \right)$$

dove E_t è l'efficienza totale del filtro ed E_{sn+1} è l'efficienza di ogni step di filtrazione.

Le minime efficienze richieste, per dimensioni del particolato di $0,4~\mu m$, in base alla qualità dell'aria esterna e di mandata, per il caso di inquinanti particellari sono date in tabella:

Qualità	Aria di mandata						
dell'aria	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5		
esterna							
ODA 1	88%	80%	80%	80%	Non		
					specificato		
ODA 2	96%	88%	80%	80%	60%		
ODA 3	99%	96%	92%	80%	80%		

Se è richiesto un livello di aria di mandata SUP 1 o SUP 2 e in caso di qualità di aria esterna per inquinanti gassosi di classe ODA 2 o ODA 3, viene raccomandata (o richiesta) l'aggiunta della filtrazione molecolare per ridurre i livelli degli inquinanti gassosi più nocivi.

Qualità	Aria di mandata					
dell'aria	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5	
esterna						
ODA 1	raccomandata					
ODA 2	Richiesta	raccomandata				
ODA 3	richiesta	richiesta	raccomandata			

Le classi di filtri raccomandate per soddisfare le efficienze minime di rimozione delle particelle (secondo le definizioni date dalla EN 779:2012) non

dipendono più dalla classe di aria interna ma variano a seconda della categoria dell'aria esterna e dell'aria di mandata, e sono date come valori di default nell'appendice B della normativa.

Qualità	Aria di mandata					
dell'aria	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5	
esterna						
ODA 1	M5+F7	F7	F7	F7	-	
ODA 2	F7+F7	M5+F7	F7	F7	M5	
ODA 3	F7+F9	F7+F7	M6+F7	F7	F7	

3.3.3 ISO 16890:2016

Per quanto riguarda le prestazioni dei filtri, sia in termini di efficienza di filtrazione che di consumi energetici, il cambiamento più importante degli ultimi anni è sicuramente l'introduzione della ISO 16890. Essa va a sostituire la UN EN 779 e la ASHRAE 52.2 e dal luglio 2018 sarà l'unica a valere a livello internazionale.

In particolare la ISO 16890-1:2016 [9] va a correggere le criticità della EN 779, la principale delle quali era che in quest'ultima l'efficienza dei filtri veniva valutata solo rispetto a particelle di diametro aerodinamico di 0,4 µm, mentre d'ora in poi dovrà essere valutata sulla base delle diverse dimensioni del particolato (PM10, PM2.5, PM1), in linea con le ultime evidenze mediche e scientifiche che hanno evidenziato i danni provocati dalle micro-polveri e la necessità di proteggersi da esse.

Quindi non si farà più riferimento alle 9 classi (G per i filtri grossolani, M per i medi e F per i fini) della EN 779, ma a 4 gruppi in base alle dimensioni:

Definizione	Range [µm]
Coarse (grossolano)	Valore di arrestanza gravimetrica
ePM ₁₀	0,3 – 10
ePM _{2,5}	0.3 - 2.5
ePM₁	0,3 – 1

La classificazione viene fatta in base a dei valori di efficienza minima:

Gruppo ISO	Requisito mi	Valore riportato		
	ePM _{1,min} ePM _{2,5,min} ePM _{10,min}			
ISO coarse	-	-	< 50%	Arrestanza
				iniziale

ISO ePM ₁₀	-	-	≥ 50%	ePM ₁₀
ISO ePM _{2,5}	-	≥ 50%	-	ePM _{2,5}
ISO ePM₁	≥ 50%	-	-	ePM₁

I valori considerati sono quelli di efficienza media rispetto al filtro nuovo e al filtro scarico (cioè entrambe le efficienze devono essere maggiori del 50% per il PM1 e il PM2,5).

Si avranno così tante classi in base agli effettivi valori di efficienza arrotondati per difetto ogni 5%:

PM1	PM2,5	PM10	Coarse
ePM₁ 95%	ePM _{2,5} 95%	ePM ₁₀ 95%	Arrestanza
ePM₁ 90%	ePM _{2,5} 90%	ePM ₁₀ 90%	iniziale con step
ePM₁85%	ePM _{2,5} 85%	ePM ₁₀ 85%	del 5%
ePM ₁ 80%	ePM _{2,5} 80%	ePM ₁₀ 80%	
ePM₁75%	ePM _{2,5} 75%	ePM ₁₀ 75%	
ePM₁70%	ePM _{2,5} 70%	ePM ₁₀ 70%	
ePM ₁ 65%	ePM _{2,5} 65%	ePM ₁₀ 65%	
ePM ₁ 60%	ePM _{2,5} 60%	ePM ₁₀ 60%	
ePM₁55%	ePM _{2,5} 55%	ePM ₁₀ 55%	
ePM₁50%	ePM _{2,5} 50%	ePM ₁₀ 50%	

Il problema principale è che non c'è una corrispondenza univoca tra la classificazione della ISO 16890 e la precedente EN 779, perché si basano su dimensioni del particolato completamente diverse, inoltre la normativa EN 16798-3, che sostituisce la EN 13779, basa la classificazione dei filtri sulla EN 779: poiché il periodo di coesistenza è finito nel giugno del 2018, dopo il quale la EN 779 è diventata obsoleta, è evidente il bisogno di un aggiornamento della EN 16798-3.

Nell'attesa si può utilizzare la Raccomandazione 4/23 - 2018 [3] ideata dall'associazione internazionale Eurovent (Europe's Industry Association for Indoor Climate (HVAC), Process Cooling, and Food Cold Chain Technologies), un ente non normatore, per la scelta pratica dei filtri con la nuova classificazione

3.3.4 Raccomandazione Eurovent 4/23 - 2018

L'associazione Eurovent ha sviluppato una corrispondenza tra le classi di filtri delle due normative basandosi su dati sperimentali e test su decine di filtri diversi.

Questa comparazione prende come riferimento le concentrazioni limite fissate nelle Air Quality Guidelines del 2005, cioè 10 µg/m3 di media annuale per il PM2,5 e 20 µg/m3 per il PM10.

L'aria esterna risulta quindi essere classificata nel modo seguente:

Categoria	Valore medio annuo PM2,5	Valore medio annuo PM10
_	[µg/m³]	[µg/m³]
ODA 1	≤ 10	≤ 20
ODA 2	≤ 15	≤ 30
ODA 3	> 15	> 30

mentre per l'aria di mandata:

Categoria	Tipiche applicazioni	Valore medio	Valore medio
		annuo	annuo
		PM2,5	PM10 [µg/m ³]
		[µg/m³]	1. 0
SUP 1	-	≤ 2,5	≤ 5
SUP 2	Ambienti con presenza	≤ 5	≤ 10
	prolungata di persone (ad es.		
	asili, uffici, hotel, edifici		
	residenziali, cinema, ecc.)		
SUP 3	Ambienti con presenza	≤ 7,5	15
	temporanea di persone (ad es.		
	centri commerciali, lavanderie,		
	server room, ecc.)		
SUP 4	Ambienti con occupazione a	≤ 10	≤ 20
	breve termine (toilette,		
	magazzini, ecc.)		
SUP 5	Ambienti senza presenza di	≤ 15	≤ 30
	persone (data center,		
	parcheggi, ecc.)		

Il metodo per valutare le efficienze minime raccomandate si basa sui livelli di qualità dell'aria esterna e di quella di mandata seguendo la struttura data dalla EN 16798-3. Per alti livelli di qualità dell'aria richiesti (SUP 1 e SUP 2) sono indicate le efficienze riferite al PM1, viceversa per bassi livelli di aria richiesti (SUP 4 e SUP 5) le efficienze sono riferite al PM10.

Qualità	Qualità aria di mandata					
aria	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5	
esterna						
Categoria	ePM₁	ePM₁	ePM _{2,5}	ePM ₁₀	ePM ₁₀	
ODA 1	70%	50%	50%	50%	50%	
ODA 2	80%	70%	70%	80%	50%	
ODA 3	90%	80%	80%	90%	80%	

Vengono inoltre date le raccomandazioni che per proteggere il sistema HVAC il primo stadio di filtrazione deve essere almeno ePM₁₀ 50%, mentre un filtro a valle di un umidificatore deve essere almeno ePM_{2,5} 65%.

La tabella di comparazione per le classi di filtri delle due normative ideata da Eurovent risulta essere la seguente:

EN 779:2012	EN ISO 16890		
Classe del filtro	ePM ₁	ePM _{2,5}	ePM ₁₀
M5	5% - 35%	10% - 45%	40% - 70%
M6	10% - 40%	20% - 50%	60% - 80%
F7	40% - 65%	65% - 75%	80% - 90%
F8	65% - 90%	75% - 95%	90% - 100%
F9	80% - 90%	85% - 95%	90% - 100%

Nell'ultima versione della Raccomandazione vengono inoltre fatti degli esempi pratici di utilizzo delle classi di filtri, anche in caso di filtrazione a più stadi e per dimensioni del particolato di riferimento diverse da quelle indicate prima, sempre a seconda del livello di qualità dell'aria necessario e del tipo di aria esterna.

Qualità	à aria	Qualità aria di mandata				
esterna		SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5
ODA	Esempio	ePM ₁₀	ePM₁ 50%	ePM _{2,5}	ePM ₁₀	ePM ₁₀
1	1	50% +		50%	50%	50%
		ePM₁				
		60%				
	Esempio	ePM₁	-	-	-	-
	2	70%				

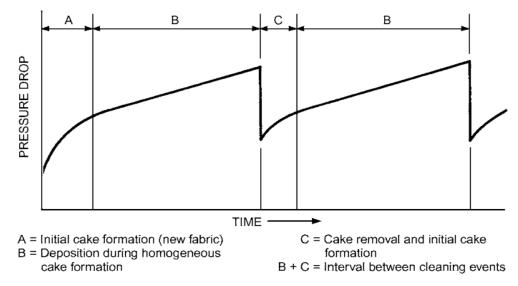
ODA	Esempio	ePM _{2,5}	ePM ₁₀	ePM₁	ePM _{2,5}	ePM ₁₀
2	1	50% +	50% +	50%	50%	50%
		ePM₁	ePM₁ 60%			
		60%				
	Esempio	ePM₁80%	ePM₁ 70%	ePM _{2,5}	ePM ₁₀	-
	2			70%	80%	
ODA	Esempio	ePM _{2,5}	ePM _{2,5}	ePM ₁₀	ePM₁	ePM _{2,5}
3	1	50% +	50% +	50% +	50%	50%
		ePM₁80%	ePM₁ 60%	ePM₁		
				60%		
	Esempio	ePM₁90%	ePM₁80%	ePM _{2,5}	ePM ₁₀	ePM ₁₀
	2			80%	90%	80%

4. Filtrazione e consumi energetici

I filtri per l'aria non servono soltanto a garantire un'adeguata qualità dell'aria interna, ma hanno anche lo scopo di proteggere il sistema HVAC stesso: essi infatti impediscono che le polveri si accumulino nel ventilatore e nelle batterie degli scambiatori di calore, il che peggiorerebbe lo scambio termico.

Il principale fattore di incremento del consumo di energia causato dai filtri è la caduta di pressione che si ha quando l'aria passa attraverso di essi e che aumenta col tempo a causa dell'accumulo di polveri e sporcizia.

La tipica relazione tra la differenza di pressione dovuta all'intasamento dei filtri e il tempo è approssimativamente lineare per buona parte dei cicli di utilizzo.



Fonte: archivio ASHRAE [11]

4.1 Effetto delle perdite di carico

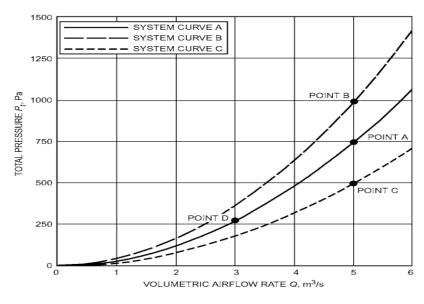
Le perdite di carico relative ai filtri sono legate alla portata e quindi alla velocità dell'aria che li attraversa, il cui valore deve soddisfare diverse esigenze del sistema HVAC, come evitare che sia troppo alta perché non ci siano troppe vibrazioni e quindi troppo rumore o perché le perdite di carico non siano troppo elevate, minimizzare il consumo energetico o essere adeguata ad assicurare un buon scambio termico e per ottimizzare il costo dei materiali.

Queste esigenze sono illustrate, ad esempio, dall'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) nei suoi manuali di progettazione.

In generale, per i sistemi HVAC, in regime turbolento dell'aria, vale la seguente equazione [11]:

$$\Delta P_2/\Delta P_1 = (Q_2/Q_1)^2$$

che corrisponde alla curva di perdita di carico del sistema in funzione della portata volumetrica d'aria. La curva cambia se cambiano le condizioni di pressione del sistema: se il sistema viene modificato, ad esempio aggiungendo un gomito nei condotti, o a causa dell'intasamento dei filtri o se l'impianto presenta delle serrande di regolazione e le chiude, la pressione totale alla portata di progetto aumenterà (ad esempio, nell'immagine seguente dal punto A della curva centrale al punto B della curva superiore tratteggiata) e si avrà quindi una nuova curva. Al contrario, se ad esempio si elimina un gomito dal progetto delle condotte dell'impianto, o si aprono le serrande di regolazione, si avrà una riduzione della pressione (curva inferiore tratteggiata).



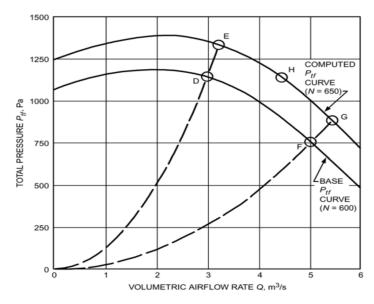
Fonte: archivio ASHRAE [11]

I ventilatori, che sono uno delle maggiori cause di consumo energetico, sono descritti da una curva caratteristica che permette di descrivere le loro prestazioni grazie alle leggi che regolano il loro comportamento al variare di portata volumetrica Q, pressione P, dimensione D, velocità di rotazione N, potenza W e densità dell'aria ρ .

Law No.	Dependent Variables		ndependent Variables
la 1b		-	$(D_1/D_2)^3(N_1/N_2)$ $(D_1/D_2)^2(N_1/N_2)^2\rho_1/\rho_2$
1c	$W_1 = V$	_	$(N_1/N_2)^5 (N_1/N_2)^3 \rho_1/\rho_2$
2a	$Q_1 = Q$		$(D_1/D_2)^2 (P_1/P_2)^{1/2} (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$
2b	$N_1 = N$	$V_2 \times (I_2)$	$D_2/D_1)(P_1/P_2)^{1/2}(\rho_2/\rho_1)^{1/2}$
2c	$W_1 = V$	$V_2 \times (I_2)$	$(D_1/D_2)^2 (P_1/P_2)^{3/2} (\rho_2/\rho_1)^{1/2}$
3a	$N_1 = N$	$V_2 \times (I$	$(D_2/D_1)^3(Q_1/Q_2)$
3b	$P_1 = I$	$P_2 \times (I$	$(D_2/D_1)^4(Q_1/Q_2)^2\rho_1/\rho_2$
3c	$W_1 = V$	$\bar{V}_2 \times (I$	$(D_2/D_1)^4(Q_1/Q_2)^3\rho_1/\rho_2$

Fonte: archivio ASHRAE [11]

Queste leggi permettono il confronto tra ventilatori che rispettano certe condizioni di similitudine, ma permettono anche di analizzare il funzionamento dello stesso ventilatore (D1=D2) con velocità variabile: la curva caratteristica con velocità maggiore sarà quella superiore, trovata partendo dal punto D e usando le equazioni 1a e 1b (ρ_1 = ρ_2) per trovare il punto E e facendo lo stesso per gli altri punti (ad esempio dal punto F al punto G).



Fonte: archivio ASHRAE [11]

Il punto di funzionamento sarà quello di intersezione tra la curva caratteristica del ventilatore e la curva di perdita di carico dell'impianto.

L'ASHRAE ha quindi riassunto i valori raccomandati e massimi di velocità dell'aria nei vari componenti (tra cui i filtri) del sistema di ventilazione.

Valori raccomandati [12] sono (in feet/min e m/s):

Location	Residences	Schools, Theaters, Public Buildings	Industrial Buildings
Recommended ve	locities, fpm [m/s	s]	
Outdoor air intakes* Filters* Heating coils*,† Cooling coils* Air washers* Fan outlets*	300 [1.5] 250 [1.3] 450 [2.3] 450 [2.3] 500 [2.5] 1000–1600	300 [1.5] 300 [1.5] 500 [2.5] 500 [2.5] 500 [2.5] 1300–2000	300 [1.5] 350 [1.8] 600 [3.1] 600 [3.1] 500 [2.5] 1600–2400
Main ducts [†] Branch ducts [†] Branch risers [†]	[5.1–8.1] 700–900 [3.6–4.6] 600 [3.1] 500 [2.5]	[6.6–10.2] 1000–1300 [5.1–6.6] 600–900 [3.1–4.6] 600–700 [3.1–3.6]	[8.1–12.2] 1200–1800 [6.1–9.1] 800–1000 [4.1–5.1] 800 [4.1]

Fonte: archivio ASHRAE [12]

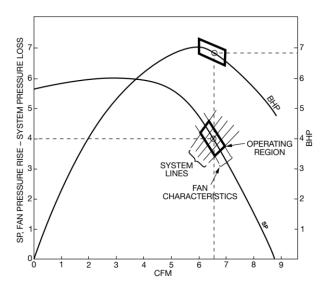
Valori di velocità massimi sono:

Outdoor air intakes*	300 [1.5]	300 [1.5]	300 [1.5]
	200 51 53	500 50 51	500 F 2 51
Filters*	300 [1.5]	500 [2.5]	500 [2.5]
Heating coils*,†	500 [2.5]	600 [3.1]	1000 [5.1]
Cooling coils*	450 [2.3]	500 [2.5]	600 [3.1]
Air washers	500 [2.5]	500 [2.5]	500 [2.5]
Fan outlets	1700 [8.6]	1500-2200	1700-2800
		[7.6–11.2]	[8.6-14.2]
Main ducts [†]	800-1200	1100-1600	1300-2200
	[4.1-6.1]	[5.6–8.1]	[6.6–11.2]
Branch ducts [†]	700-1000	800-1300	1000-1800
	[3.6–5.1]	[4.1-6.1]	[5.1–9.1]
Branch risers [†]	650-800	800-1200	1000-1600
	[3.3–4.1]	[4.1-6.1]	[5.1–8.1]

Fonte: archivio ASHRAE [12]

Dove gli asterischi specificano che tali valori si riferiscono all'area frontale totale, altrimenti all'area libera netta (net free area).

Come si vedrà risulta abbastanza facile trovare il punto di funzionamento in un sistema in cui la velocità è fissa (cioè il punto si trova comunque sulla curva del ventilatore anche se varia la curva del sistema) e in un sistema VAV semplice che varia la velocità del ventilatore per mantenere la portata costante, mentre è molto più complicato in un VAV multi-zona, dove le serrande di regolazione dei vari piani cambiano continuamente il grado di apertura, quindi la portata, e il ventilatore deve cambiare la velocità per adeguarsi: in quel caso si ha una regione di funzionamento, come nella figura seguente.



Fonte: documento della Twin City Fan Companies

4.2 Teoria e studi sul consumo energetico dei filtri

Il consumo energetico dovuto ai filtri dipende dal tipo di sistema usato per la circolazione e il condizionamento dell'aria.

Per gli impianti a sola aria, cioè che usano solo l'aria come vettore energetico e la distribuiscono negli ambienti, si può effettuare la suddivisione in due tipi: a portata costante (Constant Air Volume), in cui la regolazione si effettua variando la temperatura di immissione dell'aria, e a portata variabile (Variable Air Volume).

I sistemi CAV funzionano con una portata d'aria costante e soddisfano i carchi termici facendo variare la temperatura dell'aria di mandata. Poiché i carichi sono diversi per il funzionamento estivo e invernale, sono dimensionati in base alla portata maggiore, quindi si trovano generalmente a operare con portate più grandi di quelle effettivamente necessarie, con conseguenti sprechi energetici per il ventilatore; inoltre operando sempre alla portata massima la ventilazione di solito è controllata con interruttori on/off. Hanno il vantaggio di essere di più facile installazione.

I sistemi VAV operano con una portata d'aria che varia continuamente per ottenere la temperatura voluta o soddisfare le richieste degli occupanti. Poiché utilizzano portate minori rispetto a quella massima si ha un risparmio energetico e una regolazione efficace, che può essere fatta variando la posizione delle serrande dell'aria alla mandata o usando ventilatori a numero di giri variabile dotati di inverter.

I sistemi misti aria/acqua utilizzano l'aria e la regolano per controllarne la velocità, la qualità e l'umidità, mentre affidano il controllo della temperatura all'acqua, che è in grado di trasportare molta più energia rispetto all'aria, e la portano a dei terminali che scambiano con gli ambienti, permettendo una regolazione zona per zona della temperatura, e con il vantaggio non trascurabile di ridurre l'ingombro dei canali per la distribuzione dell'aria, visto che le portate necessarie sono minori rispetto agli impianti a tutt'aria. Sono utilizzati soprattutto in edifici frazionati in tanti ambienti diversi.

I sistemi DCV (Demand Controlled Ventilation) hanno una ventilazione a portata variabile col fabbisogno effettivo, e controllano automaticamente la portata d'aria in base a un parametro stabilito dagli occupanti, e controllato dai sensori posti negli ambienti, che spesso è la CO₂.

A seconda del tipo di sistema, il comportamento energetico dovuto al sistema di filtrazione sarà diverso, perché diversi saranno gli obiettivi, le dimensioni e i componenti. Sistemi più grandi avranno bisogno di una regolazione variabile del ventilatore per mantenere la portata d'aria desiderata ed evitare sprechi energetici, quindi di ventilatori con motori regolati tramite VSD (Variable Speed Drive), sistemi più piccoli, ad esempio quelli residenziali, avranno velocità del ventilatore fissa.

Ognuno dei componenti del sistema di condizionamento (condotte, filtri, scambiatori) provoca una caduta di pressione al passaggio dell'aria cui deve provvedere il ventilatore.

A causa dell'intasamento dei filtri, la perdita di carico del sistema aumenta (la curva caratteristica del sistema sul grafico pressione-portata cambia) e la portata volumetrica d'aria diminuisce se il ventilatore continua ad operare allo stesso numero di giri (cioè la curva della pressione del ventilatore ad un certo

numero di giri non cambia), la potenza assorbita dal ventilatore varierà secondo l'equazione:

$$W = \frac{\dot{V} \cdot \Delta P}{\eta}$$

dove η è il rendimento di motore e ventilatore e ΔP è la prevalenza totale.

Come visto, la pressione del sistema è legata alla portata volumetrica da una relazione quadratica, e quindi la potenza (rappresentata sul grafico da una curva specifica) dipende dal cubo della portata d'aria, a seconda di quale sia l'effetto preponderante, se la riduzione di portata o l'aumento di pressione, si può valutare se l'energia al ventilatore aumenterà o diminuirà. Per avere lo stesso valore di portata, tale energia dovrà essere fornita al ventilatore, il cui motore girerà a un numero di giri superiore (un'altra curva), cui corrisponderà una potenza maggiore.

La maggior parte degli studi e delle ricerche fatte per valutare l'entità del consumo energetico dovuto ai filtri riguarda sistemi CAV e VAV, che sono la maggioranza dei sistemi installati, mentre pochi dati sono stati trovati per quanto riguarda i più recenti DCV.

Lo studio più interessante ai fini di questa tesi è quello di Chimack M. e Sellers D. [13] eseguito su due UTA di tipo VAV di un edificio commerciale. Le due UTA erano progettate per fornire 70000 cfm (cubic feet per minute, circa 119000 m³/h) ad una metà dell'edificio e ad esse era affidato totalmente il riscaldamento e il raffrescamento di tutto l'edificio, con i ventilatori funzionanti per lo stesso numero di ore.

La filtrazione era a due stadi: entrambe le UTA erano dotate degli stessi prefiltri, una aveva filtri a tasche tradizionali, l'altra filtri con maggiore superficie filtrante e minori perdite di carico iniziali (definiti di tipo premium).

Il risparmio energetico è stato calcolato sia teoricamente, usando la nota formula con cadute di carico medie rispetto alla vita dei filtri prevista dal costruttore, sia monitorando effettivamente il consumo energetico dei ventilatori di mandata tramite uso di power-logger ogni 10 minuti, mentre non sono state misurate le portate d'aria. Dal punto di vista teorico gli autori hanno previsto, per un periodo di 2 anni, un consumo energetico minore del 29% (circa 22000 kwh) usando filtri premium rispetto a quelli tradizionali. Dal monitoraggio dei consumi elettrici hanno riscontrato, per un periodo di 40

settimane e misurando periodicamente le cadute di pressione statica nel tempo tramite manometro digitale (poiché non si poteva misurarle separatamente per pre-filtro e filtro hanno effettuato un'unica misura assumendo lo stesso comportamento per entrambi), che l'intasamento dei filtri nel tempo seguiva una relazione quasi lineare, e le curve relative all'energia usata avevano un andamento simile per entrambe le UTA ma è stato registrato un risparmio energetico di circa il 21% (12600 kwh) in quella che usava filtri premium. Non è stato tenuto conto degli effetti energetici per il riscaldamento e il raffreddamento.

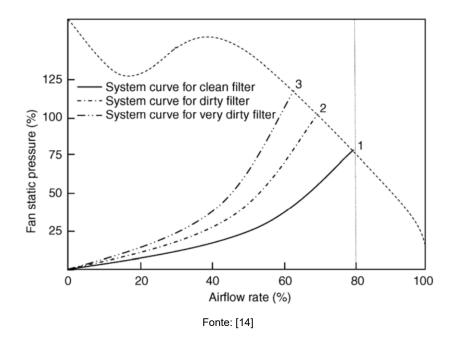
I risultati dello studio confermavano così l'ipotesi di partenza.

Un'analisi teorica basata su software di modellazione energetica è stata fatta nello studio di Nassif N. [14], nel quale l'autore ha eseguito simulazioni su sistemi di condizionamento tipicamente usati in negozi di diversa grandezza negli Stati Uniti per prevedere l'impatto dei filtri sul consumo energetico annuale.

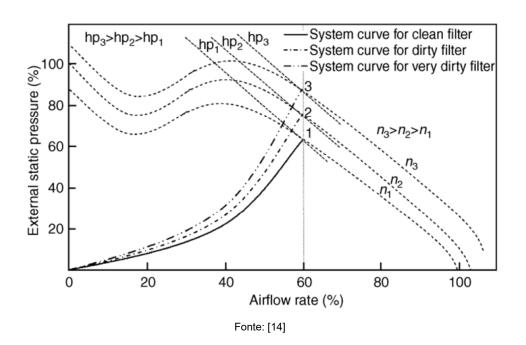
I sistemi pensati per lo studio dovevano soddisfare sia il fabbisogno di riscaldamento che di raffreddamento, perciò l'autore ha analizzato anche l'effetto dei filtri su di essi, distinguendo tra il caso in cui il ventilatore aveva velocità variabile e quello in cui la velocità era fissa.

Le altre variabili ipotizzate erano il valore di efficienza di rimozione del particolato (Minimum Efficiency Reporting Value, il valore di efficienza minima stabilito dall'ASHRAE), il grado di sporcizia dei filtri, a cui sono state fatte corrispondere valori di perdite di carico crescenti al crescere dello stesso e considerati tipici per questi casi, la potenza di refrigerazione e la zona climatica in cui il sistema andrebbe ad operare.

Nel caso di sistema di condizionamento con ventilatore a velocità fissa, risulta che più il filtro diventa sporco più la perdita di carico aumenta, e così la pressione statica totale, mentre diminuisce la portata d'aria, da cui ne consegue una peggiore performance del sistema dal punto di vista della ventilazione e dell'aumento del consumo di energia, che dipende molto dalla curva caratteristica del ventilatore, perché il ventilatore deve operare più a lungo per soddisfare il carico termico previsto. Inoltre, le variazioni di pressione e portata cambiano il rendimento del ventilatore.



Nel caso di sistema con ventilatore a velocità variabile, l'aumento della resistenza causato dai filtri sporchi porta il motore a dover operare a velocità maggiore per mantenere la stessa portata d'aria, da cui una maggiore potenza necessaria. Le variazioni di portata e pressione cambiano il rendimento del ventilatore, ma poiché la portata rimane costante non si hanno cambiamenti significativi nella quota di energia per il riscaldamento e raffreddamento.

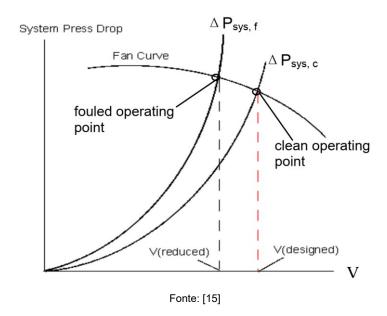


Risultava che per ventilatore con velocità variabile, con filtro molto sporco (ritenuto tale quando la sua perdita di carico finale è due volte più grande rispetto a quella iniziale) si arriverebbe in tutti i casi a incrementi del consumo energetico annuo del 25-30% rispetto a quello che si avrebbe con filtro pulito.

Per un ventilatore a velocità fissa, la diminuzione di portata provoca un peggioramento delle performance di condizionamento: l'aumento del consumo energetico annuale dipende in questo caso sia dalla riduzione di portata sia dall'aumento della pressione statica, oltre che dall'efficienza del ventilatore che non è costante al variare delle condizioni operative, ed è stimabile tra il 2,5% e il 5% per filtri molto sporchi, mentre l'aumento del consumo di energia annuo per il raffrescamento, fortemente legato alla riduzione di portata, che non basta più a rimuovere lo stesso carico termico e quindi deve operare più a lungo, è stimabile tra il 2,2% e il 9% nel caso peggiore.

Per avere un'altra indicazione quantitativa un altro studio da citare è quello di Yang L., Braun J., Groll E. [15], nel quale le variazioni di consumi energetici legate alla filtrazione sono state calcolate per 3 esempi di sistemi di condizionamento: sistema commerciale di taglia medio-grande (di tipo rooftop), sistema commerciale di piccola taglia e residenziale.

La curva di pressione del sistema è stata ottenuta sperimentalmente, considerata come somma dei contributi di caduta di pressione dovuti i filtri, alla batteria dell'evaporatore e ai canali di distribuzione dell'aria, esprimibili in funzione di una potenza della velocità dell'aria con esponenti e coefficienti derivati empiricamente ($\Delta p_{system} = \Delta p_{filters} + \Delta p_{coil} + \Delta p_{ducts} = e \cdot V^g + a \cdot V^b + k \cdot V^2$), calcolandoli prima con batteria e filtri puliti e poi in condizioni di fouling (assumendo che le perdite di carico nei condotti non variassero in seguito al fouling):



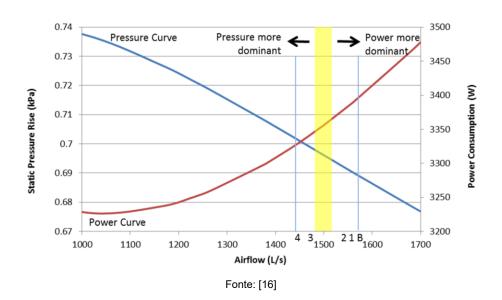
L'intasamento dei filtri è stato simulato con la polvere sintetica standard prescritta dalla normativa, con una quantità tale da simulare un anno di operazione, causando una riduzione media di portata dell'8%, gli autori hanno riscontrato una variazione di consumo per il ventilatore, per sistemi a velocità fissa, in condizioni di filtro intasato rispetto a quello pulito, che andava da -7% a +40% in un caso (senza contare gli effetti sul raffreddamento e sul riscaldamento, dovuti alla diminuzione di portata d'aria, a cui questi sistemi dovevano far fronte).

Lo studio di Zhai Z., Johnson S. [16] è stato compiuto in un sistema HVAC, in laboratorio, a portata costante, dotato di Variable Frequency Drive per mantenere la portata costante mentre veniva fatta aumentare la caduta di pressione nei filtri, misurando la portata d'aria, l'aumento di pressione (ottenuto artificialmente con materiali che ostruivano il passaggio dell'aria) e il consumo di potenza del ventilatore di mandata.

L'incremento di potenza istantanea dovuto all'aumento di velocità del ventilatore causato dall'accresciuta caduta di pressione del filtro, rispetto alle condizioni di partenza, poteva arrivare al 12%.

Gli autori sono poi passati ad un'analisi del consumo energetico a breve periodo (6 ore e mezza) e gli effetti sul condizionamento dell'aria, utilizzando perdite di carico diverse: per cadute di pressione cui corrispondono piccoli decrementi di portata rispetto al punto operativo iniziale, la riduzione del consumo di potenza è più importante rispetto agli altri effetti a causa della pendenza della curva di potenza, mentre cadute di pressione maggiori con

riduzioni di portata maggiori vogliono dire che il ruolo della pressione diventa preponderante e il ventilatore dovrà consumare più energia per mantenere la portata costante e dovrà operare più a lungo per raggiungere le temperature di set-point. Le variazioni di consumo energetico registrate vanno da -4,8% a +9,3%.



Il comportamento dei filtri dalla letteratura scientifica risulta chiaro nei suoi principi teorici nei casi di sistemi che variando la velocità riescono a mantenere i valori di portata desiderati, per cui un buon numero di ricerche sull'argomento si sono concentrate soprattutto sullo studio di sistemi più piccoli (di potenza di refrigerazione minore di 30 kW) che generalmente operano a velocità del ventilatore non regolabile, soprattutto per valutare gli effetti sul carico di raffrescamento e riscaldamento, che sono più difficili da quantificare.

Tra le ricerche che si occupano di impianti di dimensione maggiore si pone lo studio di Zaatari M., Novoselac A., Siegel J. [17], che si focalizza su sistemi HVAC con unità "rooftop" che devono fornire riscaldamento e raffreddamento, con potenze di refrigerazione dai 30 agli 84 kW, sia dotate che prive di controllo della velocità del ventilatore, installate sui tetti di grandi magazzini di Austin, Texas.

La metodologia adottata includeva la misurazione diretta di portata d'aria, caduta di pressione sui filtri (ottenuta artificialmente ostruendo il passaggio

dell'aria) e consumo di energia del ventilatore, e l'uso di modelli per valutare l'impatto sulla capacità del sistema di soddisfare il carico di raffreddamento.

Le unità testate sono state 15, di cui solo una dotata di VFD (Variable Frequency Drive) per regolare la velocità del ventilatore e mantenere la portata d'aria costante nelle misurazioni delle perdite di carico.

Le perdite di carico dei filtri sono state messe in relazione alla velocità frontale dell'aria (con valori tipici per queste applicazioni) sui filtri tramite un polinomio di secondo grado del tipo $\Delta p = c_1 \cdot V^2 + c_2 \cdot V$.

Per il caso di ventilatore senza regolazione della velocità, naturalmente, se aumenta la caduta di pressione nei filtri aumenta la pressione statica al ventilatore e cambia la curva del sistema (qui assunta come P=c·Q²) mentre la portata d'aria diminuisce con una relazione approssimativamente lineare rispetto all'incremento delle perdite di carico, e diminuendo la portata d'aria diminuisce la potenza misurata al ventilatore secondo una curva che è anch'essa approssimabile quasi lineare, soprattutto per i sistemi più grandi. Anche la potenza di raffreddamento, ottenuta tramite simulazioni da modelli (le unità analizzate non provvedevano al riscaldamento durante lo studio, inoltre è stato rilevato sperimentalmente che la portata influenza solo marginalmente la capacità di riscaldamento), diminuisce ma non in modo lineare.

Su indicazione dei fabbricanti dei filtri riguardo alle cadute di pressione finali consigliate, gli autori hanno analizzato incrementi di perdite di carico da 2 fino a circa 5 volte il valore relativo alla condizione iniziale del sistema (a filtro pulito) cui corrispondono, rispettivamente, decrementi mediani della portata d'aria rispettivamente del 16% e del 47%, e della potenza al ventilatore del 13% e del 38%, una diminuzione di potenza che è spiegabile con l'importante riduzione di portata rispetto all'aumento di pressione, che comporta anche una diminuzione della potenza usata per il raffrescamento e allo stesso tempo un aumento della lunghezza del ciclo di raffrescamento per soddisfare il carico di calore da asportare.

Nel caso del sistema con regolazione della velocità, se le cadute di pressione nei filtri aumentano si ha aumento della velocità al ventilatore per mantenere la portata costante (il ventilatore cambia la sua curva di funzionamento), e la potenza al ventilatore risulta aumentare con una relazione approssimativamente lineare rispetto alla velocità del ventilatore, così come le perdite di carico.

L'aumento della potenza necessaria al ventilatore è misurato del 13% se raddoppiava la perdita di carico ai filtri, e del 63% se quintuplicava, mentre la potenza necessaria al raffreddamento rimaneva approssimativamente costante essendo la portata d'aria costante.

Il rendimento globale mediano del ventilatore considerando entrambi i tipi di sistemi è stato calcolato del 23% (massima efficienza calcolata del 36%), probabilmente dovuto al fatto che si tratta di sistemi di dimensioni mediopiccole.

Lo studio si concentrava poi sull'analisi dell'effetto dei filtri con maggiore efficienza di filtrazione sul consumo energetico e sulla qualità dell'aria. Una considerazione preliminare, che trova conferma da altre fonti, è che l'efficienza di filtrazione non è uno dei fattori fondamentali nel determinare l'entità delle perdite di carico, e quindi del consumo energetico, soprattutto rispetto al design dei filtri stessi: ci possono essere filtri che rimuovono particelle più piccole in maggior quantità e provocare meno cadute di pressione rispetto a filtri meno efficienti.

I risultati di questo studio sono simili, nella teoria e in parte nei risultati, a quelli di altri 2 studi, effettuati però su sistemi HVAC di dimensioni mediopiccole.

Stephens B., Siegel A., Novoselac A. [18] hanno misurato la portata d'aria, il consumo energetico, la caduta di pressione dovuta ai filtri e le variazioni nella capacità di condizionamento di 17 tra edifici per uffici e residenziali, con potenze di raffreddamento dai 5,3 ai 17,6 kW, installando in un anno filtri con diversa efficienza di filtrazione per periodi di 3 mesi, per analizzare i loro effetti sui parametri energetici e il comportamento al variare dell'efficienza di filtrazione.

I ventilatori dei sistemi analizzati erano dotati di motori tipici per applicazioni di queste dimensioni, 15 avevano motori PSC (Permanent Split Capacitor), 2 di tipo ECM (Electronically Commutated Motor), detti anche BPM (Brushless Permanent Magnet): i primi di norma non permettono una regolazione della portata ma al crescere della resistenza essa diminuisce così come la potenza, mentre gli altri la riescono a mantenerla costante aumentando la potenza.

Per sistemi di dimensioni minori sembra che gli effetti energetici siano minori, verosimilmente perché dipendono dalle portate e dalle cadute di pressione che in questi casi sono minori: al raddoppiare delle cadute di pressione, sia

per intasamento del filtro che per l'uso di filtri con maggiore efficienza di filtrazione, si ha mediamente una riduzione della portata del 6-8% quando la sola ventilazione era attiva, e del 7-10% quando il sistema doveva raffrescare, e una riduzione dell'assorbimento di potenza per il ventilatore rispettivamente tra l'1% e il 3% e tra il 4% e il 6%.

Filtri di diversa categoria di filtrazione sono stati impiegati per lo stesso periodo di tempo (3 mesi), e gli autori sono giunti a conclusioni simili a quelle di altri studi: l'uso di filtri con elevata efficienza di filtrazione (MERV11 e 12) rispetto a filtri di categoria inferiore causava una variazione mediana della potenza del ventilatore relativamente piccola (-1,1% perché la portata diminuiva), un po' più grande nella stagione di raffrescamento (-4%).

Uno studio di diversi autori. [19] ha analizzato per un anno il comportamento di filtri di diversa efficienza di filtrazione e diverso design, installati in 10 case in California, misurando la caduta di pressione e il consumo energetico e usando software di simulazione, giungendo a conclusioni simili a quelle viste in precedenza.

Anche in questo caso i ventilatori erano dotati di motori di tipo PSC o PBM: con i primi si registrava una riduzione graduale della portata e della potenza del ventilatore mentre con i secondi la portata si confermava costante con un aumento del consumo del ventilatore.

Nel primo caso per una caduta di pressione finale tra 1,8 e 2,3 volte quella iniziale hanno registrato una riduzione media della portata del 36% e della potenza del 19%; nel secondo caso si è riscontrato un aumento del 22% della potenza del ventilatore per una caduta di pressione doppia.

Un parametro rilevante era il design dei filtri, e la loro geometria (profondità e superficie del mezzo filtrante): in particolare, tra i filtri in esame, quelli profondi 4 pollici avevano una caduta di pressione media di 94 Pa contro i 110 Pa di quelli profondi 1 pollice, e un tasso medio di accumulo di particolato pari a circa la metà rispetto ai filtri meno profondi.

Riepilogando:

Effetti dell'aumento di perdita di carico nei filtri			
Per Δp finale doppio di quello iniziale, se non indicato altrimenti			
Velocità del ventilatore fissa		Velocità del ventilatore variabile	
Riduzione	8% (medio dopo un	Portata	
portata	anno di accumulo	regolata	
	simulato)		
	6%÷10%		
	16%		
	36% medio (Δp 1,8-		
	2,3 volte quello iniziale)		
Variazione di	-7% ÷ +40% (dopo un	Aumento	13%
potenza	anno di accumulo	della potenza	22%
dipende da	simulato)	del ventilatore	2270
trade-off tra	- 13%	per	
aumento di	-1% ÷ -6%	mantenere la	
pressione e	-4,8% ÷ 9,3%	stessa portata	
riduzione di	-19% medio (Δp 1,8-		
portata	2,3 volte quello		
	iniziale)		
Variazione	2,2% ÷ 9% annuo	Portata voluta	
consumo		è mantenuta,	
energetico per		effetto	
raffrescamento		trascurabile sul carico	
		termico	
Variazione del	2,5% ÷ 5% annuo	Aumento di	25% ÷ 30%
consumo	2,070 · 070 annuo	consumo	annuo
energetico del		energetico	
ventilatore		9	

4.3 Raccomandazione Eurovent 4/21-2018

Uno dei metodi universalmente accettati nel settore della filtrazione per valutare il consumo energetico dei filtri si basa sulla certificazione di

Eurovent, perché quest'ultima garantisce imparzialità, rispetto delle norme internazionali e controllo delle prestazioni.

In particolare, il metodo consigliato è definito nella raccomandazione Eurovent 4/21- 2018 [10]: in essa si valuta il consumo energetico (in KWh/anno) dovuto ai filtri in base alla caduta di pressione che essi provocano, secondo la seguente formula:

$$E = \frac{q_v \cdot \overline{\Delta p} \cdot t}{\eta \cdot 1000}$$

dove $\overline{\Delta p}$ è la perdita di carico media in Pa (integrale nel periodo di tempo considerato della perdita di pressione che varia a causa dell'intasamento del filtro)

 q_v è la portata d'aria volumetrica in m³/s, costante a 0,944 m³/s t è il tempo operativo (di 6000 ore/anno)

η è il rendimento del sistema di ventilazione (pari a 0,5)

La formula permette di classificare i filtri dal punto di vista energetico e vale per sistemi con ventilatori dotati di Variable Speed Drive (VSD) che permette di variare la velocità del ventilatore per avere un valore di portata costante. Considerando costanti i valori indicati, l'unica variabile che cambia, crescendo nel tempo, è la caduta di pressione media. Essa però è valutata in condizioni di laboratorio, usando una polvere sintetica di test e seguendo una procedura standard, perciò i valori ottenuti possono essere molto diversi da quelli in un sistema vero in condizioni non controllate.

Infatti, la perdita di carico media viene calcolata come somma delle perdite di carico misurate ad ogni accumulo indotto di polvere di test moltiplicato per la relativa quantità di polvere, diviso per la massa totale di polvere accumulata.

$$\overline{\Delta p} = \frac{1}{M_x} \cdot \sum_{i=1}^n \overline{\Delta p_i} \cdot \Delta m_i$$

Inoltre, il fatto che sistemi di ventilazione come quello in esame in questa tesi siano sì dotati di regolazione della velocità del ventilatore ma operino a portate variabili a seconda del fabbisogno è un ulteriore aspetto che può far differire i risultati.

Dalla precedente formula di Eurovent, nel campo della filtrazione viene usata, ipotizzando un costo medio dell'energia di 10 cent/KWh, come rule of thumb l'equivalenza:

1 € ≈ 1 Pa

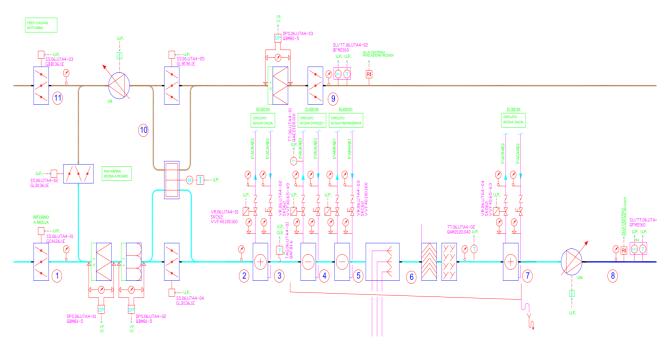
Le classi di efficienza energetica Eurovent, classificate secondo la EN 779:2012, variano con il consumo energetico annuo dovuto ai filtri:

Classe energetica	Classe del filtro	
	M5	M6
A+	0 – 450 kWh	0 – 550 kWh
Α	> 450 kWh – 600 kWh	> 550 kWh – 650 kWh
В	> 600 kWh – 700 kWh	> 650 kWh – 800 kWh
С	> 700 kWh – 950 kWh	> 800 kWh – 1100 kWh
D	> 950 kWh – 1200 kWh	> 1100 kWh – 1400 kWh
E	> 1200 kWh	> 1400 kWh

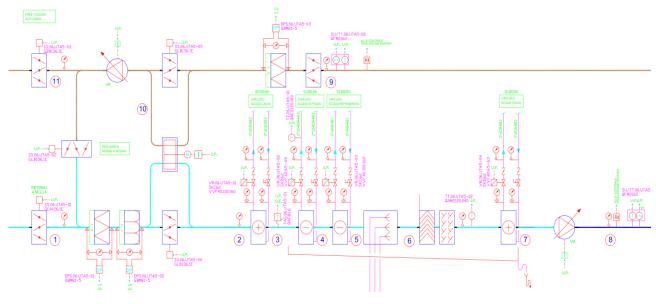
Classe	Classe del filtro		
energetica	F7	F8	F9
Minumum	ME ≥ 35%	ME ≥ 55%	ME ≥ 70%
Efficiency			
A+	0 – 800 kWh	0 – 1000 kWh	5 – 1250 kWh
Α	> 800 kWh – 950	> 1000 kWh – 1200	> 1250 kWh – 1450
	kWh	kWh	kWh
В	> 950 kWh – 1200	> 1200 kWh – 1500	> 1450 kWh – 1900
	kWh	kWh	kWh
С	> 1200 kWh -	> 1500 kWh – 2000	> 1900 kWh – 2600
	1700 kWh	kWh	kWh
D	> 1700 kWh -	> 2000 kWh – 3000	> 2600 kWh – 4000
	2200 kWh	kWh	kWh
E	> 2200 kWh	> 3000 kWh	> 4000 kWh

5. Descrizione degli impianti

Le Unità di Trattamento Aria disponibili ad essere esaminate si trovano al sesto piano del grattacielo Intesa San Paolo (detto anche Torre ISP) nella città di Torino e sono l'UTA 4 e l'UTA 5. Si tratta di UTA gemelle, perché hanno gli stessi componenti, operano alle stesse condizioni, senza ricircolo dell'aria, e riforniscono ambienti per uffici simili.



Schema UTA 4 - Fonte: archivio PRODIM



Schema UTA 5 - Fonte: archivio PRODIM

5.1 Componenti delle UTA

• Ventilatore di mandata: di tipo plug-fan, ventilatore centrifugo con pale curvate all'indietro, ha i seguenti dati di targa per entrambe le UTA:

Tipo	NPA 900
Potenza nominale motore	45 kW
Portata nominale	38090 m ³ /h
Pressione statica	1550 Pa
Max velocità rotazione girante	1600 rpm

• Ventilatore di ripresa:

Tipo	NPA 800
Potenza nominale motore	30 kW
Portata nominale	33085 m ³ /h
Pressione statica	1000 Pa
Max velocità rotazione girante	1800 rpm

• Batteria di riscaldamento

Potenza	380,9 kW
Portata d'acqua	18,19 l/s
Temperature aria	-10° C – 19,2° C
Temperature acqua	45° C – 40° C

• Batteria di preraffreddamento

Potenza	61,3 kW
Portata d'acqua	2,93 l/s
Temperature aria	28,6°C – 24°C
Temperature acqua	19°C – 24°C

Batteria di raffreddamento

Potenza	544,3 kW
Portata d'acqua	26 l/s
Temperature aria	34°C – 12,5°C

Temperature acqua	7°C – 12°C
Tomporataro acqua	17 0 12 0

Batteria di post-riscaldamento

Potenza	118,4 kW
Portata d'acqua	5,66 l/s
Temperature aria	15°C – 24°C
Temperature acqua	45°C – 40°C

Umidificatore

- Separatore di gocce e separatore a maglie di acciaio
- Recuperatore rotativo igroscopico



Sezione dell'UTA senza filtri



Serranda a valle della sezione filtrante



Sezione dell'UTA con filtri installati

5.2 Filtri testati

I filtri usati devono avere un'efficienza di filtrazione minima. Poiché i valori indicati dalla raccomandazione Eurovent sono superati, secondo le concentrazioni registrate dall'ARPA, si può classificare l'aria esterna come ODA 3. Trattandosi di un edificio per uffici, la categoria più indicata sarà SUP 2. L'efficienza minima di filtrazione risulta essere ePM₁ 80% (F9 secondo la precedente normativa), che è rispettata da entrambi i filtri e con in più

l'aggiunta di un pre-filtro ISO Coarse 50% per quello standard e ISO Coarse 70% per quello premium.

I filtri a tasche e i pre-filtri nelle UTA erano 10 di sezione 592x592, 5 di sezione 592x287.

La differenza principale tra i filtri in esame è la loro superficie filtrante e le perdite di carico iniziali dovute al loro design e ai materiali utilizzati.

	Filtri a tasche		Pre-filtri	
	Premium	Standard	Premium	Standard
	(4 diedri	(2 diedri)		
Superficie filtrante [m²]	17	9,5	1,64	0,6
Δp iniziali [Pa]	90 (a 3400	130 (a	70 (a 3420	70 (a 3400
	m ³ /h)	2550 m ³ /h)	m ³ /h)	m ³ /h)



Filtri a tasche premium (a sinistra) e tradizionale (a destra) appena installati





Pre-filtri premium (a sinistra) e tradizionale (a destra) appena installati





Pre-filtri visionati l'ultima volta

Nei condotti di ritorno sono presenti dei filtri G4, su cui non si è potuto operare.

5.3 Funzionamento e regolazione delle UTA

La climatizzazione del grattacielo ISP è affidata a un sistema di pannelli radianti per garantire un comfort superiore rispetto ai tradizionali fan-coil o agli impianti a tutt'aria. Il fluido termovettore è acqua prodotta, per il raffrescamento, da 5 gruppi frigoriferi (di cui uno di riserva) a levitazione magnetica che utilizzano acqua di falda e che sono reversibili a pompa di calore per produrre l'acqua di riscaldamento.

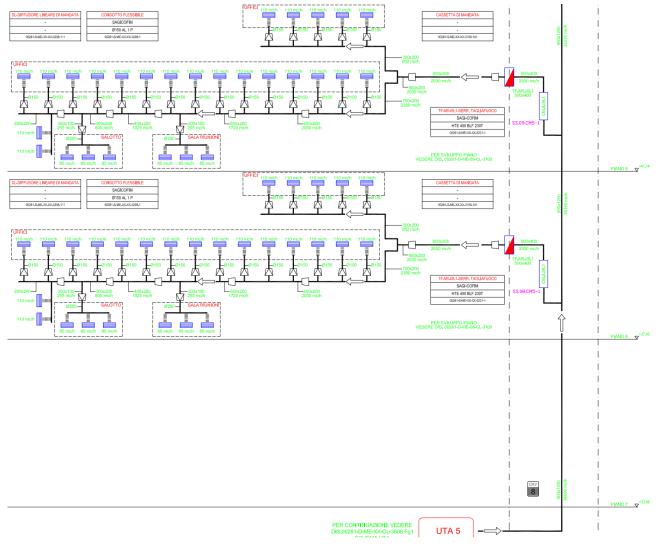
Poiché alle UTA non è affidato il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti, esse forniranno un'aria di ricambio "neutra" e controlleranno principalmente la movimentazione dell'aria (evitando che essa provochi un eccessivo discomfort agli utenti) e la sua qualità.

Le UTA hanno due modalità operative, estate e inverno, e per ognuna si considera un valore di temperatura di mandata di set point, che può variare leggermente a seconda delle richieste del committente.

Al fine di ridurre il consumo energetico dovuto alla movimentazione dell'aria, le UTA operano a portata variabile a seconda del livello di qualità dell'aria imposto e misurato da rilevatori di CO2, per cui non mantengono un valore di portata d'aria costante, che risulterebbe eccessivo nei momenti in cui gli

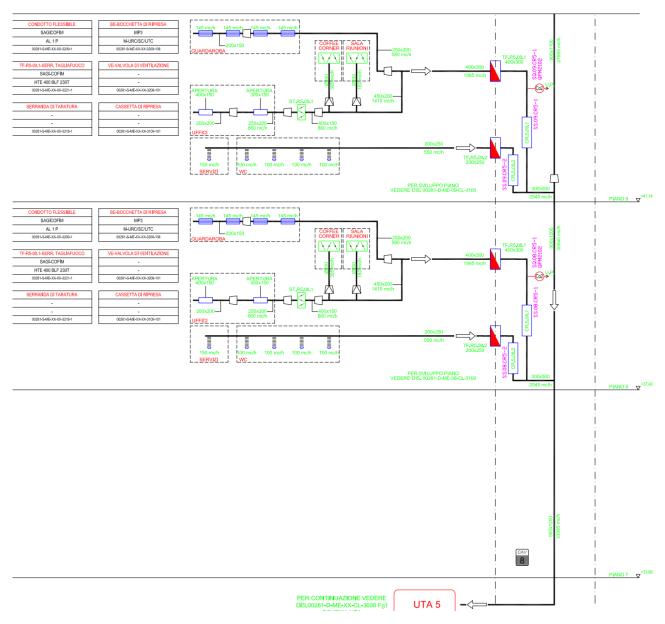
ambienti sono poco affollati, ma tengono conto delle effettive necessità di ventilazione. Il sistema di condizionamento delle UTA rientra quindi nella categoria DCV (Demand Controlled Ventilation).

Ciascuna UTA rifornisce i piani dall'8 al 20, l'UTA 4 nel lato ovest dell'edificio e l'UTA 5 nel lato est. La ventilazione in base al fabbisogno reale è effettuata agendo sulle cassette di regolazione dell'aria di ogni piano, la cui posizione è visibile ad esempio nello schema altimetrico dei primi due piani della mandata dell'UTA 5 (rettangoli blu).



Schema altimetrico mandata UTA 5

La regolazione avviene in base ai valori misurati da sonde di CO₂ poste nelle condotte di ripresa dei piani (cerchi rossi nell'esempio dello schema altimetrico dei primi due piani riforniti dall'UTA 5).

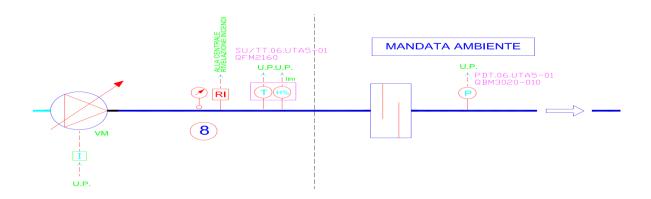


Schema altimetrico ripresa UTA 5

Il ventilatore di mandata è progettato per mantenere un valore di prevalenza statica utile pari a 550 Pa nel canale di mandata, mentre il ventilatore di ripresa mantiene un valore costante di 400 Pa (per evitare che negli ambienti entri aria non trattata, la portata di progetto alla mandata sarà maggiore di quella alla ripresa).

Il ventilatore di mandata varia la velocità in base al valore di pressione misurato da un sensore di pressione nel canale di mandata posto pochi metri dopo il ventilatore (vedi figura seguente): per fare in modo che la differenza tra il valore misurato, che cambia in base alle esigenze di ventilazione dei vari piani, e quello di set-point tenda a zero, il sistema di regolazione manda un

segnale all'inverter che aumenterà o diminuirà la percentuale del numero di giri per inseguire il valore di pressione imposto.



Per il test in questione ci si è potuti concentrare solo sul ventilatore di mandata di marca Comefri, dotato di un motore trifase a singola polarità di marca SMEM modello 7SM2 225M-4.

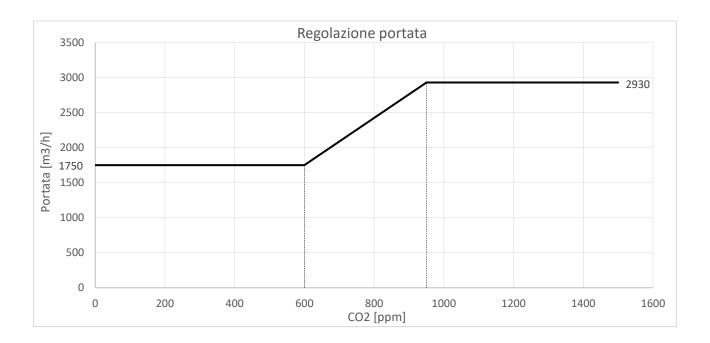


Ventilatore di mandata

La regolazione delle cassette di regolazione è indipendente da quella del ventilatore. Quando il canale è in pressione esse regolano la portata a seconda della necessità di ciascun piano.

Le cassette di regolazione sono della Trox, serie TVZ/TVA, e sono costituite da serrande di regolazione azionate da un servo motore, un sensore di

pressione differenziale e un regolatore di portata. La regolazione si basa su una logica di misurazione-confronto-impostazione. Il sensore di pressione misura la portata, che viene confrontata con quella corrispondente alla quantità di CO₂ nei piani impostata secondo il seguente diagramma di regolazione:



Per un valore di concentrazione di CO₂ rilevato minore di 600 ppm è stata impostato un set-point minimo di portata pari a 1750 m³/h che corrisponde al 60% della portata di progetto, quest'ultima, 2930 m³/h, è il set-point massimo di portata per valori di CO₂ superiori a 950. Tra 600 ppm e 950 si ha una regolazione lineare.

Il regolatore di portata della Belimo, avendo confrontato il valore effettivo con quello impostato, manda un segnale al servomotore che cambia la posizione angolare delle serrande. Il segnale è compreso tra 0 e 10 V:

- 0-2 V: segnale di shut-off, chiusura delle serrande
- 2 V: corrisponde alla portata minima
- 10 V: corrisponde alla portata massima (e ad un'apertura massima delle serrande del 75%)



Cassette TROX

Il corretto funzionamento delle UTA è gestito e monitorato dal Building Management System (BMS), che permette di visualizzare e registrare i vari parametri di funzionamento e di intervenire in tempo reale.

Orari Le UTA seguono i seguenti orari:

Lunedì	4:30 - 18:45
Martedì – Venerdì	6:30 – 18:45
Sabato	6:30 – 12:45

A queste ore di funzionamento se ne aggiungono altre in occasione di accensioni particolari o eventi nei week-end.

5.4 Strumentazione

Termomanometro digitale KIMO MP 202

Range di misura: da 0 a ±1000 Pa

Accuratezza: ±0,5% della misura ±1 Pa

Risoluzione: 1 Pa



Sensore di pressione differenziale Siemens QBM3020-25

Range di misura: 0/2500 Pa

Accuratezza: ±0,7% del Fondo Scala

Risoluzione: 1 Pa



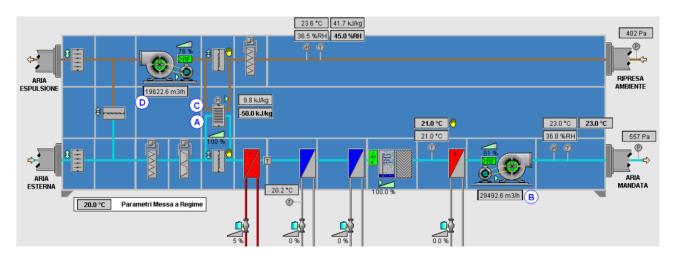
Il sensore di pressione differenziale permette di ricavare la portata in maniera indiretta dalla misura della differenza di pressione statica tra la camera di aspirazione e il boccaglio del ventilatore, tramite la formula:

$$\dot{V} = K * \sqrt{\frac{2}{\rho} * \Delta P}$$

dove: K=878 è il fattore di calibrazione dipendente dalla grandezza della girante (fornito dal costruttore) e ρ =1,2 kg/m³.

Desigo Insight Management Station

Le grandezze in figura sono monitorate e alcune su richiesta vengono fatte registrare. La potenza e il consumo energetico del ventilatore di mandata sono letti dal Desigo direttamente dall'inverter.



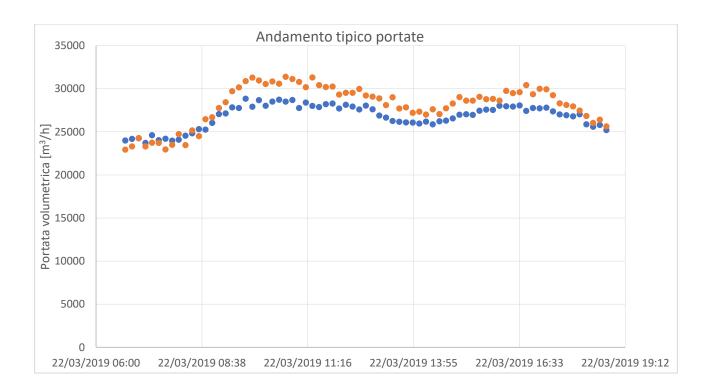
Esempio schermata Desigo per l'UTA 5.

6. Misure effettuate

L'obiettivo è verificare che filtri con un'alta efficienza di filtrazione certificata e con un'elevata superficie filtrante, detti filtri premium, possono portare a perdite di carico di molto inferiori rispetto a quelle causate da filtri tradizionali con bassa superficie filtrante, in sistemi a portata variabile a seconda del fabbisogno.

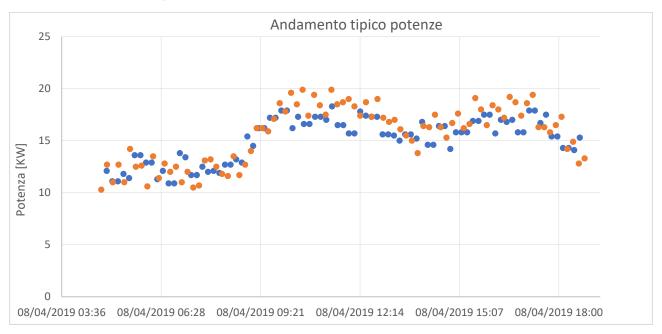
6.1 Stima dei volumi d'aria trattati

Un esempio di andamento delle portate nelle due UTA per un giorno qualunque è il seguente:



Si nota come al mattino presto la portata d'aria richiesta alle UTA si attesta su valori minori, per poi crescere mentre col passare delle ore aumentano il grado di occupazione e la concentrazione di CO₂ negli ambienti, diminuisce e rimane circa costante tra le 12.30 e le 14.30 in corrispondenza della pausa pranzo, quando i lavoratori escono per mangiare, per poi aumentare nuovamente nel pomeriggio.

Un discorso analogo vale per le potenze:



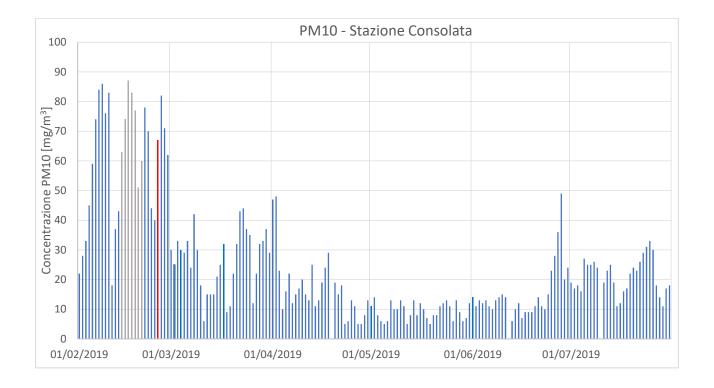
Poiché le portate sono sempre diverse, per poter fare un confronto tra le due UTA si è fatta una stima del volume d'aria effettivo che le UTA hanno filtrato, contando anche le ore in cui esse erano in funzione fuori dall'orario lavorativo settimanale, per verificare se ci fosse un'eccessiva differenza tra le quantità d'aria che sono passate attraverso i diversi filtri. Conoscendo l'andamento giornaliero delle portate (registrate ogni 11 minuti), approssimando le portate a valori costanti per ogni step temporale ed escludendo i transitori (valori registrati in prossimità delle accensioni e degli spegnimenti delle macchine), risultano così:

34886700 m³ circa di aria filtrata per l'UTA 4 con filtri tradizionali, e 35408300 m³ circa di aria per l'UTA 5 con filtri premium, una differenza dell'1,5% in più per l'UTA 5 che si può considerare non eccessiva e permette un confronto.

6.2 Perdite di carico nel periodo di confronto

Per il periodo di confronto si riportano i valori di particolato atmosferico dalla stazione di rilevamento dell'ARPA più vicina al grattacielo San Paolo, che però misurava solo il PM10, per notare le variazioni di concentrazioni giornaliere a partire dall'inizio delle osservazioni per i filtri tradizionali (primo valore in tabella) e il periodo dall'installazione dei filtri premium (barra rossa).

I valori in grigio sono stati presi da un'altra stazione di rilevamento perché erano mancanti.



Il periodo di confronto per i due tipi di filtri è stato di 19 settimane ma avrebbe dovuto essere maggiore per coprire tutto il periodo invernale, invece si è potuto iniziare solo da fine febbraio. Inoltre, per motivi logistici (non erano disponibili immediatamente i filtri tradizionali nei magazzini della Torre ISP), sono stati installati i filtri premium 4 settimane dopo quelli tradizionali: contando che 13 di quei giorni di attività sono stati caratterizzati da concentrazione di particolato elevate rispetto agli altri, i filtri a tasche dell'UTA 4 hanno operato in condizioni più svantaggiose rispetto a quelli dell'UTA 5, che però saranno controllati anche dopo che è finito il periodo di confronto.

Per quanto riguarda l'efficienza di filtrazione, poiché non si tratta di filtri elettrostatici essa non diminuisce col tempo, ma al contrario tende ad aumentare.

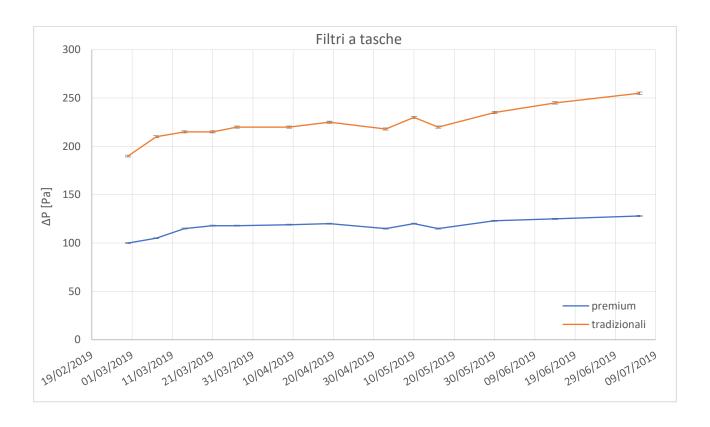
Le misure di pressione sono state fatte con la supervisione di un membro del personale dell'azienda che si occupa della gestione e manutenzione del grattacielo, e sono state fatte una volta alla settimana, o una volta ogni 2 settimane, a seconda della disponibilità del personale.

La caduta di pressione su filtri e pre-filtri è stata misurata ad un valore di portata costante grazie al software Desigo che permette di intervenire direttamente sul numero di giri del ventilatore o sulla percentuale di apertura delle serrande delle cassette VAV dei piani (cioè quando le serrande vengono fatte aprire il ventilatore interviene automaticamente aumentando il numero di giri per compensare la depressione indotta e così aumenta la portata, e viceversa quando le serrande vengono fatte chiudere).

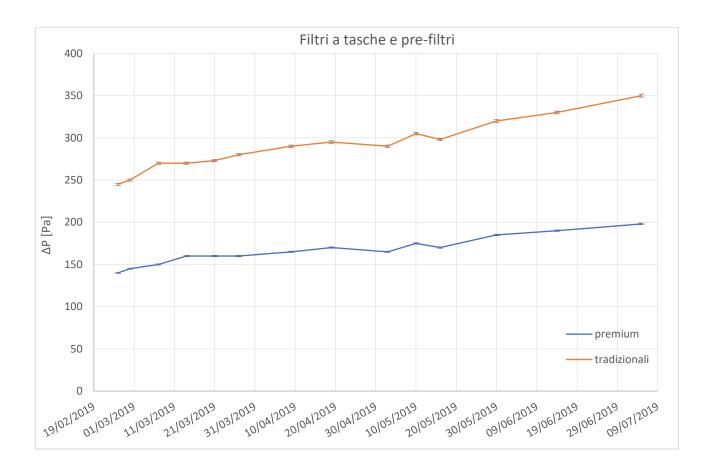
Per ognuna delle UTA si sono misurate le cadute di pressione prima sull'insieme di filtri a tasche e pre-filtri, poi fermando le macchine e togliendo i pre-filtri, sui soli filtri a tasche.

Per effettuare le misure si aspettava qualche minuto per far arrivare la portata al valore voluto di 32'000 m³/h, usato abitualmente dal personale per le verifiche periodiche, e mantenerla stabile e, soprattutto dopo l'arresto della macchina, per farla arrivare a regime, e per ogni misura veniva considerato il valore di pressione medio, a causa delle variazioni dovute alle oscillazioni della portata d'aria, segnato dal manometro digitale.

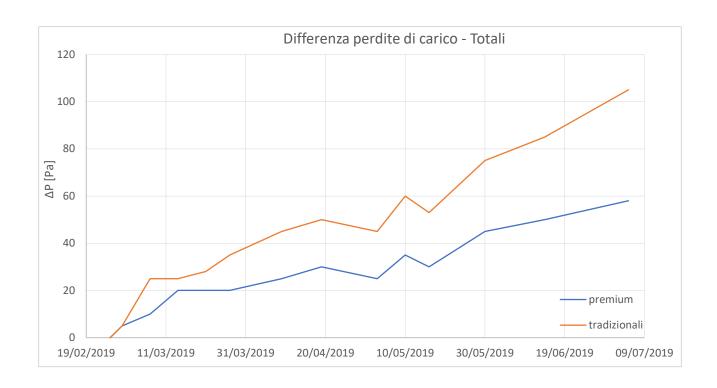
L'andamento delle cadute di pressione per i filtri a tasche durante il periodo di confronto è quello in figura (con indicata l'incertezza sulla misura dello strumento):

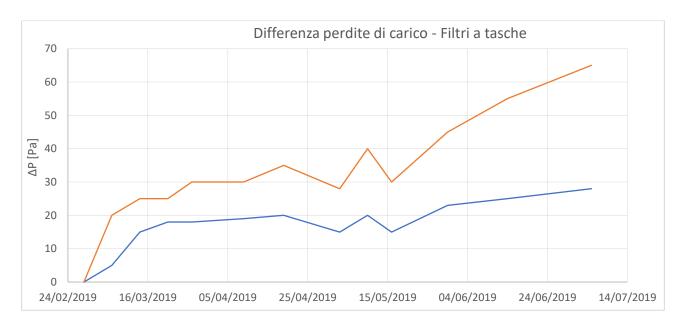


Per il totale di filtri e pre-filtri si ha il seguente andamento:



Per vedere meglio la differenza nel tempo, si può vedere l'aumento rispetto al primo valore:





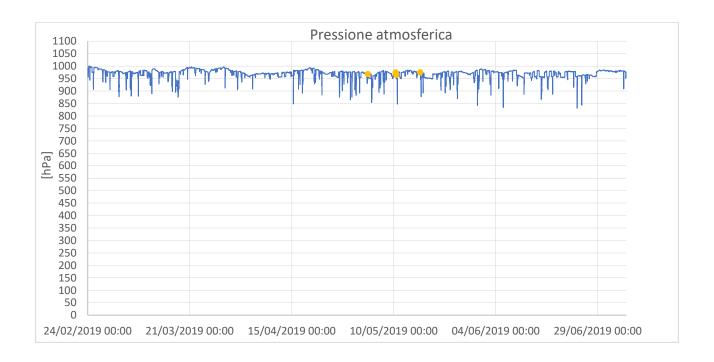
Nelle 19 settimane di confronto risulta che l'accumulo di polveri nei filtri ha provocato delle perdite di carico che per i filtri con minore superficie filtrante è stato più del doppio rispetto a filtri a tasche premium (65 vs 28), maggiore per i pre-filtri (35 vs 25) e per il totale (105 vs 58).

	UTA 4 – Filtr	i tradizionali	UTA 5 – Filtri premium	
	Inizio	Fine	Inizio	Fine
Filtri a tasche [Pa]	190	255	100	128

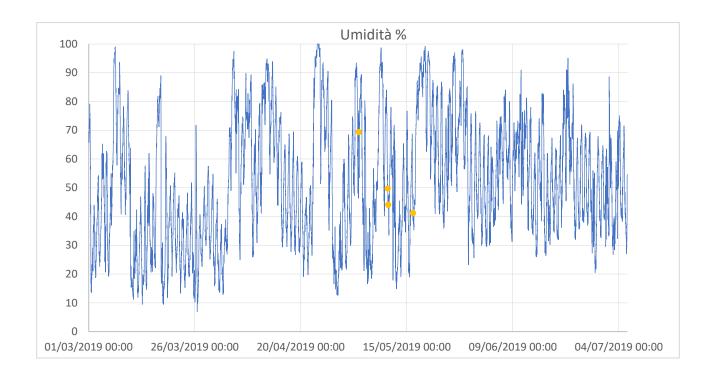
Pre-filtri [Pa]	60	95	45	70
Totale	245	350	140	198

L'aumento delle cadute di pressione per i filtri a tasche premium nel periodo di confronto, considerando che i volumi di aria trattati dalle UTA sono paragonabili, risulta essere decisamente minore, segno che i pre-filtri hanno filtrato meglio l'aria proteggendo i filtri a tasche, e che questi di per sé provocano meno perdite di carico.

Dai grafici si notano delle anomalie nell'andamento cadute di pressione, che in un paio di punti misurati si riducono invece di crescere. Oltre alle oscillazioni inevitabili della portata e alle incertezze nella misura della pressione e della portata, le cause possono essere nelle condizioni atmosferiche dell'aria, che variano con la pressione atmosferica, l'umidità e la temperatura.



Dall'andamento della pressione atmosferica, registrato dalla stazione di rilevamento del Politecnico, si vede che le misure in questione (le due anomale e quella in mezzo) sono state prese in momenti in cui la pressione atmosferica aveva valori simili tra di esse.



Se si guardano i valori di umidità dell'aria esterna rilevati nel Grattacielo San Paolo, si vede che per la prima anomalia i valori di umidità sono maggiori: a simile pressione esterna e simile temperatura registrata, un'umidità maggiore rende l'aria meno densa e più leggera a parità di volume. Tuttavia, ciò probabilmente spiega solo in parte un'anomalia, ma non l'altra. Inoltre, i valori di temperatura e umidità relativa non sono presi in prossimità del filtro, ma all'esterno dell'edificio.

6.3 Consumo energetico secondo linee guida Eurovent

Il periodo operativo dei filtri era sfasato per le due UTA, tuttavia è stato possibile misurare le cadute di pressione per i filtri tradizionali all'inizio della loro vita (pochi giorni dopo l'installazione) per l'UTA 4, per cui si è usato quel valore per un confronto in base alle ore di funzionamento previste dagli orari di lavoro.

Ciò è stato fatto per poter inserire anche i valori di perdita di carico misurati al momento dell'installazione per i due tipi di filtri nella formula di Eurovent, per poter avere un confronto che non penalizzasse i filtri tradizionali che erano stati misurati dopo rispetto a quelli premium e quindi partivano da una perdita di carico maggiore.

La formula di Eurovent si applica nei casi di UTA con ventilatori in cui la velocità è regolata per avere una portata d'aria costante, le UTA in esame sono state progettate per avere una regolazione di velocità per cui la portata varia continuamente: al posto dei valori previsti da Eurovent si sono usati i valori di pressione misurati sul campo, la portata a cui sono state misurate le perdite di carico e le ore di funzionamento programmate:

$$E = \frac{q_v \cdot \overline{\Delta p} \cdot t}{\eta \cdot 1000}$$

I consumi energetici secondo Eurovent sono quelli in tabella, usando come valori costanti q_v = 0,708 m³/s; t = 1278 h; η = 0,5;

	Filtri a tasche premium	Pre-filtri premium	Filtri a tasche tradizionali	Pre-filtri tradizionali
Perdite di carico medie [Pa]	117	51,7	214,4	66,5
Consumo energetico [KWh/y]	211,8	93,6	388,2	120,4

Se il filtro operasse sempre allo stesso valore di portata al quale è stata misurata la perdita di carico si avrebbe un consumo energetico quasi doppio per quello a tasche comune e quasi un terzo più grande per il pre-filtro.

In realtà si tratta di valori approssimativi, perché si suppone che il filtro operi sempre allo stesso valore di portata, mentre in questo impianto essa cambia a valori anche lontani da quello. Inoltre, c'è da considerare la differenza di carico di polveri che hanno subito i diversi filtri.

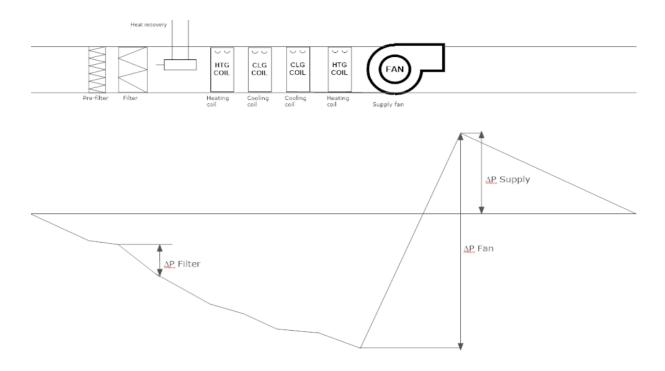
6.4 Curve pressione-portata

Il ventilatore per movimentare la portata d'aria deve fornire una prevalenza per vincere le perdite di carico nel tratto di aspirazione (dal valore di pressione ambiente si ha una depressione causata dai componenti che l'aria deve attraversare) e per mantenere il canale di mandata a una pressione costante. Se la perdita di carico dovuta ai filtri diventa maggiore, sarà maggiore il salto di pressione nell'aspirazione che il ventilatore dovrà vincere, per cui la potenza richiesta aumenterà.

La prevalenza fornita dal ventilatore può essere scomposta in contributi diversi: la pressione nei condotti di mandata, la caduta di pressione nei filtri, quella nei componenti (batterie di scambio termico, recuperatore) e nei condotti di aspirazione.

Se il salto di pressione nel tratto di mandata è considerabile costante, nel tratto di aspirazione possiamo rappresentare i diversi contributi di pressione come potenze con esponenti e coefficienti che variano con la portata d'aria, per poi concentrarsi solo sul contributo del filtro:

$$\Delta P_{TOT} = \Delta p_{filtri} + \Delta p_{batterie} + \Delta p_{recuperatore} + \Delta p_{condotti} + \Delta p_{mandtata}$$

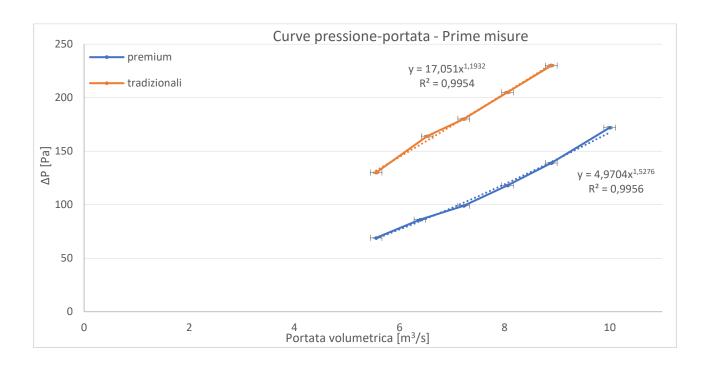


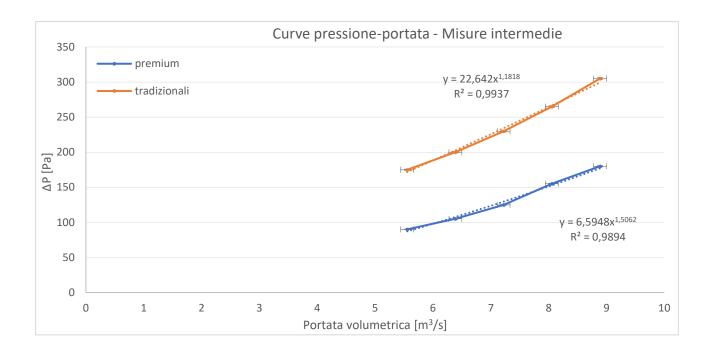
Poiché non è stato possibile installare dei data logger per misurare la pressione dei filtri, per avere un'idea della variazione di questa nel tempo si è calcolata in diversi momenti la relazione che lega la caduta pressione e la portata nei filtri, facendo variare la portata per diversi valori del range di funzionamento delle due UTA e misurando le corrispondenti pressioni. Come visto negli studi precedenti, come relazione con la velocità (o con la portata volumetrica) si possono considerare diverse curve di fitting, come un polinomio di 2° grado o una potenza, per semplicità si è scelta quest'ultima:

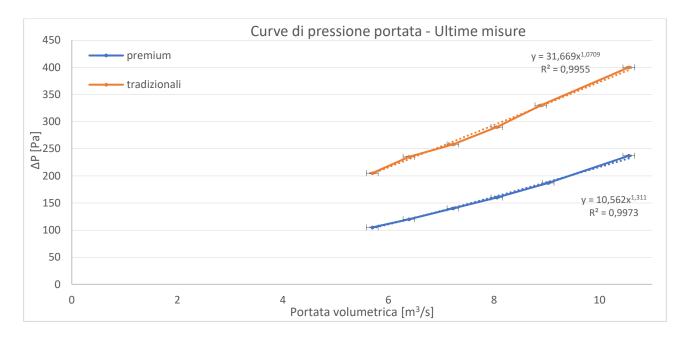
$$\Delta p_{filtri} = c \cdot q_v^{\ n}$$

Non è stato possibile calcolare empiricamente coefficienti ed esponenti per i soli pre-filtri, poiché togliere e rimettere i filtri a tasche rigide e fare le misure di pressione al variare della portata con i soli pre-filtri installati avrebbe comportato molto più tempo e un maggiore impegno da parte del personale, perciò per essi si sono considerate le perdite di carico come differenza tra il sistema filtrante totale e i filtri a tasche.

Dalle misure di pressione ricavate si è poi fatto un fitting con Excel per trovare la curva teorica che meglio approssima i valori misurati. Di seguito sono riportate come esempio le misure fatte per l'insieme di filtri e pre-filtri con le rispettive incertezze: le prime misure sono state effettuate a pochi giorni dall'installazione, quelle intermedie a circa metà della vita dei filtri tradizionali, le ultime verso la fine della vita dei filtri tradizionali. I valori dei coefficienti di determinazione R² sono generalmente superiori a 0,98, il che è stato preso come indice della bontà delle curve di regressione ottenute.







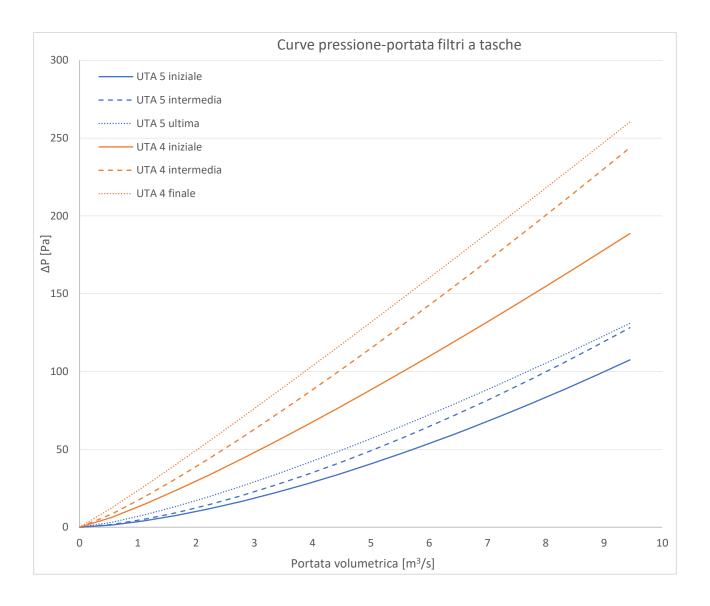
Dai valori dei coefficienti e degli esponenti delle curve ricavati si nota come ci sia la tendenza dei coefficienti a crescere nel tempo, mentre gli esponenti diminuiscono fino a tendere a 1, cioè a una retta.

Ciò è probabilmente dovuto al fatto che con l'aumentare dell'intasamento del media filtrante aumenta la resistenza provocata da esso, per cui le perdite di carico tendono a essere proporzionali alla portata, secondo la legge di Darcy per i mezzi porosi, mentre diminuirà per la caduta di pressione l'importanza del filtro come ostacolo al passaggio dell'aria (perdita di carico concentrata,

che tende a essere proporzionale al quadrato della portata) visto che essa dipende dalla geometria del filtro e questa non è cambiata.

Visto che la tendenza dei coefficienti ed esponenti viene seguita dalla somma di filtri e pre-filtri si è assunto lo stesso andamento per i pre-filtri.

L'andamento delle perdite di carico per il periodo considerato può essere rappresentato nel modo seguente per i filtri a tasche:



Le curve di inizio periodo sono state ricavate da misure fatte pochi giorni dopo l'installazione dei filtri, ma poiché i filtri dell'UTA 4 sono stati installati in periodi diversi, le curve iniziali si riferiscono per i filtri tradizionali all'inizio di febbraio e per i filtri premium a un giorno di fine febbraio. Non sarebbe esatto quindi fare un confronto diretto tra le curve perché fatte in diversi momenti della vita dei filtri, tuttavia si può notare come anche dopo quasi 19 settimane

di funzionamento le cadute di pressione dovute ai filtri premium siano comunque inferiori a quelle dovute ai filtri con minore superficie filtrante installati da pochi giorni.

Per poter calcolare successivamente il consumo energetico dei filtri, si è provato a ricostruire l'evoluzione dell'intasamento dei filtri considerandola come un processo continuo di accumulo, con conseguente aumento delle cadute di pressione, che è possibile rappresentare come evoluzione delle corrispondenti curve di pressione-portata dei filtri.

Si è pensato quindi di rappresentare la variazione delle perdite di carico nel tempo come variazione dei coefficienti c e degli esponenti n delle curve di pressione tra i giorni in cui sono stati ricavati. Si è diviso l'aumento del coefficiente e la diminuzione dell'esponente delle curve dei filtri, nel periodo tra le misure effettuate, per i giorni in cui sono state in funzione le UTA, facendo poi le ipotesi di:

- incremento (decremento) continuo graduale del coefficiente (esponente)
- incrementi maggiori (che rappresentano un accumulo maggiore di polveri nei filtri), per i giorni in cui si sono registrati valori più alti di particolato nell'aria dalla stazione di rilevamento più vicina (soprattutto nel periodo invernale), incrementi via via minori per i giorni in cui si hanno concentrazioni particolarmente basse; la stessa cosa per il decremento dell'esponente

In particolare, per fare in modo che i valori di pressione ottenuti in questo modo dessero valori che seguissero l'andamento delle misure di pressione effettuate in precedenza (per lo stesso valore di portata), nel primo periodo tra le prime misure e quelle intermedie (che comprendeva i giorni invernali in cui ci sono state maggiori differenze di concentrazione di particolato) si è moltiplicato l'incremento del coefficiente e il decremento dell'esponente per un fattore pari a:

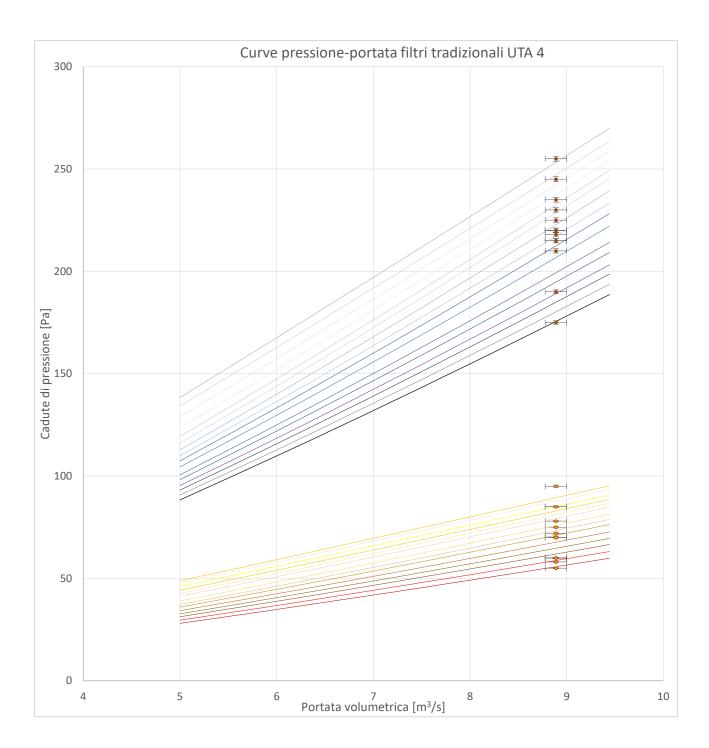
- 3 se la concentrazione giornaliera era maggiore di 80 μg/m³
- 2 se era compresa tra 40 e 80 μg/m³
- 1 se era compresa tra 15 e 40 μg/m³
- -- 1/2 se era minore di 15 μ g/m³

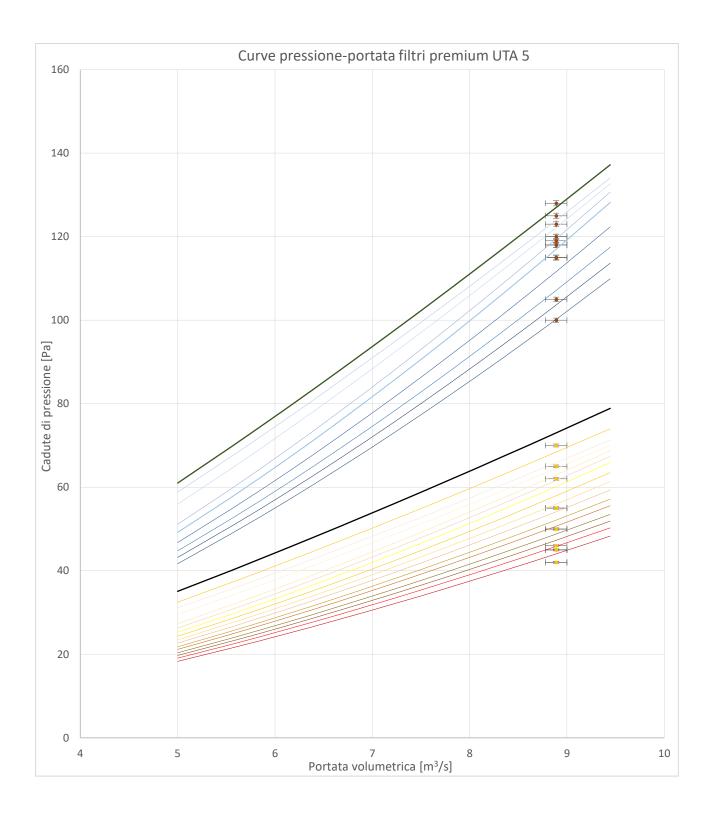
Per il periodo successivo (dai primi di maggio, molto più omogeneo in termini di concentrazioni di particolato) si è considerato un fattore moltiplicativo unitario.

Si è così rappresentata una evoluzione continua dell'accumulo nei diversi filtri, verificando che fosse compresa all'incirca tra i valori misurati, e che le pressioni calcolate, relative al valore di portata usato per le misure, non fossero troppo distanti da quelle effettivamente misurate (in alcuni casi i valori calcolati approssimavano bene quelli misurati stando entro la loro barra di errore della misura dovuta all'incertezza sulla portata, che era la più rilevante).

Nell'utilizzo delle curve caratteristiche ricavate si è scelto come criterio di validità delle stesse l'errore causato dall'incertezza sulla portata e sulla pressione applicato a tutte le curve, scegliendo di aggiornare le stesse, passando ad una curva relativa a un periodo successivo, quando si osservava graficamente che le barre di errore delle curve incominciavano a intersecarsi.

Nei grafici seguenti sono mostrate le curve caratteristiche ottenute ordinate regolarmente per il range di portata tipico delle UTA:





Per i filtri premium dell'UTA 5, le ultime curve (in nero, più spesse) rappresentano delle misure di perdita di carico fatte alla fine di settembre: dopo quasi 3 mesi dall'ultimo rilevamento (contando però che in mezzo ci sono state le ferie estive) le cadute di pressione di pre-filtri e filtri a tasche sono cambiate di molto poco, dando una conferma della lunga durata del filtro a tasche (che per la sostituzione raccomandata deve raggiungere i 300

Pa): risulta così giustificato assumere una durata di almeno un anno per questo.

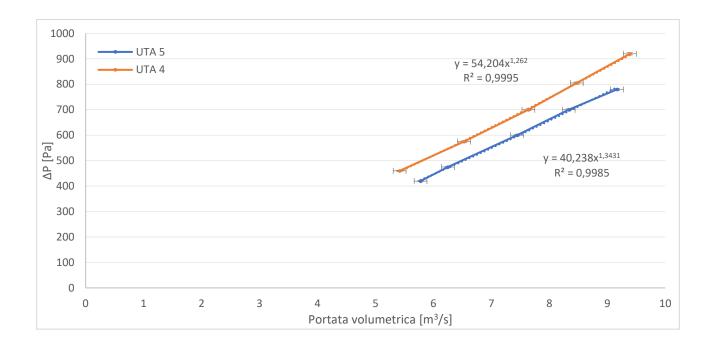
Per calcolare il consumo energetico dei filtri, oltre alla conoscenza dell'andamento delle portate e delle cadute di pressione dei filtri, è necessario tener presente che il rendimento globale dato dal prodotto dei rendimenti di ventilatore e motore non è costante, come da formula Eurovent (per la quale è considerato pari a 0,5) perché il rendimento del ventilatore varia con la portata e con la prevalenza che il ventilatore deve fornire.

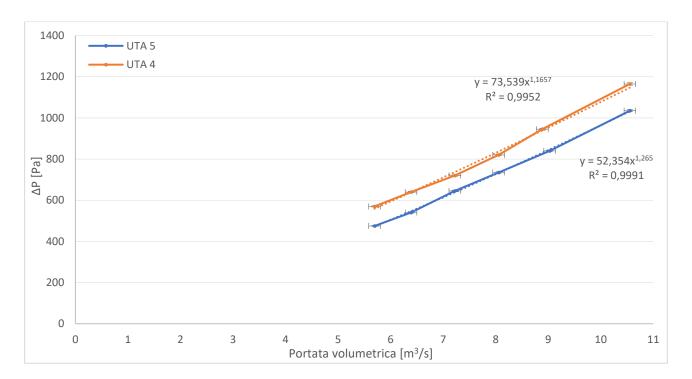
6.5 Stima del rendimento medio

Risulta complicato calcolare le variazioni di rendimento senza poter contare su sensori di pressione che misurano la prevalenza del ventilatore. Per avere una stima del rendimento medio si è così provato a misurare le cadute di pressione al variare della portata per il tratto di aspirazione che precede il ventilatore, che corrisponde al percorso che deve fare l'aria quando viene aspirata dall'esterno, comprendendo le perdite di carico dei condotti di aspirazione e dei vari componenti delle UTA (batterie di scambio termico, filtri, recuperatore di calore) a partire dalla pressione atmosferica, per alcuni giorni in cui è stato possibile effettuare le misure.

Si sono ottenute curve che sono la somma di contributi di pressione che variano con una potenza della portata, come per il caso dei filtri (non ci sono serrande di regolazione attive in quel tratto e non c'è ricircolo).

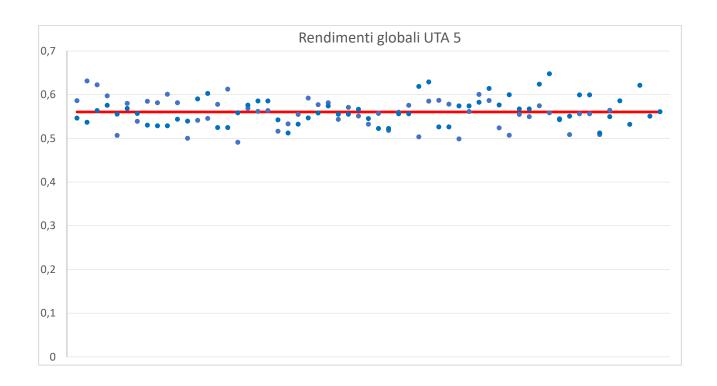
Esempi di curve pressione-portata per l'aspirazione ottenute sono i seguenti, con le relative barre di errore per le misure:

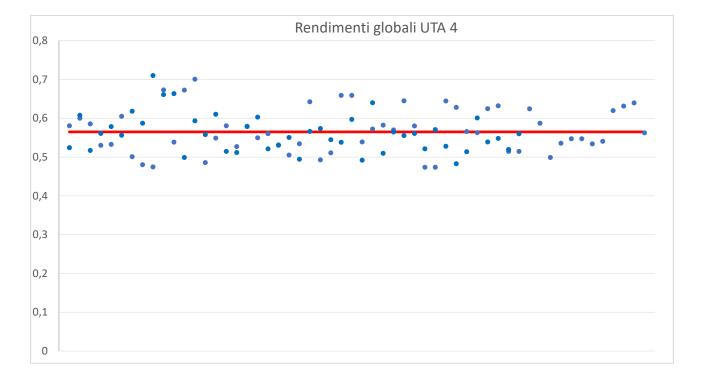




Ai valori di pressione all'aspirazione si è aggiunto il valore di pressione di considerato circa costante a 550 Pa (le variazioni di pressione intorno a questo valore sono di circa ±30 Pa). La somma di mandata (pressione) e aspirazione (depressione) da approssimativamente la prevalenza totale del ventilatore.

Sapendo i rispettivi valori di potenza e portata si possono calcolare i rendimenti globali per i rispettivi giorni in cui si sono misurate le cadute di pressione all'aspirazione, e trovare un rendimento medio:

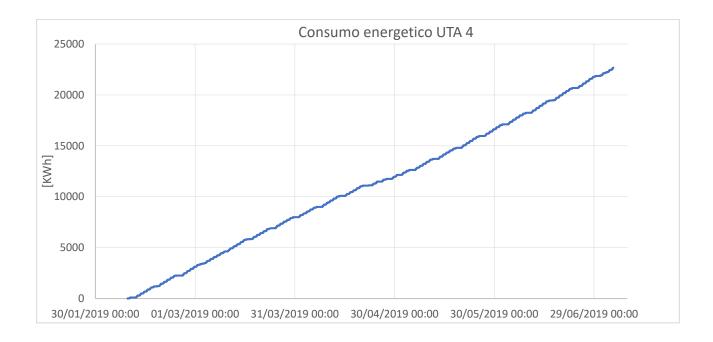


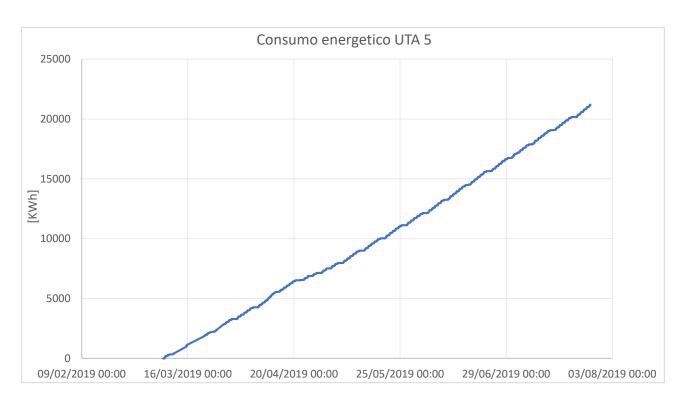


Si può notare come in questo caso i valori calcolati del rendimento globale siano molto più spesso superiori a 0,5: risultati simili per entrambe le UTA danno come rendimento medio valori attorno al 56,5%, che è stato preso come valore medio per i calcoli.

6.6 Consumo energetico dei filtri

Poiché si conoscono i dati di consumo energetico per la ventilazione delle due UTA si può vedere quanta parte di esso è dovuta ai filtri. Nei primi 5 mesi di operatività dei filtri si hanno i seguenti andamenti:





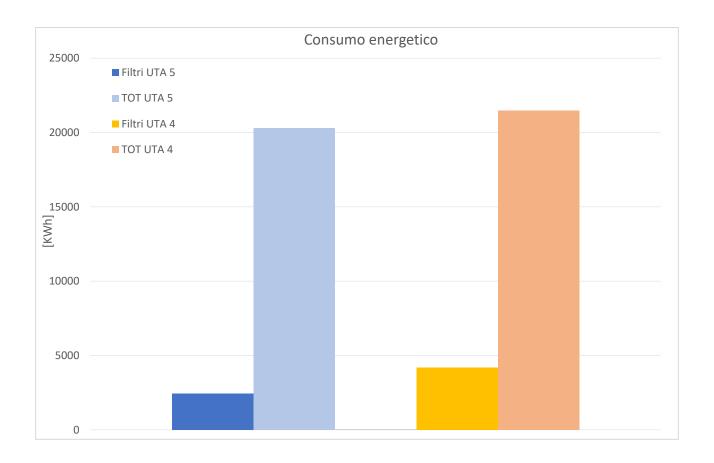
Si sono così stimati i consumi energetici dovuti ai pre-filtri e ai post-filtri nei primi 5 mesi di operatività, sapendo i relativi valori di portata e di caduta di pressione dalle curve caratteristiche e approssimando a costante il consumo dovuto ai filtri negli step temporali.

Si è contato solo l'utilizzo durante gli orari di lavoro previsti, escludendo le accensioni occasionali fuori orario perché presentavano valori di portata atipici, e con un errore sui risultati calcolato di ±2%.

	Filtri		Totale	
	UTA 4	UTA 5	UTA 4	UTA 5
Ore di funzionamento	1361			
Consumo energetico	4194,3	2421	21457	20279
% sul totale	19,55%	11,94%		

In particolare, le quote di consumo energetico calcolati sono i seguenti per i diversi filtri:

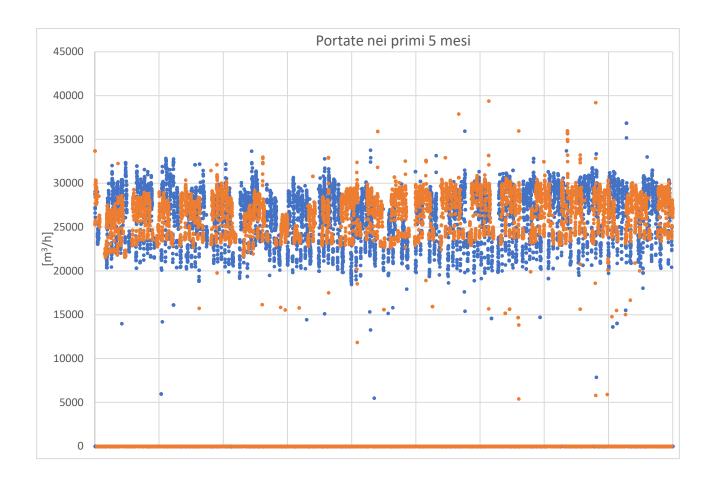
	Consumo energetico [KWh]		
	Premium	Tradizionali	
Filtro a tasche	1585,8	3135,1	
Pre-filtro	835,2	1059,1	



Il consumo energetico dei filtri a tasche standard risulta praticamente il doppio di quello premium, mentre quello del pre-filtro è circa un quarto più grande, ricordando però le differenze di carico.

Infatti, le due UTA riforniscono gli stessi piani ma zone diverse (lato Est e lato Ovest), quindi hanno un diverso grado di occupazione, ma si può fare un ulteriore considerazione sapendo lo storico delle portate e delle potenze.

Dalla stima dei volumi trattati si è visto che l'UTA 5 ha trattato l'1,5% in più di aria, la portata media, escludendo i transitori e le accensioni occasionali, per l'UTA 5 nel periodo è stata di 26560 m³/h contro i 26194 m³/h, anche qui una differenza piccola (1,4%) e perfino entro l'incertezza della misura della portata. La potenza media però non è leggermente maggiore per l'UTA 5, ma è del 4,5% maggiore per l'UTA 4 (16,2 contro 15,5 kW). Ciò può indicare un effettivo minor assorbimento di potenza in situazioni comunque paragonabili in termini di portata fornita dalle due UTA.



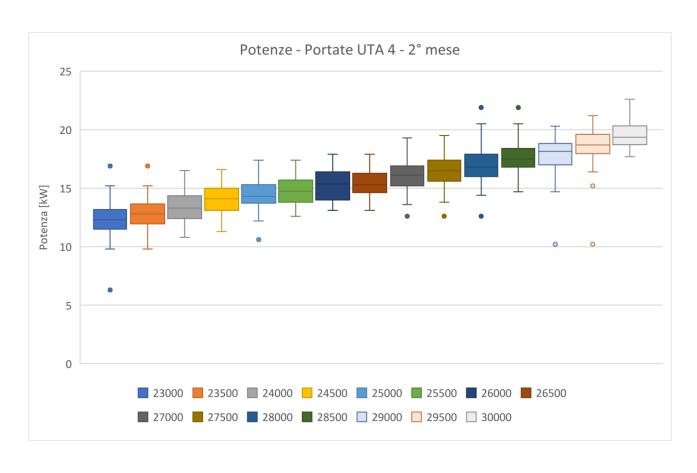
7. Analisi dati monitoraggi

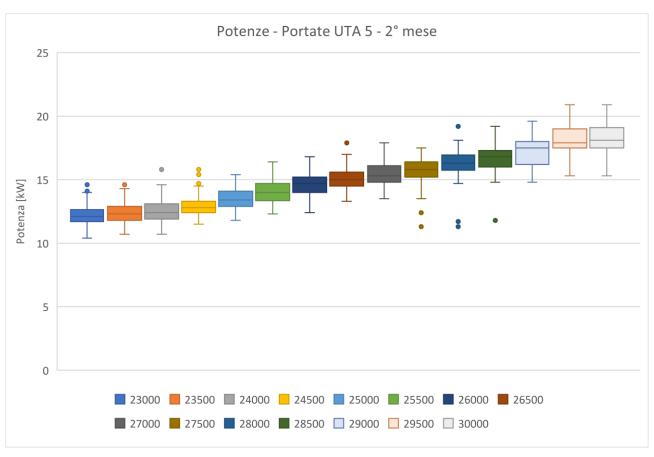
Per verificare l'effetto che filtri con maggiore superficie filtrante, con minori perdite di carico ad essi legate, hanno sull'assorbimento di potenza elettrica in UTA con velocità del ventilatore variabile in base al fabbisogno effettivo, si è provato ad analizzare la variazione mensile di potenza elettrica dei ventilatori di mandata delle UTA in relazione ai valori di portata registrati dal sistema.

Si assume che l'aumento delle perdite di pressione dovuto all'accumulo di polveri presenti nell'aria trattata sia trascurabile negli altri componenti dell'UTA rispetto al filtro, cioè è l'accumulo nel tempo nel filtro la causa principale dell'aumento della prevalenza (del resto il compito del filtro è proprio quello di proteggere gli altri componenti, oltre ad assicurare la qualità dell'aria).

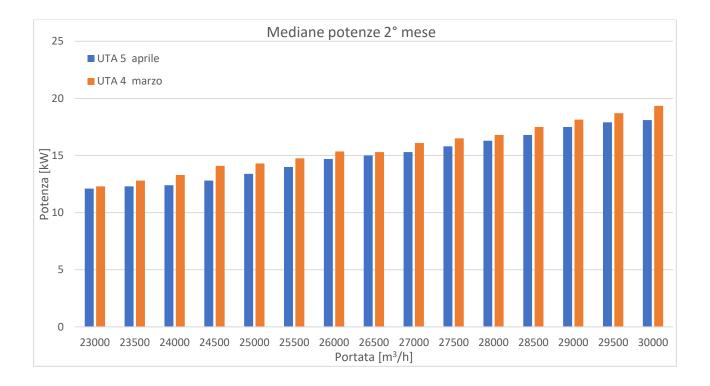
Sono stati presi in esame i primi 5 mesi di vita dei filtri, scegliendo valori di portata crescenti a intervalli regolari, prendendo quelli che rientravano nel range di incertezza del sensore di pressione che misura la portata.

Dal secondo mese di funzionamento sono riportati i grafici a scatola e baffi (box and whiskers), ricavati con Excel, delle potenze elettriche dei ventilatori di mandata per i valori di portata scelti e le relative mediane. I grafici a scatola e baffi sono una rappresentazione statistica che ha la forma di rettangoli (scatole) i cui lati inferiore e superiore rappresentano rispettivamente il primo e terzo quartile, detti anche 25° e 75° percentile, e contiene una linea che è la mediana, il valore centrale della distribuzione di dati (50° percentile). Le linee uscenti (baffi) indicano i dati che sono compresi nel range di 1,5 volte il range interquartile, cioè la distanza tra il primo e il terzo quartile. I punti esterni son valori anomali (outliers).

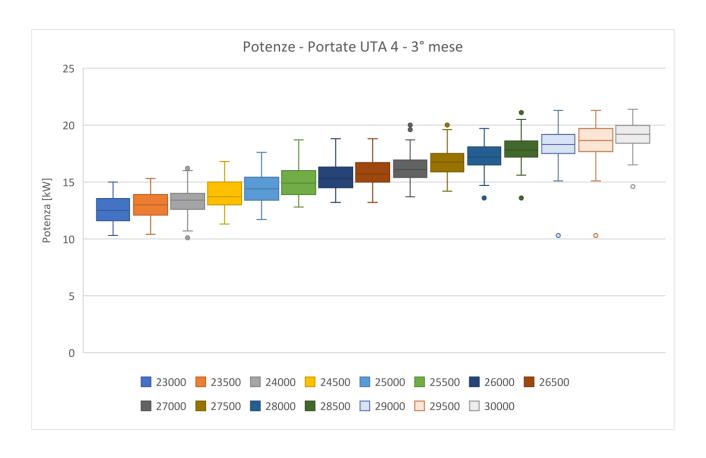


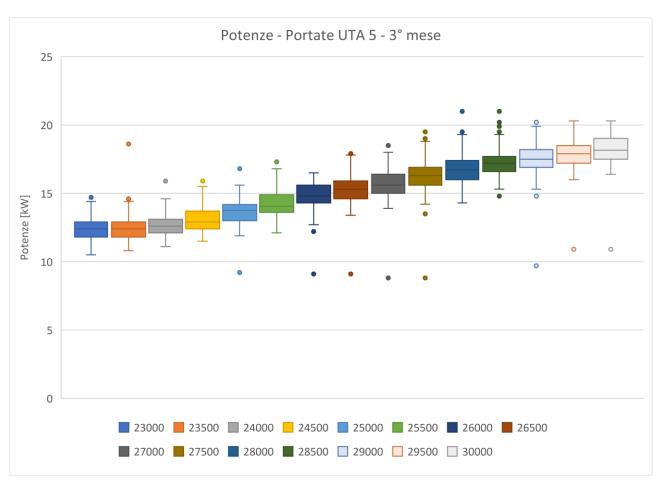


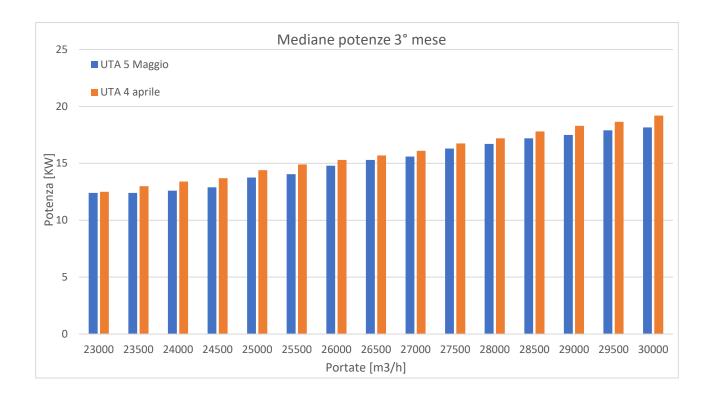
Confrontando i valori mediani si nota come nel loro secondo mese operativo, si hanno valori superiori di potenza per l'UTA 4 con filtri con minore superficie filtrante rispetto all'UTA 5 per tutti i valori di portata scelti.



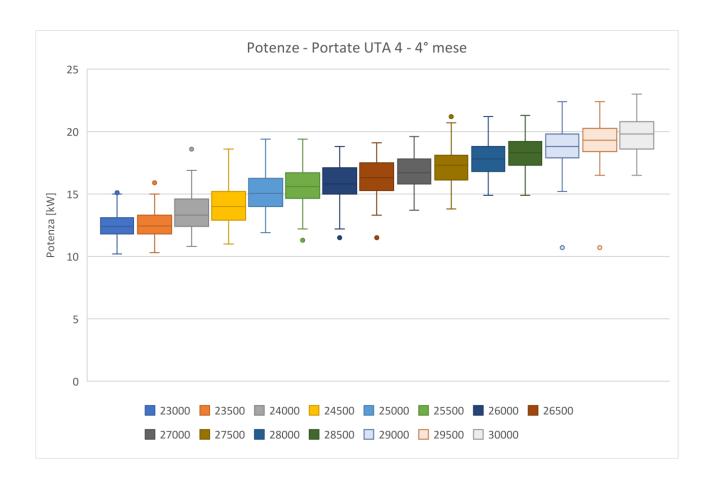
Lo stesso andamento si può notare per il terzo mese di funzionamento, in cui si ha una leggera crescita della differenza tra le potenze, che indica come il ventilatore dell'UTA 4 abbia bisogno di una potenza maggiore per fornire la prevalenza necessaria al normale funzionamento:

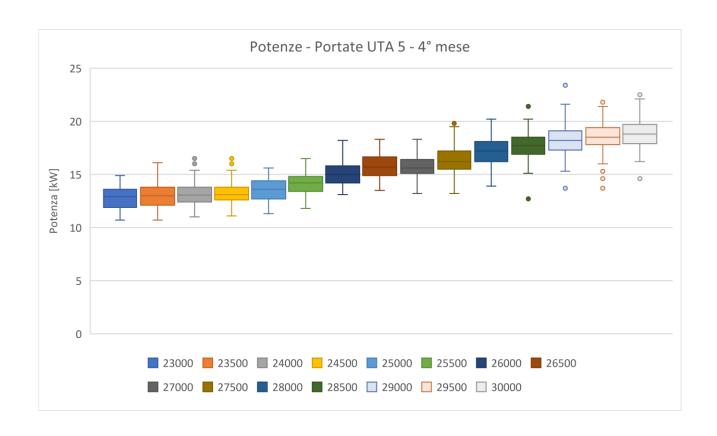


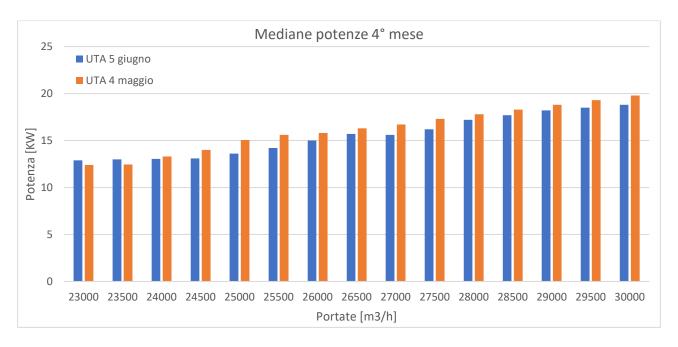




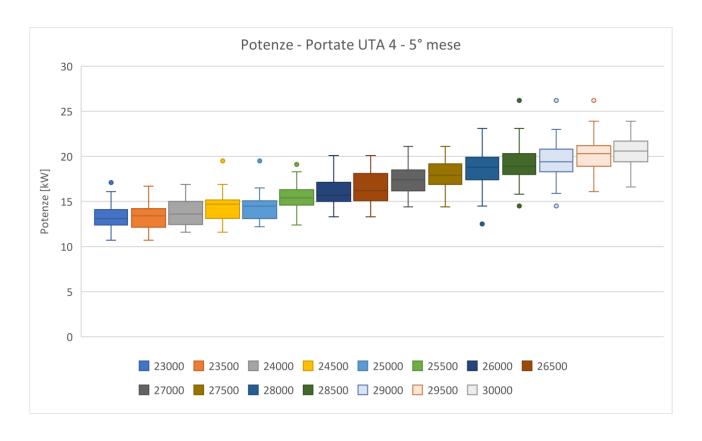
Per il quarto mese:

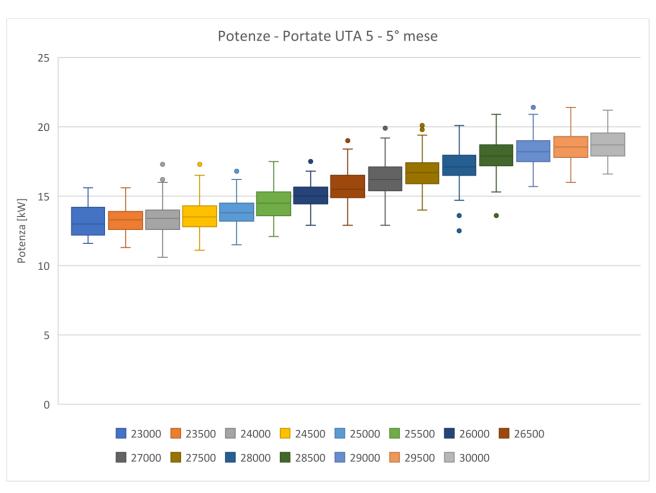


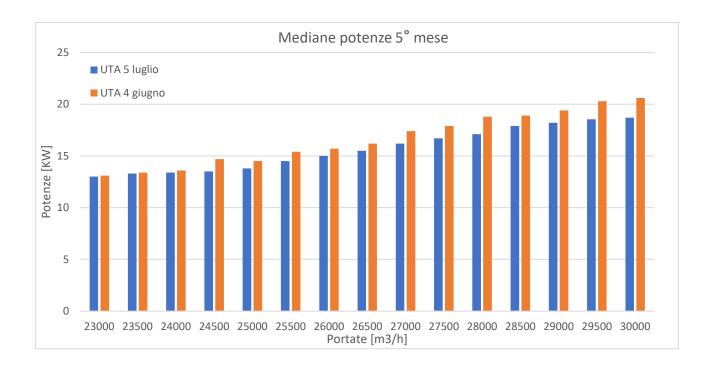




Per il quinto mese:

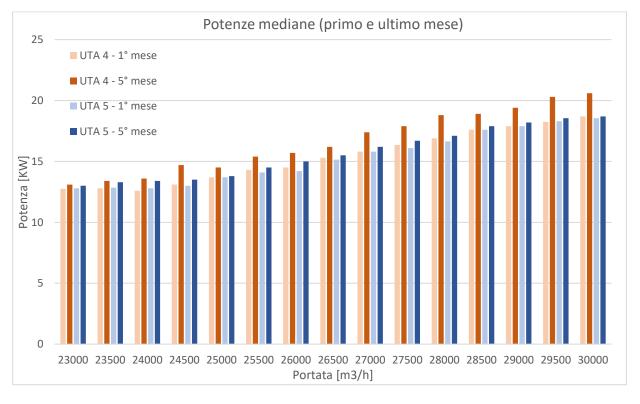




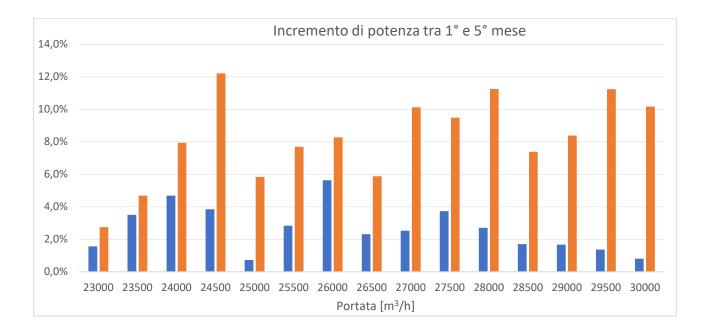


Dal confronto tra i valori mediani delle potenze del ventilatore corrispondenti alle portate registrate si nota come nei cinque mesi siano sempre superiori quelli dell'UTA 4 con installati filtri standard rispetto a quelli dell'UTA 5.

Confrontando le mediane del primo mese e del quinto mese di entrambe le UTA la differenza si nota maggiormente (i colori più chiari si riferiscono al primo mese, i colori scuri all'ultimo):



Volendo fare un confronto tra gli incrementi percentuali di potenza nel tempo, si ha il seguente grafico:



La media dell'aumento di potenza dal primo al quinto mese per il range di valori di portata per l'UTA 4 è stata dell'8,2%, contro il 2,6% per l'UTA 5. Considerando l'incremento di potenza per i diversi valori di portata, sembra che per un periodo in cui la caduta di pressione è raddoppiata per il filtro a tasche standard (da 130 a più di 250 Pa misurati alla portata nominale del filtro), esso sia in percentuale inferiore ai valori trovati per i sistemi a velocità variabile tradizionali visti negli studi citati.

A causa di ritardi nell'inizio del test non è stato possibile misurare le perdite di carico per il filtro a tasche premium per un periodo più lungo e farlo arrivare a una perdita di carico considerevole rispetto a quella iniziale, anche se questo è un indice della bontà del filtro che dura sicuramente più a lungo.

8. Costo annuale dei filtri

Su richiesta dell'azienda che gestisce il Grattacielo San Paolo, Geico Lender (ora acquisita da CBRE) si è poi fatta una valutazione economica sulle diverse soluzioni filtranti confrontate.

Quella abitualmente usata prevede un filtro a tasche a 2 o 3 diedri, di efficienza ePM1 80% (F9 secondo la vecchia normativa) e un pre-filtro con telaio in lamiera d'acciaio. Il pre-filtro deve essere lavato circa ogni 3 mesi, e viene riutilizzato per circa un anno.

La soluzione offerta da Camfil è un filtro a 4 diedri, ovviamente di pari efficienza di filtrazione, di cui viene garantita una durata maggiore, e un prefiltro in telaio di cartone che può essere sostituito facilmente e non deve essere lavato.

In base alle stime e ai dati forniti dall'azienda sui vari costi di gestione e manutenzione dei filtri si è potuto fare un confronto tra le due soluzioni filtranti.

I costi relativi ai filtri sono:

- Costo d'acquisto: risulta essere maggiore del 31% per il singolo filtro a tasche rigide a 4 diedri, e del 60% per il singolo pre-filtro Camfil.
 Tuttavia, poiché si è visto che il filtro a tasche tradizionale è durato solo 5 mesi, si sono considerate due sostituzioni all'anno contro una dei filtri a tasche premium. Per i pre-filtri le sostituzioni sono invece una all'anno per quelli standard, poiché vengono lavati ogni 3 mesi e utilizzati per un anno, e due per i pre-filtri premium
- Costo di smaltimento dei filtri: relativo al codice CER 15.02.02, pari a 0,78 €/kg
- Costo di smaltimento dell'acqua dei lavaggi: relativo al codice CER 16.02.02, pari a 0,105 €/kg. L'acqua necessaria per il lavaggio dei filtri di un UTA è stimata in 0,7 m³
- Costo dell'acqua per i lavaggi: circa 3 €/m³
- Costo di manodopera per i lavaggi: stimato di 25 € per i filtri di tutta l'UTA

- Costo di manodopera per le verifiche periodiche di perdita di carico: stimato di 25 €, uguale per entrambe
- Costo di manodopera per la sostituzione e l'installazione dei filtri: stimato di 25 € per i filtri premium di tutta l'UTA, in 30 € per i filtri tradizionali per via del maggior peso
- Costo dell'energia elettrica: medio, di 0,19 €/kWh
- Prodotti per i lavaggi: stimati in 21,7 € all'anno per UTA

Per stimare il consumo energetico dei mesi rimanenti bisogna fare delle ipotesi, partendo dal considerare per il periodo successivo condizioni di carico simili a quelle già calcolate: poiché si prevede che il consumo cresca nel tempo perché le perdite di carico aumentano, per il consumo annuale dei filtri a tasche premium si è quindi calcolata la percentuale di aumento tra primo e ultimo mese disponibile, ipotizzando che sia la stessa per i mesi successivi, dividendola per 6 mesi e applicando un aumento crescente ad ogni mese rimanente.

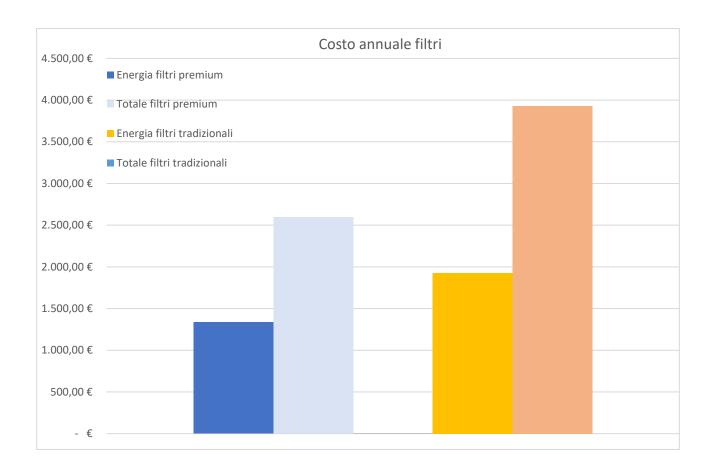
Per il filtro a tasche standard si è "allungata" la vita a 6 mesi considerando in più il consumo dell'ultimo mese, il tutto moltiplicato per 2.

Nel caso dei pre-filtri, invece, si è moltiplicato per 4 (numero di sostituzioni per lavaggi all'anno) il consumo dei primi 3 mesi di quelli tradizionali, mentre per quelli premium si è moltiplicato per 2 il consumo di 6 mesi.

Filtri e pre-filtri standard sono stati pesati al momento della sostituzione, per quelli premium si è ipotizzato un peso per lo smaltimento pari a quello indicato nelle rispettive schede tecniche.

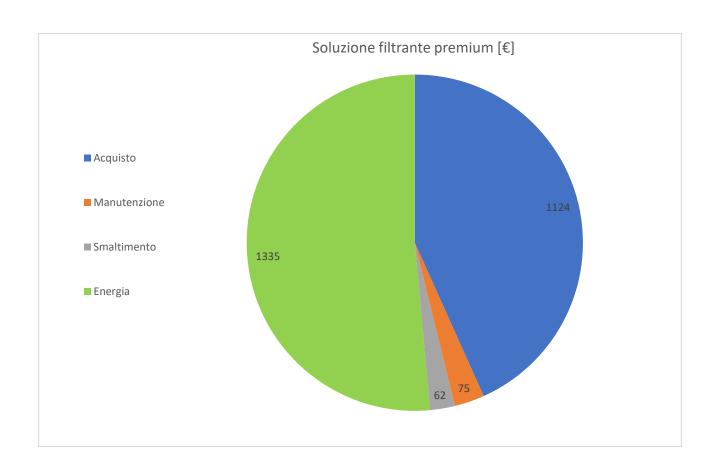
Il consumo stimato di energia annuale è risultato di 10154 KWh per i filtri standard e di 7028 KWh per i filtri premium: nella realtà potrebbero essere minori perché non si è considerata la chiusura del Grattacielo per i periodi di ferie e festivi.

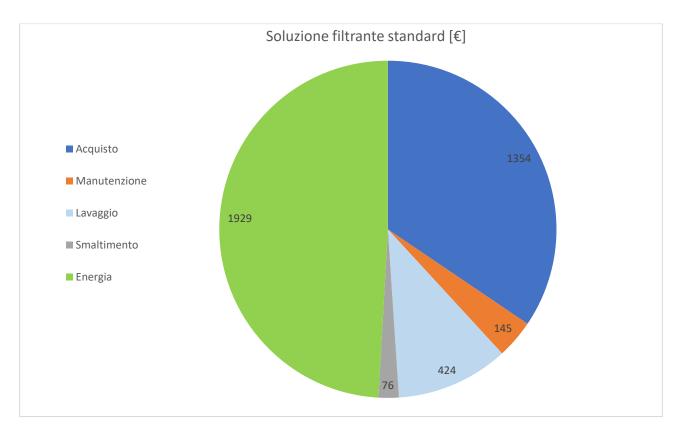
I costi annuali ricavati totali sono i seguenti, a fianco è indicata la quota dovuta al consumo energetico:



	Costo energia	Costo totale
Soluzione premium	1335,4 €	2596 €
Soluzione tradizionale	1929,3 €	3928,7 €

Si aggiungono le quote in cui sono divisi i costi per i diversi casi in base ai dati disponibili:





Dalla differenza dei costi si nota come, dal punto di vista economico, in applicazioni che trattano grandi quantità di aria e situate in luoghi come

Torino, in cui la concentrazione di polveri è alta soprattutto in inverno, non conviene usare filtri con una bassa superficie filtrante, soprattutto a 2 diedri, perché la loro durata è di gran lunga inferiore di quelli a 4 diedri, e quindi devono essere cambiati più spesso.

Avere filtri che durano di più comporta inoltre un numero minore di filtri da smaltire, con vantaggio per l'ambiente.

Se al primo stadio di filtrazione viene poi usato un pre-filtro con una bassa superficie filtrante e che necessita di essere lavato, si avrà come conseguenza che la quota di costo per l'energia sarà maggiore, ma cresceranno soprattutto i costi di gestione, a causa del maggior numero di volte in cui gli addetti devono togliere e rimettere i filtri, delle ore per i lavaggi e dei i costi di smaltimento dell'acqua usata.

Risulta quindi più conveniente impiegare un pre-filtro dal costo d'acquisto maggiore, avendo come rifiuto solo un pre-filtro facilmente smaltibile, che affrontare lo smaltimento di tutta l'acqua del lavaggio dei filtri.

Tra i costi non si è potuto tenere in contro di altre voci come ad esempio la pulizia delle condotte a causa della mancanza di dati forniti. Le condotte di distribuzione dell'aria, la cui pulizia e manutenzione è stata oggetto di ricerca negli ultimi anni [20], possono infatti inficiare la qualità dell'aria se ne viene trascurato il controllo, anche in presenza di un buon sistema di filtrazione, per cui vale la pena tenerne in conto in future analisi.

9. Conclusioni

Dal monitoraggio delle portate e degli assorbimenti di potenza dei ventilatori di due Unità di Trattamento Aria nel Grattacielo Intesa San Paolo di Torino, e dalla misura periodica delle perdite di pressione nei filtri, si è potuto valutare che filtri con una maggiore superficie filtrante (dovuta presumibilmente a un design innovativo, ma su questo aspetto non si sono ottenuti dati sperimentali per confermarlo) garantiscono una lunga durata e minori perdite di carico, e quindi un minore consumo energetico, anche in sistemi efficienti come quelli utilizzati negli edifici più moderni.

Si è osservato statisticamente un aumento di potenza necessario ai ventilatori per fornire le portate necessarie nel periodo considerato, primi 5 mesi di vita dei filtri, che è risultato evidentemente maggiore nell'UTA che aveva installati filtri che nello stesso periodo hanno raggiungo le perdite di carico consigliate per la sostituzione. Sembra che l'aumento di assorbimento di potenza del ventilatore in questo tipo di impianti sia minore rispetto ad impianti VAV con ventilazione che non varia in base alla CO₂ analizzati negli studi citati, ma per ritardi nell'inizio del test non si è potuto avere un periodo più lungo per ottenere un riscontro certo.

Tra le due UTA osservate, quella con i filtri abitualmente usati ha operato più a lungo nel periodo invernale, quando le concentrazioni di polveri nell'aria erano maggiori, e anche per questo sono durati solo 5 mesi, ma i filtri con maggiore superficie filtrante dopo 3 ulteriori mesi, nel periodo estivo, presentavano perdite di carico che erano aumentate di molto poco, e lo stesso quando erano installati contemporaneamente.

Il periodo limitato di tempo in cui si è potuto fare il confronto, e il fatto che non si è potuto misurare la pressione nei filtri in modo continuativo, hanno reso più difficile l'analisi, ma le previsioni teoriche (seguendo gli esempi dati in altri studi) e i dati sperimentali ottenuti indicano un certo vantaggio dal punto di vista energetico.

Indubbio è il vantaggio economico nell'adottare filtri che durano molto più a lungo e pre-filtri che non devono essere lavati ma possono essere smaltiti facilmente, e che comportano minori costi per l'energia e di gestione, nonostante il costo d'acquisto più alto.

In una città come Torino, dove i superamenti dei livelli delle polveri nell'aria sono ancora troppi, e con grandi quantità d'aria trattate, conviene avere filtri più performanti per non incorrere in continue sostituzioni e in continui aumenti di consumo.

Sicuramente sono consigliate ulteriori ricerche per periodi più lunghi e con una strumentazione completa, oltre al fatto di allargare il campo di ricerca ad altri componenti degli impianti di condizionamento per studiarne le conseguenze dal punto di vista del risparmio energetico e della qualità dell'aria negli impianti di condizionamento.

10. Bibliografia

- [1] Perez-Lombard L., Ortiz J., Pout C., "A review on buildings energy consumption information", in *Energy and Buildings*, n. 40, 394-398, 2008
- [2] ISPRA, Qualità dell'ambiente urbano. X Rapporto Edizione 2014, 2014
- [3] Eurovent, Eurovent 4/23 2018. Selection of EN ISO 16890 rated air filter classes for general ventilation applications, 2 ed., 2018
- [4] World Health Organisation, *Air Quality Guidelines Global Update 2005*, 2006
- [5] ISPRA, Qualità dell'ambiente urbano. XIV Rapporto Edizione 2018, 2018
- [6] Buratti C., Impianti di climatizzazione e condizionamento, Morlacchi, 2015
- [7] EN 13779:2007, Ventilation for non-residential buildings Performance rquirements for ventilation ad room-conditioning systems, 2007
- [8] EN 16798-3:2017, "Energy performance of buildings Ventilation for buildings. Part 3: For non-residential buildings Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems", 2017
- [9] ISO 16890-1:2016, "Air filters for general ventilation. Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM)", 2016
- [10] Eurovent, Eurovent 4/21 2018. Energy Efficiency Evaluation of Air Filters for General Ventilation Purposes, 3 ed., 2018
- [11] ASHRAE, 2016 ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment (SI), Atlanta, 2016
- [12] ASHRAE, Air-Conditioning System Design Manual, Atlanta, 2007
- [13] Chimack M.J., Sellers D., "Using extended surface air filters in heating ventilation and air conditioning systems: reducing utility and maintenance costs while benefiting the environment", in *Proceedings from the 2000 summer study on energy efficiency in buildings*, 2000
- [14] Nassif N., "The impact of air filter pressure drop on the performance of typical air-conditioning systems", in *Builiding Simulation*, v. 5, 345-350, 2012
- [15] Yang L., Braun J.E., and Groll E.A., "The Impact of Evaporator Fouling on the Performance of Packaged Air Conditioners", in *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, 2004

- [16] Zhai Z., Johnson S.N., "Full-Scale Laboratory Test on Energy Dependence on Pressure Drops in HVAC Systems", in *Procedia Engineering*, n. 205, 2133-2140, 2017
- [17] Zaatari M., Novoselac A., Siegel J., "The relationship between filter pressure drop, indoor air quality, and energy consumption in rooftop HVAC units", in *Building and Environment*, n. 73, 151-161, 2014
- [18] Stephens B., Siegel A., Novoselac A., "Energy Implications of Filtration in Residential and Light-Commercial Buildings", in *ASHRAE Transactions*, n. 116, 346-357, 2010
- [19] Walker I.S., Dickerhoff D.J., Turner W.J.N., Faulkner D., "System effects of high efficiency filters in homes", submitted for presentation at ASHRAE Annual Conference, 2013
- [20] M. C. Basile, V. Bruni, F. Buccolini, D. De Canditiis, S. Tagliaferri, and D. Vitulano, "Automatic and Non invasive Indoor Air Quality Control in HVAC Systems", in *Journal of Industrial Mathematics*, v. 16, 2016