

Un sistema di abbattimento polveri in ambito autostradale – Il caso pratico

Nicolò Faggioni ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Imgeco S.r.l.

ABSTRACT: La galleria stradale è per sua natura un condotto aperto su due fronti che trasporta una portata d'aria carica di tutto l'inquinante in esso prodotta. Quando in galleria è presente un sistema di ventilazione del tipo longitudinale, l'aria fuoriesce dalla galleria da uno dei due portali spinta dall'azione dei ventilatori. Quando invece è presente anche un sistema di estrazione puntuale, spesso il punto di emissione in ambiente può essere dislocato lungo il tracciato stesso della galleria. Associato ai flussi d'aria di ventilazione, l'inquinante emesso può raggiungere concentrazioni rilevanti, che intervengono come interazione antropica sull'ambiente. Lo stato della tecnica ed una progettazione attenta di tutti gli aspetti impiantistici oggi consentono di limitare l'azione di contaminazione da parte dell'inquinamento sull'ambiente circostante, soprattutto quando il contesto di inserimento dell'opera richiede particolari attenzioni. Al fine di garantire che il carico inquinante sia rimosso, prima dell'uscita dei flussi di ventilazione dalla galleria, in prossimità di un portale o del camino di espulsione, viene installato un sistema di abbattimento. Esso è costituito da un condotto di by-pass – un sistema di filtrazione/abbattimento ed un sistema di scarico. Nel caso dell'abbattimento polveri, i sistemi che garantiscono la miglior affidabilità unita ad un'ottima efficienza di filtrazione sono oggi basati sulla precipitazione elettrostatica. Il principio di funzionamento dei precipitatori elettrostatici consiste nel far fluire l'aria inquinata, contenente il particolato, fra campi elettrici ad alta intensità generati da una corrente continua, in modo da caricare negativamente il particolato che viene a sua volta attirato dai collettori collegati a terra. Si ottiene così il deposito e l'abbattimento della polvere.

1 Generalità sulla ventilazione ed il ricambio d'aria in galleria

La ventilazione sanitaria delle gallerie si basa generalmente sull'applicazione di due principi fondamentali: la diluizione degli inquinanti nel flusso d'aria e l'estrazione del flusso d'aria inquinato.

La diluizione è senza dubbio un metodo efficiente che viene applicato nella stragrande maggioranza dei casi in cui l'obiettivo è mantenere la qualità dell'aria e la visibilità in galleria nei limiti ammissibili (quelli ad esempio dettati dai Report del PIARC: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation). Nelle gallerie in cui è installato un sistema di ventilazione di tipo longitudinale (è il caso delle gallerie del tracciato stradale in esame) il principio di diluizione è ottenuto introducendo l'aria di rinnovo da uno dei portali e spingendola, attraverso l'azione del sistema di ventilazione, verso il portale di uscita completando il processo di diluizione e pulizia della galleria. Nelle gallerie a traffico unidirezionale il principio di diluizione è realizzato spesso naturalmente per effetto della spinta aerodinamica prodotta dal moto dei veicoli all'interno della galleria e pertanto l'azione di diluizione effettiva è ottenuta nel lungo periodo come effetto combinato dei sistemi naturale e meccanico (Figura 1).

La ventilazione sanitaria non rientra nell'operatività di emergenza della galleria, scenario in cui i requisiti principali sono quelli relativi al controllo della gestione dei fumi e la salvaguardia del processo di esodo degli utenti. La condizione di emergenza in galleria, più critica per il dimensionamento dell'impianto di ventilazione, corrisponde all'insorgenza di un evento incendio e non può che ritenersi un evento isolato e non ripetibile nella vita utile dell'opera; la gestione dell'emergenza non può essere ricondotta infatti, in termini di adempimenti normativi, ad un esercizio ordinario e pertanto rappresenta uno scenario che esula dal presente contesto. Durante l'operatività normale della galleria, al sistema di ventilazione è richiesto di realizzare la diluizione degli inquinanti mantenendo le concentrazioni entro i limiti fissati. Gli inquinanti guida sono il particolato ed i gas tossici quali il monossido di carbonio (CO) ed in alcuni casi (solo la normativa di alcuni Stati lo contemplano) gli ossidi di azoto definiti come NO_x. La presenza di particolato in galleria ha effetti diretti oltre che sulla salute degli utenti anche

sulla sicurezza di esercizio della galleria perché è responsabile di una riduzione di visibilità che è proporzionale alla sua concentrazione nell'aria. Normalmente le concentrazioni massime ammissibili, il cui superamento richiede la chiusura al traffico della galleria, sono fissate in galleria nei valori di 200 ppm per il CO e 0.012 m^{-1} per il coefficiente di estinzione rappresentativo del contenuto di polveri nell'aria. Il controllo della ventilazione avviene tramite la misura in continuo delle concentrazioni degli inquinanti principali tramite gli strumenti di analisi e campionamento.

Alcune gallerie sono progettate ed attrezzate con dotazioni impiantistiche tali da minimizzare l'impatto dell'inquinamento, prodotto all'interno della galleria, sugli ambienti circostanti. Le zone di interesse sono tipicamente rappresentate dalle aree a cielo aperto direttamente prospicienti gli imbocchi della galleria (o adiacenti ai camini di estrazione aria), che possono assumere dimensioni variabili e talvolta anche considerevoli, che sono funzione loro volta dell'azione dei flussi di ventilazione uscenti dalla galleria, dei venti e dei fattori meteorologici. La corretta diluizione degli inquinanti all'interno della galleria può essere responsabile, come verrà descritto meglio nel seguito, di un'alterazione delle condizioni ambientali all'esterno di essa, proprio per la concentrazione locale di alcune sorgenti di emissione.

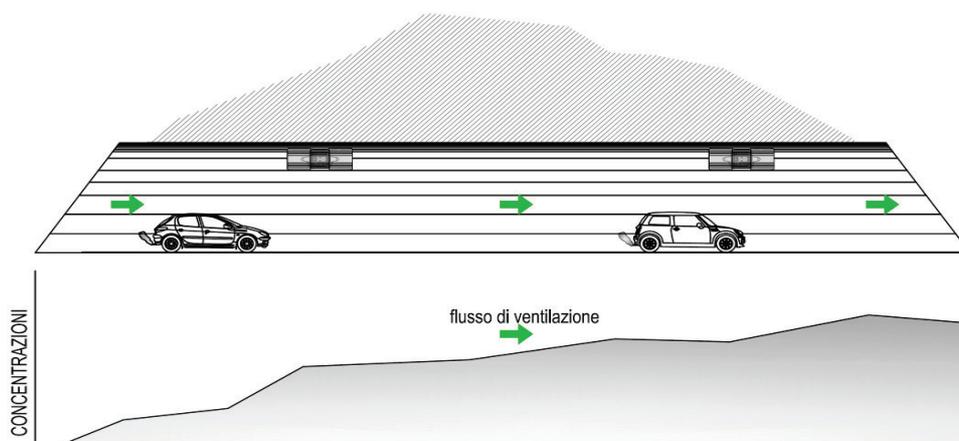


Figura 1 – Rappfigurazione funzionamento impianto di ventilazione longitudinale

2 Inquinanti di riferimento

Abbiamo accennato in precedenza al concetto di inquinanti guida. Sono intesi come inquinanti guida quelle emissioni per le quali il rispetto delle concentrazioni limite assicura le condizioni di benessere all'interno della galleria per tutti gli altri inquinanti presenti (Tabella 1).

Tabella 1 – Valori limite del carico inquinante in galleria in funzione degli scenari di esercizio (fonte: PIARC)

Scenario di traffico	CO	Visibilità	
		Coefficiente di estinzione K	Trasmissione s (su 100 m di lunghezza)
	ppm	10^{-3} m^{-1}	%
Traffico fluido 50 – 100 km/h	70	5	60
Traffico congestionato	70	7	50
Traffico bloccato	100	9	40
Manutenzione	20	3	75
Valori soglia chiusura galleria	200	12	30

Gli inquinanti di riferimento sono:

- il **monossido di carbonio (CO)**, tradizionalmente assunto come riferimento per il dimensionamento della ventilazione sanitaria in galleria, oggi meno rilevante grazie al contributo alla riduzione di emissioni inquinanti derivato dall'introduzione delle classi EURO e dei relativi requisiti.

- il **particolato (OP)**, il cui controllo avviene in modo indiretto per misura della visibilità (o dell'opacità – per l'appunto OP) dell'aria in galleria.
- il **biossido di azoto (NO₂)**, il cui limite superiore di concentrazione è relativo principalmente all'inquinamento atmosferico piuttosto che all'inquinamento interno della galleria. Il controllo è relativo all'emissione locale nell'ambiente esterno prodotto dal flusso d'aria di ventilazione uscente dalla galleria.

Gli effetti che gli agenti inquinanti hanno sulla salute umana sono tutti funzione del tempo; le dosi assorbite sono funzione del tempo di esposizione nell'ambiente inquinato che nel caso particolare corrispondono al tempo di percorrenza della galleria. In funzione delle condizioni di traffico in galleria sono consentiti limiti di emissione differenti (come riportato nel prospetto – fonte: PIARC - Road Tunnels: Vehicle Emissions And Air Demand For Ventilation) ma le portate di diluizione richieste sono generalmente sempre più contenute rispetto alla capacità effettiva del sistema di ventilazione, il quale risulta quasi sempre dimensionato sullo scenario di emergenza.

2.1 Particolato

Particolato, polveri sottili o polveri totali sospese (PTS) sono tutti termini che identificano l'insieme delle sostanze sospese in aria (fibre, particelle carboniose, metalli, silice, inquinanti liquidi o solidi). Il particolato è composto da tutte quelle particelle solide e liquide, disperse nell'atmosfera, con un diametro compreso tra 0,005 e 500 µm. L'insieme delle polveri totali sospese (PTS) può essere scomposto a seconda della distribuzione delle dimensioni delle particelle. L'identificativo delle dimensioni è il Particulate Matter, abbreviato in PM, seguito dal diametro massimo delle particelle. Ad esempio si parla di PM10 per la totalità delle particelle con diametro inferiore a 10 µm. Gli standard internazionali, per l'accertamento della qualità dell'aria, fissano nei valori dei PM10 presenti, la soglia di accettabilità della qualità dell'aria. Dal 2015 la soglia verrà rappresentata dai PM2.5 e visto il grado di pericolosità di queste particelle minute sulla salute umana è assai probabile che in un prossimo futuro saranno i PM1.0 a determinare le nuove soglie di qualità dell'aria.

La presenza di particolato tende a ridurre la visibilità all'interno della galleria. Il criterio della diluizione dell'inquinante si basa sul mantenere la visibilità all'interno di valori accettabili per consentire l'utilizzo della galleria in sicurezza.

2.2 Emissioni da esausti

Le emissioni da esausti della combustione sono generalmente costituite da particelle molto piccole, fini ed ultrafini, di dimensioni variabili nel range 0.01 a 0.20 µm. Sono le particelle più pericolose sia per gli effetti sull'estinzione della luce ma soprattutto per gli effetti sulla salute umana in quanto le particelle ultrafini possono anche penetrare nel sangue e quindi negli organi interni attraverso la membrana dei polmoni. La loro presenza in galleria aumenta con il numero di veicoli diesel, che sono i primi responsabili della loro produzione, ed in particolare con l'aumento dei veicoli pesanti dotati di motori di elevate cilindrata. I nuovi limiti allo scarico dettati dall'entrata in vigore dei più recenti standard EURO sulle emissioni inquinanti da autoveicolo ha costretto i costruttori ad adottare misure per la riduzione delle emissioni di polveri quali il Filtro Anti Particolato (FAP o DPF) che ne può ridurre l'emissione sino a valori vicini all'80-90%.

Le emissioni di natura non esausta, prodotte dal moto dei veicoli, sono riconducibili invece a tutte le tipologie di veicoli e sono principalmente costituite da particelle delle dimensioni maggiori o uguali a 1 µm. Contribuiscono per numero e peso a costituire quello che viene definito il PM2.5 ed il PM10.

2.3 Gli ossidi di Azoto (NO_x)

L'ossido di azoto (NO) ed il biossido di azoto (NO₂) sono inquinanti risultanti dal processo di combustione di combustibili fossili. La maggior parte degli ossidi di azoto NO_x sono costituiti da monossido di azoto che si ossida trasformandosi in NO₂ in atmosfera in presenza di ossigeno.

Il monossido di azoto non è considerato di per sé un inquinante pericoloso mentre il biossido di azoto è nocivo per l'ambiente (composti responsabili della formazione dello smog fotochimica – effetto serra) nonché irritante e pericoloso per la salute. Per lunghe esposizioni può causare danni e infiammazioni alle vie respiratorie; il TLV è 25 ppm, ma già a 10 – 15 ppm si comincia a sentire irritazione agli occhi e alle mucose. Mentre negli anni precedenti gli NO_x prodotti dalla combustione nei

motori endotermici erano essenzialmente costituiti per il 90-95% da NO, oggi l'implementazione dei sistemi di post trattamento dei gas combusti negli autoveicoli (ossigenazione catalitica, DPF, SCR) ha incrementato notevolmente la percentuale emessa di NO₂. Nella maggior parte dei paesi europei oggi la percentuale di NO₂ sugli NO_x emessi ammonta a frazioni importanti dell'ordine del 20-30% proprio per effetto del ringiovanimento del parco veicoli. I livelli di NO₂ riscontrabili nelle aree urbane, per effetto del traffico, è funzione oltre che dell'entità del traffico anche delle condizioni climatiche e di temperatura dell'area.

3 I limiti di emissione e gli standard normativi

Negli ultimi anni l'Unione Europea ha prodotto, una serie di Direttive caratterizzate da continui abbassamenti dei limiti di concentrazione degli inquinanti nell'aria. In Italia, le Direttive Europee sono state recepite attraverso un lungo percorso legislativo sfociato nel recentissimo D.Lgs. 155/2010 basato, appunto, sulla Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e sulla Direttiva 21/05/08 del Consiglio Europeo. Nel D.Lgs. 155/2010 sono stati fissati i nuovi limiti di qualità dell'aria, così come riportati in forma sintetica nel prospetto che segue (Tabella 2).

Tabella 2 – Limiti qualità dell'aria D.Lgs. 155/2010

Inquinante	Valore	[µg/m ³]
Monossido di carbonio	limite media 8 ore consecutive	10.000 (10 mg/m ³)
Biossido di azoto	limite media oraria < 18 volte/anno	200
	soglia di allarme 3 ore consecutive in tutto il territorio	400
	limite media annuale	40
PM10	limite media giornaliera < 35 volte/anno	50
	limite media annuale	40
PM2.5	limite media annuale	25

4 Analisi delle interazioni opera-ambiente

Si riporta a seguire il caso pratico di due gallerie a traffico unidirezionale della lunghezza di poco inferiore a 6 km, inserite in un nuovo tracciato autostradale il cui iter progettuale vede ultimata ad oggi la fase della progettazione definitiva. Nell'ambito del progetto definitivo, ed in particolare dello studio di impatto ambientale dell'opera, si erano già analizzate le interazioni tra lo scenario progettuale di riferimento ed il contesto ambientale in cui si inseriva. Per una corretta stima delle emissioni inquinanti, con particolare riferimento al percorso stradale in esame, all'interno dello studio si erano considerati i seguenti dati:

- Volumi di traffico suddivisi per tipologia di veicolo (leggeri e pesanti) in forma di dato medio orario, giornaliero e mensile relativi all'anno di entrata in esercizio (2020);
- Velocità medie di percorrenza dei flussi veicolari (scenari di traffico ipotizzati).

Sulla base delle informazioni sopra riportate venivano condotte le analisi di calcolo relative alle portate inquinante indotte in galleria dalla presenza del traffico nei diversi scenari di esercizio. Per calcolare la quantità delle sorgenti di emissione inquinanti in galleria, nel progetto definitivo si faceva riferimento alla composizione del parco veicolare in base alla classificazione utilizzata dalla metodologia COPERT IV per il ciclo di guida autostradale. La classificazione non corrisponde ad altro che alla suddivisione del parco veicolare circolante nell'ambito territoriale di riferimento rispetto alla normativa sulle emissioni allo scarico. Dalla classificazione si riesce a determinare, per mezzo di una media pesata, il fattore di emissione base unitario del veicolo "medio" e risalire quindi, in base al numero di veicoli ed alla velocità di flusso caratteristici di ciascuno scenario, al carico inquinante totale.

4.1 Gli standard emissivi EURO

Si tratta di una serie di standard normativi dalle caratteristiche sempre più restrittive, identificati con la sigla Euro seguita da un numero, che vengono introdotti progressivamente dalla Comunità Europea; riguardano le emissioni prodotte dai nuovi veicoli immatricolati nei paesi membri e sono misurate rispettivamente in g/kWh per i veicoli commerciali pesanti e in g/km per gli altri veicoli. Dal momento dell'entrata in vigore di uno di questi standard, le case automobilistiche devono terminare la vendita di nuovi veicoli con gli standard precedenti. I veicoli che rispettano un certo standard vengono

gradualmente introdotti prima dell'entrata in vigore dello stesso. L'elenco degli standard con i relativi anni di introduzione sono elencati nella nel prospetto di cui alla successiva Tabella 3); i veicoli prodotti prima dell'introduzione dell'Euro I sono solitamente detti Euro 0.

Tabella 3 – Standard EURO e relativa entrata in vigore

STANDARD	ANNO di Riferimento	STANDARD	ANNO di Riferimento	STANDARD	ANNO di Riferimento
EURO I	1992	EURO III	1999	EURO V	2008
EURO II	1995	EURO IV	2005	EURO VI	2014

Partendo dal trend evolutivo che il parco veicolare italiano ha seguito nel triennio 2007-2009 (dati reperibili sugli annuari statistici ACI) e facendo ricorso all'interpolazione dei dati contenuti sulla distribuzione del parco veicolare per classi EURO, si è ricavata la ripartizione in classi emittive COPERT per il parco veicolare leggeri e pesanti nello scenario di esercizio (anno 2020) riportato in Tabella 4. Sulla base della composizione del parco veicoli definita e sulle valutazioni degli scenari di traffico ipotizzabili si erano calcolate le portate di aria di rinnovo di progetto ed eseguito il dimensionamento dell'impianto longitudinale.

Tabella 4 – Composizione media del parco veicolare per classi EURO (anno 2020)

Scenario 2020	Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 2	Euro 5	Euro 6
Mezzi Leggeri	0	0	5	15	25	30	25
Mezzi Pesanti	0	0	15	25	20	30	10

4.2 Portate inquinanti: il metodo PIARC

Ad oggi nuovi strumenti sono intervenuti, nella valutazione delle sorgenti di emissione inquinanti in galleria e nella valutazione dei fabbisogni di aria di rinnovo necessari a garantire la corretta diluizione degli inquinanti. I nuovi strumenti sono resi disponibili dal PIARC – Organizzazione Mondiale della Strada – che con le più recenti pubblicazioni dei nuovi rapporti tecnici ha divulgato una metodologia di calcolo semplificata per le emissioni inquinanti dovute al traffico veicolare. Il PIARC fornisce i valori precalcolati per un parco veicoli standard (paese dell'unione europea che ha aderito alle disposizioni comunitarie in tema di riduzione di emissioni inquinanti) riferito all'anno 2012 corredati da una serie di pesi di riduzione, associabili ad ogni anno successivo all'anno di riferimento. Il metodo PIARC consente di calcolare in modo diretto la produzione di inquinanti in galleria in funzione dell'anno di riferimento, della velocità di traffico e del numero di veicoli presenti al suo interno (flusso veicolare). In funzione dei valori massimi ammissibili ammessi dalla normativa vigente, viene calcolato il fabbisogno di aria fresca conseguente al regime di traffico presente in galleria.

5 L'analisi degli scenari di traffico del progetto definitivo

Il progetto degli impianti ventilazione delle gallerie inserite nello scenario progettuale prevedeva il calcolo delle portate di rinnovo nei diversi scenari di traffico caratteristici della galleria. L'analisi prevedeva il calcolo delle portate d'aria di rinnovo in tutte le condizioni di esercizio della galleria ed in particolare nelle condizioni di:

- traffico fluido con velocità superiori a 100 km/h;
- traffico fluido con flusso veicolare massimo (traffico di punta $v = 60$ km/h);
- traffico congestionato con velocità di riferimento inferiori a 20 km/h;
- traffico bloccato in galleria (massima densità di veicoli per chilometro).

I risultati di calcolo associati ad ognuno degli scenari sopra descritti, sono stati aggiornati sulla base delle più recenti pubblicazioni PIARC. Ad ogni scenario corrisponde una data produzione di inquinanti ed una determinata portata d'aria di rinnovo. In funzione delle condizioni al contorno della galleria e delle condizioni meteo ai portali, per garantire la portata di rinnovo calcolata, il sistema di ventilazione deve attuare le misure di compensazione necessarie. Risulta in particolare che:

- per tutti gli scenari di traffico fluido l'effetto pistone prodotto dai veicoli in moto all'interno della galleria è predominante sulle perdite di attrito e la portata d'aria di ventilazione naturale in galleria genera un effetto di diluizione più che sufficiente a mantenere la salubrità dell'aria e le concentrazioni entro i valori ammissibili;

- nelle condizioni di traffico bloccato le portate d'aria necessarie a garantire la diluizione degli inquinanti sono sempre garantite mediante l'azione di spinta prodotta dal sistema di ventilazione; la componente di spinta prodotta dal moto dei veicoli sull'aria viene meno e la presenza dei veicoli fermi lungo la galleria è responsabile di un'ostruzione al moto dell'aria al suo interno;
- nelle condizioni di traffico rallentato i flussi di ventilazione naturali in galleria non sono sempre sufficienti a garantire il corretto rinnovo e l'azione dei ventilatori è richiesta in presenza di condizioni meteorologiche avverse (pressioni barometriche ai portali sfavorevoli).

Tutto ciò premesso si può affermare che gli scenari che prevedono una forte produzione di inquinanti ed al contempo una elevata concentrazione sui flussi d'aria uscenti dalla galleria corrispondono a quelli relativi all'esercizio con traffico bloccato ed occasionalmente, in presenza di avverse condizioni meteo-climatiche, anche in presenza di scenari di traffico congestionato.

6 L'area di interesse

La presenza di due gallerie adiacenti della lunghezza di 6 km è responsabile di una emissione concentrata sulle valli limitrofe, ma soprattutto nella valle caratterizzata dall'affaccio delle due medesime gallerie, che rappresenta l'area di maggior interesse ai fini della valutazione di impatto ambientale

Ad incidere sull'emissione inquinante sull'area di interesse è, data l'unidirezionalità del traffico, l'esercizio dei due forni contrapposti delle due gallerie. Le emissioni inquinanti sull'area di interesse sono state valutate mediante l'ausilio di un software di calcolo che elabora le serie temporali, sull'anno di riferimento, delle concentrazioni orarie calcolate all'interno del dominio di calcolo; l'analisi consente l'estrapolazione dei valori statistici rappresentativi per ciascun inquinante come contributo alla qualità dell'aria in relazione alle disposizioni di legge:

- per l'NO₂ il 99,8° percentile delle concentrazioni orarie nell'anno (200 µg/Nm³, al quale corrisponde un massimo numero di superamenti di 18 volte) e il valore medio nell'anno (40 µg/Nm³);
- per il PM10 il 90,4° percentile delle concentrazioni medie giornaliere nell'anno (50 µg/Nm³ al quale corrisponde un massimo numero di superamenti di 35 volte) e il valore medio nell'anno (40 µg/Nm³);
- per il PM2.5 il valore medio nell'anno (25 µg/Nm³).

Il prospetto riportato in Tabella 5, estratto dallo studio di impatto ambientale, riporta i valori massimi calcolati per ciascun inquinante e parametro di riferimento legislativo. I valori riportati costituiscono le stime dei contributi ai livelli di qualità dell'aria dovuti alle strutture autostradali di progetto; alle stime di tali contributi si possono quindi sommare le stime del fondo, per ottenere il carico inquinante assoluto. Per quanto attiene i valori presi in considerazione per il raffronto con le soglie normative, si evidenzia che detti valori rappresentano i livelli massimi stimati sull'intero dominio di calcolo. Tale scelta ha portato quindi, anche nel caso dei valori medi, ad operare il confronto nelle più gravose condizioni che si potranno determinare per l'area indagata. Qui di seguito si riassumono e si commentano i risultati ottenuti:

- I valori di concentrazione più elevati si ritrovano generalmente in corrispondenza degli sbocchi delle gallerie;
- l'area di calcolo in assoluto più complessa è risultata quella in oggetto proprio per la presenza delle due gallerie e per la lunghezza degli archi stradali che vi insistono; in quest'area risulta ampia la zona nella quale si registrano i valori delle concentrazioni appartenenti alla classe dei valori relativamente più alti (per l'NO₂ compresi tra 35 e 40 µg/Nm³);
- in linea generale comunque su tutte le aree e per tutti gli inquinanti i valori massimi di concentrazione calcolati risultano circoscritti alle sole vicinanze delle strutture autostradali e, se sommati ai valori di concentrazione del fondo, sono tali da non comportare condizioni di qualità oltre i limiti di legge.

Tabella 5 – Esito delle verifiche sulle emissioni (area di interesse)

Area	Inquinante	Parametro	Valore massimo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Valore fondo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Totale [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Limite normativo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Area di interesse	NO ₂	99.8° perc. medie orarie	40	102	142	200
		Media annuale	8	30	38	40
	PM10	90.4° perc. medie 24 ore	4	30	34	50
		Media annuale	2	18	20	40
	PM2,5	Media annuale	1	14	15	25

6.1 Emissioni nelle aree di interesse - sviluppo futuro

Lo studio qui analizzato si basa sull'analisi degli studi di traffico relativi all'anno assunto come riferimento per l'entrata in esercizio della galleria (2020). La normativa vigente prevede che l'analisi degli aspetti legati alla ventilazione delle gallerie e dell'interazione opere-ambiente sia condotta per l'intero arco temporale che va dalla messa in esercizio sino ai 15 anni successivi. La scarsa attendibilità che un'analisi di traffico avrebbe con un arco temporale così esteso rende la valutazione al 2035 quanto meno complessa. E' altresì vero che, in tema di emissioni inquinanti e sviluppi futuri, si possono fare alcune considerazioni di natura generale che assicurano la coerenza e l'attendibilità degli studi condotti anche per gli scenari venturi. Infatti:

- la costante e programmatica riduzione dei valori limite di inquinamento ambientale (aria) rappresenta un fattore dominante sulle tecniche di costruzione degli autoveicoli;
- Il ringiovanimento del parco veicoli circolante accompagnato dalla costante riduzione dei fattori base di emissione rappresenta un fattore che gioca a totale favore dell'abbattimento del carico inquinante;
- l'aumento del traffico circolante ipotizzabile nei 15 anni successivi alla messa in esercizio della galleria non dovrebbe essere tale da controbilanciare la riduzione dei carichi inquinanti emessi dal parco veicolare.

7 Sistemi per l'abbattimento dell'inquinamento

La presenza di una galleria lungo un tratto stradale non altera la natura delle emissioni da traffico veicolare ma muta la conformazione della sorgente di emissione. La presenza del medesimo flusso stradale su un qualunque altro tracciato stradale di simili caratteristiche causerebbe lo stesso livello di emissioni con l'unica differenza che un tracciato stradale aperto si configurerebbe come una sorgente di emissione lineare continua nello spazio, mentre la galleria si configura come una sorgente puntiforme (portale, camino di estrazione, ...).

Lo stato della tecnica ed una progettazione attenta di tutti gli aspetti impiantistici oggi consentono di non subire in modo passivo l'azione di contaminazione ambientale da parte dell'inquinamento prodotto in galleria, soprattutto quando il contesto di inserimento dell'opera richiede particolari attenzioni. E' il caso delle due gallerie in questione e delle due aree di interesse sopra definite per le quali potrebbe essere predisposto un intervento mitigatore mirato. Nonostante gli studi di traffico e di impatto ambientale abbiano evidenziato la piena compatibilità ambientale dell'opera, si può ipotizzare tramite un'installazione mirata che l'impatto della nuova opera sull'ambiente che la ospita sia assimilabile a zero.

7.1 L'abbattimento dell'inquinante gassoso

La riduzione dell'emissione inquinante può essere ottenuta, in genere, attraverso l'adozione di due strategie distinte e complementari: preventiva o di abbattimento.

Il sistema preventivo è efficace quando esiste la possibilità di intervenire direttamente sulla sorgente primaria realizzando sistemi o metodi in grado di ridurre la produzione di inquinante.

L'abbattimento, in genere, avviene quando si vuole ridurre il grado di inquinamento all'interno di un ambiente, quando cioè la sorgente primaria ha già prodotto l'emissione. L'abbattimento avviene per

mezzo di un terzo sistema estraneo alla sorgente e all'ambiente recettore, che interviene per catalisi, assorbimento e captazione direttamente sul carico inquinante. L'assorbimento quindi, a differenza dell'azione preventiva, non previene la formazione di inquinante ma lo abbate quando questo è già presente nell'ambiente recettore. E' quest'ultimo il metodo applicabile all'esercizio della galleria in cui il metodo preventivo non può essere applicato se non attraverso la regolazione del traffico.

7.2 L'abbattimento delle polveri

Negli ambienti di lavoro con intensa produzione di polvere, come i cantieri di demolizione, costruzione di gallerie o le miniere a cielo aperto (cave, impianti di lavorazione di sabbia e ghiaia) è spesso necessario ricorrere a sistemi locali per l'abbattimento delle polveri. La tecnica generale per l'abbattimento delle polveri consiste in una precipitazione realizzata mediante l'utilizzo di un aerosol d'acqua. Una serie di ugelli produce un getto d'acqua finemente nebulizzata in grado di abbattere le particelle di polvere alla loro sorgente e impedirne la diffusione nell'aria circostante. Il sistema sarebbe di difficile applicazione durante l'esercizio della galleria sia per la scarsa efficacia che si ottiene quando le particelle solide diminuiscono di dimensione sia per l'effetto indesiderato che provoca il dilavamento costante della piattaforma stradale (con i derivanti problemi legati alla sicurezza di esercizio e all'esigenze di drenaggio e depurazione delle acque).

Gli studi condotti sulla distribuzione delle particelle dell'aria nel tunnel Plabutschunnel a Graz (AUSTRIA) tra il Gennaio e l'Aprile del 2009, hanno evidenziato come la distribuzione delle particelle per massa e quantità numerica sia totalmente sbilanciata a favore, nel primo caso, verso le particelle di dimensione comprese tra 1.0 e 10 μm mentre, nel secondo, verso quelle di dimensione minore (Tabella 6).

Tabella 6 – Composizione dell'inquinante nell'aria in galleria

Dimensione particelle	< 0.5 μm	0.5-1.0 μm	1.0-10 μm	>10 μm
Quantità numerica	95.3%	4.3%	0.4%	0.0%
Massa	38.1%	9.0%	50.9%	2.1%

Infatti, i campionamenti eseguiti hanno evidenziato come, sul flusso d'aria di ventilazione, siano presenti in numero assolutamente maggiore (per oltre il 99% del totale) le particelle di dimensione inferiore ad 1.0 μm (e per il 95% quelle sotto gli 0.5 μm). Da ciò si evince come sia necessario attuare una misura di controllo soprattutto mirata all'abbattimento delle particelle ultrafini.

Nuove soluzioni recentemente utilizzate in ambito stradale consentono, oggi, la precipitazione delle particelle solide di PTS di qualunque forma e dimensione per azione elettrostatica e/o per filtrazione meccanica. Il sistema di filtrazione meccanica necessita di manutenzione un pò più spinta per la necessaria pulizia che il mezzo filtrante, periodicamente, richiede. Il sistema puramente elettrostatico invece consente senza ricorrere a sistemi di pulizia dedicata, se non quelli programmabili per normale manutenzione, di realizzare una filtrazione efficace delle polveri. Il sistema consente filtrazioni molto spinte con efficienza sempre superiore al 90%. Il PTS trattenuto dal sistema di filtrazione viene poi lavato dalle superfici filtranti e trasformato in residuo secco prima di essere smaltito. La precipitazione delle polveri avviene tramite ionizzazioni delle stesse (passaggio in uno ionizzatore) e deposito sulla superficie captante realizzata mediante una piastra ad alta tensione. L'elettrostatica fa il resto facendo depositare le particelle che vengono poi rimosse dalle piastre mediante pulizia automatica con getti d'acqua. Il sistema è facilmente inseribile nel "contesto" galleria, predisponendo già in fase di progettazione le opere civili necessarie, e realizzando un condotto di by-pass rispetto alla galleria (in prossimità di uno dei due portali) in cui l'aria viene deviata e successivamente aspirata e trattata dal sistema di trattamento, prima di essere espulsa all'esterno o reimpressa in galleria.

8 Le soluzioni di progetto: la filtrazione delle polveri

Al fine di garantire che le particelle dannose siano rimosse dai flussi di ventilazione prima della loro uscita dalla galleria, proprio in prossimità dei portali, viene realizzato un condotto di by-pass per la deviazione dell'aria al sistema di trattamento. Il condotto di by-pass, per aspirazione di un sistema di ventilazione dedicato, viene attraversato dal flusso d'aria di ventilazione, la cui portata (variabile) è funzione dell'effettivo contenuto di inquinanti nell'aria. Il condotto di by-pass termina in un locale tecnologico in cui sono installati i sistemi di precipitazione elettrostatica ed i relativi impianti ausiliari.

L'aria carica, dopo aver attraversato il mezzo filtrante, viene depurata e spinta dai ventilatori allo scarico in ambiente. Il condotto di by-pass viene realizzato nell'ultima porzione di galleria per una lunghezza dall'imbocco di circa 50 m così come schematicamente riportato in Figura 2.

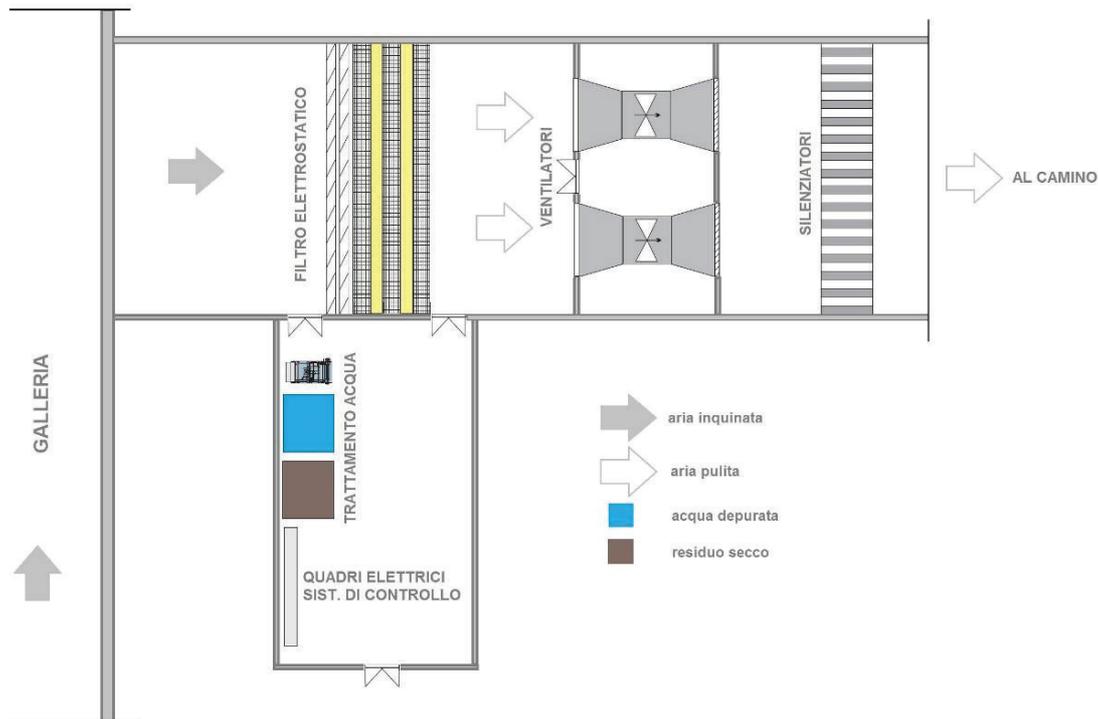


Figura 2 – Schema impianto di filtrazione

8.1 Il filtro

ECCO EP è un innovativo sistema di filtrazione elettrostatica, sviluppato dalla *Aigner Tunnel Technology GmbH*, che permette di bloccare il particolato, prodotto in maniera rilevante dal traffico degli autoveicoli, prima della fuoriuscita dell'aria dalla galleria. L'apparecchiatura di base è il Precipitatore Elettrostatico (E.P.), modificato secondo la più recente tecnologia che combina i vantaggi di un precipitatore elettrostatico a quelli di un filtro meccanico.

Il principio di funzionamento dei precipitatori elettrostatici consiste nel far fluire l'aria inquinata, contenente il particolato, fra campi elettrici ad alta intensità generati da una corrente continua in modo da caricare negativamente il particolato. Il procedimento di caricamento del particolato è simile a quello che avviene in un precipitatore elettrostatico standard in cui il particolato viene raccolto su piatti collettori. Le particelle, come mostrato in Figura 3, sono caricate elettrostaticamente nella sezione ionizzante (1) e poi espulse dalle piastre parallele d'alta tensione (4) e rimosse nelle piastre a terra (5). Per aumentare l'efficienza si posizionano due celle elettrostatiche in serie così da massimizzare l'effetto del precipitatore.

Si realizza così un sistema filtrante in 4 fasi:

- Nella prima fase, le ali a dente di sega (1), posizionate tra gli elettrodi a massa (2) generano un forte campo elettrostatico dove le particelle (3) vengono caricate.
- Nella seconda fase, una parte di queste particelle aderisce alle piastre del collettore a massa (5) e rimosse dalle celle filtranti elettrostatiche.
- Nella terza fase, le particelle rimaste sono prima caricate o ionizzate nuovamente nella seconda cella elettrostatica e poi filtrate.
- Nella quarta fase le particelle rimaste vengono rimosse dal collettore.

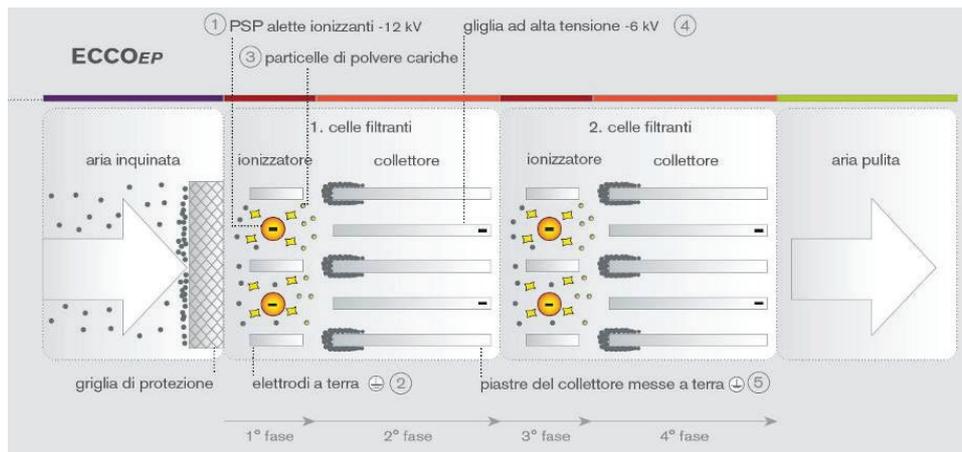


Figura 3 – Schema del sistema filtrante a precipitazione elettrostatica

La pulizia viene realizzata con sistema oscillante ad ugelli. Le celle elettrostatiche filtranti sono infatti pulite attraverso un sistema di pulizia ad umido completamente automatizzato con ugelli oscillanti. La polvere viene così separata con un processo automatico e raccolta in appositi bidoni. Gli ultimi bidoni sono dotati di un sistema di controllo automatico del livello che segnala quando sono colmi. Questo sistema consente di ridurre l'esposizione delle persone alla polvere di metalli pesanti e al particolato e, conseguentemente, di diminuire il rischio di inalazione di particelle. Ogni modulo del filtro ECCO è dotato di una serranda che rimane chiusa durante il normale funzionamento. L'acqua (di rete) di lavaggio dello ionizzatore, laddove si rendesse necessario, può essere depurata prima dello scarico o riutilizzata mediante un sistema di trattamento chimico fisico e raccolta in un apposito bacino.

Il sistema di filtrazione funziona automaticamente: funzionamento normale, ciclo di pulizia e alta tensione sono controllati da PLC che prelevano i segnali dalle apparecchiature in campo loro assegnate e che possono essere integrati nel sistema di telecontrollo e supervisione della galleria. Le principali innovazioni introdotte dal sistema di filtrazione elettrostatica di tipo ECCO consistono in:

- efficace filtrazione di tutte le particelle con dimensioni effettive comprese tra 0 e 20 μm ;
- rendimento di filtrazione sino al 98% (alla portata nominale) anche per particelle di dimensione inferiore a 0.1 μm ;
- ottimizzazione specifica dei sistemi di pulizia per limitare i costi di manutenzione e di esercizio;
- sistema di trattamento dell'acqua per possibile riutilizzo;
- semplice rimozione della polvere (residuo secco) con bidoni o sacche.

8.2 La centrale di ventilazione ed il sistema di by-pass

Le dimensioni della centrale di trattamento aria e del relativo by-pass di collegamento dovranno essere tali da garantire:

- le corrette velocità del flusso d'aria nell'attraversamento del mezzo filtrante;
- la corretta disposizione delle apparecchiature necessarie al corretto funzionamento di tutta la filiera di filtrazione;
- gli spazi di installazione del sistema di ventilazione;
- l'espulsione dell'aria filtrata nell'ambiente esterno.

Il sistema filtrante è stato dimensionamento nell'ipotesi di garantire una portata d'aria di filtrazione pari a 400 m^3/s , valore stimato sufficiente per far fronte all'abbattimento del carico inquinante calcolato in tutte le condizioni di esercizio. La velocità di progetto del filtro è fissata in 4.5 m/s e pertanto la superficie totale filtrante ammonta a circa 90 m^2 . Il sistema filtrante si ipotizza installato in adiacenza al nodo di connessione con la galleria di linea all'interno di un ampio locale (plenum) sui cui si affacciano le aspirazioni dei due ventilatori (Figura 4). Per incrementare l'effetto utile ed il rendimento totale di impianto, la filtrazione avviene nel doppio passaggio del flusso d'aria attraverso le piastre filtranti (doppia fila) che alternano in successione piastre ionizzatori e collettori di terra.

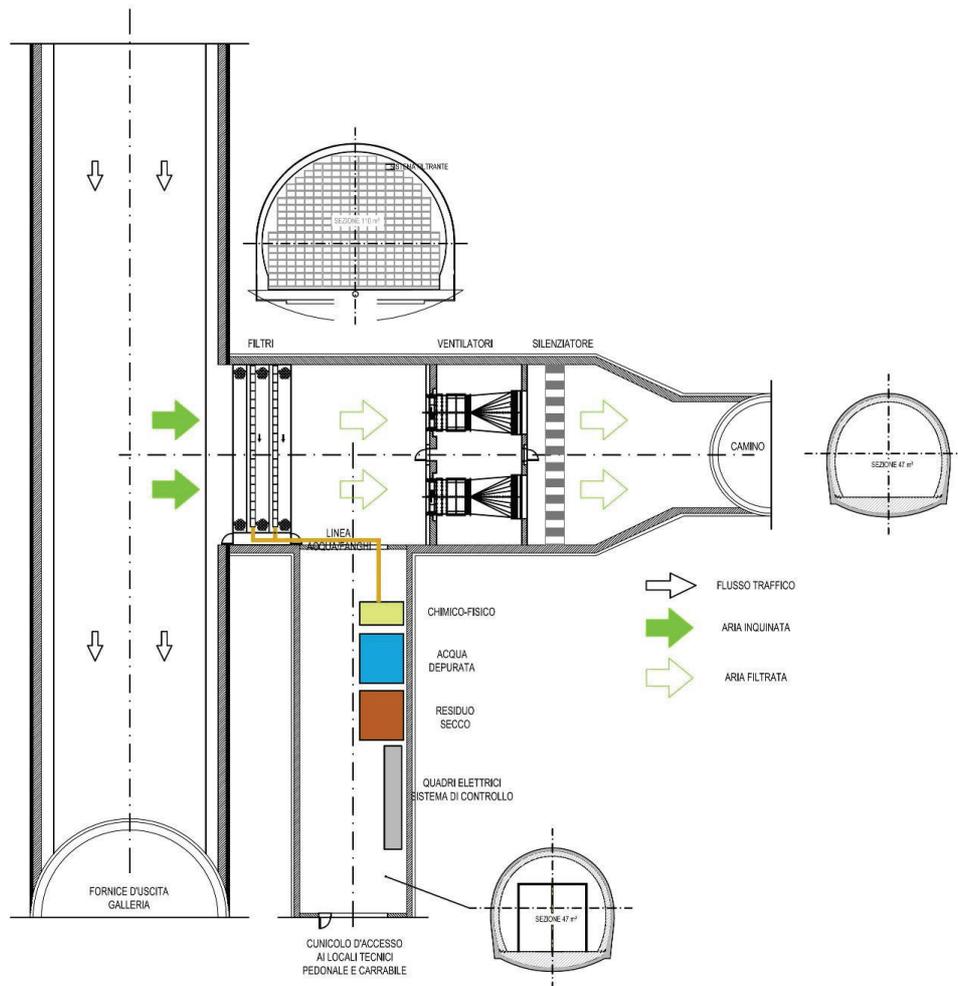


Figura 4 – Sistema by-pass e centrale trattamento aria gallerie

I due ventilatori saranno del tipo assiale funzionanti in parallelo, aventi portata nominale di 200 m³/s e pressione statica di 400 Pa. I ventilatori saranno alimentati da un sistema a frequenza/tensione variabile per la regolazione della portata. La potenza elettrica presunta per i ventilatori è di 315 kW cad.. Per garantire tutti i requisiti di cui sopra sono state fissate le geometrie dei condotti e dei locali tecnici di servizio:

- Sezione filtrante (sezione di by-pass): 110 m²;
- Sezione camino: 47 m² (sezione tipo by-pass carrabile);
- Sezione zona locali tecnici: 47 m² (sezione tipo by-pass carrabile);
- Lunghezza totale condotto di by-pass: 40 m (camino escluso).

Si riportano in Tabella 7 – le principali caratteristiche tecniche del sistema di filtrazione:

Tabella 7 – Caratteristiche sistema di filtrazione

Caratteristica	Valore
Tensione Ionizzatore	-12 kV
Tensione collettore	-6 kV
Velocità aria di progetto filtro	4.5 ÷ 5.0 m/s
Superficie filtrante unitaria	6.5 m2
Numero sezioni filtranti	14
Portata aria totale	400 m3/s
Caduta di pressione (alla portata nominale)	200 Pa
Assorbimento elettrico massimo (processo)	1.6 kW

Il sistema è poi completato dall'impianto di lavaggio dei collettori filtranti e dal sistema di trattamento acque reflue ad esso connesso. L'acqua di lavaggio, a trattamento avvenuto, viene infatti recuperata

in forma di fanghi per il trattamento nel sistema chimico fisico e il successivo riutilizzo. Il residuo secco della lavorazione viene depositato per lo smaltimento dedicato, mentre l'acqua trattata viene nuovamente inviata al serbatoio di stoccaggio pronta per il successivo ciclo di lavaggio. Lo schema completo del sistema di trattamento è riportato nell'immagine che segue.

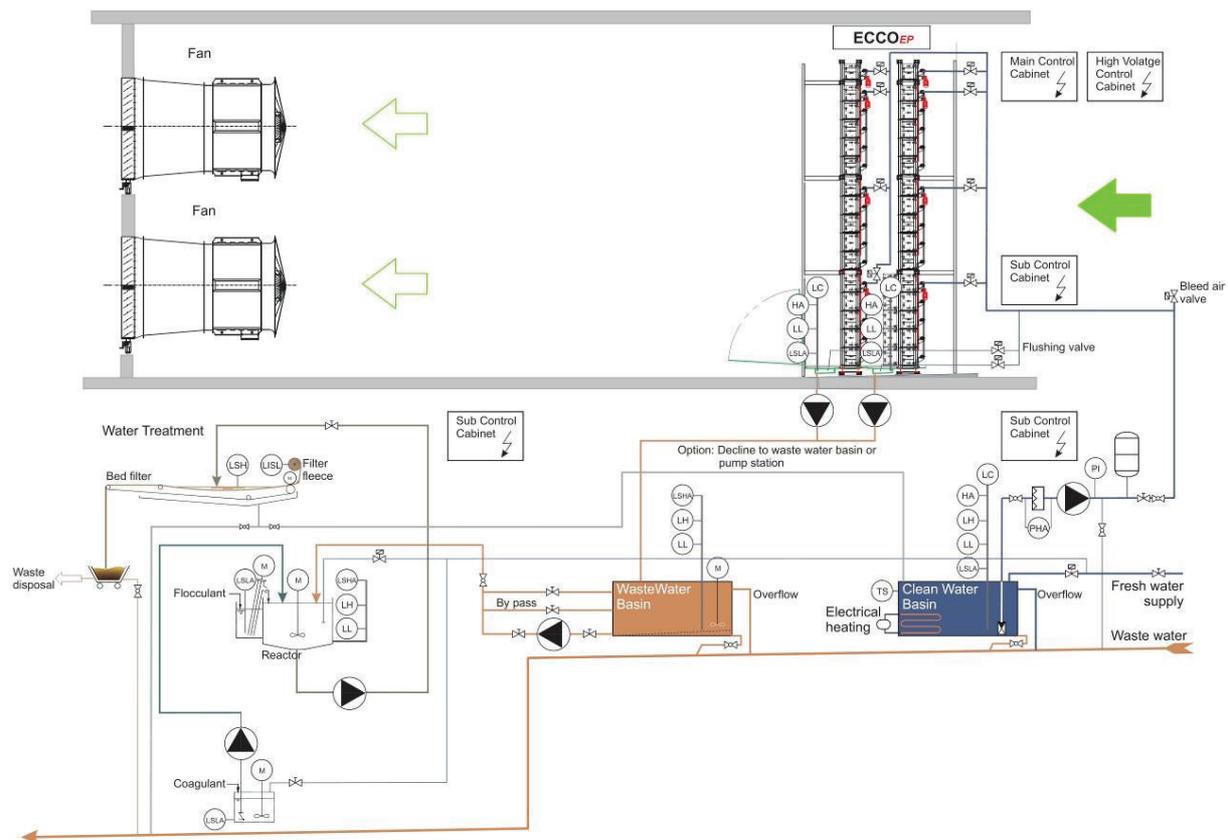


Figura 5 – Schema sistema filtrazione e trattamento acqua

Tutte le opere complementari necessarie al corretto funzionamento dell'impianto di trattamento e abbattimento inquinanti sono già installate a servizio della galleria. La vicinanza del condotto di by-pass alla cabina utente MT/BT, dedicata all'alimentazione dei servizi tecnologici della galleria, semplifica l'approvvigionamento dei servizi nei nuovi locali tecnologici (alimentazione elettrica – servizi – alimentazione idrica).

9 Bibliografia

- World Road Association (PIARC) Technical Committee C4 Road Tunnels Operations 2012. Road Tunnels: Vehicle Emissions And Air Demand For Ventilation
- World Road Association (PIARC) Technical Committee C3.3 Road Tunnels Operations 2011. Road Tunnels: Operational Strategies for Emergency Ventilation.
- World Road Association (PIARC) Committee on Road Tunnels (C5) 1999. Fire And Smoke Control In Road Tunnels
- Sistema statistico nazionale (SISTAN) – Annuario Statistico dell'Automobile Club d'Italia 2012.
- www.aignertunnel.com.
- Ventilia n° 61 - Novembre 2006. ECCO la via per abbattere l'inquinamento nei tunnel - Il primo impianto di filtrazione elettrostatica del particolato per una galleria in Italia.