



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Precipitatori elettrostatici ad alta efficienza e bassa
produzione di ozono: modellizzazione numerica e
verifica sperimentale**

Laureando:
Marco Busellato
Matricola 1038995

Relatore:
Ch.mo Prof. Piergiorgio Alotto

Sommario

Nota da oltre un secolo, la filtrazione elettrostatica è utilizzata in impianti industriali per depurare l'aria dalle polveri emesse nei vari processi produttivi. Il principio di funzionamento, che prevede l'alimentazione di elettrodi con tensioni sufficientemente alte da ionizzare l'aria per effetto corona, consente di raggiungere efficienze di cattura oltre il 99.5% tali da permettere la filtrazione di particelle inferiori al micron e quindi di purificare anche l'aria ambiente dalle particelle che vi sono in sospensione prima di immetterla in ambienti chiusi come edifici civili, specialmente se con ridotto scambio d'aria. Studi effettuati negli USA, dove le normative sull'inquinamento di ambienti interni per prime si sono rese più restrittive, hanno dimostrato come malattie prevalentemente respiratorie siano sempre più frequenti all'aumentare del tempo trascorso mediamente in ambienti confinati. Uno dei principali gas inquinanti e irritanti è l'ozono, gas generato per la presenza di effetto corona dai filtri stessi. Il presente lavoro di tesi raccoglie e ordina quanto presente in letteratura e, a seguito di verifiche sperimentali, suggerisce alcuni modelli sperimentali e analitici per la stima della produzione di ozono e della cattura al variare dei parametri elettrici e geometrici; per le difficoltà incontrate nel controllo elettronico dei parametri durante le misure, l'influenza degli aspetti ambientali e fluidodinamici non è stata considerata. Con particolare riferimento alla geometria presente nel prototipo realizzato dall'azienda SIC S.r.l., si sono studiate e sono state realizzate soluzioni innovative per l'ottimizzazione della cattura riducendo la produzione di ozono.

Abstract

Known since the beginning of the XX century, electrostatic precipitation is used in industrial plants to purify air from dusts in exhaust emissions. The operating principle, which consists in the electrical supply of electrodes with voltages high enough to ionize air by corona effect, admits collection efficiencies over 99.5% working even for particles below 1 micron and permits to cleanse air from suspended particles before input in close location, in particular with low air exchange. Many studies in the USA, where legislation first became restrictive on indoor pollution, demonstrate that respiratory diseases are more frequent with the increasing time spent indoors. Ozone is one of the main pollutants and it is produced by electrostatic precipitators themselves. This Thesis gathers and sorts what is available in literature and, by means of experimental tests, proposes experimental and mathematical models to estimate ozone production and particle collection with varying electrical and geometrical parameters; due to the difficulties encountered in the parameters control during measurements, the influence of environmental and fluid dynamics aspects hasn't been taken into account. With reference to the geometry of the prototype made by SIC S.r.l., innovative solutions have been studied to optimize collection reducing ozone production.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato e supportato nella realizzazione della mia Tesi con suggerimenti, critiche e osservazioni.

Un ringraziamento particolare al Prof. Piergiorgio Alotto per i numerosi e utili consigli, sia prima sia durante il periodo di Tesi. Ringrazio l'azienda SIC S.r.l. presso la quale si sono effettuate tutte le misure riportate: in particolare il Dott. Daniel Mertens per i suggerimenti e le puntuali precisazioni, l'Ing. Alessandro Tambone per la realizzazione del prototipo e per il supporto nell'utilizzo della strumentazione, il Sig. Andrea Mantovani, titolare dell'azienda, per aver reso possibile questa interazione con l'Università degli Studi di Padova. Senza il loro impegno e spirito di iniziativa, questa Tesi non esisterebbe.

Ad amici e colleghi va la mia sincera gratitudine per avermi incoraggiato e per aver condiviso con me questo periodo. Vorrei infine ringraziare i miei genitori, le mie sorelle, i miei più stretti parenti e la mia fidanzata per essermi stati vicini in questi anni di studio e per avermi sostenuto nelle scelte.

Indice

Ringraziamenti	7
Introduzione	1
1 Filtrazione dell'aria	5
1.1 Tipologie di filtri utilizzati	6
1.2 Filtri elettrostatici (ESP)	7
1.2.1 Principio di funzionamento	9
1.2.2 Vantaggi e svantaggi	12
2 Ozono	17
2.1 Cos'è e dove lo si trova	17
2.2 Legislazione e Normative	20
2.3 Fisica dell'ozono	26
2.3.1 Ionizzazione - Effetto corona	26
2.3.2 Reazioni tipiche in aria	32
2.3.3 Da quali parametri dipende	34
2.4 Modelli e teorie in letteratura	38
2.4.1 Elettrostatico e densità di carica spaziale	39
2.4.2 Produzione di ozono	51
3 Cattura	55
3.1 Normativa sulla cattura: UNI 11254	55
3.1.1 UNI 11254 in sintesi	56
3.1.2 Strumenti e misure secondo normativa	57
3.1.3 Rapporto di prova: risultati e incertezze	58
3.1.4 Considerazioni	60
3.2 Fisica della cattura	61
3.2.1 Fluidodinamica	63

3.2.2	Particle charging	67
3.2.3	Particle collection	74
3.2.4	Fenomeni non ideali	76
3.3	Modelli e teorie in letteratura	77
4	SIC S.r.l.: azienda, progetto e prototipo	91
4.1	L'azienda	91
4.2	Il progetto	92
4.3	Il prototipo e gli strumenti utilizzati	92
4.3.1	Filtro elettrostatico multistadio	92
4.3.2	Generatore di alta tensione DC	96
4.3.3	Cabina e Cella	98
4.3.4	Analizzatore di Ozono	101
4.3.5	Sensore di temperatura e umidità	102
4.3.6	Interfaccia Gestione Segnali e Data Logger	103
4.3.7	Contatore ottico di particelle - OPC	103
4.3.8	Anemometri e Manometro	106
4.4	Considerazioni sugli strumenti e sui metodi di misura	108
5	Modello e risultati	113
5.1	Software utilizzati	113
5.2	Risultati ottenuti: misure effettuate, ipotesi e procedure uti- lizzate, modello finale.	117
5.2.1	Risultato 1: verifica condizione di Peek	117
5.2.2	Risultato 2: modello per la produzione ozono.	124
5.2.3	Risultato 3: modello per la cattura.	156
6	Ottimizzazione	175
6.1	Distanza tra le piastre	175
6.2	Dimensione dei fori	179
6.3	Filtro senza elettrodi	183
7	Conclusioni	189
7.1	Possibili sviluppi futuri	190
7.1.1	Controllo elettronico	191
7.1.2	Distruzione elettrochimica dell'ozono	193
A	Disegni tecnici del precipitatore elettrostatico	197

B	Equazioni utilizzate	201
B.1	Equazione interpolante	201
B.2	Definizione dei coefficienti delle fisiche PDE in COMSOL . .	203
C	Codici MATLAB realizzati	205
C.1	Applicazione per calcolo della generation rate	205
C.2	Calcolo generation rate con interpolazione cubica	210
	Bibliografia	223

Elenco delle figure

1.1	Principio di funzionamento di un filtro elettrostatico. Rappresentazione di una sezione di un filtro a singolo stadio wire-plate.	10
1.2	Rappresentazione grafica del principio di funzionamento di un filtro elettrostatico.	11
1.3	Rappresentazione di filtri mono-stadio.	13
1.4	Rappresentazione di filtri bi-stadio con configurazione wire-plate per il primo stadio e plate-plate per il secondo.	13
2.1	Dimensioni massime registrate del buco dell'ozono il 10 Settembre 2000: 29.9 milioni km ² (Fonte: NASA).	18
2.2	Mappe regionali delle emissioni annuali a livello comunale di Ossidi di Azoto (NO _x) e Composti Organici Volatili (COV), basate su INEMAR Veneto 2007/2008.	20
2.3	Confronto tra valori limite proposti e valori standard ad 80 ppb in termini di casi evitati entro il 2020 [1].	21
2.4	Air Quality Index e conseguenze sulla salute	23
2.5	Rappresentazione schematica della distribuzione di cariche in presenza di effetto corona (Fonte: [2]).	28
2.6	Immagine agli ultravioletti di un elettrodo alimentato con tensione DC (Fonte: [3]).	31
2.7	Tipologie di elettrodi.	35
2.8	Campo elettrico reale al variare della tensione applicata all'elettrodo in una configurazione coassiale (Fonte: [4]).	44
2.9	Definizione dei parametri geometrici a , b e c richiamati nelle equazioni di Townsend e Cooperman, rispettivamente (2.4.8) e (2.4.10).	46
2.10	Rappresentazione della legge di Warburg (Fonte: [5]).	47
2.11	Influenza della vicinanza tra elettrodi sulle linee di campo nel caso wire-plate (Fonte: [6]).	48

3.1	Rappresentazione grafica del concetto di carica di saturazione. In alto: linee di campo distorte dalla presenza della particella. In basso: linee di campo deformate per la presenza di un campo proprio generato dalla particella che si muove verso la piastra di raccolta.	62
3.2	Linee di flusso rappresentanti il moto del gas all'interno del filtro al variare della velocità in ingresso (Fonte: [7]).	65
3.3	Fattore di Cunningham al variare del diametro delle particelle.	67
3.4	Linee di campo (e di forza) in prossimità di una particella per diversi stati di carica (Fonte: [8]).	70
3.5	Mobilità elettrica in funzione del diametro delle particelle in caso di diffusion charging, field charging e la combinazione delle due. $E = 5$ kV/cm, $N_i t = 10^{13}$ s/m ³ (Fonte: [8]).	73
3.6	L'immagine raffigura una piccola particella di polverino di carbone analizzata al microscopio elettronico.	78
3.7	Rappresentazione delle variabili richiamate dal modello di Deutsch (spiegazione di White).	80
3.8	Rappresentazione delle variabili richiamate dal modello di Deutsch (spiegazione con piastre).	82
3.9	Percorso (sinistra) e concentrazione sulle pareti di cattura (destra) di particelle di diverso diametro d_p alla velocità dell'aria fissata a 1 m/s. Risultato ottenuto numericamente con FLUENT (Fonte: [7, 9])	84
3.10	Efficienza in funzione del diametro delle particelle: la 3.10c rappresenta i due contributi distinti ottenuti come interpolazione dei risultati proposti in [10].	85
3.11	Efficienza di cattura in funzione del potenziale applicato alle piastre calcolata con la relazione (3.3.12) per diversi diametri di particelle (in distribuzione logaritmica).	87
3.12	Efficienza di cattura in funzione del diametro delle particelle calcolata con la relazione (3.3.12) per diversi potenziali applicati alle piastre.	88
4.1	Rappresentazione grafica del prototipo utilizzato in tale studio. A sinistra è indicata la direzione del fluido.	93
4.2	Foto scattata a lato del filtro. Sono visibili le piastre piene dentate (numerata a seconda del tipo in riferimento alla A.2) e gli elettrodi con il proprio sistema di aggancio alla struttura.	95

4.3	Foto delle piastre di repulsione utilizzate nei diversi prototipi: a sinistra una piastra forata, a destra una piastra piena e dentata.	97
4.4	Schema a blocchi del sistema di alimentazione del prototipo: P1 e P2 indicano i due potenziometri che agiscono sullo switcher. I blocchi a destra rappresentano i moltiplicatori di tensione.	98
4.5	Rappresentazione semplificata della cabina con indicazione della direzione dell'aria e dei principali componenti.	100
4.6	Esempio di strumentazione (anemometro a filo caldo) inserita nel vano del filtro attraverso il pannello in policarbonato trasparente.	101
4.7	Sensori di temperatura e umidità Carel. In basso, il punto di aspirazione dell'analizzatore di ozono.	102
4.8	Foto della cabina presente in SIC durante una misurazione. In primo piano è ben visibile la strumentazione utilizzata per le misure, in secondo piano la cabina con la camera di sperimentazione illuminata.	104
4.9	Posizioni possibili del contatore ottico di particelle nella configurazione prevista da SIC.	106
4.10	Tipico output esportato dal contatore ottico tramite il software LMS XChange e modificato per calcolare l'efficienza (in giallo) a partire dai valori medi calcolati su ogni terna di campionamenti.	107
4.11	Andamento di corrente e umidità nel filtro in presenza o meno del controllo attivo ottenuto azionando umidificatore e deumidificatore tramite i valori letti dalla sonda Carel.	111
5.1	Diagramma di flusso della procedura di simulazione (ρ_{DPM} è la densità di carica delle particelle).	116
5.2	Andamento di tensione sull'elettrodo, corrente, concentrazione di ozono. La tensione è stata modificata manualmente tramite un potenziometro fino ad individuare la tensione di innesco dove si verifica un salto di corrente e la rampa di crescita dell'ozono.	118

5.3	Modello bidimensionale del prototipo realizzato in COMSOL Multiphysics. I cerchi di diametro maggiore, ben visibili nel riquadro di zoom, non sono un'entità fisica ma soltanto una linea per definire la mesh; la linea verticale verde è stata utilizzata come <i>cut-line data set</i> lungo la quale calcolare parametri quale ad es. il campo elettrico. L'elemento in rosso è l'elettrodo.	120
5.4	Andamento del campo elettrico lungo la linea verticale verde nel riquadro di Figura 5.3 calcolato nel caso con $V_1 = 6790$ V e $V_2 = 5087$ V.	120
5.5	Tensione di innesco applicata sull'elettrodo in funzione della tensione sulle piastre e andamento della temperatura nelle diverse misure. Si osservi la contenuta variazione della tensione sull'elettrodo.	121
5.6	Campo elettrico calcolato con COMSOL Multiphysics utilizzando tensioni su elettrodo e piastre come in Figura 5.4. La Figura 5.6b raffigura il dettaglio del campo elettrico in prossimità dell'elettrodo centrale. NOTA: il limite massimo indicato in legenda non corrisponde al campo dell'elettrodo raffigurato, bensì il valore assunto dal campo sulla superficie dell'elettrodo più esterno.	122
5.7	Potenziale elettrico calcolato con COMSOL Multiphysics utilizzando tensioni su elettrodo e piastre come in Figura 5.4. . .	123
5.8	Sezione di una configurazione wire-cylinder.	125
5.9	Mutua interazione tra E e δ . Schema iterativo per la soluzione del problema elettrostatico e di densità di carica spaziale (tratto da [11]).	129
5.10	Risultato del problema elettrostatico e densità di carica considerato come costituito da due fisiche accoppiate, una in φ e una in δ	131
5.11	Cut-lines lungo cui si sono calcolati gli andamenti rappresentati in Figura 5.12÷5.14.	132
5.12	Campo elettrico	133
5.13	Variabile φ (potenziale elettrico).	134
5.14	Densità di carica spaziale δ	135
5.15	Risultati nel caso multi-potenziale con $V_0 = 50$ kV e $V_1 = 12.81$ kV.	136

5.16	Risultati nel caso multi-potenziale con $V_0 = 50$ kV e $V_1 = 0$ kV (sinistra) a confronto con $V_1 = 10$ kV (destra). Si notino le diverse scale di valori per il campo elettrico e la densità di carica.	137
5.17	Potenziale e direzione del campo elettrico al variare di V_1 (tensione sulla lamella) lontano dall'elettrodo.	139
5.18	Potenziale e direzione del campo elettrico nel caso limite di convergenza $V_1 = 0.2562 \cdot V_0$	140
5.19	Andamento dell'ozono e della corrente in cabina misurati con un campionamento ogni 2 secondi. La misura è stata effettuata con un elettrodo di diametro 0.16 mm a cui è stata applicata una tensione pari a 7 kV, mentre sulle piastre (piene con dentatura) la tensione è pari a 3 kV.	143
5.20	Interpolazione con funzione esponenziale della concentrazione di ozono nel tempo. Nella funzione interpolante non è presente l'intercetta perché si è utilizzata la procedura automatica di fitting di MATLAB con funzione esponenziale ($y = a * exp(b * x)$).	144
5.21	Concentrazione di ozono misurata applicando sul filtro una corrente costante pari a 0.6 mA.	146
5.22	Rappresentazione della funzione analitica utilizzata per interpolare i valori di concentrazione d'ozono misurati.	146
5.23	Risultato dell'interpolazione cubica sui valori misurati e del calcolo della generation rate (nel grafico è rappresentata la sua inversa) e del punto di flesso come da procedura descritta.	148
5.24	Generation rate in funzione della corrente costante imposta.	148
5.25	Il grafico rappresenta l'inverso dei valori di concentrazione misurati applicando una corrente costante pari a 450 μ A. L'interpolazione, in questo caso, comporta una sottostima della generation rate: come si vede nel grafico in basso a sinistra, l'interpolante cubica passa sotto i valori misurati e la tangente (in nero tratteggiato) è più pendente di quanto dovrebbe essere. Essendo la generation rate l'inverso della retta tangente appena citata è evidente come una sottostima sia inevitabile.	149
5.26	Modello 3D e foto del filtro con dettaglio delle colonnine e dei fori passanti.	151

5.27	Campo elettrico e potenziale sulla sezione colonnina–piastra alimentata per valutare se si raggiunge l’innesco in questa zona con una tensione sulle piastre di 6000 V, condizione alla quale si verifica la scarica e/o la produzione di ozono. Il modello qui rappresentato è un assialsimmetrico 2D: nelle Figure 5.27a e 5.27c la linea verticale a potenziale nullo rappresenta la colonnina a ground (l’ascissa pari a 3 mm indica il raggio delle colonnine), le linee orizzontali superiori e inferiori le piastre di raccolta. La piastra centrale è quella alimentata come si vede dal potenziale.	152
5.28	Le figure presentano in dettaglio i fori realizzati sulle piastre; in particolare evidenziano la presenza di una deformazione in direzione della pressione di punzonatura.	153
5.29	Concentrazione di ozono misurata alimentando le piastre a tensioni inferiori all’innesco. Si sottolinea come la concentrazione rimanga invariata all’accensione del filtro.	154
5.30	Concentrazione di ozono misurata alimentando le piastre a tensioni prossime all’innesco. Si sottolinea come la concentrazione cominci a salire non appena le piastre (soltanto) vengono alimentate e come si formino delle scariche locali nello stadio di cattura. Il grafico riporta anche un confronto tra piastre forate e piene-dentate dove si può vedere come le piastre piene, originariamente presenti nel filtro, abbiano un comportamento peggiore per quanto riguarda la produzione di ozono a tensioni elevate.	155
5.31	Curve analoghe a quelle presentate in Figura 3.11a ma con diametri di particelle misurabili dall’OPC.	157
5.32	Andamento dell’efficienza di cattura per particelle da 0.4 μm in funzione della tensione applicata sulle piastre secondo il metodo di Deutsch evidenziando la variazione di efficienza dovuta a diversi valori di portata (estremi dell’intervallo di variazioni visualizzato durante le misure) mantenendo invariate le altre grandezze. La linea rossa indica l’efficienza alla portata nominale come nei casi precedenti, i punti rossi indicano le misure effettuate col contatore ottico.	160
5.33	Curve analoghe a quelle presentate in Figura 3.11b ma con diametri di particelle misurabili dall’OPC.	162

5.34	Confronto tra le efficienze calcolate col solo effetto della field charging e le <i>Overall efficiencies</i> somma dei due contributi, field charging e diffusion charging.	162
5.35	Grafico analogo alla Figura 5.32 con efficienza complessiva data dalla somma dei contributi dovuti alla field e alla diffusion charging.	163
5.36	Interpolazione delle misure di efficienza effettuate presso SIC su piastre forate con elettrodo di diametro 0.3 mm. Si osservi che, rispetto ai casi precedenti, l'estremo inferiore dell'asse verticale è pari a 0.95 anziché 0.9.	164
5.37	Risultato del modello di Deutsch-Anderson modificato confrontato con il modello originale e con le misure effettuate per particelle da 0.4 μm	166
5.38	Linee di flusso calcolate numericamente su una configurazione con elettrodo di diametro 0.2 mm e potenziali applicati all'elettrodo e alle piastre rispettivamente di 8500 V e 2360 V. Le frecce rosse sono rappresentate in funzione logaritmica del valore del campo nel loro punto di origine. In Figura 5.38b il dettaglio in prossimità dell'elettrodo. Le misure negli assi sono da intendersi in mm.	168
5.39	Migration velocity in funzione del diametro delle particelle a tensioni costanti.	172
5.40	Migration velocity in funzione della tensione applicata alle piastre a diametro di particella costante.	172
6.1	Calcolo dell'efficienza ottenuta modificando la spaziatura tra le piastre.	177
6.3	Grafici raffiguranti il percorso compiuto dalle particelle transitanti nella sezione secondo il calcolo numerico (la gradazione di colore dal rosso al blu indica la velocità delle particelle dalle più veloci alle più lente) e le linee equipotenziale (inferiori a 2400 V) al variare del diametro dei fori sulle piastre forate.	181
6.4	Efficienza di cattura in funzione del diametro dei fori come da descrizione.	182
6.5	Esempio di piastra forata con rapporto pieno/vuoto pari a 0.5: modello 3D e andamento del potenziale tratto dalla Relazione Tecnica del Prof. Piergiorgio Alotto [12].	184
6.6	Rappresentazione grafica dei risultati in Tabella 6.3.	186

7.1	Rappresentazione schematica dell'alimentazione in presenza del controllo.	191
7.2	Rappresentazione schematica del controllo di corrente.	192
7.3	Foto del filtro con installata la piastra in carbone ortogonale al flusso d'aria. La configurazione ufficiale sarà analoga alle piastre interne del filtro.	195
A.1	Proiezioni del prototipo. In alto il filtro con le sole piastre di raccolta (in alto a destra) e di repulsione (in alto a sinistra). . .	198
A.2	Esploso e dettaglio delle piastre utilizzate nel prototipo.	199
A.3	Piastra forata innovativa realizzata in sostituzione alle piastre di repulsione (lamella di Tipo 3 indicata in FiguraA.2)	200
C.1	Applicazione all'apertura.	206
C.2	File di output del software di acquisizione dati BenchLink a fine misura utilizzato come input nell'applicazione.	207
C.3	Applicazione dopo il caricamento del file.	207
C.4	Selezione dell'intervallo contenente il punto di flesso. Nell'esempio, dall'andamento visibile in Figura C.3 si è considerato come intervallo di interpolazione quello con indice compreso tra 30 e 80.	208
C.5	Esempio di calcolo della generation rate.	209

Elenco delle tabelle

2.1	Valori della rigidità dielettrica e di k_{geom} utilizzati nella (2.4.5) ricavati da Peek in diverse configurazioni geometriche.	40
2.3	Calcolo di d per la relazione (2.4.10) a partire da altri parametri geometrici secondo Cooperman.	46
3.1	Valori della distribuzione di Student utilizzati dalla normativa per la relazione (3.1.3).	59
5.1	La tabella dimostra come la relazione di Peek sia verificata nella configurazione del prototipo. Le colonne da sinistra a destra rappresentano: tensione applicata sull'elettrodo di diametro 0.16 mm, tensione applicata sulle piastre di repulsione, campo elettrico calcolato secondo la teoria di Peek tenendo conto della variazione di temperatura che modifica la densità relativa dell'aria secondo la relazione (2.4.4), campo elettrico calcolato numericamente sulla superficie dell'elettrodo della sezione centrale del filtro, campo elettrico calcolato numericamente sulla superficie dell'elettrodo delle sezioni più esterne del filtro. L'ultima riga ha valori fisicamente errati, probabilmente dovuti ad un errore nella misura per tensione elevata nelle piastre.	121
5.2	La tabella raccoglie la massima concentrazione di ozono raggiunta in cabina durante le misure indicata con $[O_3]$ e le efficienze riscontrate a diverse tensioni V_2 applicate sulle piastre mantenendo costante la corrente I o la tensione sull'elettrodo V_1 . Le misure sono state realizzate con un filtro a piastre forate ed elettrodi da 0.3 mm.	142

5.3	La tabella riporta i valori di efficienza misurati in cabina alimentando il filtro in modo tale da mantenere una corrente pari a $450 \mu\text{A}$ e applicando sulle piastre di repulsione un potenziale pari a quello indicato. Il filtro è a piastre forate con elettrodo di diametro 0.3 mm	158
5.4	Efficienza di cattura ottenuta alimentando solo le piastre in due prototipi, uno con piastre forate, uno con piastre piene, a due livelli di tensione, uno al di sotto dell'innesco, uno prossimo alla scarica.	169
6.1	Efficienze calcolate al variare della spaziatura delle piastre.	178
6.2	Stima dell'efficienza di cattura calcolata numericamente in COMSOL al variare del diametro dei fori nelle piastre di repulsione.	182
6.3	Efficienze misurate e calcolate con il modello alimentando solamente le piastre forate del prototipo.	185
6.4	Valori di α per particelle di $0.4 \mu\text{m}$ e i tre livelli di tensione misurati.	186
6.5	Valori di L_{nuova} al variare della tensione sulle piastre per ottenere un'efficienza del 99.5% con particelle di $0.4 \mu\text{m}$ supponendo sistematico l'errore sulla stima che il modello fornisce.	187

Elenco dei Simboli

b	mobilità elettrica
c	velocità della luce
C	capacità elettrica
C_c	fattore di Cunningham
C_D	coefficiente di trascinamento
c_i	velocità termica media
C_{Loeb}	costante di Loeb
D	campo di spostamento elettrico
D_i	coefficiente di diffusione
$d\delta$	componente variabile di δ
d_p	diametro della particella
d_{pias}	distanza tra le piastre
e	carica elementare
E	campo elettrico
E_0	rigidità dielettrica dell'aria
E_{av}	campo elettrico medio nello strato ionizzato
E_{on}	campo elettrico di innesco
E_p, E_{ps}	campo nello stadio di cattura
E_{peek}	campo sulla superficie dell'elettrodo
E_{peekRH}	campo di Peek corretto con l'umidità
F_D	drag force, forza di trascinamento
g_z	accelerazione di gravità
I	corrente uscente dal filamento
I_c	corrente per effetto corona
J	densità di corrente
k	costante di Boltzmann. Il simbolo è utilizzato anche come energia cinetica in regime turbolento (solo nel modello $k-\varepsilon$)
K_E	costante di Coulomb
k_{geom}	costante geometrica (Tabella 2.1)

K_n	numero di Knudsen
k_{real}	costante di modifica del modello di Deutsch-Anderson per considerare i fenomeni non ideali
l	lunghezza di un cilindro (filtro monostadio coassiale)
L_{nuova}	nuova lunghezza delle piastre necessaria per raggiungere il rendimento desiderato
m	massa generica, coefficiente di rugosità nella formula di Peek
m_p	massa della particella
n	numero di cariche
\mathbf{n}	vettore normale alla superficie
N	numero di particelle (funzione della posizione d'analisi)
N_0	numero di particelle in ingresso al filtro
N_i	concentrazione degli ioni
$[O_3]$	concentrazione di ozono
$[O_3]'$	generation rate
p	probabilità di cattura
P	pressione
P_0	pressione in condizioni STD (101325 Pa)
P_i	potenza dissipata nello strato d'aria ionizzato
q	carica elettrica, probabilità di non cattura nella spiegazione probabilistica di White del modello di Deutsch-Anderson
Q	portata d'aria
q_s	carica di saturazione
q_{field}	carica dovuta a field charging
q_{diff}	carica dovuta a diffusion charging
R	costante universale dei gas
r_c	raggio cilindro esterno
r_p	raggio della particella
r_{sheath}	spessore dello strato ionizzato
r_w	raggio cilindro interno, raggio del filamento
Re	numero di Reynolds
s	circonferenza del cilindro esterno in configurazione coassiale
S	sezione di cattura
S_{in}	sezione di ingresso del filtro
t	tempo
T	temperatura assoluta
t_c	temperatura in gradi celsius
t_0	costante di tempo della carica

T_0	temperatura assoluta in condizioni STD (298 K = 25°C)
v	velocità del gas in ingresso
V	potenziale elettrico
\bar{v}	componente media della velocità v
v'	componente fluttuante della velocità v
V_0, V_1	tensione di alimentazione dell'elettrodo di ionizzazione
$V_2, V_{piastre}$	tensione applicata alle piastre
v_{aria}	velocità dell'aria
V_i	caduta di tensione nello strato d'aria ionizzato
V_{on}	potenziale di innesco
$Volume$	volume d'aria dato da $S_{in} \cdot v_{aria} \cdot \Delta t$
w	velocità di deriva delle particelle verso l'elettrodo a ground
x	variabile spaziale
α	entità dell'errore sistematico percentuale introdotto dal modello
δ	densità di carica spaziale
δ_0	componente costante di δ
δ_{bz}	spessore infinitesimo dello strato prossimo alla parete di cattura
δ_{part}	contributo alla densità di carica dovuto alla carica delle particelle
δ_{peek}	densità relativa dell'aria
$-\Delta H_0$	entalpia di formazione di ossidi sulla superficie di un filamento metallico
φ	potenziale elettrico (nelle equazioni di Maxwell)
φ_A	potenziale calcolato con la (2.4.12)
φ_B	potenziale calcolato con la (2.4.13)
ε	tasso di dissipazione in presenza di moto turbolento
ε_0	costante dielettrica del vuoto
ε_r	costante dielettrica relativa del materiale
ρ_f	densità di massa del fluido
ρ_p	densità di massa delle particelle
μ	viscosità del gas
μ_0	permeabilità magnetica nel vuoto
μ_t	viscosità in regime turbolento
σ	diametro di collisione
λ	cammino libero medio

Introduzione

Nati per applicazioni di tipo industriale, i *precipitatori elettrostatici*, noti anche come *elettrofiltri*, sono dispositivi che sfruttano elevati potenziali elettrici per ionizzare localmente l'aria e caricare elettricamente le particelle sospese nell'aria; in presenza di un opportuno campo elettrico, sulle particelle caricate agisce una forza di tipo coulombiano che le attrae su pareti dove vengono catturate. In questo modo un flusso d'aria sporca in ingresso viene depurato con un dispendio energetico molto contenuto: proprietà caratteristica dei filtri sono infatti la loro ridotta energia elettrica richiesta per alimentarli e la modestissima caduta di pressione. Nel corso del Novecento, l'interesse verso i filtri elettrostatici ha comportato l'avvio di numerose ricerche volte a migliorare l'efficienza di cattura di particelle di diverse dimensioni soggette a forze di entità anche molto differenti. La capacità di raggiungere efficienze molto elevate anche per particelle di dimensioni inferiori ad $1\ \mu\text{m}$, ha evidenziato la possibilità di utilizzare questi dispositivi anche per purificare l'aria immessa in edifici civili, residenziali e non. La necessità di ridurre i consumi energetici negli edifici, che nella maggior parte dei casi si traduce nel minimizzare lo scambio termico tra interno ed esterno, è sede di un conflitto intrinseco tra la necessità di rendere sempre più ermetici gli edifici e la contemporanea necessità di un ricambio d'aria per mantenerne i livelli di qualità e purezza, aspetto particolarmente problematico in siti con inquinamento atmosferico elevato. Gli ambienti interni, infatti, sono potenzialmente aree di maggiore esposizione ad inquinanti pericolosi poiché gli edifici, in assenza di un'opportuna filtrazione dell'aria immessa dall'esterno, diventano contenitori in grado di accumulare aria sporca e insalubre¹. Nel piano economico degli USA l'impatto economico positivo conseguente

¹Sono stati individuati oltre 900 componenti dannosi nell'aria degli ambienti confinati "civili". Possono essere di natura chimica (monossido di carbonio, biossido di carbonio, biossido di azoto, anidridi varie, composti organici volatili, formaldeide, toluene, benzene, stirene, isocianati, gas radon ecc.), fisica (particolato) o biologica (muffe, batteri, virus, funghi, pollini, endotossine, acari, ecc) [13].

ad un miglioramento dell'Indoor Air Quality (IAQ) sotto forma di aumento di produttività, diminuzione di spese sanitarie e di assenze lavorative per malattie è stato valutato oltre 20 miliardi di dollari[14]. Da qui si evince facilmente il motivo della spinta internazionale che ha visto il settore dell'Air Quality comparire tra i temi di ricerca prioritari dal *Department of Energy* degli Stati Uniti inseriti nel Piano Strategico ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) nel quinquennio 2010-2015[15]. Una soluzione adottata da molto tempo è l'utilizzo di filtri, tipicamente elettrostatici per i vantaggi energetici ed economici rispetto alle altre tecnologie disponibili. Paradossalmente, l'utilizzo di tali dispositivi per la rimozione di polveri, fumi e altre particelle causa la produzione di ozono, un gas tossico ed irritante; ciò è dovuto agli elevati potenziali necessari a ionizzare l'aria e caricare le particelle da raccogliere. Si comprende facilmente che, essendo la ionizzazione responsabile sia della cattura (per la carica delle particelle) che della produzione di ozono, esiste un trade-off che dev'essere considerato in sede di progetto: le potenze in gioco devono essere sufficienti per ottenere un'elevata efficienza ma non tali da causare il raggiungimento di concentrazioni pericolose di ozono. Nessun filtro ad oggi controlla la produzione di ozono in tempo reale poiché la normativa non lo richiede. L'adozione di un controllo in grado di valutare lo stato di funzionamento del dispositivo e il rispetto dei limiti prestabiliti sarebbe auspicabile.

Per quanto riguarda i fenomeni agenti nel processo di cattura, gli studi effettuati in passato hanno portato ad un modello che ben approssima i risultati sperimentali sul polverino di carbone e altre particelle di diametro non inferiore a 10 μm . Nel presente lavoro si analizzerà la validità del modello per particelle fino a due ordini di grandezza inferiori. Diversamente, le informazioni presenti in letteratura riguardo la produzione di ozono sono piuttosto limitate e, quando presenti, frammentate. Nei primi capitoli del presente elaborato si è cercato di raccogliere le informazioni teoriche e sperimentali presenti in letteratura così da presentare il problema nel modo più completo ed organico possibile. La maggior parte dei riferimenti utilizzati e adottati per la stesura e l'esposizione dei dati sono citati e riportati in bibliografia; alcuni, di scarso interesse o ripetitivi nei contenuti, non sono stati nominati. Il Capitolo 1 presenta in dettaglio il problema della filtrazione confrontando le varie tipologie di filtri e le proprietà che li contraddistinguono. Particolare attenzione è posta sui filtri elettrostatici di cui si è narrata brevemente la storia. Il Capitolo 2 e 3, strutturati in modo analogo, analizzano rispettivamente le problematiche di ozono e cattura: in

ordine descrivono la normativa vigente, la fisica che sta alla base e i modelli presenti in letteratura. Il Capitolo 4 presenta brevemente l'azienda committente del progetto e i prototipi utilizzati durante le sperimentazioni. Le analisi effettuate e i risultati ottenuti sono riportati al Capitolo 5. Questo è stato suddiviso in tre sezioni principali:

1. Verifica della validità della legge di Peek per verificare se l'intero ragionamento fosse applicabile anche in una configurazione diversa da quella storicamente studiata.
2. Studio analitico, numerico e sperimentale della produzione di ozono nel filtro
3. Adozione del modello di cattura di Deutsch-Anderson, universalmente assunto come il più esaustivo, opportunamente modificato per considerare la sensibile differenza nella dimensione delle particelle tra il caso originale e il caso di interesse.

Dai modelli risultanti si sono proposte e analizzate numericamente delle migliorie geometriche realizzabili in un ulteriore prototipo; i ragionamenti e i risultati da validare sperimentalmente sono riportati al Capitolo 6. Nel Capitolo 7 sono riportate conclusioni e osservazioni sull'intero lavoro; una particolare attenzione è stata posta sulle proposte avanzate che durante il presente lavoro non hanno potuto essere analizzate, per motivi di tempo o di possibilità materiali, e si riservano per ulteriori sviluppi futuri.

Capitolo 1

Filtrazione dell'aria

La separazione di particelle sospese dal gas è uno dei principali problemi tecnici e scientifici dell'era industriale. I processi industriali, dalla lavorazione di materie prime all'utilizzo di combustibili fossili come fonte di energia, hanno causato l'emissione di oltre 100 mega-tonnellate l'anno di fumi, polvere e vapori nei soli Stati Uniti [6]. Nonostante una piccola parte di gas e vapori sia di origine naturale, il crescente problema dell'inquinamento atmosferico è dovuto all'attività antropica e, per la maggiore densità di industrie, tende a concentrarsi in corrispondenza dei centri urbani. La sempre maggiore attenzione al problema ha comportato l'obbligo da parte dei produttori di munirsi di dispositivi in grado di ridurre le emissioni in loco. Già nel XIX secolo alcuni apparati di abbattimento assimilabili agli odierni filtri erano in funzione, tipicamente nelle caldaie a carbone dove l'inquinamento era tale da causare la morte di numerosi lavoratori [16, 6]. Nel tempo la tecnologia sempre più avanzata e raffinata ha portato alla realizzazione di numerose tipologie di filtri in grado di depurare l'aria da particelle e gas con efficienze di cattura oltre il 90%. Tuttavia, la crescita esponenziale delle aree industriali e la delocalizzazione delle fonti inquinanti, un esempio tra tutti i mezzi di trasporto, hanno comportato un aumento della concentrazione di polveri e agenti inquinanti nell'aria, in alcuni casi tali da renderla pericolosa per la salute umana anche all'interno degli edifici civili dove un importante ricambio d'aria non era effettuabile. Per l'elevata efficienza, tali filtri si sono perciò rivelati adatti non solo a limitare i livelli di inquinamento filtrando l'aria espulsa nei siti produttivi, ma anche eliminando particelle inquinanti dall'aria immessa in edifici residenziali o altre strutture ad uso civile.

1.1 Tipologie di filtri utilizzati

Sviluppatasi in particolar modo nel secolo scorso sotto la forte spinta di direttive nazionali e comunitarie, i dispositivi utilizzati per la rimozione del particolato solido sospeso¹ (tipicamente in uscita dalle camere di combustione) possono essere suddivisi in tre gruppi:

- precipitatori meccanici
- filtri a manica
- precipitatori elettrostatici

Precipitatori meccanici Tipicamente raggruppabili in *camere di sedimentazione* e *cycloni*, sono adatti a rimuovere polveri grossolane di dimensione non inferiore a $1\ \mu\text{m}$ prodotte da caldaie con focolare a griglia, ma non polveri fini. Non essendo di interesse per il campo di applicazione dei filtri analizzati nel presente lavoro, i precipitatori meccanici non verranno analizzati.

Filtri a manica Di più recente adozione nell'industria, sfruttano il semplice principio di filtrazione del "colino" dove un fluido contenente particelle in sospensione viene costretto ad attraversare una superficie forata cosicché tutte le particelle aventi dimensioni maggiori del diametro del foro vengano trattenute. Sono realizzate in fibra di vetro rivestita in grafite, si parla in tal caso di *filtro di superficie* poiché le particelle sporche si bloccano sulla superficie del tessuto lasciando passare al suo interno solamente aria pulita o contenente particelle molto piccole, o in teflon, si parla di *filtro di profondità* poiché le particelle vengono bloccate all'interno del tessuto. Qualora il particolato fosse chimicamente aggressivo, come accade negli impianti di produzione, si utilizzano materiali adatti a sopportarne l'attacco. La loro efficienza, superiore al 99%, varia a seconda della trama più o meno fitta del tessuto. In ogni caso, essa aumenta all'aumentare del volume d'aria filtrato per accumulo sul tessuto di materiale che rende sempre più difficile il

¹Si definisce PTS (particelle totali sospese) l'insieme di particelle solide e liquide di **diametro inferiore a $100\ \mu\text{m}$** che rimangono in sospensione nell'aria. Vengono classificate in base al diametro delle particelle:

- *ultrafine* con $0.01 < d_p < 0.1\ \mu\text{m}$
- *fine* con $0.1 < d_p < 2.5\ \mu\text{m}$ (di interesse per il presente lavoro)
- *grossolana* con $2.5 < d_p < 100\ \mu\text{m}$

passaggio di particelle progressivamente più piccole, ma al contempo rende più difficoltoso il passaggio dell'aria stessa. È necessario, quindi, procedere regolarmente alla rimozione dello strato solido accumulato: le procedure, a seconda del tipo di materiale e dal tipo di captazione, sono

- *meccaniche*: vibrazione o scuotimento delle maniche. Sollecita molto le fibre.
- *pulse-jet*: utilizzabile con maniche a captazione esterna (l'aria da filtrare entra dall'esterno della manica ed esce dall'interno). Un getto d'aria a 6÷7 bar all'interno di ciascuna manica provoca un allargamento del tessuto e un distacco del deposito
- *Corrente inversa*: un gas privo di polveri viene fatto passare in senso inverso a quello di funzionamento. È necessario sospendere la manica dall'esercizio.

Per il loro principio di funzionamento, i filtri a manica presentano perdite di carico notevoli (tipicamente 500÷2500 Pa [17]).

In sintesi, vantaggi (+) e svantaggi (-) di questa tipologia di filtri sono:

- + Efficienze elevate
- + Prestazioni indipendenti dal carico di polveri (se il carico è molto elevato si aumenta la frequenza di rimozione del deposito)
- + Possibile recupero delle polveri secche inalate
- Durata di vita molto bassa, spesso inferiore a 2 anni
- Costo elevato. Le sole maniche rappresentano il 20% del costo del sistema di filtrazione e, per il punto precedente, rendono il tipo di filtrazione particolarmente oneroso.
- Perdita di carico molto marcata con necessità di maggiore potenza dei ventilatori
- In presenza di aria umida peggiorano le prestazioni del filtro

1.2 Filtri elettrostatici (ESP)

Rappresentano la soluzione tecnica più diffusa negli impianti industriali; presentano rendimenti e affidabilità elevate con basse perdite di carico e sono in grado di bloccare particelle, fibre e sostanze biologiche (batteri, muffe,

funghi, ecc.) aventi $0.01 < d_p < 100 \mu\text{m}$. Di natura completamente diversa rispetto alle tipologie precedentemente descritte per l'utilizzo di forze di natura elettrica, i precipitatori elettrostatici presentano efficienze elevate e consumi molto ridotti: motivo principale di queste caratteristiche è l'applicazione delle forze di separazione direttamente sulle particelle anziché sull'intero flusso d'aria come avviene nei metodi di filtrazione di natura meccanica. Le prime osservazioni del fenomeno di attrazione elettrica di particelle presenti nei fumi risalgono al 1600 con il lavoro del fisico William Gilbert, *De Magnete* [18]:

“Everything rushes towards electricks excepting flame and flaming bodies and the thinnest air [...] yet they entice smoke sent out by an extinguished light [...] Bodies are borne towards electricks in a straight line towards the center of electrick.”

Nel 1745 Benjamin Franklin notò e studiò ciò che oggi è noto come effetto corona. Soltanto tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento si vide la nascita del filtro elettrostatico come dispositivo: Lodge tra il 1884 e il 1905 mise al centro dell'attenzione scientifica lavori precedenti sui fenomeni di scarica e il loro effetto su fumi [19]; Cottrell nel 1907, interessato nel gas cleaning e collocato storicamente in un periodo di grande attività di ricerca sulla scarica elettrica, realizzò il primo precipitatore elettrostatico ad alta tensione utilizzando un raddrizzatore meccanico [20]. Nel 1910 Cottrell stesso produsse il primo filtro commerciale che, nonostante le difficoltà incontrate, raggiunse efficienze superiori all'80% [6]. Filtri elettrostatici per la pulizia dell'aria in edifici ad uso civile furono realizzati per la prima volta nel 1915 nel Connecticut in un impianto di ventilazione di una fabbrica d'armi [21]. Il primo esempio di precipitatore per ambienti interni che prevedeva un ricircolo dell'aria depurata risale al 1923 in California dove si cercò, senza successo, di determinare se l'ozono prodotto dall'effetto corona comportasse degli effetti benefici sugli impiegati dell'ufficio in cui il filtro era installato. Per l'utilizzo di filtri come dispositivi per l'air-cleaning commercialmente disponibili si dovette attendere la fine degli anni Trenta con l'introduzione dei *Low-ozone type precipitator* [22], la cui concentrazione di ozono raggiungibile, seppur inferiore rispetto al precipitatore di Cottrell, rimaneva di diversi ppm, ovvero decine di volte la concentrazione oggi fissata come limite massimo in ambienti a ridotta esposizione temporale. Il lavoro di Penney fu essenziale per rendere i filtri elettrostatici dei prodotti commerciali come oggi li intendiamo: affidabili, compatti ed economici. L'utilizzo di un

precipitatore bi-stadio con elettrodi sottili in tungsteno alimentati con relativamente basse tensioni positive e piastre in alluminio equispaziate, noto come *filtro Westinghouse*, evidenzia come da allora (1937) la struttura di base sia rimasta invariata. Attualmente, oltre ai filtri ESP, per la purificazione dell'aria esterna si utilizzano filtri meccanici in tessuto-non-tessuto con classi di filtrazione di media efficienza che variano secondo la destinazione finale dell'edificio. Alcune nuove tecnologie basate sull'impiego di reazioni foto-catalitiche su membrane con biossido di titanio sono state sperimentate per eliminare inquinanti gassosi come i COV (Composti Organici Volatili) precursori dell'ozono e presenti negli ambienti chiusi (si veda il Capitolo 2). Nel 2003 l'azienda *Allied Environmental Technologies Inc.* ha brevettato un nuovo tipo di filtro elettrostatico ibrido denominato MSC (Multi-Stage Collector) che combina le caratteristiche dei filtri meccanici a manica e quelli elettrostatici con risultati di gran lunga migliori sulla cattura del particolato fine.

1.2.1 Principio di funzionamento

Il processo fisico che descrive la cattura tramite ESP è spesso definita in modo generico come *Elettrofisica*. Tuttavia, le discipline scientifiche effettivamente coinvolte sono numerose: fisica, chimica, aerosol technology, elettrotecnica, elettronica, aerodinamica, meccanica, ecc. Lo stesso appellativo “precipitatore elettrostatico”, di origine recente, è meno accurato rispetto al “precipitatore elettrico” utilizzato in passato: il processo, per la presenza dell'effetto corona, è infatti tutt'altro che elettrostatico. Si veda il Paragrafo 2.4.1 per una descrizione del problema.

Il principio di funzionamento si basa sulla carica di particelle sospese per effetto della ionizzazione causata dalle tensioni elevate su filamenti di piccolo diametro e la loro cattura su piastre alimentate (o non) a potenziale diverso in modo tale da creare un campo elettrico che applichi una forza di tipo coulombiano sulle particelle appena caricate tale da rendere trascurabili le forze di origine diversa. In riferimento alla Figura 1.1, in cui è rappresentato un filtro a singolo stadio con configurazione wire-plate, dell'aria carica di particelle (aria sporca) è fatta circolare con velocità di $0.5 \div 3.0$ m/s all'interno di una regione delimitata da due piastre a potenziale fissato pari a 0 V in modo tale da garantire una sicurezza intrinseca in caso di accidentale contatto con un operatore. Tra le piastre sono disposti una serie di elettrodi, non necessariamente di forma uguale, alimentati ad alta tensione positiva o negativa

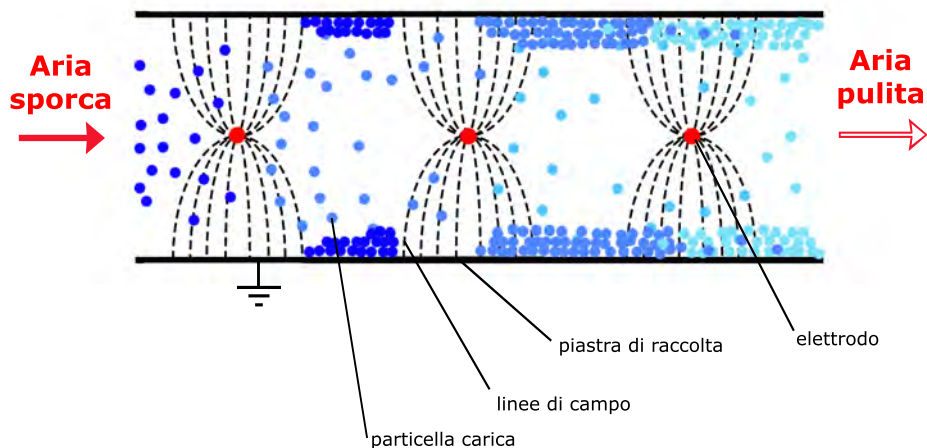
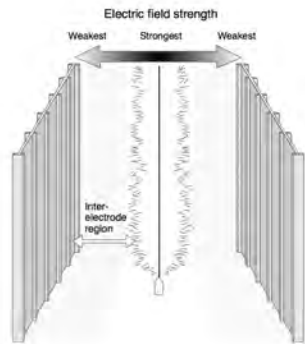


Figura 1.1: Principio di funzionamento di un filtro elettrostatico. Rappresentazione di una sezione di un filtro a singolo stadio wire-plate.

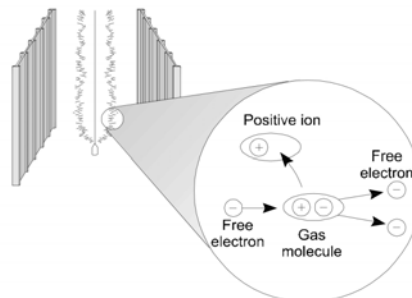
tale da produrre un campo elettrico sufficiente a ionizzare l'aria in prossimità degli elettrodi stessi: in questo modo un flusso di cariche dello stesso segno del potenziale applicato all'elettrodo viene respinto dalla zona di campo massimo prossima al filamento verso le piastre a ground incrociando sia altri atomi e molecole che vengono a loro volta ionizzati (effetto valanga), sia le particelle sospese nell'aria sulle quali si depositano. In questo modo le particelle acquisiscono una carica. Proseguendo il loro moto all'interno della sezione, queste risentono del campo creato dagli elettrodi più interni e, essendo il potenziale concorde al segno della carica acquisita, vengono respinte verso le piastre di cattura sulle quali il loro moto si arresta per una combinazione di forze di Van der Waals e di attrazione elettrica. L'efficienza di cattura è definita come la frazione di particelle entranti nel filtro che vengono catturate. In Figura 1.2 sono riportati graficamente i passaggi finora descritti relativi ad un filtro con elettrodo alimentato positivamente.

Una volta formatosi uno strato di particelle sulle piastre di raccolta, queste devono essere rimosse: si utilizzano sistemi di tipo meccanico (martelletti) o sistemi di lavaggio. In impianti industriali, la rimozione dev'essere eseguita automaticamente e regolarmente con interventi tanto più frequenti quanto maggiore è il carico di polveri depositate; per impianti di filtrazione dell'aria per edifici civili la pulizia viene eseguita in sede di manutenzione ordinaria essendo i depositi molto inferiori.

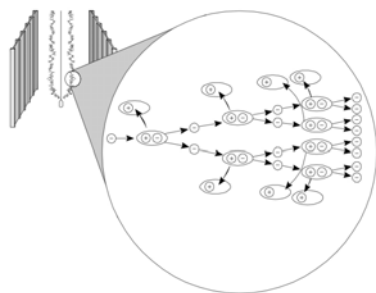
In realtà i processi di carica delle particelle sono molteplici (si veda il



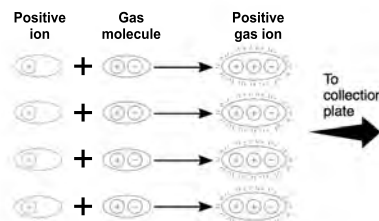
(a) Campo elettrico e zona di ionizzazione (nell'immagine lo strato è stato evidenziato e reso molto più grande, nella realtà il suo spessore è tanto piccolo da renderlo indistinguibile dall'elettrodo).



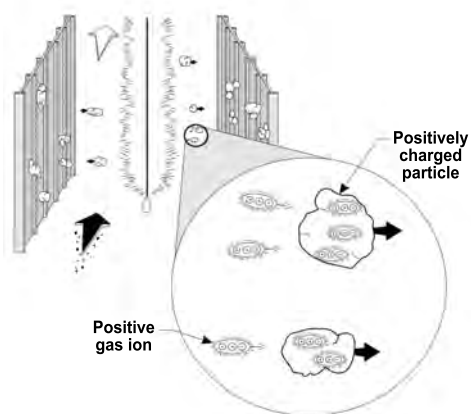
(b) Effetto corona. Ionizzazione di una molecola.



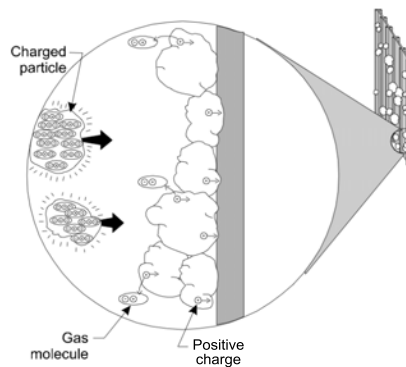
(c) Effetto valanga della ionizzazione.



(d) Formazione di molecole cariche.



(e) Caricamento delle particelle.



(f) Cattura delle particelle sulle piastre di raccolta.

Figura 1.2: Rappresentazione grafica del principio di funzionamento di un filtro elettrostatico.

Paragrafo 3.2.2) e possono avvenire anche naturalmente in modo tanto efficace da rendere rara la presenza di particelle neutre. Tuttavia, le particelle cariche naturalmente non consentono una precipitazione interessante: i rendimenti di cattura massimi in questo caso non raggiungono l'80% [6], efficienza minima per poter essere classificati secondo normativa [79]. Tra i metodi utilizzati per caricare le particelle, l'effetto corona è in assoluto il più efficace.

Molteplici sono anche le configurazioni che nel tempo sono state realizzate. Si parla di:

- **filtro mono-stadio:** il “campo di cattura” è, di fatto, la continuazione del campo di ionizzazione. Sono i primi realizzati, il filtro di Cottrell era di questo tipo.
- **filtro bi-stadio:** il “campo di cattura” è realizzato da elettrodi di forma e alimentazione diverse rispetto al campo responsabile della ionizzazione.

Tipici esempi della prima tipologia sono filtri con configurazione wire-cylinder (elettrodi coassiali), analoghi al precipitatore ideato da Cottrell, e filtri wire-plate (elettrodi filiformi disposti parallelamente a due piastre di raccolta). In Figura 1.3 una rappresentazione delle configurazioni appena descritte.

Un tipico esempio di filtro bi-stadio è riportato, invece, in Figura 1.4. Il primo stadio, responsabile del caricamento delle particelle, è costituito da un filamento percorso trasversalmente dal flusso d'aria come nel caso wire-plate precedente; il secondo stadio è invece costituito da piastre parallele disposte longitudinalmente al flusso d'aria e alimentate alternativamente a potenziale nullo e a potenziale di segno concorde a quello applicato sull'elettrodo nel primo stadio così da respingere le particelle verso le piastre di cattura.

Per il maggiore impatto sulla produzione di ozono degli elettrodi filiformi, per l'Indoor Air-Cleaning si utilizzano prevalentemente precipitatori bi-stadio con filamenti di diametro inferiori al millimetro presenti esclusivamente nel primo stadio.

1.2.2 Vantaggi e svantaggi

Per la loro recente comparsa nel mercato dei dispositivi per la filtrazione, i precipitatori elettrostatici, seppur strutturalmente molto semplici, offrono ancora ampi margini di miglioramento in termini di efficienza, costi, dimensioni e compatibilità con gli ambienti di installazione. Sebbene sia difficile

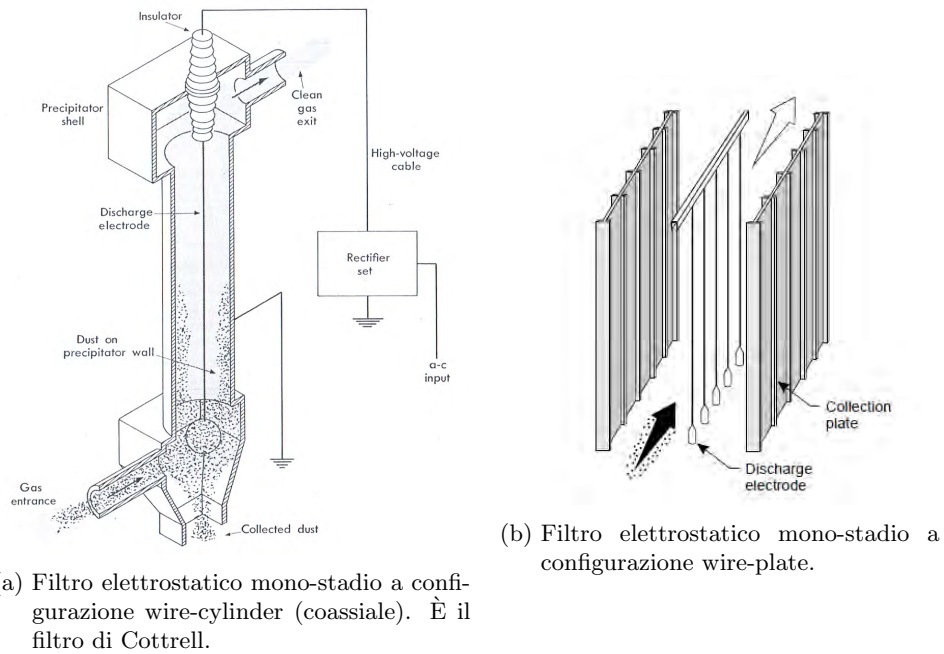


Figura 1.3: Rappresentazione di filtri mono-stadio.

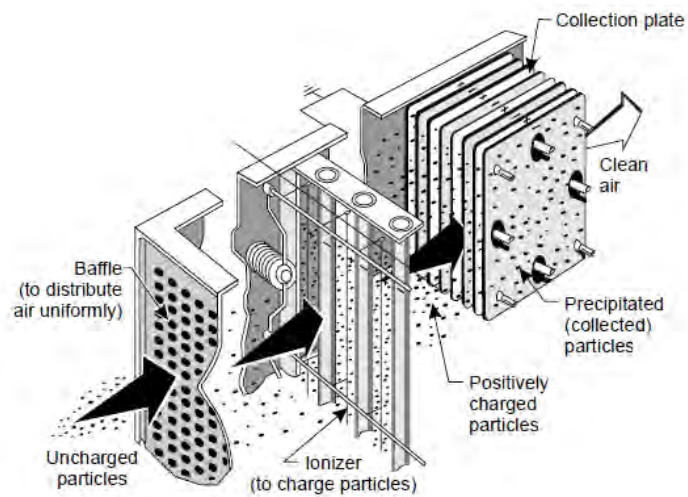


Figura 1.4: Rappresentazione di filtri bi-stadio con configurazione wire-plate per il primo stadio e plate-plate per il secondo.

riportare esaustivamente pro e contro di una tecnologia di così vasta applicazione senza contestualizzare, una generica analisi dei vantaggi (+) e svantaggi (-) è qui di seguito riportata.

- + Elevata efficienza di separazione
- + Capacità di catturare particelle in un range di dimensioni molto ampio, sia solide che liquide. Come limite inferiore spesso si considera un diametro di 0.01 μm , ma si può arrivare anche ad 1 nm, seppur con configurazioni particolari e comunque con efficiente modeste
- + Sono in grado di catturare anche particelle di tipo biologico. Diversamente dai filtri meccanici, l'accumulo di sporcizia e di crescita microbica non è attraversato costantemente dal flusso d'aria (nei filtri elettrostatici l'aria scorre longitudinalmente alle piastre di raccolta) con conseguente minor rischio di contaminazione degli ambienti
- + Minime perdite di carico
- + Potenza elettrica richiesta molto modesta. In impianti industriali, un valore tipico è pari a 1 kW per trattare una portata di 10000 m^3/h . Nel prototipo utilizzato, con una portata di 630 m^3/h non si superano i 15 W (tipicamente è inferiore a 10 W)
- + Possibilità di trattare grandi portate di gas
- + Costi di esercizio estremamente ridotti
- + Vita operativa molto lunga e con ridotte esigenze di manutenzione (necessaria in primis per i filamenti)
- + Affidabilità dovuta all'assenza di parti in movimento (al massimo i martelletti per la rimozione meccanica del deposito)
- + Temperature massime di esercizio molto elevate
- + Possibilità di funzionamento in presenza di nebbie fortemente corrosive
- Costi di investimento iniziali maggiori rispetto ai filtri meccanici (in particolare nell'applicazione industriale)
- Spazio richiesto dal dispositivo molto grande

- La resistività delle particelle incide sull'efficienza di cattura in modo molto pesante. Nel caso di applicazioni civili la resistività non è molto variabile, mentre in applicazioni industriali, in particolare con emissioni derivanti dalla combustione del carbone, la resistività varia anche di alcuni ordini di grandezza in condizioni ambientali molto simili².
- Condizioni di funzionamento sensibili alle condizioni ambientali
- Richiede l'utilizzo di componenti a tensione elevata
- Salvo particolari eccezioni, non è possibile filtrare sostanze gassose [6]
- Nonostante l'elevato rendimento, alcuni fenomeni intrinseci alla cattura e al deposito di particelle (si veda 3.2.4) causano una perdita di energia.
- In alcuni casi, tipicamente quando è richiesta un'elevata efficienza di cattura di particelle molto piccole e quindi molto dipendenti dal flusso d'aria, la bassa perdita di carico e la bassa turbolenza generata non facilitano la raccolta delle particelle sulle piastre di cattura: si procede quindi con una modifica delle piastre così da creare volutamente delle turbolenze all'interno del filtro.
- Le tensioni elevate con cui si alimentano gli elettrodi, ionizzando l'aria, danno origine a reazioni che producono gas indesiderati, in particolare l'ozono.

Aspetto energetico-economico per applicazioni in ambito civile

Uno degli oggetti principali nell'ambito della ricerca sul precipitatore elettrostatico è stata la messa a punto di un filtro di ventilazione in sostituzione alle UTA (Unità di Trattamento dell'Aria) destinate al condizionamento in ambito civile. In termini di efficienza di abbattimento delle polveri, della perdita di carico e quindi dell'energia richiesta, i risultati si sono rivelati estremamente interessanti.

I filtri per ambienti civili in commercio sono spesso caratterizzati dalla presenza di pre-filtri e post-filtri, entrambi in medium fibroso piano e continuo di bassa grammatura [24]. Nonostante ciò causi inevitabilmente delle perdite di carico, la perdita complessiva a circa 1 m/s è di circa $60 \div 80$ Pa.

²Essa dipende dal contenuto d'acqua, dalla temperatura e dalla composizione del gas, ecc. Un aumento della percentuale di vapore acqueo dal 5% al 20% comporta una riduzione della resistività di due ordini di grandezza [23].

Conoscendo i dati di alimentazione di filtri per applicazioni indoor, come nel caso di interesse per il presente lavoro di tesi, è quindi possibile stimare quale sia l'entità del risparmio energetico ottenuto con l'utilizzo di filtri elettrostatici anziché meccanici. Un filtro meccanico in carta ad efficienza medio-alta operante per 8760 h (1 anno) con portata di $1 \text{ m}^3/\text{s}$ e avente una perdita di carico pari a 250 Pa richiede 3129 kWh di energia elettrica se si ipotizza un rendimento del ventilatore del 70%. Con un costo dell'energia fissato a 0.11 €/kWh (tipico per impianti allacciati in MT), il costo annuale per la sola componente energia è pari a 344 €; considerato che il costo di un filtro di queste caratteristiche non supera i 70 €, si evince come il contributo in conto esercizio prevalga sul contributo in conto capitale. Utilizzando invece un filtro elettrostatico, con una tensione di alimentazione degli elettrodi di circa 10 kV e una corrente massima di alcune centinaia di microampere, le potenze installate sono pari ad alcuni watt: si consideri nell'esempio $P = 6 \text{ W}$ equivalenti ad un consumo annuo pari a 53 kWh. Considerando cautelativamente che un precipitatore elettrostatico dotato di pre-filtri e post-filtri produca una perdita di carico pari a metà del caso meccanico appena citato (125 Pa), il consumo energetico del ventilatore sarà anch'esso dimezzato e pari a 1564 kWh; aggiungendo il consumo dell'alimentatore si ricava un consumo annuo di 1617 kWh. Rispetto al caso tradizionale, si ha quindi un risparmio energetico di $3129 - 1617 = 1512 \text{ kWh}$, ovvero del 48.3% avendo utilizzato valori molto cautelativi per la perdita di carico nel caso elettrostatico. In termini di CO_2 immessa nell'atmosfera, informazione utile in termini pubblicitari per un'azienda, dalla conversione³ $1 \text{ kW} = 0.504 \text{ kg}$ di CO_2 si ricava che l'utilizzo di un filtro elettrostatico anziché tradizionale comporta una riduzione delle emissioni pari a 762 kg/anno di CO_2 .

Dall'esempio riportato, si comprende il motivo dell'interesse nell'industria della ventilazione e filtrazione dell'aria. Il settore a livello mondiale valeva 69 miliardi di \$ nel 2010 [25] e ha visto un incremento del 6.2% fino al 2014, con Cina e India come mercati principali (40% del mercato totale). In Europa il solo settore della ventilazione e del condizionamento fatturava 5.14 miliardi di \$ nel 2010 con 12710 aziende operative [25]. In Italia, con un fatturato di 1.1 miliardi di \$ nel 2010, si stima una crescita a 1.8 miliardi nel 2015. Entro il 2020, tali dati potrebbero essere di gran lunga superati per requisito "Zero Energy Building" che i nuovi edifici dovranno soddisfare⁴.

³Valore medio dichiarato da ENEL nel 2004.

⁴Con *Zero Energy Building* si intendono quegli edifici con consumo netto di energia nullo e zero emissioni di CO_2 calcolato su base annua.

Capitolo 2

Ozono

2.1 Cos'è e dove lo si trova

L'ozono (simbolo chimico O_3) è una forma allotropica dell'ossigeno che si presenta in natura sotto forma di gas inorganico, di colore blu via via più scuro man mano che la temperatura scende prossima a quella di condensa (80 K) e caratterizzato da un odore agliaceo pungente (da cui deriva il suo nome $\acute{o}\zeta\epsilon\iota\nu$ che in greco significa “puzzare”). La molecola fu scoperta da Christian Friedrich Schönbein nel 1840, solo successivamente si fu in grado di determinarne la formula chimica, la struttura fisica dei legami e la sua caratteristica diamagnetica. È un composto più instabile dell'ossigeno biatomico dal quale si genera in presenza di radiazione ultravioletta, scariche atmosferiche naturali o mediante dispositivi generatori di effetto corona. La sua concentrazione media nell'atmosfera terrestre è pari a 0.6 ppm (esiste in verità uno strato dell'atmosfera ad una quota di circa 25 km detto ozonofera che presenta concentrazioni fino a 10 volte tale valore); l'unità di misura della quantità totale di ozono che ci sovrasta in qualsiasi punto dell'atmosfera è il Dobson (DU) che equivale ad uno spessore di 0.01 mm di ozono puro alla densità che questo gas possiede con una pressione atmosferica misurata al suolo pari a 1 atm. Valori usuali di ozono a latitudini temperate sono 350 ± 100 DU a seconda che ci si sposti più o meno verso i poli (all'equatore la quantità naturale di ozono è minima). Negli ultimi decenni, si è misurata, in particolar modo nelle regioni polari, un'importante riduzione ciclica annuale della quantità atmosferica di ozono, fenomeno che è stato battezzato “buco dell'ozono”¹ e la cui colpa è stata attribuita principalmente a reazio-

¹Con “buco dell'ozono” si intendono le aree con valori di ozono inferiori a 220 DU. Un'immagine scattata e processata dalla NASA è riportata in Figura 2.1.

ni chimiche ozono-distruttive dovute alla presenza di composti catalizzatori quali gli alogenati (principalmente cromo e bromo), CFC in primis, dal 1990 banditi in oltre 90 paesi. In queste zone la diminuzione può arrivare al 71% (regione Antartica) e al 40% (regione Artica) [26, 27].

La presenza dell'ozono negli strati alti dell'atmosfera è fondamentale per la vita sulla Terra poiché schermo la superficie terrestre dai raggi ultravioletti di lunghezza d'onda dai 200 nm ai 315 nm² che danneggiano direttamente il DNA in tessuti di piante, animali e nell'uomo causano patologie per lo più dermatologiche che vanno da scottature e indebolimento del sistema immunitario fino al cancro della pelle [28, 29].

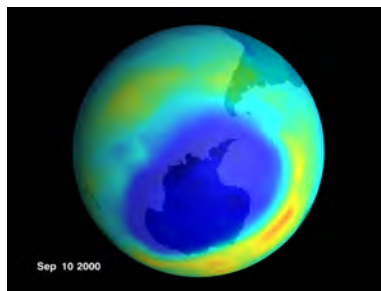


Figura 2.1: Dimensioni massime registrate del buco dell'ozono il 10 Settembre 2000: 29.9 milioni km² (Fonte: NASA).

“All life on Earth depends on the existence of a thin shield of a poisonous gas high in the atmosphere: the ozone layer.”

(Ozone Secretariat, UNEP, [29])

Negli strati bassi dell'atmosfera, invece, l'ozono è un gas fortemente indesiderato³. Esso è infatti un potente ossidante e tale proprietà lo rende altamente velenoso per gli esseri viventi. Fino al XX secolo, i naturalisti lo consideravano un composto benefico: solo successivamente si compresero gli aspetti negativi. Vi è un'evidenza scientifica sui rischi che comporta la presenza di ozono: il sistema respiratorio costituisce l'insieme di tessuti e mucose maggiormente pregiudicati con irritazioni a faringe, trachea e polmoni con conseguenze patologiche quali asma, bronchiti e problemi cardiopolmonari [30]. Lunghe esposizioni aumentano malattie polmonari croniche, come dimostrato da uno studio durato 18 anni basato su 450.000 persone abitanti negli USA: nelle città con elevati valori di ozono come Houston, Los Angeles e Città del Messico (concentrazione media tra 41 e 125 ppb) il rischio di

²Il picco della banda di assorbimento di Hartley per l'ozono è a 253.7 nm

³In realtà vi sono numerose applicazioni dell'ozono. Per la sua proprietà di potente ossidante viene impiegato nella preparazione di farmaci, lubrificanti sintetici, nella purificazione delle acque da agenti batterici. In ambiente industriale esso viene usato prevalentemente per l'estrazione di metalli e per l'invecchiamento precoce dei materiali plastici e gommosi.

morte per problemi respiratori è superiore del 30% rispetto alla media ed è considerato il quinto fattore di rischio per la salute umana [16, 31]. Dimostrati sono anche i problemi agli occhi conseguenti alle pesanti irritazioni che si possono verificare anche in presenza di basse concentrazioni di ozono [30].

Oltre ai descritti problemi di salute che comporta, l'ozono è un gas serra capace di assorbire raggi infrarossi emessi dalla superficie terrestre. Sebbene sia difficile dare una valutazione precisa della sua influenza a causa della distribuzione disuniforme sulla superficie, valori universalmente accettati propongono un forzante radiativo per l'ozono troposferico pari al 25% dell'anidride carbonica [32]. Origine di tale gas non è direttamente l'attività umana: l'ozono è infatti un agente inquinante secondario, ossia un gas che si forma dalla reazione fotochimica di inquinanti cosiddetti precursori in zone dove le condizioni climatiche presentano temperatura elevata, forte radiazione solare, alta pressione e bassa ventilazione⁴. Tipicamente il picco di ozono si presenta nelle ore centrali delle giornate estive. Alcuni inquinanti precursori sono presenti in natura, uno fra tutti il metano, ciò in accordo con valutazioni pre-industriali che dimostrano come l'ozono fosse un gas già presente in basse concentrazioni [33]; una concentrazione di fondo di ozono è pertanto considerata sicura. I maggiori precursori sono, tuttavia, prevalentemente dovuti a processi antropici e sono principalmente COV (composti organici volatili-idrocarburi) e NO_x, gas derivanti da emissioni industriali, traffico motorizzato e tutte le attività umane che prevedono l'utilizzo di combustibili fossili.

In Veneto, e in generale nella Pianura Padana, il problema è particolarmente sentito poiché, collocato in una delle aree geografiche con il più elevato tasso di inquinamento atmosferico, presenta valori elevati di polveri sottili ed ozono che sovente si mantengono prossimi (e talvolta superano) le soglie di informazione e di allarme stabilite dalla normativa⁵.

Per questo motivo e per mantenere i valori entro i limiti fissati dal Proto-

⁴Seppur di minore entità, è dimostrata una dipendenza della concentrazione di ozono di fondo dall'altitudine e dalla conformazione territoriale [1]

⁵Per “*soglia di allarme*” si intende il livello oltre il quale sussiste un rischio per la salute umana in caso di esposizione di breve durata per la popolazione nel suo complesso: il raggiungimento di tale soglia impone di adottare provvedimenti immediati; per “*soglia di informazione*” si intende, invece, il livello oltre il quale sussiste un rischio per la salute umana in caso di esposizione di breve durata per alcuni gruppi particolarmente sensibili della popolazione: il raggiungimento di tale soglia impone di assicurare informazioni adeguate e tempestive. Chiaramente vale la relazione *soglia di allarme* > *soglia di informazione*.

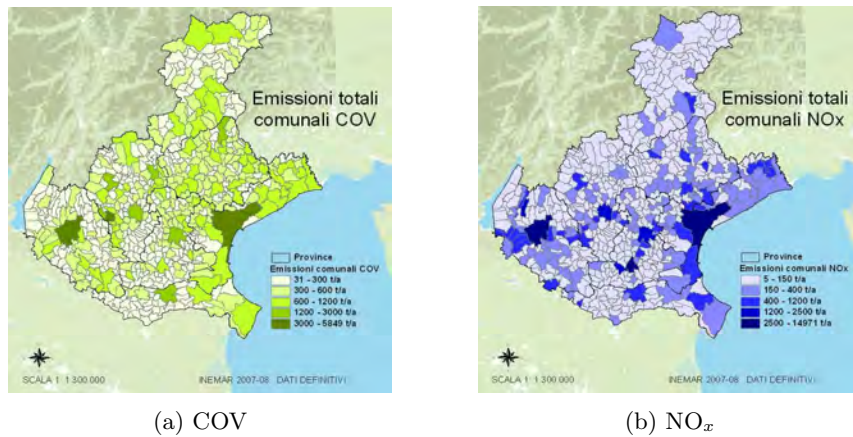


Figura 2.2: Mappe regionali delle emissioni annuali a livello comunale di Ossidi di Azoto (NO_x) e Composti Organici Volatili (COV), basate su INEMAR Veneto 2007/2008.

collo Göteborg (1999) all'interno della Convenzione di Ginevra tra i membri dell'UNECE sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero (1979), l'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale Veneto ha raccolto un database georeferenziato delle emissioni in atmosfera (INEMAR) che stima le emissioni annuali di 11 macroinquinanti tra cui COV e NO_x come si può vedere in Figura 2.2. Mentre a livello nazionale la Direttiva NEC (2001/81/CE) stabilisce come limiti di emissione $\text{NO}_x = 990 \text{ kt}$ e $\text{COV} = 1159 \text{ kt}$, a livello regionale la normativa vigente non fissa dei tetti di emissione. Nel 2013 è stato attivato un servizio informativo tempestivo dedicato all'ozono sul superamento effettivo o previsto delle suddette soglie di informazione e di allarme.

2.2 Legislazione e Normative

Per garantire livelli di concentrazione di gas dovuti ad attività antropica non dannosi per gli esseri umani e per l'ambiente, negli ultimi decenni innumerevoli norme e linee guida si sono succedute presentando un trend che conduce a valori sempre minori di concentrazioni ammesse che si traducono in vincoli sempre più stringenti per prodotti il cui funzionamento produce gas nocivi. Negli USA una legge federale nota come *Clean Air Act* resa effettiva nel 1963⁶ ha portato alla definizione da parte dell'Environmental

⁶La versione originale è stata rivista nel 1967 e ha portato ad un effettiva applicazione con le modifiche del 1970 quando è stata fondata l'Agenzia Federale EPA. Ulteriori aggiornamenti vi sono stati nel 1977 e nel 1990.

Protection Agency di *National Ambient Air Quality Standards* (NAAQS) ovvero limiti ammessi per diversi tipi di inquinanti (incluso l'ozono troposferico). Nel 1997 il valore di ozono limite fu fissato a 80 ppb⁷, valore in seguito ritenuto decisamente troppo elevato per garantire la salute umana in caso di lunghe esposizioni. Uno studio condotto dal *Clean Air Scientific Advisory Committee* nel periodo 1996–2010 stima, valutando parametri come mortalità e inquinamento atmosferico basati su dati tratti rispettivamente dal National Center for Health Statistics e dal National Climatic Data Center, che ad un aumento quotidiano di 10 ppb (valore sulle 8 ore) è associato un aumento della mortalità pari allo 0.3 % [34]. Basandosi su questo valore è quindi possibile valutare alcuni scenari riducendo il valore limite ammesso.

End Point	Number of Cases Averted by 2020	
	at 75 ppb	at 65 ppb
Premature death	260–2,300	940–7,100
Heart attack	890	2,300
Upper respiratory symptoms	4,900	13,000
Lower respiratory symptoms	6,700	17,000
Chronic bronchitis	380	970
Acute bronchitis	1,000	2,600
Asthma exacerbation	6,100	16,000
Lost work days	43,000	110,000
Lost school days	200,000	1,100,000
Hospital/emergency room visits	1,900	9,400
Minor restricted-activity days	750,000	3,500,000

Figura 2.3: Confronto tra valori limite proposti e valori standard ad 80 ppb in termini di casi evitati entro il 2020 [1].

I valori riportati in Figura 2.3 hanno condotto l'EPA a ridurre, nel Maggio 2008, gli standard per l'ozono da 80 ppb a 75 ppb. L'American Lung Association propose un'ulteriore riduzione a 60 ppb [35], valore supportato da numerosi enti pubblici per la salute e per l'ambiente. La World Health Organization raccomanda valori non superiori a 51 ppb. Studi indipendenti suggeriscono valori di mortalità prematura dovuta a presenza di ozono anche per concentrazioni di fondo pari a $10 \div 25$ ppb⁸ [34].

⁷Il valore indicato si intende come valore medio calcolato sui picchi in un periodo di 8 ore.

⁸Per avere un termine di paragone, il 30/4/2014, giorno seguente ad un giorno temporalesco, l'ozono di fondo misurato nella zona industriale di Cologna Veneta (VR) era superiore a 28 ppb.

*“Omnia venenum sunt: nec sine veneno quicquam existit. Dosis sola facit, ut venenum non fit.”*⁹ (Paracelso, *Responsio ad quasdam accusationes et calumnias suorum aemulorum et obtrektorum.*)

Per questo motivo una revisione dei limiti standardizzati è stata proposta al NAAQS dalla stessa EPA nel 2010 per abbassare il limite a valori nel range 60 ÷ 70 ppb così da aumentare la protezione specialmente delle persone a rischio quali bambini, anziani e persone con problemi respiratori. Un indice della qualità dell’aria creato ad hoc dall’EPA e riportato nello schema di Figura 2.4, categorizza le diverse concentrazioni di ozono in funzione della loro nocività¹⁰.

Particolarmente importante da valutare è l’Indoor Air Pollution ovvero l’inquinamento all’interno degli edifici poiché, in assenza di opportuna ventilazione, non è insolito trovare concentrazione di ozono 2 ÷ 5 volte superiore a quello misurato all’esterno [36] fungendo l’edificio da contenitore all’interno del quale avvengono anche reazioni chimiche e biochimiche in grado di generare nuovi inquinanti [37]; considerato che mediamente le persone trascorrono il 90% del loro tempo in “ambienti confinati” [38], che un individuo adulto respira mediamente 22000 volte al giorno per una quantità d’aria inspirata che varia tra 9 e 90 l/min [39], risulta evidente come il concetto di “esposizione a lungo termine” sia una condizione altamente probabile che dev’essere monitorata. Un tipico esempio di locale ritenuto “indoor” soggetto a concentrazioni elevate di ozono per altitudine ed eventuale turbolenza atmosferica sono gli aeroplani dove la U.S. Federal Aviation Authority ha

⁹ *“Tutto è veleno, e nulla esiste senza veleno. Solo la dose fa in modo che il veleno non faccia effetto.”*

¹⁰La relazione che converte da ppm ad AQI è $AQI = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}}(C_{O_3} - BP_{LO}) + I_{LO}$ con:

- I_{HI} e BP_{HI} rispettivamente indice e concentrazione in ppm massimi della categoria
- I_{LO} e BP_{LO} rispettivamente indice e concentrazione in ppm minimi della categoria
- C_{O_3} concentrazione di ozono sulle 8 ore

Valori di soglia tra le diverse categorie sono:

- AQI 0 = 0 ppb
- AQI 50 = 60 ppb
- AQI 100 = 75 ppb
- AQI 150 = 95 ppb
- AQI 200 = 115 ppb

Air Quality Index Values	Air Quality Descriptor	Health Effects
0 to 50	Good	No health effects are expected.
51 to 100*	Moderate	Unusually sensitive individuals may experience respiratory effects from prolonged outdoor exertion if you are unusually sensitive to ozone.
101 to 150	Unhealthy for Sensitive Groups	Member of sensitive group may experience respiratory symptoms (coughing, pains when taking a deep breath).
151 to 200	Unhealthy	Member of sensitive group have higher chance of experiencing respiratory symptoms (aggravated cough or pain), and reduces lung function.
201 to 300	Very Unhealthy	Members of sensitive groups experience increasingly severe respiratory symptoms and impaired breathing.

* Generally, an AQI of 100 for ozone corresponds to an ozone level of 0.075 parts per million (averaged over 8 hours).

Figura 2.4: Air Quality Index e conseguenze sulla salute

fissato il limite di concentrazione a 250 ppb con un massimo di 100 ppb nella media basata su 4 ore [40].

In Europa le normative hanno seguito un percorso analogo delle normative statunitensi, con concentrazioni ammesse progressivamente minori. Un team di ricercatori europei ha studiato effetti e patologie direttamente collegabili ad una scarsa qualità dell'aria negli ambienti confinati e ha presentato una relazione per l'*EnVIE Coordination Action on Indoor Air Quality and Health Effects* ordinato dalla Commissione Europea. È opportuno distinguere quanto disposto sotto il profilo legislativo e normativo per la protezione dell'ambiente e la qualità dell'aria e per quanto prescritto a tutela delle persone. Sono infatti definite due soglie, già presentate nel Paragrafo 2, che hanno differenti valori e differenti finalità.

Nel primo caso i valori di soglia sono funzione della presenza di altri inquinanti primari precursori; a questi livelli l'ozono non è pericoloso di per sé ma evidenzia la presenza di reazioni in atto con componenti nocivi presenti nell'atmosfera che originano a loro volta componenti volatili altrettanto no-

civi. In Italia la problematica è stata presa in considerazione con il DL n.155 del 13/08/2010 entrato in vigore il 30/09/2010, in attuazione alla Direttiva Europea 2008/50/CE che tratta gli inquinanti atmosferici in generale. La legge definisce i criteri di misura e campionamento dell'ozono e dei suoi precursori e fissa:

- una *soglia di informazione* pari a $180 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ equivalenti a circa 90 ppb¹¹
- una *soglia di allarme* pari a $240 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ equivalenti a circa 120 ppb

Nel secondo caso le ASL, data la carenza di riferimenti legislativi nazionali in merito a limiti di esposizione delle sostanze, fanno riferimento alle linee guida prescritte dalla *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) e adottate in Italia dall'*Associazione Italiana degli Igienisti Industriali* (AIDII), come conferma la nota finale del DM 20/08/1999:

“In mancanza di riferimenti legislativi italiani, in valori limite di esposizione generalmente adottati per gli ambienti di lavoro sono in TLV (Threshold Limit Value = Valore limite di soglia) stabiliti annualmente dall’ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) ed editi in italiano dall’AIDII (Associazione italiana degli igienisti industriali)”.

Come sottolineato nel DM, in questo caso le soglie sono dette anche TLV (*Threshold Limit Values*) e indicano le “*concentrazioni negli ambienti di lavoro per le quali si ritiene che tutti i lavoratori¹² possono essere esposti giorno dopo giorno per tutta la vita senza effetti dannosi*”. La sensibilità individuale presenta tuttavia ampie differenze; pertanto non si garantisce una protezione del 100% degli individui derivante dal rispetto delle concentrazioni massime tollerabili, ma si ammette che una piccola percentuale della popolazione possa avere disagio o aggravamento delle malattie preesistenti. In tal senso, il concetto di *limite tollerabile* andrebbe più correttamente considerato come *valore di riferimento* che garantisce una sicurezza non assoluta ma una sicurezza per la maggior parte degli individui; i TLV non costituiscono un confine netto tra concentrazioni pericolose e concentrazioni sicure ma sono da considerarsi come orientamento o raccomandazione per la prevenzione. Negli anni, analogamente a quanto accaduto negli USA, le soglie

¹¹ $1 \text{ ppm}_{\text{O}_3} = 2.14 \text{ mg}_{\text{O}_3}/\text{m}^3$

¹²Per “lavoratori” si intendono soggetti adulti sani esposti a questi valori per 8 ore al giorno e per 5 giorni la settimana.

hanno subito una riduzione progressiva essendo stato dimostrato come valori di concentrazione dichiarati inizialmente accettabili fossero in realtà eccessivamente elevati. Stabiliti dall'AIDII che si occupa del settore industriale, tali limiti sono da intendersi riferiti agli ambienti di lavoro (sono un riferimento contrattuale e giuridico) e quindi non applicabili per altri ambienti, ad esempio l'ambiente domestico; nonostante ciò, è sensato assumere i TLV come valori di riferimento per tutti gli ambienti "indoor". Basati su studi scientifici (studi epidemiologici sperimentali in vitro, su animali o valutati statisticamente su campioni umani) e su valutazioni economico-politiche, i TLV sono stati divisi in tre classi:

1. Valore limite per tempi lunghi di esposizione TLV-TWA (*Time Weighted Average*) = concentrazione media ponderata nel tempo per 8 ore lavorative e 40 ore settimanali alla quale i lavoratori giorno dopo giorno possono essere esposti.
2. Valore limite per tempi brevi di esposizione TLV-STEL (*Short Term Exposure Limit*) = concentrazioni tollerabili per agenti capaci di produrre effetti acuti (irritanti, narcotici ecc.), definite come valori medi per esposizioni di durata pari a 15 minuti, che non devono mai essere superati anche se la media sulle 8 ore resta contenuta entro il TLV-TWA.
3. Valore limite per tempi brevissimi di esposizione TLV-C (*Ceiling*) = concentrazioni tollerabili per agenti capaci di produrre effetti acutissimi (potenti irritanti, tossici a effetto rapidamente mortale come l'acido cianidrico) che non devono essere in nessun caso superate.

Considerando l'oggettiva difficoltà nel definire con esattezza la concentrazione alla quale la singola persona è effettivamente sottoposta, la variabilità in tempo e spazio delle concentrazioni, le conseguenze meno evidenti che la presenza della sostanza può comportare spesso non considerate nella definizione del limite (ad esempio per l'ozono il limite è basato sulla sua azione irritante, non viene considerata la sua caratteristica di gas mutageno), è sempre opportuno valutare dei fattori di sicurezza. Le soglie considerate per il dimensionamento di apparati destinati a sanificare l'aria, di interesse per il presente lavoro, sono le TLV-TWA. Le concentrazioni indicate come valori limite di soglia dalla ACGIH si distinguono per intensità di lavoro svolto nei locali interessati:

- Lavori leggeri: 0.1 ppm, pari a circa 200 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$

- Lavori mediamente impegnativi: 0.08 ppm pari a circa 160 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$
- Lavori pesanti: 0.05 ppm pari a circa 100 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$

È prassi, in sede di progetto, considerare il caso peggiore tra quelli elencati così da garantire i requisiti per qualunque tipo di installazione. Valore limite considerato normalmente è quindi 50 ppb.

2.3 Fisica dell'ozono

Come descritto in 1.2, il fenomeno fisico che consente la filtrazione è il campo elettrico che ha la duplice funzione di ionizzare l'aria caricando le particelle da catturare e di attrarle (o respingerle) su piastre di raccolta alimentate a potenziale in modulo inferiore, tipicamente a potenziale nullo così da soddisfare anche i requisiti di sicurezza essendo a terra le piastre più esterne e quindi più accessibili agli operatori. Per la ionizzazione dell'aria sono richiesti potenziali tanto elevati da generare campi elettrici che superino localmente la rigidità dielettrica dell'aria (normalmente $3 \cdot 10^6$ V/m): tipico effetto percepibile, oltre ad una perdita di energia¹³ misurabile, è la comparsa di un ronzio e di un bagliore nell'area prossima agli elementi alimentati ad alta tensione dove il campo è massimo. Lo spessore d'aria circoscritta all'elettrodo, non più isolante poiché la ionizzazione causa la presenza di cariche libere, può essere pensata come un aumento di dimensioni dell'elettrodo stesso, essendo pressoché costante il campo all'interno della regione ionizzata (è l'assunzione di Kaptzov, si veda il Paragrafo 2.4.1). Come noto, l'aria in condizioni normali è composta prevalentemente di ossigeno e azoto; quando essa viene ionizzata, le molecole di ossigeno O_2 si separano in due atomi di ossigeno O chimicamente molto attivo. Le elevate energie presenti nello strato ionizzato favoriscono ricombinazioni tra atomi a formare ozono O_3 che, per la sua attività chimica, si può scomporre nuovamente in ossigeno o, più facilmente, combinare con altri materiali eventualmente presenti nella zona attiva [41]. Un elenco di reazioni tipiche è riportato al Paragrafo 2.3.2.

2.3.1 Ionizzazione - Effetto corona

Tra i primi fenomeni elettrici osservati dall'uomo, le prime ricerche sull'effetto corona come metodo di ionizzazione sono state effettuate da Benjamin Franklin nel XVIII secolo e successivamente da Gaugain nel 1862 [42] dalle

¹³Le perdite sono di tipo termico, chimico, luminoso, acustico, per convezione, ecc.

quali si comprese come l'effetto dipendesse primariamente dalla dimensione dell'elettrodo interno di una configurazione coassiale. Fondamentali furono i contributi nei primi anni del Novecento di Warburg [43, 6] e Townsend [44, 6] che dimostrarono quale fosse la distribuzione di corrente uscente da un elettrodo filiforme su una piastra piana. Fino agli anni Cinquanta, studi sull'effetto corona furono svolti da Peek, Loeb, Cooperman, Penney e Matlick e White, di alcuni dei quali saranno riportati i risultati al Paragrafo 2.4.

Come definito nelle IEEE Std.539 (2005), il termine *ionizzazione* indica «il processo in base al quale un atomo o una molecola ricevono energia sufficiente (ad es. da collisioni con elettroni¹⁴ o fotoni) per liberare uno o più elettroni e ioni positivi». Questo tipo di collisione è detta *inelastica* poiché l'energia cinetica viene convertita tutta o in parte in energia potenziale. Contrariamente, una collisione *elastica* si verifica quando l'energia cinetica si mantiene costante e nessun tipo di ionizzazione ha quindi luogo. Nella fisica del plasma, tra i cui effetti è presente l'effetto corona di interesse per l'elaborato, sono frequenti le collisioni inelastiche dovute ad elettroni molto veloci e sottoposti a forze enormi. Seppur tali forze non siano necessariamente di tipo elettrico¹⁵, la ionizzazione per effetto dei campi elettrici è sicuramente la più efficace e la più utilizzata a livello industriale. Si parla in particolare di *effetto corona* quando gli elevati campi elettrici in prossimità di conduttori provocano la ionizzazione di un mezzo gassoso senza giungere alla scarica (totale) tra gli elettrodi.

Processo fisico

Una tra le prime osservazioni sulle caratteristiche presentate dalla conduzione nei materiali portò ad affermare che i gas si comportano in maniera completamente diversa rispetto a solidi e liquidi. Se negli ultimi sono sempre presenti elettroni liberi (o ioni), nei gas in condizioni normali non vi sono cariche libere e possono pertanto essere considerati degli isolanti: a dimostrazione di ciò, applicando potenziali anche molto elevati (decine di kV), la corrente misurata è molto piccola (dell'ordine dei μA) e dovuta alle poche cariche naturalmente presenti per radiazioni cosmiche o sostanze radioattive.

¹⁴L'elettrone sorgente può provenire dalla precedente ionizzazione di un atomo o può essere espulso dall'elettrodo stesso.

¹⁵La teoria cinetica dimostra come sia possibile la ionizzazione atomi e molecole anche in presenza di elevate temperature e pressioni.

Quando il campo elettrico dovuto al potenziale tra gli elettrodi diventa sufficientemente elevato, il gas si ionizza e diventa improvvisamente conduttore: si parla di *electric breakdown* o *gas discharge*, in altre parole di *scarica*. Da un punto di vista microscopico [6, 45, 46, 47], gli atomi e le molecole prossimi all'elettrodo, in precedenza neutri, perdono elettroni divenendo positivi. Le cariche (d'ora in poi col termine *cariche* si indicheranno elettroni e ioni così da non confondere il termine *particelle* quelle sospese nell'aria da catturare), per effetto dell'elevato campo elettrico presente nella regione, vengono accelerate a velocità tali da causare l'emissione di ulteriori elettroni nello scontro con altri atomi o molecole, senza perdite di energia cinetica.

Il fenomeno, che avviene in pochi millisecondi in uno strato piccolissimo attorno all'elettrodo ad alta tensione, procede creando sempre più cariche: si parla di **effetto valanga**, studiato e descritto da Townsend [6]. In caso di elettrodo alimentato negativamente, gli ioni positivi, più grandi, lenti ma con maggiore inerzia, vengono attratti verso l'elettrodo talvolta fino a farli collidere

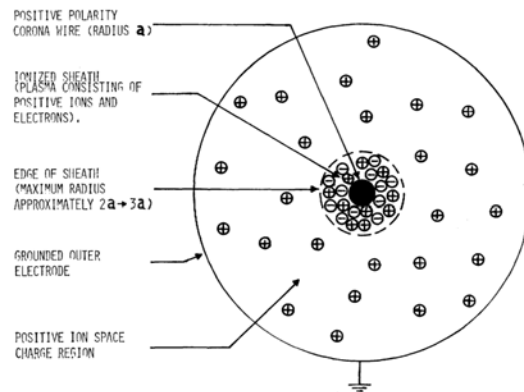


Figura 2.5: Rappresentazione schematica della distribuzione di cariche in presenza di effetto corona (Fonte: [2]).

con l'elettrodo stesso il quale libera ulteriori elettroni. Si parla in tal caso di *emissione secondaria*, pressoché assente nei filtri elettrostatici per l'Air-Cleaning (si veda il Paragrafo successivo). Nelle Figure 1.2a÷1.2c si può vedere una rappresentazione di quanto finora descritto.

Diversi tipi di corona

L'effetto corona, per quanto detto, è dovuto all'alimentazione ad alta tensione dell'elettrodo presente nel filtro. A seconda del tipo di alimentazione, del livello di tensione imposto e delle condizioni ambientali, il fenomeno si può presentare sotto diverse forme. Una prima classificazione è realizzabile suddividendo i diversi tipi di alimentazione:

- AC o DC
- se DC, positiva o negativa

Gli esempi finora riportati si riferiscono ad alimentazioni DC, tipicamente positivo (la motivazione a fine Paragrafo).

DC - positiva Alimentando l'elettrodo con tensioni positive, gli elettroni liberi generati nello strato ionizzato vengono attratti verso la superficie dell'elettrodo, mentre gli ioni positivi vengono respinti verso le piastre a potenziale nullo (vedi Figura 2.5). L'elevata velocità degli elettroni nella zona prossima all'elettrodo e il conseguente effetto valanga che si viene con facilità a creare sulla sua superficie favoriscono il raggiungimento della condizione limite che rende il campo di innesco dell'effetto corona inferiore rispetto al caso negativo in cui, invece, gli elettroni vengono respinti dall'elettrodo e realizzano quindi l'effetto valanga in uno spazio più grande (raggio maggiore) e, a parità di tensione applicata, con probabilità minore. La presenza di una zona ricca di elettroni in prossimità dell'anodo (filamento) e di una ricca di ioni positivi in prossimità del catodo (piastra di raccolta) comporta la presenza di una carica spaziale che riduce il campo elettrico nel primo caso (si veda l'assunzione di Kaptzov in accordo con questo fenomeno, 2.4.1) e lo intensifica nel secondo.

Nel caso positivo, i tipi di corona che si verificano prima della scarica totale, in ordine di comparsa all'aumentare del potenziale, sono [46]:

- **Burst corona.** Uno strato luminescente uniforme¹⁶ e sottile appare in corrispondenza dell'elettrodo come risultato dell'effetto valanga. Al di fuori dello strato ionizzato il campo decade in modo esponenziale con conseguente soppressione dell'effetto corona.
- **Onset Streamers.** La generazione di ioni positivi avviene per emissione di fotoni in tutte le direzioni. Alcune molecole d'aria vengono foto-ionizzate anche se al di fuori dello strato ionizzato: si creano così delle scariche di breve durata, bassa frequenza ed intensità relativamente alta, 50÷500 mA. Per tensioni prossime a quella d'innesco, il Burst Corona e gli Onset Streamers compaiono alternativamente o, talvolta, contemporaneamente.

¹⁶Motivazione dell'uniformità dello strato violetto visibile in figura 2.6 è l'elevata mobilità che presentano elettroni e ioni negativi (tipicamente superiore a $2.7 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{V \cdot s}$) in prossimità dell'elettrodo combinata con la mobilità ridotta degli ioni positivi (tipicamente $1.4 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{V \cdot s}$) uscenti che, per la loro difficoltà ad acquisire energia cinetica elevata, non causano eventi locali al di fuori dello strato di ionizzazione [48]. È interessante notare che gli ioni negativi sono più veloci degli ioni positivi ma sono interessati da una forza minore essendo la carica inversamente proporzionale alla mobilità ionica [49].

- **Positive Glow Discharge.** Loeb suggerì di chiamarla *Hermstein's glow* dal nome dello studioso che per primo nel 1960 la dimostrò sperimentalmente. Simile alla Burst Corona, appare come uno strato luminoso avvolgente l'elettrodo che pulsa ad una frequenza che aumenta all'aumentare della tensione e può raggiungere i megahertz.
- **Breakdown Streamers.** Più la tensione aumenta e meno uniforme risulta lo strato luminescente. Si formano degli spot più luminosi ed attivi che possono dare origine a scariche dello stesso tipo descritto negli Onset Streamers ma più lunghi e asimmetrici.

DC - negativa Respinti dall'elettrodo alimentato negativamente, gli elettroni si dirigono a velocità elevatissime verso la parete di raccolta scontrandosi e caricando atomi e molecole costituenti l'aria, mentre gli ioni positivi creano uno strato a carica positiva in corrispondenza della superficie del catodo (filamento). Anche in questo caso la presenza di due distinte zone di carica spaziale causa un disturbo del campo elettrostatico. In ordine di tensioni applicate crescenti, i tipi di corona possibili con alimentazione negativa sono:

- **Trichel Streamers.** Dal nome del loro osservatore Trichel, in presenza di un potenziale negativo in grado di generare un campo appena superiore a quello di innesco è possibile misurare una corrente pulsante con frequenza tanto maggiore quanto maggiore è la tensione applicata all'elettrodo. L'effetto è di un bagliore localizzato in un punto casuale della superficie dell'elettrodo e della durata di alcune decine di nanosecondi. La spiegazione di un tale comportamento, risiede ancora una volta nell'interazione tra campo elettrostatico e densità di carica in presenza di cariche uscenti dall'elettrodo di inerzia di alcuni ordini di grandezza inferiore rispetto al caso positivo dove ad essere uscenti erano ioni positivi.
- **Pulseless Glow.** Le pulsazioni dei Trichel Streamers aumentano fino ad una frequenza critica oltre la quale la luminescenza, indice dell'effetto corona, e la corrente misurabile diventano più stabili. Le condizioni alle quali si verifica il Pulseless Glow coprono un range molto ristretto. Tipicamente si presentano Trichel Streamers o Negative Streamers.

- **Negative Streamers.** Aumentando ulteriormente il potenziale, come nel caso precedente ma con intensità che possono essere maggiori e di maggiore durata, si formano scariche asimmetriche tra gli elettrodi.

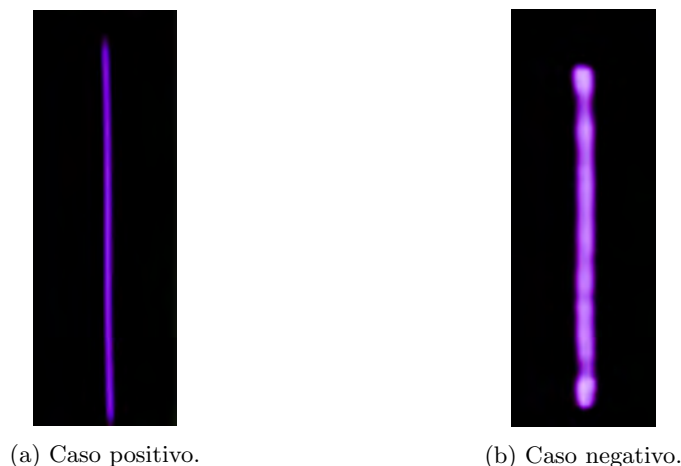


Figura 2.6: Immagini agli ultravioletti di un elettrodo alimentato con tensione DC (Fonte: [3]).

AC Se la tensione di alimentazione dell'elettrodo è sinusoidale, diversi tipi di corona tipici di entrambe le polarità possono essere visibili in uno stesso periodo. Il problema della densità di carica si complica ulteriormente poiché la carica spaziale che si crea in un semiperiodo viene sovvertita nel semiperiodo successivo creando un transitorio aggiuntivo sul campo elettrico. Essendo il campo di innesco inferiore nel caso di tensioni con polarità positiva, le uniche scariche visibili saranno di tipo *Onset Streamers* o *Breakdown Streamers*. Un vantaggio che l'alimentazione in AC presenta è la corrente media oltre un ordine di grandezza inferiore rispetto al caso DC a parità di tensione media [50]. Ciò consente di risentire in modo minore dell'aumento di corrente e riduzione della tensione che si sperimenta immettendo nel filtro dell'aria sporca: il fenomeno è dovuto alla deposizione di sporcizia sull'elettrodo che distorce localmente il campo di superficie nella regione di ionizzazione¹⁷. Il fenomeno si verifica solo nel caso “glow” a tensioni inferiori, gli Streamers

¹⁷Un incremento di concentrazione delle particelle sospese causa una riduzione della corrente di scarica media: ciò è dovuto all'aumento della densità di carica totale nell'equazione di Poisson cui consegue una riduzione dell'intensità del campo elettrico sulla superficie dell'elettrodo responsabile della ionizzazione. Peraltro, una concentrazione maggiore influenza anche la turbolenza, rendendola maggiore anche a monte dell'elettrodo e aumentando di conseguenza l'efficienza sulle particelle di diametro minore particolarmente soggette alle forze aerodinamiche [50, 7, 9].

e le scariche totali Breakdown non sono interessate. Per questo motivo, l'alimentazione AC, caratterizzata da un corona di tipo "Streamer", non sarà affetto dalla distorsione di campo. La loro sensibilità è invece superiore per quanto riguarda l'effetto della densità di carica [50, 6].

Considerazioni I filtri elettrostatici in commercio, sia industriali che per applicazioni indoor, prevedono un'alimentazione DC unipolare di gran lunga più efficace rispetto al caso a due potenziali discordi [6]. L'efficienza a parità di tensione applicata è pressoché identica nei due casi. Tipicamente il caso negativo è preferibile in applicazioni industriali per la stabilità superiore e per la possibilità di raggiungere tensioni e correnti operative superiori rispetto al caso positivo senza innescare scariche. Nel caso di interesse per il presente lavoro, ovvero per filtri destinati all'air-cleaning, l'alimentazione DC positiva risulta la più indicata per la minore produzione di ozono fisicamente spiegabile con il contenimento degli elettroni nello strato ionizzato e la minore capacità degli ioni positivi di innescare reazioni tipiche della ionizzazione [51, 3]: la generation rate per unità di corrente nel caso di corona negativo è $5\div 8$ volte superiore rispetto al caso positivo in modalità Burst corona, tipico delle applicazioni civili [52]. Dal punto di vista computazionale, lo studio di filtri alimentati con polarità negativa generante tufts¹⁸ è un problema intrinsecamente tridimensionale e tempo-variante [53]; utilizzare polarità positive che generano una ionizzazione uniforme, invece, consente di studiare il problema in 2D (addirittura 1D nel caso coassiale).

2.3.2 Reazioni tipiche in aria

Per la presenza di ionizzazione che fornisce molta energia localizzata in prossimità dell'elettrodo, lo strato d'aria interessato dall'effetto corona è sede di numerose reazioni chimico-fisiche tra atomi e molecole presenti nell'aria. Lo stesso elettrodo, per elettroerosione e in minima parte per erosione meccanica dovuta al flusso d'aria incidente, può contribuire ad immettere nell'aria atomi e molecole metalliche che interagiscono in particolare con l'ossigeno a generare ossidi [41]. L'attenzione nel presente lavoro di tesi sarà incentrata proprio sull'ossigeno poiché in questa regione fortemente energizzata si genera ozono per ionizzazione della molecola O_2 . La generazione di ozono in aria è più complessa di quella in ossigeno puro per la presenza di azoto e

¹⁸Con il termine *tufts* si indicano gli spot di ionizzazione tipici dei Trichel Streamers ben visibili in Figura 2.6.

vapore acqueo, entrambi contribuenti per la formazione e ricombinazione di ozono [54].

Reaction	Rate coefficient ($\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
$\text{e} + \text{O}_2 = \text{O} + \text{O} + \text{e}$	k_{1e}
$\text{e} + \text{N}_2 = \text{N} + \text{N} + \text{e}$	k_{2e}
$\text{e} + \text{O}_3 = \text{O} + \text{O}_2 + \text{e}$	$5 \sim 10 k_{1e}$
$\text{e} + \text{O}_2 = \text{O}_2^* + \text{e}$	k_{4e}
$\text{e} + \text{N}_2 = \text{N}_2^* + \text{e}$	k_{5e}
$\text{O} + \text{O}_2 + \text{O}_2 = \text{O}_3 + \text{O}_2$	$6.0 \times 10^{-34} (T/300)^{-2.8} [\text{O}_2]$
$\text{O} + \text{O}_2 + \text{N}_2 = \text{O}_3 + \text{N}_2$	$5.6 \times 10^{-34} (T/300)^{-2.8} [\text{N}_2]$
$\text{O} + \text{O}_3 = \text{O}_2 + \text{O}_2$	$8.0 \times 10^{-12} \exp(-2060/T)$
$\text{O} + \text{NO} + \text{N}_2 = \text{NO}_2 + \text{N}_2$	$1.0 \times 10^{-31} (T/300)^{-1.6} [\text{N}_2]$
$\text{O} + \text{NO}_2 = \text{NO} + \text{O}_2$	$5.6 \times 10^{-12} \exp(180/T)$
$\text{O} + \text{NO}_3 = \text{O}_2 + \text{NO}_2$	1.7×10^{-11}
$\text{O} + \text{N}_2\text{O}_5 = \text{NO}_2 + \text{NO}_2 + \text{O}_2$	1.0×10^{-16}
$\text{N} + \text{O}_2 = \text{NO} + \text{O}$	$1.5 \times 10^{-11} \exp(-3600/T)$
$\text{N} + \text{O}_3 = \text{NO} + \text{O}_2$	1.0×10^{-16}
$\text{N} + \text{NO} = \text{N}_2 + \text{O}$	$2.1 \times 10^{-11} \exp(100/T)$
$\text{N} + \text{NO}_2 = \text{N}_2\text{O} + \text{O}$	$5.8 \times 10^{-12} \exp(220/T)$
$\text{NO} + \text{O}_3 = \text{NO}_2 + \text{O}_2$	$3.0 \times 10^{-12} \exp(-1500/T)$
$\text{NO} + \text{NO}_3 = 2\text{NO}_2$	$1.8 \times 10^{-11} \exp(110/T)$
$\text{NO}_2 + \text{O}_3 = \text{NO}_3 + \text{O}_2$	$1.4 \times 10^{-13} \exp(-2470/T)$
$\text{NO}_2 + \text{NO}_3 + \text{N}_2 = \text{N}_2\text{O}_5 + \text{N}_2$	$2.8 \times 10^{-30} (T/300)^{-3.5} [\text{N}_2]$
$\text{N}_2\text{O}_5 + \text{N}_2 = \text{NO}_2 + \text{NO}_3 + \text{N}_2$	$1.0 \times 10^{-3} (T/300)^{-3.5} \exp(-11,000/T) [\text{N}_2]$
$\text{O}_2^* + \text{O}_2 = \text{O}_3 + \text{O}$	4.8×10^{-15}
$\text{N}_2^* + \text{O}_2 = \text{N}_2 + 2\text{O}$	$3.0 \times 10^{-12} (T/300)^{0.55}$
$\text{N}_2^* + \text{O}_2 = \text{N}_2\text{O} + \text{O}$	$6.0 \times 10^{-14} (T/300)^{0.55}$

Meccanismi di reazione per la produzione di ozono in corona di polarità positiva in aria secca¹⁹ (Fonte: [54]).

* atomi/molecole con concentrazioni particolarmente basse: per i rate coefficients si sono considerati quelli allo stato fondamentale.

Tipicamente le molecole eccitate sono instabili e hanno un tempo di vita di circa 10^{-8} s. Le prime cinque reazioni in elenco, caratterizzate da elevate energie e vita media superiore alle altre, possono essere considerate le reazioni principali in grado di produrre successivamente ozono mediante una delle altre reazioni. Si sottolinea come alcune reazioni comportino una distruzione dell'ozono²⁰. Yagi e Tanaka [55] hanno dimostrato che le quattro

²⁰Sono noti numerosi meccanismi di spontanea distruzione di ozono:

- decomposizione catalitica o chimica sulla superficie dell'elettrodo
- decomposizione termica
- reazione con gas di altra natura
- autodistruzione di ozono $\text{O}_3 + \text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$

reazioni principali per la generazione di ozono sono:

1. $e + O_2 \rightarrow 2O + e$
2. $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$
3. $O + O_3 \rightarrow 2O_2$
4. $e + O_3 \rightarrow O + O_2 + e$

Nelle prime due si ha generazione di ozono, nelle seconde si ha distruzione. Nel loro lavoro, Yagi e Tanaka riuscirono a dimostrare che la velocità della reazione (1) è superiore della (4) portando quindi ad una maggiore produzione rispetto alla distruzione di ozono per bombardamento elettronico; per la presenza di O_3 tra i reagenti, la distruzione sarà tanto più presente quanto maggiore è la concentrazione di ozono e quanto maggiore è la potenza dissipata nell'effetto corona [52]. Per i motivi appena citati, i punti di lavoro di interesse nel settore dell'indoor air-cleaning prevedono l'impiego di correnti e potenze dissipate modeste così da ridurre quanto possibile la produzione di ozono e rendendo pressoché trascurabile la sua distruzione. Una descrizione è riportata al Paragrafo 2.4.2.

2.3.3 Da quali parametri dipende

Numerosi studi sperimentali sono stati condotti per stimare la dipendenza della generazione di ozono nei precipitatori elettrostatici da parametri geometrici, ambientali, fluidodinamici, elettrici, ecc. Solamente pochi lavori hanno però fornito risultati di natura quantitativa per poter interpretare in modo globale il problema. A rendere il problema ulteriormente complesso è la dipendenza dell'ozono prodotto dal tempo di funzionamento del filtro, quindi dal carico d'aria filtrato, dallo stato degli elettrodi e dalla concentrazione di ozono naturalmente presente nell'ambiente [56]. Il presente paragrafo non ambisce a sopperire alla mancanza, ma si pone solo come punto di raccolta dei principali studi presenti in letteratura.

Parametri geometrici Tra i parametri geometrici e strutturali, quelli che influenzano in modo più sensibile la produzione di ozono sono il diametro dell'elettrodo alimentato ad alta tensione, la forma e il materiale con cui esso è realizzato [57, 58]. Al diminuire del diametro del filamento, avvengono contemporaneamente due fenomeni:

- Il campo elettrico di innesco dell'effetto corona sulla superficie dell'elettrodo aumenta permettendo quindi un'alimentazione più spinta senza innescare scariche.
- Lo strato ionizzato, universalmente considerato di spessore pari ad $1 \div 2$ volte il raggio dell'elettrodo, risulta di volume molto più contenuto.

Entrambe le osservazioni effettuate portano ad affermare che una riduzione nel diametro del filamento comporta una riduzione nella produzione di ozono, in accordo con i risultati ricavato sperimentalmente in [51]. La forma stessa dell'elettrodo può influenzare la generazione di ozono per la presenza o meno di elementi appuntiti o di zone dove il campo si può concentrare. In Figura 2.7 sono riportate le forme più usuali di elettrodi. Seppur causa

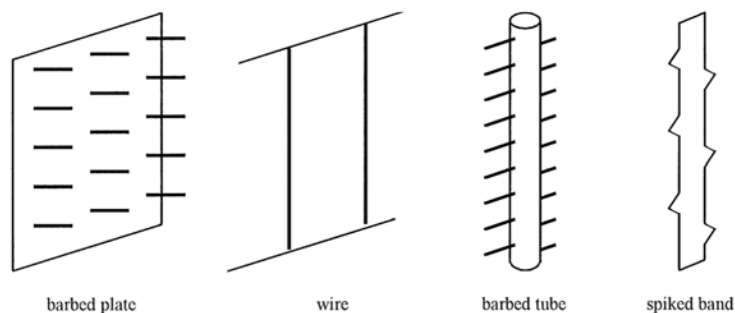


Figura 2.7: Tipologie di elettrodi.

di una generation rate superiore, a parità di tensione il risultato migliore in termini di efficienza di cattura si ottiene con il barbed tube [59]: il miglioramento è maggiormente percepibile sulle particelle di diametro minore. Tipicamente gli elettrodi con punte, come i barbed o le piastre dentate, sono utilizzati con corona di polarità negativa così da concentrare il campo in zone note e non casuali come nel caso di un elettrodo filiforme nel quale la distribuzione dei tufts lungo tutta la lunghezza del filo può causare una generation rate ancora maggiore. Più complessa da analizzare è la variazione dovuta al materiale costituente l'elettrodo. Pressoché indipendente dalla polarità, Boelter e Davidson [57] eseguirono test con quattro diversi materiali a pari diametro del filamento, condizioni ambientali ed elettriche. Alimentando l'elettrodo con polarità positiva e normalizzando i risultati per elettrodi di tungsteno, come nel prototipo utilizzato nelle sperimentazioni i cui risultati sono riportati nei Capitoli successivi, si è notato che il titanio produce il 122% di ozono, il rame il 68% e l'argento il 44%. Una spiegazione dell'importante variazione causata dal tipo di metallo usato fu data da

Nashimoto, secondo la cui ipotesi, dimostrata in [58], la produzione di ozono sarebbe proporzionale all'entalpia di formazione di uno strato di ossido superficiale, tipicamente indicata con $-\Delta H_0$: quanto più $|\Delta H_0|$ è piccola, tanto minore sarà la generation rate. Dai risultati ottenuti, si può quindi affermare che è possibile ridurre la generation rate mantenendo invariata la corrente ma riducendo diametro e cambiando il materiale con cui è realizzato l'elettrodo. Va tuttavia ricordato che gli elettrodi sono l'elemento più stressato meccanicamente ed elettricamente in un filtro; la scelta del materiale deve quindi considerare anche l'affidabilità che un materiale offre, la necessità di manutenzione e il costo che esso comporta: il tungsteno, universalmente utilizzato per applicazioni industriali, è il miglior compromesso tra i materiali citati.

Parametri ambientali Pressione, temperatura e umidità sono i principali parametri considerati in letteratura per stimare la variazione della generazione di ozono al variare delle condizioni ambientali. La pressione, in realtà, ha influenza esclusivamente sulla densità dell'aria e quindi varia in modo poco sensibile il valore del campo di innesco [45]. All'aumentare della temperatura del gas, la reazione (3) in 2.3.2 aumenta, mentre la (2) cala con una complessiva riduzione dell'ozono generato [57]. Numerosi tentativi sono stati eseguiti per ridurre l'ozono riscaldando gli elettrodi di ionizzazione [60, 61]. I risultati dimostrarono che per una riduzione sensibile è necessario salire con temperature oltre 500°C che da un lato consentono di aumentare l'efficienza di cattura per caricamento di particelle sospese per effetto termoionico e per diffusione, ma dall'altro aumentano il rischio di infiammabilità e riducono la sicurezza precludendone l'applicazione. Alcuni effetti sulla generation rate sono stati comunque osservati anche a temperatura ambiente dove, in una configurazione bistadio wire-plate e plate-plate, un aumento di temperatura da 292 K a 301 K riduce la generation rate di pochi punti percentuali (il valore di incertezza è però elevato, 5÷15%) nel caso di alimentazione positiva [57].

Più presenti in letteratura, gli studi sull'effetto dell'umidità portano a risultati talvolta molto diversi. In particolare, si sono analizzati gli effetti nel caso di corona negativo nella tipologia Trichel Streamers e Pulseless Glow. Essendo il primo caso caratterizzato dalla presenza dei tufts e quindi da punti di generazione di ozono localizzati, al crescere dell'umidità relativa la concentrazione di ozono cala lentamente e, considerando l'incertezza della misura effettuata da Viner [62], in modo poco sensibile. Nel caso Glow, inve-

ce, la riduzione della generation rate è molto più marcata. Nel caso positivo, invece, Peyrous e Lepeyre [63] ricavarono una relazione dove la produzione di ozono cresce al crescere dell'umidità relativa. Lo scarso numero di misure, l'elevata incertezza e dispersione dei risultati e le diverse conclusioni tratte da Goldman [41], dove la generazione di ozono cala all'aumentare della concentrazione di vapore acqueo nell'aria, hanno portato ad assumere la produzione di ozono con polarità positiva indipendente da tale parametro. In ogni caso, come si vedrà al Paragrafo 3.1.2, il comfort richiesto per ambienti indoor, la necessità di realizzare un dispositivo a basso consumo energetico²¹ e le condizioni imposte dalla stessa normativa attuale non consentirebbero di modificare l'umidità ambientale (anche solo localmente), per lo meno non in modo tale da permettere un'apprezzabile variazione nella generation rate, qualora dimostrata sperimentalmente.

Parametri fluidodinamici Gli studi svolti sull'effetto della velocità dell'aria sulla concentrazione di ozono sono stati eseguiti recentemente da Chen e Davidson [54] e Viner [62] a distanza di un decennio. Per primo Viner cercò una relazione che confrontasse generation rate e velocità del flusso d'aria: nel range di velocità tipico dei filtri elettrostatici, $0.5 \div 3$ m/s, la generation rate è però indipendente da questo parametro. Da ciò si ricava che, a pari generation rate (che è di fatto una costante al variare della velocità), la concentrazione di ozono cala all'aumentare della velocità del flusso d'aria poiché il volume interessato da tale concentrazione è dato da $Volume = S_{in} \cdot v_{aria} \cdot \Delta t = Q \cdot \Delta t$ (S_{in} è la sezione di ingresso del filtro ortogonale al flusso d'aria, Q è la portata) e quindi tanto maggiore quanto più alta è la velocità. Il motivo del valore costante assunto dalla generation rate è da individuare nel tempo di permanenza di un volume infinitesimo d'aria all'interno del filtro: essendo molto superiore al tempo caratteristico di formazione dell'ozono, essa non dipende dal moto del fluido. Inoltre, il tempo caratteristico di decadimento dell'ozono è superiore al tempo di permanenza e ciò conferma ulteriormente quanto appena affermato anche se riferito in termini globali all'intero dispositivo e non solo al primo stadio (è nel primo stadio che si forma ozono, nel secondo eventualmente c'è un po' di distruzione).

²¹Non è consigliabile umidificare prima del filtro e deumidificare dopo perché avrei elevati consumi e, inoltre, l'efficienza di cattura può diminuire per riduzione della resistività delle particelle (varia anche a seconda del tipo di particelle sospese).

Parametri elettrici Studiato sin dal primo filtro elettrostatico realizzato, i parametri elettrici sono i più versatili e facili da controllare e, pertanto, sono i più interessanti sia per le relativamente numerose ricerche fatte in passato, sia per l'obiettivo del presente lavoro. Tipiche relazioni presenti in letteratura indicano che la generation rate è proporzionale alla potenza dissipata per effetto corona nello strato d'aria ionizzato. In altre parole la generation rate dipenderebbe da corrente uscente e tensione applicata, grandezze che influenzano direttamente la cattura. Un'analisi accurata, in accordo con i risultati della letteratura, è riportata e discussa al Paragrafo 5.2.2. Nel Paragrafo 2.4 sono invece riportati i principali modelli e risultati presenti in letteratura.

2.4 Modelli e teorie in letteratura

Lo studio elettrico della fisica dei plasmi, della scarica e dell'effetto corona come metodo di ionizzazione, come già riportato, risalgono al XVIII secolo. Molteplici sono i modelli e le relazioni semi-empiriche redatti nel tempo. Dalla scoperta delle proprietà delle alte tensioni applicate ad un elettrodo di attrarre fumi e particelle, che portarono nei primi anni del Novecento alla realizzazione del primo filtro elettrostatico, le attenzioni si concentrarono in modo particolare su tale applicazione dai molteplici sviluppi industriali possibili. Numerosi studi si sono succeduti incessantemente fino agli anni Settanta. Soltanto alla fine degli anni Novanta, per le urgenti modifiche imposte dalla normativa in termini di applicazioni per air-cleaning in ambienti civili residenziali e non, la disciplina ha risvegliato un vivo interesse scientifico e tecnico.

Peek [45], Castle [2], Viner [62], Boelter e Davidson [57], Chen [54], White [6], Deutsch [64, 46], Cooperman [65], Townsend [44] sono solo alcuni dei grandi nomi che cercarono di trovare una descrizione analitica in grado di descrivere il problema sia elettrostatico che relativo alla produzione di ozono ad esso associato. Il presente Paragrafo tratterà in sintesi gli studi principali effettuati nel dettaglio sui precipitatori elettrostatici e si soffermerà su teorie e assunzioni essenziali utilizzate in seguito per la modellizzazione.

2.4.1 Elettrostatico e densità di carica spaziale

Peek

Nel 1915 lo studioso americano Frank William Peek pubblicò il suo *Dielectric phenomena in high voltage engineering*, pietra miliare nella disciplina delle alte tensioni. Dapprima, Peek individuò analiticamente, data una configurazione molto semplice come quella coassiale o a due conduttori paralleli, il valore del campo elettrico massimo.

Rivisitato con una nomenclatura moderna, lo studio si basa sulla legge costitutiva

$$D = \varepsilon_r \varepsilon_0 E \quad (2.4.1)$$

con permittività elettrica $\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0}$ (μ_0 è la permeabilità magnetica nel vuoto), D il campo di spostamento elettrico e ε_r la costante dielettrica relativa del materiale dielettrico, in questo caso prossima a 1 poiché in presenza di aria²². Sapendo che $E = \frac{V}{x}$ dove x è la variabile spaziale 1D (radiale) del caso assialsimmetrico coassiale e che $C \cdot V = q$ con q la carica elettrica superficiale, la ben nota capacità di un volume cilindrico

$$C = 2\pi \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{l}{\log\left(\frac{r_c}{r_w}\right)} \quad (2.4.2)$$

con l l'altezza del cilindro e r_c e r_w in riferimento alla Figura 5.8, consente di ricavare il campo elettrico nel dielettrico come

$$E = \frac{V}{x \log\left(\frac{r_c}{r_w}\right)} \quad (2.4.3)$$

massimo in corrispondenza della x minima ovvero per r_w , sulla superficie dell'elettrodo centrale alimentato. Con questa relazione, alimentando a potenziali crescenti l'elettrodo era possibile ricavare quale fosse il potenziale di innesco V_{on} al quale erano visibili le prime scariche e, contemporaneamente, avere un valore in termini di campo elettrico di innesco E_{on} per una data configurazione. Essendo la tenuta dell'aria, nota come *rigidità dielettrica* E_0 , un parametro che dipende dal materiale, ci si aspettava che E_{on} fosse costante.

Peek notò, invece, che E_{on} era più alto su elettrodi di piccolo diametro; la causa fu in principio cercata nella presenza di uno strato d'aria condensata sulla superficie del conduttore. Da ulteriori analisi, emerse che il valore di

²²La costante dielettrica dell'aria è pari a $\varepsilon_r = 1.00059$ [8]

rigidità dielettrica dell'aria pari a 30 kV/cm era sempre raggiunto ad una distanza dalla superficie pari a $0.301\sqrt{r_w}$ cm. Si ricavava così che il campo sulla superficie dell'elettrodo al quale avveniva la scarica era

$$E_{on} = E_0 \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r_w}} \right)$$

Studi precedenti avevano dimostrato che al variare delle condizioni ambientali, in particolare temperatura e pressione, il valore della rigidità dielettrica dell'aria non si manteneva costante ma si modificava secondo la densità dell'aria di una quantità ricavabile dalla relazione

$$\delta_{peek} = \frac{T_0 P}{T P_0} \quad (2.4.4)$$

con $T_0 = 298$ K e $P_0 = 101325$ Pa = 1 atm, rispettivamente temperatura e pressione in condizioni standard. Aggiungendo un coefficiente m detto *coefficiente di rugosità (superficiale)* che tenesse conto delle imperfezioni superficiali dell'elettrodo in grado di modificare localmente il valore del campo, si ottiene la relazione nota come formula di Peek

$$E_{peek} = E_0 \cdot m \cdot \delta_{peek} \left(1 + \frac{k_{geom}}{\sqrt{r_w \cdot \delta_{peek}}} \right) \quad (2.4.5)$$

espressa in V/m dove k_{geom} è una costante che dipende dalla geometria; dalle verifiche sperimentali, Peek notò anche una variazione nel valore di E_0 in diverse configurazioni. In Tabella 2.1 sono riportati i valori delle due configurazioni più interessanti nei precipitatori elettrostatici.

Configurazione	E_0 [$\frac{V}{m}$]	k_{geom}
coassiale	$31.02 \cdot 10^5$	0.0308
wire-plate	$30.1 \cdot 10^5$	0.0301

Tabella 2.1: Valori della rigidità dielettrica e di k_{geom} utilizzati nella (2.4.5) ricavati da Peek in diverse configurazioni geometriche.

Coefficiente di rugosità Una nota sul coefficiente di rugosità permette di effettuare numerose considerazioni sul modello di Peek e i suoi limiti. Nello studio originale, Peek non tenne in considerazione questo fattore e ciò si tradusse nel considerare l'elettrodo come un conduttore perfettamente cilindrico e nell'imporre l'assenza di perturbazioni dovute alla densità di

carica. Lattarulo e Amoruso [46] hanno spiegato la presenza di m osservando che le grandezze elettriche, fluidodinamiche, ecc. sono sempre misurate lontano dalla zona di ionizzazione a causa del suo spessore molto modesto. In questa regione le linee di flusso sono in accordo con la teoria di Peek e, assumendo questi valori come generalmente validi nel dominio di interesse, sono considerati come naturale proseguimento delle microscariche che danno origine all'effetto corona nello strato ionizzato. Ciò è tanto più vicino alla situazione reale quanto più l'elettrodo è simile al caso ideale di un cilindro privo di rugosità in grado di deformare la direzione delle linee di campo in prossimità della superficie dell'elettrodo. Valore tipico di m suggerito in letteratura è 0.72 [66]: più correttamente, non potendo assumere costante la differenza tra caso ideale e reale, si considera il coefficiente di rugosità nel range $0.5 \div 0.7$ [6] con una variabilità ammessa molto grande. Rispetto al caso ideale, il campo di innesco può quindi variare anche del 50% rispetto al valore stabilito e i motivi principali sono i seguenti:

- l'elettrodo non è un cilindro perfetto ma presenta una rugosità che comporta una deviazione delle linee di campo nello strato ionizzato
- durante l'utilizzo, l'elettrodo si consuma e, quindi, il coefficiente di rugosità nel tempo peggiora: la presenza di un diametro non uniforme comporta un progressivo peggioramento tanto maggiore quanto maggiore è la deformazione rispetto al caso ideale
- tiene in considerazione che alcune particelle di polvere si depositano sull'elettrodo riducendo il valore del campo di innesco
- la relazione di Peek è valida per elettrodi di raggio di circa 1 mm, in ogni caso non inferiore a 0.1 mm. Per diametri tra 0.3 e 0.5 esiste un errore pari a circa il 5% dovuto al fatto che il campo calcolato da Peek per diametri molto sottili sottostima il campo vero: il valore calcolato da Peek lo si può individuare, anziché sulla superficie del conduttore come da definizione, ad una distanza dalla superficie dell'elettrodo pari al raggio del conduttore stesso [49]. Il coefficiente di rugosità funge in questo caso da estensione di validità della relazione per diametri, come nel nostro caso, prossimi al limite inferiore
- i parametri considerati da Peek sono i principali in grado di influenzare la ionizzazione e l'effetto corona. Come si può intuire, per la complessità dei fenomeni fisici l'elenco non è esaustivo: in riferimento

allo studio di Lattarulo e Amoruso [46], la stessa velocità ionica di drift nel caso di valori supersonici, non difficili da ottenere in prossimità dell'elettrodo, causa una pesante variazione nel campo elettrico misurabile.

Umidità L'equazione (2.4.5) considera la variazione del campo di innesco al mutare della densità dell'aria, in particolare temperatura e pressione. L'umidità, altro parametro influente, fu da Peek trascurato. Studi più recenti [67] hanno introdotto una "formula di Peek modificata" per tener conto del contributo dato dall'umidità: non volendo stravolgere la struttura e le definizioni create da Peek, anziché agire sulla densità dell'aria come sarebbe opportuno, è stato aggiunto un nuovo termine ricavato sperimentalmente ed esprimibile come

$$f(RH) = \frac{E_{peekRH}}{E_{peek}}$$

Considerando il problema lineare e legittimando, pertanto, la sovrapposizione degli effetti, Xu, Tan e Li hanno suddiviso il campo elettrico E in due contributi, uno relativo all'aria secca (quello di Peek), uno al vapore acqueo:

$$E = E_{dry} \cdot \frac{N_{dry}}{N} + E_{vapor} \cdot \frac{N_{vapor}}{N} \quad (2.4.6)$$

con $N = N_{dry} + N_{vapor}$ la densità di molecole totale ed $E_{dry} = E_{peek}$. Applicando la legge dei gas perfetti $PV = NRT$ e la legge di Dalton secondo cui $P = P_{dry} + P_{vapor}$, dalla (2.4.6) si ricava che

$$E = E_{dry} \cdot \frac{P - P_{vapor}}{P} + E_{vapor} \cdot \frac{P_{vapor}}{P}$$

e, sostituendo $P_{vapor} = RH \cdot P_w$ dove RH è l'umidità relativa e P_w la pressione parziale del vapore saturo,

$$E = E_{dry} \left(1 + \frac{E_{vapor} - E_{dry}}{E_{dry}} \cdot \frac{P_w}{P} \cdot RH \right)$$

Calcolando $P_w = 611 \cdot 10^{\frac{7.5 t_c}{237.3 + t_c}}$ con t_c la temperatura in °C [67, 68], si ottiene la formula di Peek modificata:

$$E_{peekRH} = E_{peek} \cdot \left[1 + \left(5.76 - \frac{1.63}{0.69 \sqrt{\delta_{peek} r_w} + 0.21} \right) \cdot \frac{P_w}{P} \cdot RH \right] \quad (2.4.7)$$

Kaptzov

Dai risultati di Peek, numerosi studi e sperimentazioni hanno cercato di estendere il problema per trovare una soluzione al problema elettrostatico e ricavare la caratteristica elettrica tensione-corrente in grado di descrivere il fenomeno. Con riferimento al caso coassiale, è possibile assumere che l'esiguo strato attivo vicino al filamento funga da sorgente di ioni, mentre nel rimanente spazio interelettrodico sia presente una distribuzione unipolare di ioni responsabile, per l'effetto dovuto alla carica spaziale, della maggior parte della caduta di tensione. Con tali assunzioni, un aumento in corrente è limitato dalla carica spaziale; un aumento di tensione comporta un piccolo aumento del campo elettrico sul conduttore, ma la maggior parte dell'aumento di tensione è compensato dalla carica spaziale superiore e, pertanto, solo in piccola parte aumenta la ionizzazione vicino al filamento [6]. Sulla base di questa osservazione, lo scienziato russo Kaptzov nel 1947 pose quella che ancor oggi è nota come *assunzione di Kaptzov*:

La carica spaziale nello spazio interelettrodico è tale da mantenere il campo superficiale dell'elettrodo alimentato al valore di innesco [69].

In altre parole, per valori di potenziale applicato sull'elettrodo superiori a quello d'innesco il campo elettrico superficiale può essere considerato costante e pari al campo di Peek calcolato con la (2.4.5). Misurazioni utili a validare l'ipotesi furono effettuate da Khalifa e Abdel-Salam [4] di cui si riporta in Figura 2.8 il grafico del campo vero misurato sulla superficie dell'elettrodo a fronte di un campo applicato (tensione applicata) in una configurazione coassiale. Si vede come assumere secondo Kaptzov un campo costante sulla superficie dell'elettrodo per tensioni superiori a quelle di innesco sia in accordo con i risultati sperimentali.

Deutsch

Nel 1915 Townsend [44] analizzò rigorosamente la configurazione elettrica in presenza di ionizzazione per un sistema coassiale unipolare. Deutsch [64] nel 1933 estese l'analisi a sistemi più complessi, monodimensionali e bidimensionali come il caso wire-plate di particolare interesse per la filtrazione elettrostatica. Per ottenere una soluzione furono necessarie delle ipotesi che presero il nome del loro creatore e sono tuttora note come *ipotesi di Deutsch*:

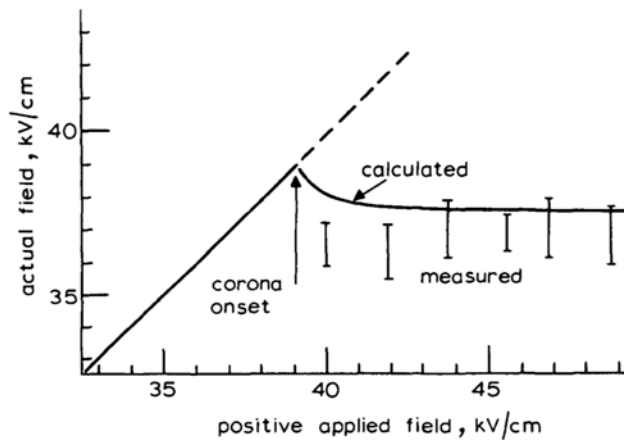


Figura 2.8: Campo elettrico reale al variare della tensione applicata all'elettrodo in una configurazione coassiale (Fonte: [4]).

1. La carica spaziale influenza solo il modulo, non la direzione del campo elettrico Laplaciano (calcolato cioè senza carica spaziale)
2. La densità di carica rimane costante lungo una qualsiasi linea di campo²³
3. Il campo elettrico sull'elettrodo a ground rimane al suo valore Laplaciano

Le ipotesi (2) e (3) sono ipotesi conseguenti all'aver considerato il campo leggermente superiore al valore di innesco. La vera assunzione di Deutsch è la prima. Conseguenza più evidente è la possibilità di studiare un problema in origine tridimensionale come un monodimensionale seppur con la necessità di introdurre ulteriori ipotesi talvolta non verificate²⁴ [46]. Le assunzioni di Deutsch saranno comunque discusse e utilizzate successivamente.

Altri studi

Sulla base delle teorie e delle ipotesi appena presentate si cercò di ricavare, così come già aveva fatto Kaptzov, la caratteristica elettrica in presenza di effetto corona. Cooperman, nel 1960, raccolse le sperimentazioni fatte negli

²³L'assunzione presenta un errore trascurabile se la si utilizza, come effettuato da Deutsch, per descrivere la regione ionizzata prossima all'elettrodo. Quanto più ci si allontana da questo, tanto più l'errore è grande, tale da renderla non più utilizzabile in prossimità dell'elettrodo a ground [46].

²⁴Un esempio di condizione necessaria ma non sempre verificata è l'ipotesi che le velocità nel modello siano tutte lontane dalla condizione super-sonica.

anni precedenti e le sintetizzò esplicitando in modo critico quali fossero le principali problematiche. Mentre le correnti elettriche in ogni mezzo liquido o solido sono governate dalle tre leggi

1. Legge di Poisson che relaziona carica spaziale e potenziale
2. Conservazione della carica
3. Legge equivalente alla legge di Ohm con conducibilità assunta costante,

nei gas le semplificazioni non possono essere fatte, rendendo tutto più complesso. Valide approssimazioni furono suggerite da Thomson [70] e Townsend [44] per geometrie estremamente semplici. Deutsch [64] tentò di estendere da un punto di vista teorico la trattazione per geometrie più complesse ma il risultato si dimostrò in errore con le sperimentazioni. Cooperman riuscì ad ovviare al problema trattandolo come se le interazioni tra carica spaziale e campo elettrico elettrostatico fossero inesistenti. Assumendo inizialmente una carica spaziale $\delta \equiv 0$ e un campo elettrico esclusivamente elettrostatico, dalla soluzione, per un dato flusso di corrente, era possibile ricavare una densità di carica; con tale distribuzione era possibile determinare l'alterazione del campo originale procedendo iterativamente. In presenza di una piccola corrente, l'effetto della carica spaziale era tale da non richiedere più di una iterazione [65]. Col metodo pseudo-computazionale proposto da Cooperman fu possibile ricavare delle relazioni in grado di predire il valore della corrente in un filtro elettrostatico in funzione del potenziale applicato: nel caso cilindrico coassiale il risultato è esattamente quello di Townsend ed è di seguito riportato per approssimazioni di basse e di elevate correnti²⁵:

$$I_{low} = \frac{2K}{b^2 \log\left(\frac{b}{a}\right)} V(V - V_{on}) \quad (2.4.8)$$

$$I_{high} = \frac{2K}{b^2} \left[(V - V_{on})^2 + \frac{V_{on}(V - V_{on})}{\log(b/a)} \right] \simeq \frac{K}{2b^2} \left(V - aE_0 \log \frac{b}{12a} \right)^2 \quad (2.4.9)$$

con $V_{on} = E_0 \cdot a \log\left(\frac{b}{a}\right)$ la tensione di innesco, K la mobilità ionica (tale denominazione verrà utilizzata solo in questa sede per uniformità di notazione con la bibliografia utilizzata), a e b in riferimento alla Figura 2.9. Nel caso

²⁵La relazione per correnti elevate considera una semplificazione del logaritmo con Taylor del primo ordine (si veda [6]).

wire-plate, di maggiore interesse, la relazione (2.4.8) diventa

$$I = \frac{2K}{b^2 \log\left(\frac{d}{a}\right)} V(V - V_{on}) \quad (2.4.10)$$

dove d , da intendersi come raggio equivalente dell'elettrodo a ground in configurazione wire-plate, è ricavato da Cooperman e calcolabile con la Tabella 2.3. Dalle verifiche eseguite dallo stesso Cooperman si evince che all'aumentare del rapporto b/c , ovvero all'aumentare dello spazio tra elettrodo e piastra o all'avvicinarsi dei filamenti, l'errore percentuale aumenta per "compressione" delle linee di campo (vedi Figura 2.11).

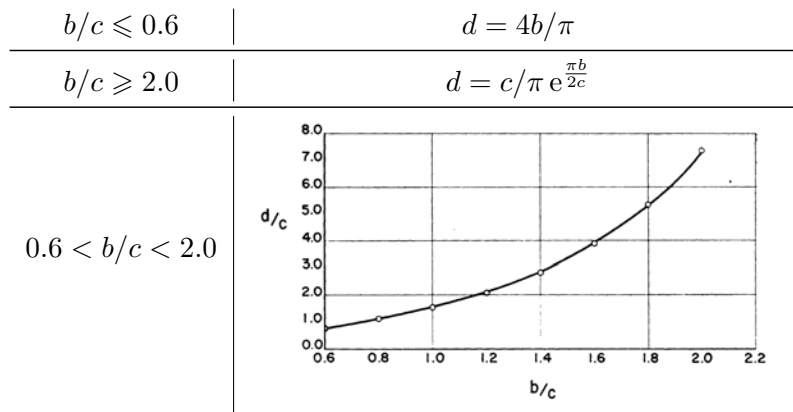


Tabella 2.3: Calcolo di d per la relazione (2.4.10) a partire da altri parametri geometrici secondo Cooperman.

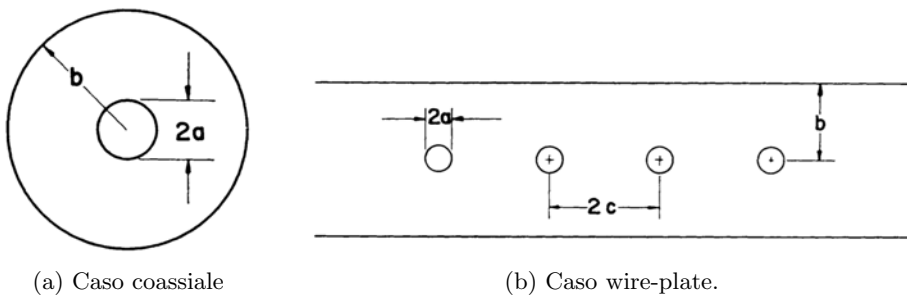


Figura 2.9: Definizione dei parametri geometrici a , b e c richiamati nelle equazioni di Townsend e Cooperman, rispettivamente (2.4.8) e (2.4.10).

Altri studi, si basano su semplici osservazioni osservazioni dei risultati ottenuti, senza un'opportuna interpretazione fisica. Un esempio di risultato soggetto a critiche di questo tipo è la *legge empirica di Warburg* la quale

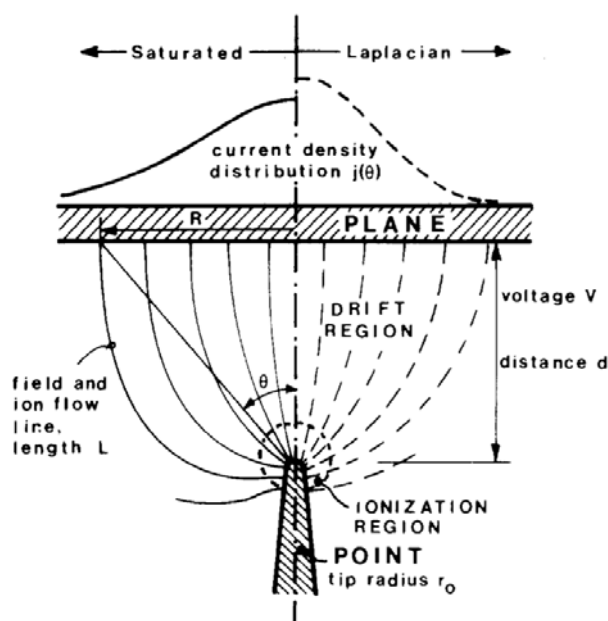


Figura 2.10: Rappresentazione della legge di Warburg (Fonte: [5]).

afferma che la distribuzione della corrente uscente da un elettrodo o da una punta su un piano segue un andamento cosinusoidale dall'asse posto alla minima distanza dall'elettrodo alimentato (vedi Figura 2.10):

$$J(\theta) = J(0) \cos^m \theta, \quad \begin{cases} m = 4.82 & \text{Corona positiva} \\ m = 4.65 & \text{Corona negativa} \\ \theta \leq 60^\circ \end{cases} \quad (2.4.11)$$

La validità della legge è limitata al caso in assenza di scariche con aria come gas tra gli elettrodi [5]. La limitazione originalmente imposta da Warburg, la quale affermava che lo spazio interelettrodico non doveva superare i 3 cm, è stata superata dalle sperimentazioni di Allibone e Saunderson [71] che ne dimostrarono la validità fino ad alcuni metri.

Considerazioni Tutte le relazioni individuabili in letteratura e finora riportate offrono una stima della corrente dovuta alla ionizzazione per effetto corona a partire dalla geometria del dispositivo e dal potenziale applicato. Per geometrie particolarmente semplici, la soluzione al problema, ottenuta considerando anche la perturbazione del caso elettrostatico introdotta dalla densità di carica spaziale, è calcolabile analiticamente. Un esempio è

riportato al Paragrafo 5.2.2. Per casi geometricamente più complessi, è indispensabile il ricorso a ipotesi e assunzioni molto forti o al calcolo numerico, come già Cooperman aveva notato nei suoi studi tentando di estendere la soluzione di Townsend al caso wire-plate; i modelli presenti in letteratura, sia semi-empirici che completamente sperimentali, sfruttano la procedura iterativa suggerita da Cooperman, con eventuali modifiche per adattare l'analisi al caso contingente.

Le equazioni (2.4.8) e (2.4.10) evidenziano però un grande limite degli studi finora presentati: direttamente dipendenti dalla tensione applicata V , essi non contemplano la possibilità che all'interno del dominio vi siano due o più potenziali applicati diversi dal ground. Escluso il caso coassiale, dove la geometria è tale da non ammettere la presenza di altri potenziali al di fuori di quello applicato all'elettrodo e del potenziale nullo del cilindro esterno, il motivo dei buoni risultati comunque ottenibili nel caso wire-plate con più elettrodi equipotenziali è esclusivamente dovuto allo spazio elevato che li separa; con elettrodi molto spazati, l'effetto dei potenziali dovuti ai filamenti limitrofi è tale da poter essere trascurato, come si vede in Figura 2.11. Ciò è tanto più vero quanto più elevata è la distanza tra gli elettrodi, in perfetto accordo con l'errore percentuale riscontrato da Cooperman (descritto in 2.4.1).

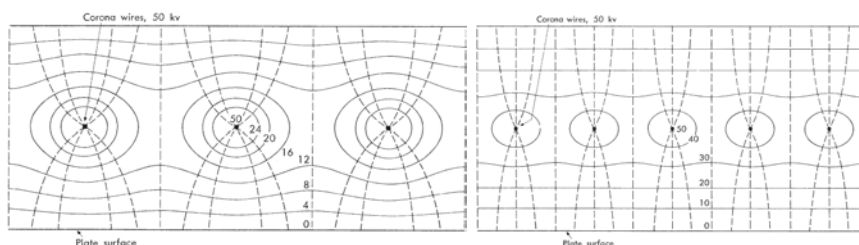


Figura 2.11: Influenza della vicinanza tra elettrodi sulle linee di campo nel caso wire-plate (Fonte: [6]).

Per filtri elettrostatici di tipo bistadio, alimentati con due tensioni distinte, una per l'elettrodo di ionizzazione e una per le piastre di repulsione, le relazioni non sono utilizzabili e lo studio richiede quindi un'analisi numerica. Se i modelli descritti ricavano la corrente per una data tensione in una data geometria, un'analisi agli elementi finiti può superare l'ostacolo appena evidenziato: l'informazione sulla geometria è data dal modello CAD fornito in input, le informazioni sul potenziale sono imposte come condizioni al contorno e il problema diventa quindi un "problema di campo elettrico". Fondamentali a tal proposito sono le equazioni di Maxwell in grado di

descrivere l'effetto corona.

Equazioni di Maxwell nel caso elettrostatico e di densità di carica

Le equazioni di Maxwell che descrivono il fenomeno dell'effetto corona e, più in generale, la ionizzazione nel caso unipolare in aria sono le seguenti:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = 0 & \Rightarrow \mathbf{E} = -\nabla\varphi \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \delta & \Rightarrow \nabla \cdot (\varepsilon_0 \mathbf{E}) = \delta \\ \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \\ \mathbf{J} = \delta b \mathbf{E} \end{cases}$$

dove \mathbf{E} è il campo elettrico, φ è il potenziale elettrico scalare, \mathbf{D} il vettore spostamento elettrico, ε_0 la costante dielettrica del vuoto, δ la densità di carica superficiale, \mathbf{J} la densità di corrente e b la mobilità elettrica degli ioni. Supponendo per semplicità che il materiale sia lineare, omogeneo e isotropo (nel nostro caso l'errore commesso è praticamente nullo trattandosi di aria) e che la mobilità b sia costante

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\delta}{\varepsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\delta b \mathbf{E}) = \nabla(\delta b) \cdot \mathbf{E} + \delta b \nabla \cdot \mathbf{E} = \nabla\delta \cdot \nabla\varphi + \delta \nabla^2\varphi = 0 \end{cases}$$

da cui si ricavano rispettivamente le due equazioni fondamentali per la soluzione elettrostatica e di densità di carica

$$\nabla \cdot \nabla\varphi = -\frac{\delta}{\varepsilon_0} \quad (2.4.12)$$

$$\nabla\delta \cdot \nabla\varphi - \frac{\delta^2}{\varepsilon_0} = 0 \quad (2.4.13)$$

Le (2.4.12) e (2.4.13) sono esprimibili anche attraverso un'unica equazione alle derivate parziali di terzo grado non lineare:

$$\nabla \cdot (\nabla^2\varphi \nabla\varphi) = 0 \quad (2.4.14)$$

Quanto finora riportato è la descrizione matematica dell'effetto corona unipolare DC in aria: le (2.4.12) e (2.4.13) devono essere risolte per il potenziale φ e la densità di carica δ entrambe funzioni dello spazio (non del tempo perché il problema è steady-state [11]).

Essendo di terzo grado, le condizioni al contorno necessarie sono tre. L'equazione in φ , di secondo grado, richiede due condizioni relative ai potenziali di alimentazione: in riferimento alla Figura 5.8

$$\varphi_{r=r_w} = V_0 \quad (2.4.15)$$

$$\varphi_{r=r_c} = 0 \quad (2.4.16)$$

L'equazione in δ , di primo grado richiede una condizione soltanto. Il problema è che non vi è nessuna condizione su δ poiché il suo valore è ignoto in ogni punto del dominio. Tale condizione al contorno va quindi cercata nei “parametri elettrostatici” o uno dei parametri rappresentativi della presenza di ioni sull'elettrodo alimentato. In assenza di una condizione direttamente su δ le possibilità sono soltanto due: assegnare la distribuzione di corrente sull'elettrodo o porre una condizione che coinvolga il campo elettrico e procedere iterativamente. Non essendo praticabile la prima opzione²⁶ essendo la distribuzione di corrente una parametro fortemente arbitrario [46], la scelta ricade sull'ultima opzione. Soluzione comunemente adottata è l'assunzione di Kaptzov

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \varphi = E_{peek} \quad (2.4.17)$$

la quale ci fornisce un valore di campo elettrico da imporre sulla superficie dell'elettrodo, avendo in sostanza trascurato lo spessore dello strato ionizzato a cui farebbe riferimento Kaptzov²⁷. Le proprietà matematiche dell'equazione (2.4.14) furono investigate da Atten [76]: dimostrò che, con le suddette condizioni al contorno, la soluzione è unica e il problema è ben posto.

La soluzione prevede l'inevitabile utilizzo di una procedura iterativa il cui primo step varia a seconda di come il problema è posto; al Paragrafo 5.2.2 è descritta la procedura utilizzata. In generale è possibile affermare che il criterio di convergenza per una procedura iterativa relativa al problema elettrostatico e di densità di carica appena descritto prevede:

- tra due iterazioni successive il valore di δ deve variare di una quantità inferiore allo 0.5%

²⁶Un tentativo fu compiuto da McDonald e poi Zamany utilizzando la distribuzione suggerita da Warburg con scarsi risultati [75].

²⁷In realtà il campo sulla superficie del conduttore normalmente non è disponibile nei casi di DC ion flow field [46].

- i due valori di φ calcolati con la (2.4.12) e con la (2.4.13) non devono discostarsi di oltre lo 0.5% del loro valor medio ($\Delta\varphi < 0.005 \frac{\varphi_A + \varphi_B}{2}$).

Nota La formula completa della densità di corrente

$$\mathbf{J} = \underbrace{\delta b \mathbf{E}}_{\text{elettrostatico e carica}} \underbrace{-D_i \nabla \delta}_{\text{diffusione ionica}} \underbrace{+ \delta \mathbf{v}}_{\text{velocità gas}}$$

è composta da tre contributi: in ordine, il primo rappresenta la densità di carica dovuta alla presenza di un campo elettrico e della densità di carica, il secondo è dovuto alla diffusione ionica (D_i è il coefficiente di diffusione) al di fuori della zona di ionizzazione, il terzo allo spostamento degli ioni da parte della velocità dell'aria \mathbf{v} con conseguente modifica della distribuzione di δ . Di questi soltanto il primo contributo è non trascurabile per il problema di nostro interesse²⁸ [73]. Qualora la ionizzazione non fosse unipolare, i termini non sarebbero ugualmente trascurabili, in particolar modo il termine legato alla diffusione. Nel caso bipolare le equazioni da considerare diventano²⁹

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi &= -\frac{\delta_+ - \delta_-}{\epsilon_0} \\ \mathbf{J}_\pm &= \delta_\pm b_\pm \mathbf{E} \mp D_{i\pm} \nabla \delta_\pm \pm \delta_\pm \mathbf{v} \\ \nabla \cdot \mathbf{J}_\pm &= \mp \frac{R_i \delta_+ \delta_-}{e} \end{aligned}$$

dove R_i sono i coefficienti di ricombinazione. Valori tipici sono suggeriti in [74].

2.4.2 Produzione di ozono

A partire dai parametri dimostratisi capaci di influenzare la produzione di ozono (Paragrafo 2.3.3), molteplici studi sono stati effettuati per tentare di stabilire se esistesse una relazione tale da poter predire la produzione di ozono a partire da parametri geometrici, elettrici e ambientali. Nonostante le numerose sperimentazioni, una relazione analitica-teorica ad oggi non esiste; gli stessi strumenti numerici in grado di simulare la fisica del plasma richiedono informazioni spesso non disponibili e non sono in grado di portare ad un risultato che, peraltro, risulta complesso anche da misurare e verificare. Sempre effettuati con filtri monostadio, a seconda della polarità della

²⁸In realtà considerare il termine dipendente dalla diffusione, nonostante complichino il problema, potrebbe facilitare la stabilità numerica [72].

²⁹Il pedice indica la polarità degli ioni considerati.

ionizzazione alcuni individuarono una dipendenza dalla corrente, dal raggio dell'elettrodo, dalla potenza totale di scarica, del campo medio, ecc. In molti di questi si è misurata la concentrazione di ozono, valore che dipende dal flusso d'aria (tanto più è veloce, tanto più in fretta l'ozono è allontanato dal punto di generazione limitando i fenomeni di distruzione), dal volume dell'ambiente (la concentrazione è data in [ppm]: tanto più grande è l'ambiente tanto minore è la concentrazione misurata a pari produzione di ozono) e dalla presenza di ozono naturalmente presente nell'ambiente. A complicare ulteriormente i confronti tra modelli, l'utilizzo di configurazioni coassiali o wire-plate. Se nel secondo caso la generazione è localizzata in prossimità degli elettrodi, nel primo la generazione avviene in modo continuo poiché l'elettrodo è disposto in senso longitudinale al moto dell'aria; aumentando il tempo di permanenza, pur aumentando anche la possibilità di distruzione di molecole d'ozono, la produzione di ozono cresce. Tutti gli aspetti citati contribuiscono a creare confusione tra i vari modelli e non consentono di utilizzare tutti i risultati che sarebbero disponibili per costruire un modello. Studi particolarmente validi relativi alla produzione di ozono sono quelli di Boelter e Davidson [57], Nashimoto [58], Chen e Davidson [54], Viner [62] e Castle [2, 61]. Il concetto fondamentale proposto dagli studiosi elencati evidenzia come la grandezza di interesse non sia la concentrazione di ozono ma la generation rate, ovvero la velocità con cui l'ozono varia: questo infatti è indipendente dal volume dell'ambiente e dalla concentrazione di ozono naturale. Con particolare riferimento agli studi di Castle, i risultati ottenuti dimostrarono una dipendenza lineare tra la generation rate e la potenza dissipata

$$[O_3]' = [O_3]Q \propto P_i \quad (2.4.18)$$

con $[O_3]'$ la generation rate in [ppm/s], $[O_3]$ la concentrazione di ozono in [ppm], Q la portata d'aria in $[m^3/s]$ e P_i la potenza dissipata nello strato d'aria ionizzata: si è assunto che tutto l'ozono fosse prodotto in prossimità dell'elettrodo, essendo questo strato l'unica regione attiva chimicamente. Indicando con V_i la caduta di tensione sullo strato ionizzato, si ricava

$$P_i = V_i I$$

Assumendo secondo l'affermazione di Loeb [77] che essa sia una piccola porzione della tensione di innesco, $V_i = C_{Loeb} V_{on}$ con $C_{Loeb} \leq 1$, dalla (2.4.18) si ricava

$$[O_3]' \propto V_{on} I$$

Per un dato diametro, V_{on} è costante (a meno di variazioni ambientali) e quindi la dipendenza della generation rate sembra essere dipendente dalla corrente I . Il risultato è stato ottenuto con una configurazione coassiale. Gallo [78] ricavò questa relazione e trovò che la relazione in funzione della corrente era una retta con intercetta non nulla e diede due motivazioni:

- La tensione di innesco è scomponibile in due termini: uno relativo allo strato di ionizzazione, l'altro alla *drift region*. Essendo la caduta di tensione in prossimità dell'elettrodo indipendente dalla corrente e dal potenziale applicato se superiore al valore di innesco (ipotesi di Loeb), allora il caso si può generalizzare in

$$V_i = V_{on} - V_{drift-on}$$

e quindi

$$[O_3]' \propto (V_{on} - V_{drift-on})I$$

- All'aumentare della concentrazione di ozono aumenta anche l'effetto delle ricombinazioni e della distruzione dell'ozono (vedi il Paragrafo 2.3.3). Viner [62] suggerì che la relazione doveva essere del tipo

$$[O_3]' = k_1 I - k_2 [O_3] \cdot RH$$

dove si era tenuto in considerazione anche dell'effetto dell'umidità relativa. Una modifica alle relazioni finora elencate in grado di considerare la distruzione di ozono fu proposta successivamente in [52]:

$$[O_3]' \propto VIF \propto VI \left[1 - 0.5 \left(\frac{V}{V_{on}} - 1 \right) \right]$$

dove F è il parametro che riduce parzialmente l'ozono all'aumentare della concentrazione, V la tensione applicata necessariamente nel range $V_{on} < V < 2V_{on}$.

Nonostante le motivazioni sembrano entrambe plausibili, non vi sono certezze sulla loro validità, specialmente nel primo caso dov'è complesso misurare quale sia l'effettiva caduta di tensione nell'una e nell'altra regione interelettrodica. Per questo motivo e per la non linearità della caratteristica elettrica (dipendente anch'essa da parametri esterni) le teorie degli studiosi si sono limitate a considerare la dipendenza della generation rate dalla corrente. Castle propose come stima della concentrazione di ozono la

seguente relazione:

$$[O_3] = f(r_w) \frac{P_i}{Q} \simeq f(r_w) \frac{E_{av} r_{sheath}}{Q} I$$

con r_w il raggio del filamento espresso in [cm], $r_{sheath} = r_{on} - r_w$ lo spessore dello strato d'aria ionizzato, calcolabile come differenza tra il valore del raggio oltre la quale il campo è inferiore alla rigidità dielettrica dell'aria e il raggio del filamento, ed E_{av} [kV/cm] il campo elettrico medio sullo strato d'aria ionizzato calcolabile come media aritmetica

$$E_{av} = \frac{E_{peek} + E_0}{2} \quad (2.4.19)$$

con E_0 il valore ricavato da Peek e riportato in Tabella 2.1. Townsend [44] al posto di E_0 utilizzò $30 \frac{kV}{cm}$, valore tipicamente utilizzato per la rigidità dielettrica dell'aria. Dagli esperimenti di Castle, fu possibile individuare una formula empirica per la concentrazione di ozono espressa in [ppm]:

$$[O_3] = 2.20 \frac{(E_{av} r_w) I}{Q} \quad (2.4.20)$$

dalla quale è possibile ricavare informazioni sulla generation rate moltiplicando per la portata d'aria e dividendo per il volume d'aria in analisi: dimensionalmente

$$[ppm] \cdot \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot \left[\frac{1}{m^3} \right] = \left[\frac{ppm}{s} \right]$$

Come già ricordato, i presenti lavori sono stati eseguiti su filtri monostadio industriali, tipicamente a configurazione coassiale. Il presente lavoro di tesi, basato invece sull'analisi di un filtro bistadio tipico per applicazioni indoor, ha cercato una relazione analoga in base alle misure disponibili effettuate sul prototipo presente in SIC S.r.l. Il modello di Castle, riassumibile con le (2.4.20) e (2.4.19), è stato assunto come riferimento. I risultati sperimentali sono riportati al Paragrafo 5.2.2.

Capitolo 3

Cattura

3.1 Normativa sulla cattura: UNI 11254

La normativa di riferimento per valutare le prestazioni di filtri per aria elettrostatici adatti all’inserimento in impianti di ventilazione è la UNI 11254 del Novembre 2007 [79], diretta conseguente della UNI 10339:1995 *Impianti aeraulici a fini di benessere*¹ e della UNI EN 13779 del 2005. È una normativa nazionale che, al momento della sua nascita, non aveva equivalenti nelle normative internazionali: le uniche normative presenti riguardavano filtri meccanici (ad es. filtri a manica) o filtri elettrostatici per cattura di particelle inquinanti e polveri tipicamente in centrali termoelettriche operanti a polverino di carbone o in impianti industriali ad elevata emissione di polveri. Completamente diverso è il settore dell’Air Cleaning, caratterizzato da massa totale e concentrazioni di particelle da catturare nettamente inferiori; essendo poi l’aria filtrata destinata a locali con elevato ricircolo d’aria (ad es. ospedali, hotel, ecc.), appare evidente come le prestazioni richieste siano diverse dai casi suddetti. Per questo i maggiori produttori attivi nel settore hanno ritenuto opportuno realizzare una “guida” di valore legale al fine di uniformare procedure e parametri di misura così da permettere una classificazione sia per diversificare i prodotti, sia per garantire all’acquirente la possibilità di scelta fornendo indicazioni standardizzate. Numerosi sono i limiti che tale norma presenta, numerose le obiezioni che si possono muovere, numerose le modifiche già proposte ma non ancora attuate. Tra i principali

¹Il Comitato Termotecnico Italiano si è occupato della revisione della UNI 10339 in modo da estenderne il campo di azione a tutti gli ambienti confinati, residenziali e non. Inoltre, è indicato un dimensionamento dei filtri in funzione del grado di inquinamento dell’aria esterna e del livello di qualità dell’aria interna desiderato (in entrambi i casi su una scala di tre livelli).

limiti, l'adozione di particelle di diametro pari a 0.4 μm come rappresentative dell'intero spettro di particelle trattato dal filtro, assunzione semplicistica e di limitato significato se si considera che particelle di dimensioni inferiori, più pericolose poiché al di sotto dei 100 nm penetrano nei tessuti polmonari [35], possono presentare efficienze di cattura sensibilmente inferiori.

3.1.1 UNI 11254 in sintesi

Il criterio di classificazione è adottato in base a valori di efficienza media nei confronti di particelle del diametro di 0.4 μm di DiEthylHexylSebacate (DEHS), materiale tipicamente impiegato nella produzione di resine e materiali plastici. In base alla particolare efficienza dei filtri elettrostatici, è stabilito un valore limite minimo di efficienza pari all'80% per poter accedere alla classificazione: sono quindi stabilite 4 classi di efficienza, A, B, C e D, in ordine di efficienza media decrescente ($E_A \geq 99\%$; $95\% \leq E_B < 99\%$; $90\% \leq E_C < 95\%$; $80\% \leq E_D < 90\%$). I diversi filtri sono anche classificati in base alla caduta di pressione iniziale²: PE (perdite di carico non inferiori a 30 Pa); EM (perdite di carico inferiori a 30 Pa). Tali valori sono ovviamente indicativi soltanto se la comparazione avviene tra filtri sottoposti a prova secondo le procedure contenute nella presente norma. I filtri possono essere a uno o più stadi, mono o poli-tensione. Requisito essenziale per l'accesso alla classificazione è che il filtro sia caricato attivamente, con apposita regolazione e alimentazione elettronica; sono quindi esclusi filtri di tipo fibra precaricata o dotati di carica elettrostatica passiva. Non è ammesso l'impiego di pre-filtri o post-filtri durante la prova. Per poter essere sottoposti alle prove previste dalla UNI 11254 i filtri attivi devono presentare caratteristiche costruttive ben definite, ad esempio dimensioni frontali non superiori a 900 mm \times 900 mm e condotti all'interno dei quali va posto il filtro di sezione quadrata di lato 610 mm: importante da sottolineare è che la struttura dei filtri (e quindi del sistema di prova) deve essere tale da impedire, per quanto possibile, il minimo trafileggio d'aria una volta inseriti nel circuito di prova eventualmente anche in condizione di funzionamento in leggera depressione o sovra-pressione.

²Il valore di caduta di pressione iniziale è rilevato alla portata nominale dichiarata dal costruttore; al di sotto di $800 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ è possibile sottoporre a prova due o più filtri in parallelo.

3.1.2 Strumenti e misure secondo normativa

Le procedure di prova fanno riferimento alle norme americane ASHRAE 52.2:1999, relative a procedure per test di dispositivi per air-cleaning ma non specifiche per filtri elettrostatici. L'aerosol di prova deve consistere di DEHS non trattato o diluito³ iniettato con un ugello di Laskin in un sistema con umidità relativa compresa tra il 40% e il 60%, intervallo dove, peraltro, l'uniformità lungo il filamento della corrente uscente dovuta ad effetto corona è massima [81]. Non vi sono indicazioni per quanto riguarda pressione e temperatura. È possibile utilizzare qualunque altro generatore di particelle in grado di produrre concentrazioni sufficientemente elevate nell'intervallo di dimensioni tra 0.2 μm e 3.0 μm in modo costante lungo l'intero periodo. Il campionamento viene fatto con sonde affusolate collocate al centro delle sezioni di misura a monte e a valle del filtro in prova con l'estremità di ingresso di fronte all'ingresso del circuito parallelamente al flusso d'aria [79]: il motivo di tale posizione si spiega facilmente considerando che qui la velocità risente poco delle forze viscosive dovute alle pareti, mentre le particelle sono uniformemente distribuite sulla sezione della condotta per la presenza di una piastra forata posta appena a valle del diffusore. Le perdite di particelle nel condotto di prova, nelle linee di trasporto dell'aerosol e nel contatore di particelle hanno un'influenza minimizzata se si rendono quanto più possibile simili nel campionamento a monte e a valle; in tal modo l'errore statistico risulta contenuto. Va altresì ricordato che l'efficienza di conteggio richiesta per il Contatore Ottico di Particelle⁴ (OPC) non dev'essere inferiore al 50% per particelle di diametro pari a 0.2 μm , valore che presenta un margine molto ampio: per ridurre l'errore statistico, è consigliata la misura di cinque classi di dimensioni tra 0.2 μm e 3 μm ed un numero di particelle contato in un intervallo di misura maggiore di 500 in conformità alla UNI ISO 2854⁵. Particolare attenzione va posta sull'OPC poiché la dimensione della particella fornita dipende fortemente dalla taratura del contatore ottico: la taratura dev'essere quindi realizzata frequentemente da un fabbricante. Le prove necessarie per il contatore di particelle sono:

- Prova a zero: si deve verificare che il contatore misuri meno di 10

³La diluizione avviene con aria ambiente depurata tramite filtri HEPA o ULPA [80].

⁴Misurano concentrazione e diametro delle particelle basandosi sull'intensità luminosa riflessa da un raggio tipicamente laser che illumina le particelle mentre queste passano in una cella ottica.

⁵Il numero di particelle è fondamentale per non valutare erroneamente i risultati del test: poche particelle misurate comportano bassa rilevanza statistica.

particelle/min se si opera con un filtro HEPA o ULPA.

- Prova di sovraccarico: è indispensabile perché se il livello di concentrazione supera il limite del contatore, si avrà una sottostima della concentrazione che porta ad ottenere dati di efficienza inferiori a quelli reali. È bene che l'errore di conteggio rimanga sempre sotto il 5%. Se la concentrazione a monte non può essere ridotta, è possibile procedere con una diluizione quantificata con precisione.
- Prova di efficienza a 100%: il sistema deve essere in grado di misurare rendimento unitario o comunque superiore a 0.99 in tutti gli intervalli di misura.
- Prova di efficienza a 0%: senza il filtro devo ottenere efficienze inferiori al 3% per particelle sotto il micron, inferiori al 7% per quelle superiori.

Per la misura della pressione differenziale è invece richiesta una strumentazione molto più sensibile, in grado di misurare differenze di pressione con un'accuratezza di ± 2 Pa al di sotto dei 70 Pa, del $\pm 3\%$ del valore misurato per variazioni di pressione superiori a 70 Pa⁶. L'intera misurazione dev'essere eseguita in condizioni quanto più possibile isocinetiche, pertanto una misura accurata dell'uniformità della velocità nel canale di prova risulta indispensabile: suddividendo la condotta in nove parti (ogni parte ha il lato pari ad 1/3 di quello della condotta) è possibile determinare l'uniformità della velocità (per diversi valori di portata) con uno strumento che abbia risoluzione minima di 0.05 m/s e un'accuratezza di $\pm 10\%$. Negli stessi punti si valuta l'uniformità della concentrazione dell'aerosol.

3.1.3 Rapporto di prova: risultati e incertezze

Il rapporto di prova è il documento che comprende generalità del processo di misura, una descrizione del metodo prescritto, i risultati ottenuti, le efficienze misurate ed il loro livello di incertezza, i dati e i risultati di portata, caduta di pressione e carico delle polveri.

Particolarmente importante ai fini del presente lavoro è il calcolo dell'efficienza in numero, ovvero del rapporto tra il numero di particelle trattenute dal filtro e quello delle particelle in ingresso (a portata nominale), per un

⁶Le misure devono essere corrette per una massa volumica dell'aria di riferimento pari a 1.1987 kg/m³ e corrispondente ad una temperatura di 20°C, pressione di 101.325 kPa e umidità relativa pari al 50%.

Campioni n	Gradi di libertà	$t_{(1-\frac{\alpha}{2})} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}$
4	3	1.591
5	4	1.242
6	5	1.049
7	6	0.925
8	7	0.836

Tabella 3.1: Valori della distribuzione di Student utilizzati dalla normativa per la relazione (3.1.3).

dato intervallo di dimensioni:

$$E = \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right) \cdot 100 \quad (3.1.1)$$

dove:

n_i è il numero di particelle nell'intervallo di dimensioni i a valle del filtro

N_i è il numero di particelle nell'intervallo di dimensioni i a monte del filtro

Il diametro medio d_i si calcola come media geometrica dei diametri all'estremo inferiore e superiore dell'intervallo di dimensioni i :

$$d_i = \sqrt{d_{inf} \cdot d_{sup}} \quad (3.1.2)$$

Il valore normalmente riportato sul rapporto di prova è l'efficienza in numero media, ovvero la media pesata delle efficienze misurate ad ogni stadio durante la prova di accumulo.

L'incertezza rispetto all'efficienza in numero media corrisponde ad un intervallo di confidenza che si estende ai due lati del valor medio e basato su un livello di confidenza del 95%:

$$U = \left[t_{(1-\frac{\alpha}{2})} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \right] \cdot \delta \quad (3.1.3)$$

Il termine tra parentesi quadre, dipendente dalla distribuzione di Student t secondo la UNI ISO 2854 e dal numero di valori di efficienza calcolati sulla base delle misure, è spesso tabulato per diversi gradi di libertà come in Tabella 3.1⁷; δ è lo scarto tipo.

⁷ α pari a 0.05 indica un livello di confidenza pari al 95%.

3.1.4 Considerazioni

La presente sintesi della UNI 11254, realizzata per evidenziare quali sono le differenze tra le procedure di test e misura realizzate presso SIC rispetto a quanto indicato da normativa, mette in luce il numero e la complessità delle misure che si rendono necessarie per classificare i dispositivi nel modo più standardizzato possibile. Il prototipo stesso di proprietà di SIC S.r.l. attualmente non soddisfa molti dei requisiti espressi nella UNI 11254. Va inoltre sottolineato come alcuni parametri non trascurabili al fine della classificazione di un prodotto per air-cleaning non siano citati nella normativa. Tra le maggiori lacune:

- L'efficienza viene testata ed espressa con riferimento a particelle di $0.4\ \mu\text{m}$: non vi sono ulteriori indicazioni su quali dovrebbero essere valori di efficienza accettabili per dimensioni diverse delle particelle. Una misura d'efficienza su particelle di diametro inferiore sarebbe auspicabile essendo la capacità di cattura crescente con la dimensione delle particelle [50].
- Non si misura l'ozono, prodotto inevitabile dei precipitatori elettrostatici. È così possibile ottenere efficienze migliori impostando tensioni elevate durante i test, salvo poi ridurre questi valori sui dispositivi effettivamente installati per evitare la produzione eccessiva di O_3 .
- Le classi di efficienza coprono ciascuna (D esclusa) un intervallo pari a 5%, equivalente all'errore di conteggio massimo ammesso per gli OPC. Un'evidente conseguenza è la possibile variazione di classe di efficienza per un filtro prossimo alla soglia tra due classi non dovuta alle effettive prestazioni del filtro, ma all'errore di conteggio introdotto dal contatore ottico.
- La normativa cita come materiale di prova il DEHS; non viene quindi considerata una variazione di resistività, parametro fondamentale per valutare la capacità di un filtro di catturare particelle. Utilizzare uno o più materiali che presentino uno spettro di prodotti con resistività diverse (tipico ad esempio dell'aria essendo questa formata da un miscuglio di sostanze) potrebbe garantire risultati più puntuali. In tal senso, potrebbe essere sufficiente anche effettuare più test con polveri più isolanti e polveri più conduttive.

- La misura della velocità/portata d'aria è una misura essenziale per valutare in modo standardizzato l'efficienza di filtrazione. La metodologia utilizzata di misura della velocità in 9 punti con la possibilità di utilizzare la stessa sonda in tempi diversi, nonostante si consideri come valore valido il valor medio di 3 misurazioni, potrebbe fornire un dato non rappresentativo della velocità nel filtro ad esempio a causa della turbolenza. La necessità di rimuovere tale/i sonda/e durante lo stato operativo del filtro per non modificare la turbolenza e la mancata definizione stessa di cosa si intenda quantitativamente per “trafilaggio d'aria” ammesso, sono indice di interpretabilità e rendono discutibile la normativa.

3.2 Fisica della cattura

Processo fisico

Proseguendo la descrizione del Paragrafo 2.3.1, le cariche uscenti allo strato ionizzato sono respinte dal campo elettrico in direzione delle piastre di raccolta a potenziale nullo. In un ambiente non più caratterizzato da campi elevati (il campo nello spazio interelettrodico cala esponenzialmente come si vede in Figura 5.4), esse rallentano e, in caso di scontro con una molecola del gas o una particella sospesa nel flusso d'aria transitante, anziché impattare violentemente e causare un'ulteriore ionizzazione, vengono da questa catturate generando una particella carica soggetta all'azione del campo presente che tenderà a spingerla verso le piastre di raccolta. La carica originale, così come la carica impartita da uno ione, non è sufficiente a garantire un'efficace separazione delle particelle dal gas. Tuttavia, particelle molto piccole possono raccogliere numerosi ioni⁸ al punto che la particella può costituire un suo stesso campo elettrico in grado di deviare le linee di campo originali (si vedano la Figura 3.1 e il Paragrafo 3.2.2). Si parla in tal caso di *carica di saturazione*, tanto maggiore quanto più grande è la particella; in altre parole, nonostante la maggiore inerzia, le particelle grandi possono ospitare una carica maggiore e sono quindi soggette a forze (ed efficienze) più elevate. Il fenomeno descritto prende il nome di **field charging**. Come si vedrà al Paragrafo 3.2.2, esso non è l'unico tipo di carica possibile. In un precipitatore il principale meccanismo di carica, oltre alla field charging, è

⁸Particelle del diametro inferiore ad 1 μm possono assorbire decine di ioni, particelle più grandi di 10 μm addirittura decine di migliaia [50, 82].

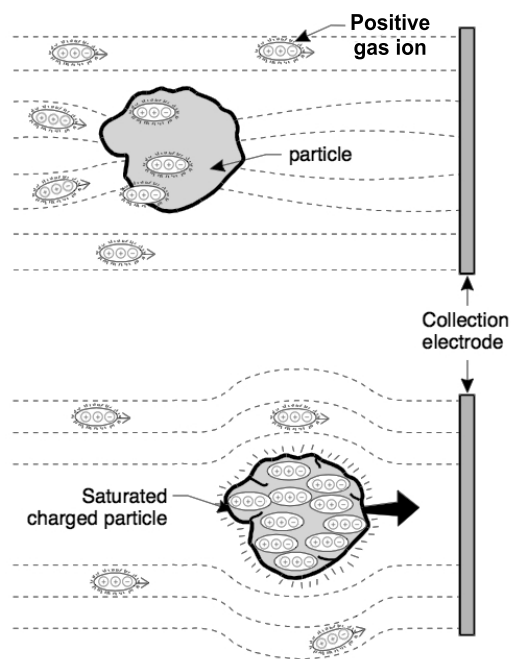


Figura 3.1: Rappresentazione grafica del concetto di carica di saturazione.
 In alto: linee di campo distorte dalla presenza della particella.
 In basso: linee di campo deformate per la presenza di un campo proprio generato dalla particella che si muove verso la piastra di raccolta.

la **diffusion charging** associata al moto casuale Browniano delle cariche secondo la teoria cinetica dei gas. Essendo molto piccole, le cariche non causano una deviazione del campo apprezzabile: pertanto la diffusion charging è il meccanismo responsabile della carica di particelle molto piccole. Una volta raggiunta la piastra di raccolta, la particella si scarica parzialmente per rilascio di cariche. Una piccola quantità di carica, rimane tuttavia nella particella così da favorire le forze adesive (le particelle si attaccano tra loro) e coesive (legami molecolari tra molecole) che la mantengono attaccata alla parete. Nelle Figure 1.2d÷1.2f si può vedere una rappresentazione di quanto finora descritto.

3.2.1 Fluidodinamica

Uno degli aspetti cruciali nello studio della cattura in un precipitatore elettrostatico è la caratterizzazione fluidodinamica del gas. Delineare una rappresentazione appropriata del *flusso primario* che tenga in considerazione gli aspetti influenti sul moto del fluido è la condizione necessaria per realizzare un modello in grado di predire l'efficienza di un filtro.

Approccio Euleriano (gas flow)

Date le contenute cadute di pressione in un filtro elettrostatico, l'aria è considerata un fluido Newtoniano incomprimibile, avente cioè densità e viscosità costanti. Sotto tali ipotesi, il flusso d'aria deve soddisfare le equazioni di continuità e di Navier-Stokes, queste ultime diretta conseguenza della seconda legge di Newton:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_f \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \underbrace{\delta \mathbf{E}}_{\text{Forza coulombiana}} \\ \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad \rho_f \stackrel{=}{\Rightarrow} \text{cost} \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \end{array} \right. \quad (3.2.1)$$

con ρ_f la densità del fluido, \mathbf{v} il vettore velocità del fluido, P la pressione, μ la viscosità del gas, δ la densità di carica, \mathbf{E} il campo elettrico. Nel caso di moto laminare, il sistema di equazioni (3.2.1) è sufficiente per descrivere il moto del gas.

Moto turbolento Nel caso il numero di Reynolds (Re), basato sulla lunghezza caratteristica del canale e la viscosità cinematica del fluido, fosse superiore al valore critico, il fluido va considerato in moto turbolento e ulteriori equazioni sono necessarie per la sua corretta descrizione. Non essendo

possibile utilizzare⁹ le equazioni di Navier-Stokes per risolvere il problema tempo-dipendente, un metodo alternativo è rappresentato dalle equazioni di *Navier-Stokes Reynolds-mediate* dove la velocità del fluido $\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}'$ è suddivisa in una componente media e una fluttuante. Indicando con il pedice i e j le componenti dimensionali della velocità,

$$\begin{cases} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_f v_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f v_i v_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \gamma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right) \right] + \\ \quad + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho_f \overline{v'_i v'_j}) + f_i \\ -\rho_f \overline{v'_i v'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho_f k + \mu_t \frac{\partial v_i}{\partial x_i} \right) \gamma_{ij} \end{cases} \quad (3.2.2)$$

dove μ_t è la viscosità “turbolenta”, γ_{ij} una costante del modello da calcolare di volta in volta. Il termine $-\rho_f \overline{v'_i v'_j}$ risultante dalla media di Reynolds per effetto della turbolenza è stato ricavato nella terza equazione mettendola in relazione ai gradienti delle velocità medie secondo l’ipotesi di Boussinesq [83]. Il metodo utilizzato da COMSOL per lo studio del moto turbolento è il metodo k - ε (k indica l’energia cinetica in moto turbolento, ε la dissipazione) derivato dalle (3.2.2).

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_f k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho_f \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \rho_f \varepsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_f \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(-\rho_f \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - C_{2\varepsilon} \rho_f \frac{\varepsilon^2}{k} \end{cases} \quad (3.2.3)$$

con la viscosità turbolenta μ_t calcolata mediante

$$\mu_t = \rho_f C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

e le costanti, già presenti nel modulo di COMSOL per moto turbolento [83], pari a

- $C_{1\varepsilon} = 1.44$
- $C_{2\varepsilon} = 1.92$
- $C_\mu = 0.09$
- $\sigma_k = 1.0$
- $\sigma_\varepsilon = 1.3$

⁹La soluzione analitica generale è attualmente uno dei problemi irrisolti della matematica moderna.

Una rappresentazione del moto all'interno di un filtro monostadio wire-plate è riportato in Figura 3.2 [7].

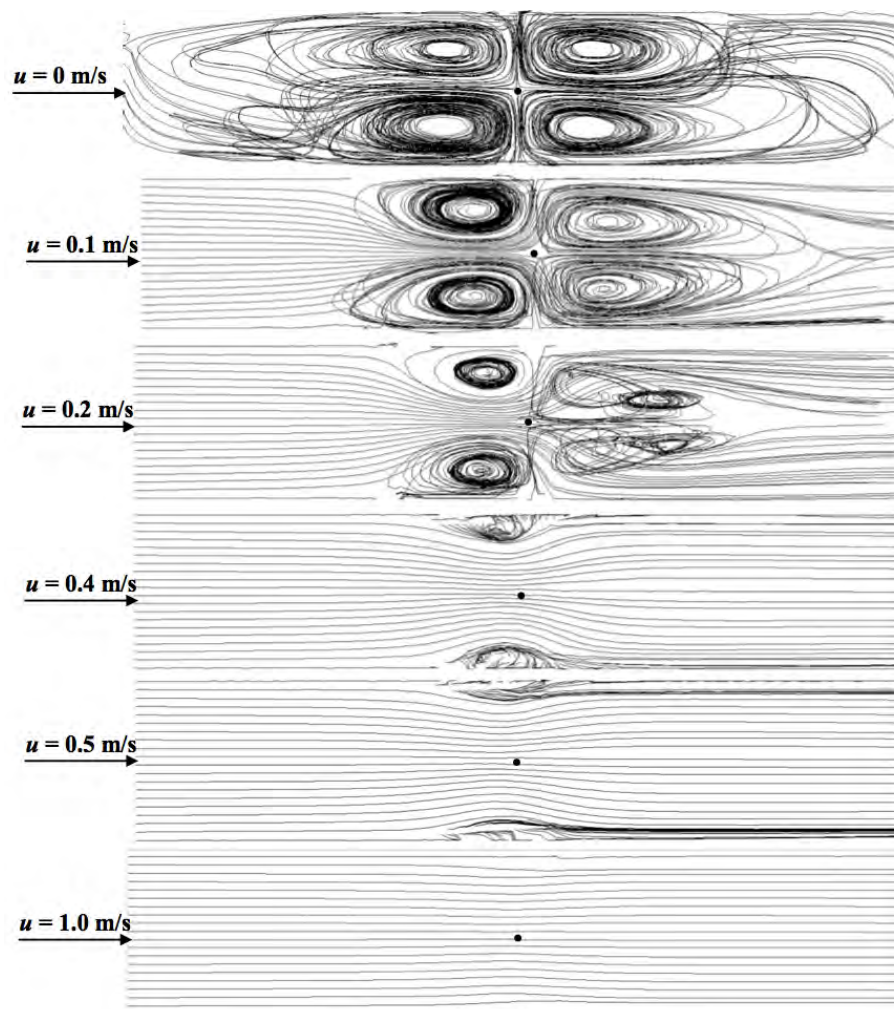


Figura 3.2: Linee di flusso rappresentanti il moto del gas all'interno del filtro al variare della velocità in ingresso (Fonte: [7]).

Approccio Lagrangiano (particelle)

Il modulo *Particle Tracing* presente in COMSOL è in grado di calcolare le traiettorie di un dato numero di particelle avvalendosi dell'approccio Lagrangiano per caratterizzarne il moto. In generale il moto delle particelle sospese è soggetto ad una combinazione di forze: aerodinamiche dovute all'interazione col gas, elettrostatica, gravitazionale (quest'ultima è spesso trascurabile date le modeste masse in gioco). Il bilancio delle forze è quindi

dato da

$$\frac{d\mathbf{v}_{\mathbf{p},i}}{dt} = \mathbf{F}_{\mathbf{D}}(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{\mathbf{p},i}) + \frac{\mathbf{g}_z(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + \frac{\mathbf{E}q_p}{m_p} \quad (3.2.4)$$

dove il pedice p denota che la grandezza si riferisce alla particella, con ρ_p la densità, q_p la carica, m_p la massa, \mathbf{g}_z l'accelerazione di gravità (solo in asse z), $\mathbf{F}_{\mathbf{D}}$ la forza di trascinamento causata dalla diversa velocità tra le particelle e il gas. Tra tutti i termini elencati, quest'ultimo è il più complesso; numerosi studi condotti per ricavarne analiticamente il valore hanno portato a molteplici modelli semi-empirici [84]. Il più accurato tra questi, proposto da Morsi e Alexander [85], differenzia $\mathbf{F}_{\mathbf{D}}$ per particelle sub-micron e super-micron:

$$\begin{cases} F_D = \frac{18\mu C_D Re}{24\rho_p d_p^2} & \text{con } d_p > 1\mu m \\ F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 C_c(\lambda)} & \text{con } d_p \leq 1\mu m \end{cases} \quad (3.2.5)$$

dove il coefficiente di trascinamento C_D è calcolato secondo il modello citato [85] dipendente da $Re = \frac{\rho_f d_p |\mathbf{v}_{\mathbf{p},i} - \mathbf{v}_i|}{\mu}$, $C_c(\lambda)$ è il coefficiente di correzione di Cunningham utilizzato per modificare la legge di Stokes così da renderla dipendente dal diametro delle particelle, non trascurabile per diametri sotto il micron. Esso si calcola con

$$C_c(\lambda) = 1 + K_n \left[1.257 + 0.4 e^{-\frac{1}{K_n}} \right] \quad (3.2.6)$$

dove $K_n = \frac{2\lambda}{d_p}$ è il numero di Knudsen e $\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi}\sigma^2 P} = \lambda_0 \frac{\mu}{\mu_0} \frac{P_0}{P} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$ il cammino libero medio: valori tipici dei parametri che compaiono sono $\lambda_0 = 6.609 \cdot 10^{-8}$ m, k la costante di Boltzmann e $\sigma = 2d_p$ il diametro di collisione pari al doppio del raggio della particella per particelle assunte sferiche. Tanto più le particelle sono piccole, tanto maggiore è la correzione apportata dal fattore di Cunningham che, al variare del diametro delle particelle, assume l'andamento riportato in Figura 3.3.

Per particelle di diametro inferiore a $0.1 \mu m$ il fattore di Cunningham diventa superiore a 3, il che significa che il modello di Stokes sottostima la forza di trascinamento ponendola pari ad un terzo: in tal caso tutto il modello andrebbe rivisto, ma spesso per raggiungere efficienze sufficientemente elevate si ricorre a dispositivi a monte appositamente creati per la cattura di particelle molto piccole: tipico esempio sono i DBD (dielectric barrier discharge), costituiti da un elettrodo a punte disposte a 360° che favoriscono la carica delle particelle sospese ma, come diretta conseguenza, producono molto ozono [86, 6, 84]. Utilizzando dispositivi completamente

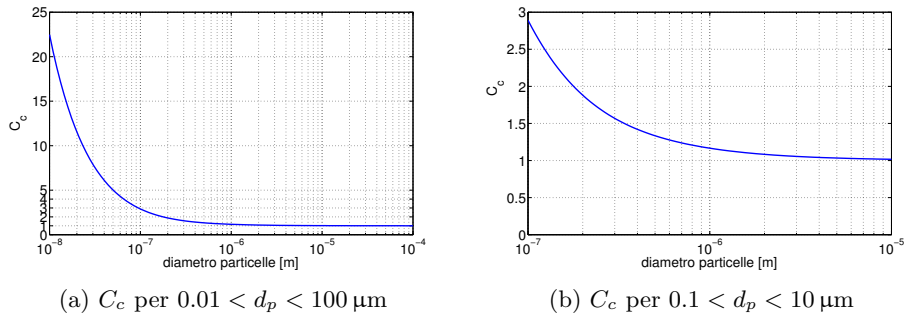


Figura 3.3: Fattore di Cunningham al variare del diametro delle particelle.

diversi, l'intero meccanismo cambia e le ipotesi del modello non sono più soddisfatte.

3.2.2 Particle charging

La carica delle particelle è il primo fondamentale passo per il processo di filtrazione elettrica del gas: quanto più alta è la carica, tanto maggiore sarà la forza coulombiana applicata. Tutte le equazioni riportate finora, in particolare al Paragrafo 2.4.1, descrivono la condizione di scarica unipolare in aria in quanto molto più efficace ed utilizzata rispetto alla variante bipolare (con elettrodi alimentati con potenziali discordi) per raggiungere elevate cariche sulle particelle sospese in aria [73, 6]. Come si è riportato, la scelta della polarità è indifferente ai fini della cattura: usualmente la polarità negativa è utilizzata in impianti industriali per la maggiore stabilità, i maggiori valori raggiungibili di tensioni e correnti, mentre la polarità positiva prevale in applicazioni Air-Cleaning per la minor produzione di ozono (si veda il Capitolo 2.3.1). Contrariamente a quanto ci si aspetterebbe, le particelle neutre presenti in natura sono piuttosto rare: basti pensare alle nebbie in grado di caricarsi per effetto di raggi cosmici o di fenomeni meteorologici di natura elettrica come i fulmini o alle normali polveri in grado di caricarsi per mero sfregamento. Studi condotti a metà del Novecento [87] dimostrarono che la maggior parte delle emissioni industriali erano cariche sia positive che negative a formare una sorta di sospensione mediamente neutra: si dimostrò che la carica “naturale” non imposta da elementi ionizzanti è circa il $5 \div 10\%$ della carica acquisita all'interno di un precipitatore elettrostatico, ciò a dimostrazione delle efficienze contenute che si ottengono su particelle in condizioni di assenza di ionizzazione [6].

I principali meccanismi di carica presenti in natura sono essenzialmente quattro [8]:

- Caricamento per passaggio su una fiamma (*Flame Charging*)
- Caricamento per elettrificazione statica (*Static Electrification*)
- Carica per presenza di un campo elettrico di ionizzazione (*Field Charging*)
- Carica per diffusione e moto browniano (*Diffusion Charging*)

Il primo avviene per effetto delle alte temperature in grado di ionizzare le molecole del gas e generare fenomeni di emissione termoionica dalle particelle. La carica netta acquisita dalle particelle dipende dal materiale: tipicamente le particelle caricate positive e negative hanno uguale probabilità di formazione. Il secondo meccanismo descrive la carica presente sulle particelle per separazione dal materiale di origine. Nonostante il meccanismo sia particolarmente efficace e in grado di produrre cariche molto elevate, esso è inaffidabile per la carica di particelle sospese in aria e può causare esplosioni in presenza di polveri incombuste. Tipici esempi di questo meccanismo di carica sono l'*electrolytic charging*, la *spray electrification* e la *contact charging*, rispettivamente dovuta alla separazione di liquidi ad elevata costante dielettrica da una superficie che causano gocce molto cariche, alla generazione di carica sulle superfici delle gocce in uscita da un nebulizzatore e alla generazione di carica che avviene quando si toccano e poi si separano materiali solidi con umidità molto basse¹⁰.

Nessuno dei meccanismi citati è adatto alla filtrazione dell'aria, sia esso dovuto al rischio di esplosioni o all'umidità eccessiva negli ambienti civili per l'attuarsi del processo di carica. I due meccanismi rimanenti sono i principali agenti nella filtrazione elettrostatica e sono di seguito analizzati.

Field Charging

Pioniere nello studio della carica delle particelle, Deutsch considerò inizialmente soltanto l'energia termica degli ioni e giunse a valori di carica troppo modesti per i requisiti industriali. Studi successivi, realizzati da Rohmann [88] e Pauthenier [89] e rivisitati in chiave moderna da White [6], estesero il meccanismo di carica all'effetto sulle particelle di un campo elettrico e

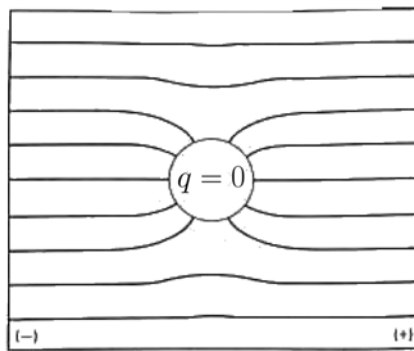
¹⁰Un esempio è dato dallo sfregamento di un panno di lana su un materiale plastico.

ne estrassero una relazione analitica valida qualora le seguenti ipotesi siano verificate:

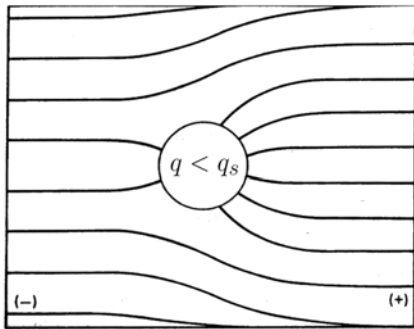
- Le particelle sono sferiche
- Le particelle di uguali dimensioni sono ugualmente caricate
- Le particelle sono sufficientemente distanziate tra loro (almeno $5 \div 10 d_p$) così da poter trascurare gli effetti dovuti alle interazioni¹¹
- Il campo elettrico E_0 e la concentrazione di ioni N_0 sono uniformi in prossimità della particella: considerata la dimensione della particella rispetto alla distanza tra gli elettrodi, l'ipotesi è sempre verificata, pur considerando la decrescita esponenziale del campo elettrico in prossimità dell'elettrodo o dello strato ionizzato e "conduttore".

Il processo di carica descritto al Paragrafo 3.2 elenca i passaggi fondamentali della field charging. Evento fondamentale per la carica delle particelle è il flusso di ioni verso di esse. Gli ioni, essendo carichi, seguono le linee di forza dovute al campo elettrico, a meno di collisioni con le molecole del gas. Il cammino libero medio in aria è di circa $0.1 \mu\text{m}$: ciò significa che per particelle con $d_p > 1 \mu\text{m}$ le irregolarità nel percorso delle particelle sono trascurabili. La presenza di una particella nello spazio interelettrodico causa una deviazione delle linee di campo in prossimità della particella stessa con un conseguente aumento del campo elettrico sulla sua superficie, come dimostrano l'aumento di densità nelle linee di campo tracciate in Figura 3.4a. La distorsione aumenta all'aumentare della conducibilità (e diminuire della costante dielettrica) della particella. È possibile dimostrare [90] che le linee di forza che passano attraverso una particella sono aumentate di un fattore 3 rispetto al caso di campo privo di distorsioni. Tutte le cariche presenti entro linee di campo incidenti sulla particella cadranno su di essa e contribuiranno alla sua carica globale. Col progressivo caricarsi della particella (Figura 3.4b), la sua polarità, identica a quella degli ioni che tenderebbero a depositarsi sulla superficie, dà origine a delle forze di repulsione dovute al campo proprio della particella fino al raggiungimento della carica di saturazione dove le linee di campo vengono totalmente deviate dalla particella carica (Figura 3.4c). È altresì dimostrabile che le linee di campo elettrico incidenti sulla superficie di una particella sferica hanno una distribuzione

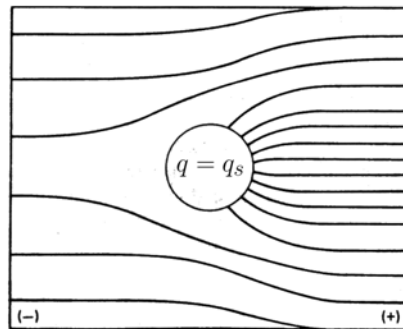
¹¹L'ipotesi è sempre verificata: la densità tipica del carico di polveri sospese non supera mai i $3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Per particelle da $1 \mu\text{m}$ con densità di massa unitaria ciò significa che la distanza media tra le particelle supera i $55 \mu\text{m}$.



(a) Carica nulla.



(b) Carica inferiore alla carica di saturazione.



(c) Carica di saturazione.

Figura 3.4: Linee di campo (e di forza) in prossimità di una particella per diversi stati di carica (Fonte: [8]).

cosinusoidale¹² $E_{in} = 3E_0 \cos \theta$. Assumendo che ad un istante t la carica depositata sia pari a ne , il campo causato dalla particella che si oppone al precedente è, a meno della costante di Coulomb, $E_{out} = -\frac{ne}{r_p^2}$ ($r_p = d_p/2$ raggio della particella). Calcolando il flusso totale entrante come integrale del campo sulla semisfera con campo positivo e ponendolo uguale a zero in condizioni di saturazione, si ottiene

$$q_s = n_s e = \frac{3E_0}{K_E} r_p^2 \quad (3.2.7)$$

dove $K_E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$ è la costante di Coulomb, n_s il numero di cariche elementari per giungere alla saturazione. Si sottolinea come la carica cresca con il quadrato della dimensione della particella e, quindi, sia modesta per particelle sub-micron. Dalla relazione sulla corrente intesa come flusso di cariche incidenti sulla particella¹³, si ricava

$$\frac{n}{n_s} = \frac{\pi K_E N_i e b t}{\pi K_E N_i e b t + 1} = \frac{t}{t + t_0} \quad (3.2.8)$$

con $N_i e$ la carica, b la mobilità ionica e $t_0 = \frac{4\epsilon_0}{N_i e b}$ che assume i connotati di una costante di tempo della carica: minore è t_0 più rapida è la carica. Valori tipici di t_0 sono alcuni ms. Essendo il tempo di permanenza del gas nel filtro dell'ordine dei secondi (o decimi di secondo), si deduce che la carica di saturazione viene raggiunta molto in fretta.

Correzioni alla relazione (3.2.7) possono essere apportate per tenere in considerazione la costante dielettrica della particella e la non-sfericità. Nel secondo caso, tuttavia, i modelli sulla cattura non sarebbero soddisfatti essendo basati sull'ipotesi di particelle sferiche: fortunatamente, come dimostrato sperimentalmente in [91], le dimensioni delle particelle di interesse per la filtrazione elettrostatica possono ragionevolmente essere considerate sferiche. Per completezza, si riporta la modifica alla (3.2.7) per effetto di ϵ_r [92, 6, 84]:

$$q_s = n_s e = \frac{3\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \pi \epsilon_0 d_p^2 |\mathbf{E}| \quad (3.2.9)$$

da cui si può immediatamente affermare che l'influenza della costante dielettrica è comunque contenuta. Quando in seguito si parlerà di carica di saturazione o di q_{field} , il valore da intendersi è quello calcolato con la (3.2.9).

¹²I punti sulla superficie della particella con campo minore, in riferimento alla Figura 3.4a, sono quelli più in alto e più in basso

¹³Per i passaggi si rimanda a [6]. Si faccia in tal caso attenzione alle unità di misura utilizzate.

Diffusion Charging

Al decrescere del diametro delle particelle, l'effetto della field charging si riduce, tanto che nel solo range tra 0.2 e 0.5 μm si ottengono valori di carica molto diversi. Per particelle piccole il processo principale di carica è dovuto al moto di agitazione termica degli ioni che li può portare a scontrarsi con delle particelle cedendo (o meglio condividendo) la propria carica. Essendo governato dallo stato cinetico e termico degli ioni, non è richiesto alcun campo elettrico per il meccanismo di carica per diffusione; un eventuale campo elettrico agisce solo da coadiuvante. Come nel meccanismo di field charging, all'accumularsi della carica su una particella, questa tende a repellere ulteriori cariche dando origine anche in questo caso ad una sorta di carica di saturazione [111] che tuttavia, diversamente dal caso precedente, viene raggiunta logicamente. I primi a modellizzare il fenomeno fornendo una relazione per quantificarlo sono stati gli studiosi Arendt e Kallmann [93]. La loro complessa analisi non sarà qui riportata. Con l'ipotesi semplificativa che ogni ione che raggiunge la particella si leghi a questa, si ottiene la relazione [92, 8]:

$$q_{diff} = \frac{d_p kT}{2K_E e} \log \left[1 + \frac{\pi K_E d_p c_i e^2 N_i t}{2kT} \right] \quad (3.2.10)$$

dove k è la costante di Boltzmann, K_E la costante di Coulomb, c_i la velocità termica media degli ioni (calori tipici sono 200 ÷ 300 m/s), T la temperatura assoluta, t il tempo di carica, N_i la concentrazione degli ioni¹⁴. Anche in presenza di campo elettrico esterno, il meccanismo di diffusion charging prevale sul field charging per particelle sub-micron.

Diffusion+Field Charging

In un filtro elettrostatico i due meccanismi di carica delle particelle coesistono: mentre la field charging prevale nel caso di particelle di diametro superiore a 0.5 ÷ 1.0 μm , la diffusion charging è il meccanismo predominante per la carica di particelle di diametro inferiore a 0.1 ÷ 0.2 μm anche se in presenza di campo elettrico [6, 8]. La contemporanea presenza dei meccanismi per particelle non comprese nei range rende necessaria una relazione in grado di descrivere la carica globale facendo prevalere l'una o l'altra forma

¹⁴Il valore di N_i dipende dalla corrente per effetto corona, dal diametro equivalente del filtro, dalla velocità del fluido, dall'altezza dell'elettrodo, ecc. [92]. Per l'interesse del presente lavoro di tesi, $N_i t \geq 10^{13} \frac{\text{s}}{\text{m}^3}$ sarà assunto come una costante [10, 8].

di carica. Si riporta in Figura 3.5 l'andamento della mobilità elettrica, che in questo caso indica la facilità con cui gli ioni possono caricare una particella neutra, in funzione del diametro delle particelle.

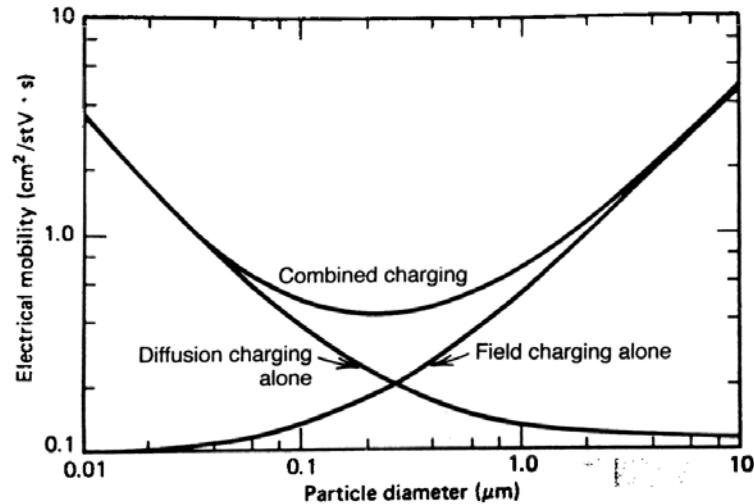


Figura 3.5: Mobilità elettrica in funzione del diametro delle particelle in caso di diffusion charging, field charging e la combinazione delle due. $E = 5 \text{ kV/cm}$, $N_i t = 10^{13} \text{ s/m}^3$ (Fonte: [8]).

Una strategia utilizzata in passato per approssimare il problema per le particelle nell'intervallo suggeriva di aumentare il diametro di una particella di una lunghezza pari al cammino libero medio degli ioni ($0.1 \text{ } \mu\text{m}$) e considerare soltanto la field charging. Su una particella di diametro $d_p = 0.2 \text{ } \mu\text{m}$ significa aumentare del 150% la sua dimensione e del 225% la carica rispetto a quando risulterebbe dalla (3.2.9) con dimensione reale; tale aumento si riduce all'aumentare del diametro della particella, in accordo col fenomeno fisico. Metodi analitici per la trattazione del problema sono stati studiati nel corso del XX secolo, senza appaganti risultati; ciò è dovuto anche allo spiccato interesse industriale su particelle di dimensioni sempre superiori al micron, lasciando soltanto all'ambito accademico lo studio dei fenomeni sub-micron.

Una strategia alternativa proposta da Benitez e Hinds [10, 8] si basa sull'assunzione che la diffusione sia un meccanismo non trascurabile per particelle che raggiungono facilmente la carica di saturazione, mentre sia il meccanismo per eccellenza per particelle il cui diametro è tale da rendere la carica di saturazione per field charging molto piccola. In questo modo la carica complessiva di una particella è data dalla somma della carica per

diffusion charging e per field charging:

$$q = q_{field} + q_{diff} \quad (3.2.11)$$

Si è dimostrato che utilizzando le cariche, valutate in modo indipendente, nella (3.2.11) si ottiene un risultato molto prossimo a quanto misurato sperimentalmente.

3.2.3 Particle collection

La cattura delle particelle cariche e ancora sospese nel gas è il secondo step fondamentale del processo di filtrazione. A garantire il moto di tali particelle vi sono la presenza del moto turbolento del gas (da solo avrebbe un effetto modesto) e di un campo elettrostatico in grado di applicare una forza di tipo coulombiano $F = qE$. Il campo è presente qualunque sia la configurazione del filtro: in un filtro monostadio coassiale è garantito dall'elettrodo stesso che ha la duplice funzione di ionizzare l'aria per caricare le particelle e generare un campo che le spinga verso la parete; in un monostadio wire-plate a più filamenti paralleli è garantito dagli elettrodi come nel caso precedente; nel caso di un filtro bistadio, analogo al prototipo utilizzato durante le misure, è garantito dalla presenza di piastre o elettrodi di altra forma alimentati a potenziali tipicamente inferiori a quello di ionizzazione e pertanto non in grado di ionizzare l'aria e di generare ozono. Con queste sorgenti di moto, è possibile descrivere la cinetica delle particelle basandosi sulle leggi della meccanica classica e dell'elettrostatica; la forza gravitazionale, data la dimensione e la massa delle particelle, può essere trascurata. Una precisazione, spesso trascurata in letteratura, va fatta sulla forza elettrostatica. In caso di una ridotta concentrazione di particelle immerse, la densità di carica spaziale ad esse dovuta può essere trascurata. All'aumentare della concentrazione, tuttavia, la densità di carica aumenta e il campo elettrico viene di conseguenza alterato. Di questa carica andrebbe tenuto in considerazione aggiungendo alla densità di carica ionica δ nella legge di Poisson un contributo δ_{part} dovuto alla presenza di particelle la cui carica varia lungo il percorso e influenza il campo elettrico:

$$\nabla^2 \varphi = - \frac{\delta + \delta_{part}}{\varepsilon_0}$$

Nel passaggio dalla regione a monte dell'elettrodo (con carica bassa) alla regione a valle (con carica elevata), le forze cambiano in modo non tra-

scurabile. Un modello numerico, ad esempio il modulo *particle tracing* di COMSOL, potrebbe tener conto di tale fenomeno facendo dipendere la carica associata alla particella dalla sua posizione attuale e passata calcolandone l'integrale lungo il suo cammino. L'eccessiva complicazione di tale soluzione porta a trascurare il fenomeno che tuttavia, in sede di descrizione teorica, è di fondamentale importanza.

L'equazione differenziale del moto, essendo w la velocità di deriva verso le superfici di cattura, è

$$m \frac{dw}{dt} = qE_p - 6\pi\mu r_p w \quad (3.2.12)$$

con m la massa, w la velocità di deriva (*drift velocity*), μ la viscosità del gas¹⁵, E_p il campo presente nella zona di cattura, nel caso del prototipo pari ad E_{ps} , il campo tra le piastre di repulsione e di cattura. Integrando si ottiene l'espressione

$$w = \frac{qE_p}{6\pi\mu r_p} \left(1 - e^{-\frac{6\pi\mu r_p}{m} t} \right) \quad (3.2.13)$$

dove il termine esponenziale, che descrive il tempo di raggiungimento della velocità limite delle particelle, diventa trascurabile per $t > 10^{-2}$ s [6]: essendo il tempo di permanenza di almeno un ordine di grandezza superiore, il suddetto termine sarà legittimamente trascurato. Per particelle con $d_p < 1 \mu\text{m}$, la relazione tuttavia esce dal range di validità della legge di Stokes e il ricorso al fattore di correzione di Cunningham si rivela necessario per una più accurata considerazione della forza di trascinamento [94]:

$$F_D = \frac{3\pi\mu d_p w}{C_c} \quad (3.2.14)$$

Essendo w la *velocità di migrazione* o *velocità terminale elettrica*, l'accelerazione nulla impone l'uguaglianza tra forza di trascinamento e forza elettrostatica; la (3.2.13) diventa

$$w = \frac{qE_p C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (3.2.15)$$

Le relazioni riportate sono note come relazioni di Deutsch-Anderson, presentate dai due studiosi in un modello di cattura che verrà riportato al Paragrafo 3.3.

¹⁵La viscosità può essere considerata costante in un range di pressione sufficientemente ampio da contenere ogni stato in cui si trovi a lavorare un ESP. Diversamente, la temperatura incide sulla viscosità come $\mu \propto T^{0.5 \div 1}$.

3.2.4 Fenomeni non ideali

Quanto espresso nei Paragrafi 3.2.3 e 3.2.2 è da intendersi in condizioni ideali. Nella realtà sono presenti alcuni fenomeni di disturbo che causano una riduzione, in alcuni casi molto grande, della carica delle particelle e della conseguente cattura. Di seguito sono riportati e descritti brevemente i principali.

Densità di carica Il più volte citato e il più facile da prevedere tra i fenomeni non ideali è la presenza di una densità di carica spaziale. È presente soprattutto in fumi e nebbie con bassa concentrazione di particelle o con concentrazioni più elevate se in presenza di particelle molto grandi. L'effetto di una densità di carica dovuta alla carica delle particelle con ioni emessi dalla regione soggetta all'effetto corona unipolare comporta la riduzione del campo in prossimità dell'elettrodo di ionizzazione, in alcuni casi anche la riduzione del suo valore di innesco e l'aumento del campo in prossimità dell'elettrodo di cattura. Un effetto diretto del fenomeno è la riduzione della corrente di un fattore 100 o superiore, cui consegue l'impossibilità di ottenere una carica come descritta nel presente Capitolo.

Back corona Studiato accuratamente da Pauthenier [89], il fenomeno avviene a causa dell'accumulo di materiale sull'elettrodo di raccolta. Tipicamente di resistività elevata¹⁶, lo strato di deposito è un ostacolo per la corrente ionica dalla zona ionizzata verso l'elettrodo di cattura. Il passaggio di corrente produce un campo elettrico $E = \rho J$ (ρ resistività e J densità di corrente) nel deposito: non appena tale campo diventa sufficientemente grande, causa una scarica locale e una conseguente produzione di ioni di polarità contraria che tendono a ridurre la densità di carica utile alla cattura¹⁷: si parla di *ricombinazione degli ioni*. Presente tipicamente in applicazioni industriali con un elevato carico di polveri sospese, possibili soluzioni sono:

- Variare temperatura e umidità per provocare una riduzione di resistività

¹⁶Teoria e sperimentazioni hanno dimostrato come resistività oltre $2 \cdot 10^8 \Omega m$, facilmente raggiungibili in applicazioni industriali, riescano ad originare il fenomeno [6].

¹⁷In alcuni casi il fenomeno di back corona può essere di entità tale non solo da annullare la carica utile, ma da ridurre anche la carica naturale delle particelle. Mediamente la caduta di efficienza è inferiore al 10% [6, 8, 89].

- Usare un'alimentazione intermittente ($10^3 \div 10^6 Hz$) così da permettere una “de-energizzazione” della regione prossima all'elettrodo e inibire la scarica.
- Pulizia e manutenzione frequenti

Dato il basso carico di polveri sospese, in applicazioni di Indoor Air-Cleaning il fenomeno di back corona può essere trascurato.

Reimmissione di particelle nel gas flow In presenza di umidità molto ridotta, di particelle molto piccole, di velocità dell'aria molto elevata o di moto particolarmente turbolento, alcune particelle catturate si possono staccare dalla parete ed essere reimmesse nel flusso d'aria. La loro carica, in parte o totalmente¹⁸ perduta sull'elettrodo di raccolta riduce le forze agenti su di esse. Il processo di field e diffusion charging normalmente sono in grado di ricaricare la particella e spingerla nuovamente sulla parete di raccolta, ma, se la reimmissione è molto importante, vi sarà un'inevitabile riduzione nell'efficienza. Per ridurre l'effetto le soluzioni proposte in letteratura sono:

- Utilizzare degli agenti adesivi (tipicamente ammoniaca e solfati) sulle pareti così da favorire la cattura e ridurre il distacco di particelle. Funziona per alcuni strati di particelle ma per strati molto spessi, il problema permane.
- Uniformare il moto dell'aria rendendolo più lento e meno turbolento. Si sottolinea però che ridurre la velocità dell'aria a parità di portata richiesta significa aumentare le dimensioni e il costo del dispositivo.
- Aumentare il potenziale sull'elettrodo qualora alimentato. Per requisiti di sicurezza l'elettrodo di raccolta è mantenuto a potenziale nullo. In installazione su edifici civili il requisito si fa ancor più necessario: la soluzione spesso non è adottabile.
- Rimuovere le polveri frequentemente.

3.3 Modelli e teorie in letteratura

Fenomeno fisico ben più noto e ricercato rispetto alla produzione di ozono, la cattura di particelle è un tema particolarmente presente in letteratura. Già nella prima metà del secolo scorso, modelli ben funzionanti erano stati formulati ed applicati ai precipitatori elettrostatici industriali

¹⁸Una particella che si stacca potrebbe addirittura aver perso tutta la sua carica e aver acquisito una carica opposta a quella utile.

al fine di descrivere e calcolare preventivamente il carico di polveri rimosibile da una determinata portata d'aria. L'applicazione industriale, come già accennato, presenta però due differenze sostanziali rispetto ai filtri per l'Indoor Air-Cleaning: il diametro delle particelle trattate è almeno un ordine di grandezza superiore, il carico di materiale (in volume o in peso) da filtrare per unità di volume di gas trattato è alcuni ordini di grandezza superiore. Un esempio di applicazione industriale può essere individuato nella filtrazione del particolato uscente dalle caldaie negli impianti di produzione alimentati a polverino di carbone: in riferimento alla configurazione monostadio di tipo wire-plate riportata in Figura 1.3b, usuale nelle applicazioni industriali, un tipico valore della distanza piastra-piastra è 20÷30 cm tale da garantire tramite l'uso di potenziali applicati negativi molto elevati l'abbattimento di svariate tonnellate di polveri ogni ora¹⁹ [17].

Nel caso di applicazioni civili, i precipitatori sono realizzati con una configurazione di tipo bi-stadio; in questo caso la zona responsabile della carica delle particelle è prevalentemente la prima, detta "stadio di ionizzazione", dove sono presenti strutture alimentate ad alta tensione, tipicamente elettrodi filiformi; la seconda, detta "stadio di cattura", è responsabile della captazione sulle piastre a potenziale nullo delle particelle caricate nello stadio precedente, effetto favorito dalla presenza di piastre di repulsione alimentate con un potenziale dello stesso segno delle particelle. In entrambi i casi, l'elvatissima efficienza di cattura raggiungibile da questi dispositivi, li ha portati ad essere preferibili a filtri di tipo meccanico (più costosi, meno affidabili e meno efficienti). Gli sviluppi e le migliorie apportate si sono concentrate in un'ottimizzazione geometrica della struttura, che rimaneva principalmente di due tipologie (configurazione coassiale o ad elettrodi come descritto nel Paragrafo 1.2), e in un aumento dell'efficienza che a lungo si è tradotta nel

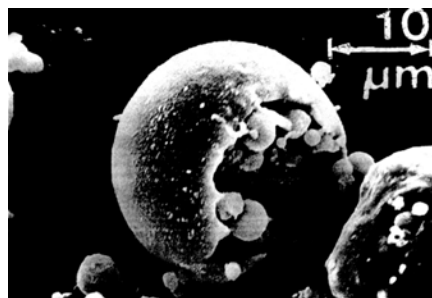


Figura 3.6: L'immagine raffigura una piccola particella di polverino di carbone analizzata al microscopio elettronico.

¹⁹Per una centrale da 320 MW, un consumo tipico di carbone standard è 2400 t/giorno: ciò produce 240 t/giorno di ceneri, tipicamente raccolte per oltre l'80% dai filtri elettrostatici posti a valle della caldaia. La rimanente parte finisce sul fondo della caldaia, sull'economizzatore o rimane in sospensione e viene espulsa a costituire le indesiderate emissioni.

massimo potenziale utilizzabile prima del verificarsi della scarica tra gli elettrodi, senza particolari attenzioni all'ozono che veniva prodotto. Raggiunti i risultati desiderati, dalla fine degli anni Settanta, salvo alcune eccezioni, la filtrazione elettrostatica non ha più goduto dell'interesse della ricerca. Dalla fine degli anni Novanta, con l'avvento di normative specifiche sulla qualità dell'aria negli ambienti (si veda il Paragrafo 2.2), la ricerca sulla filtrazione elettrostatica ha ripreso vita. In tale contesto, tuttavia, le alte tensioni utilizzate in precedenza (anche oltre 50 kV, spesso negativi²⁰ nell'applicazione industriale) per ottenere elevate efficienze non erano più permesse e si è quindi rivelato necessario studiare a fondo la fisica della cattura per comprendere come ottimizzare la captazione utilizzando tensioni più basse e dovendo catturare particelle ben più piccole dei 10÷100 µm tipici delle particelle del polverino di carbone.

Come già effettuato al Paragrafo 2.4 per i modelli sulla produzione di ozono, di seguito si riportano i principali modelli analitici presenti in letteratura. Per le numerose analisi e descrizioni reperibili tra le pubblicazioni di esperti scienziati e di produttori stessi e per l'ottimo accordo tra di esse, il Paragrafo 3.3 riporterà soltanto modelli e relazioni utilizzati nel Capitolo 5.

Deutsch-Anderson

Lo stesso studioso autore di una delle teorie sulla produzione di ozono riportata in 2.4.1 pubblicò nel 1922 una dettagliata analisi del processo di cattura delle particelle in filtri elettrostatici e propose un modello analitico in grado di descrivere il fenomeno. Seppur di carattere generale, il modello è stato ottenuto utilizzando a titolo di esempio un filtro monostadio coassiale, come di seguito riportato.

Le ipotesi poste da Deutsch per l'elaborazione del suo modello sono le seguenti:

1. Le particelle, soggette ad un moto turbolento, sono caratterizzate da una concentrazione uniforme in ogni disco infinitesimo di spessore dl perpendicolare al flusso d'aria.
2. Il tasso di cattura in ogni disco infinitesimo è proporzionale alla concentrazione di particelle nel disco e allo spessore del disco stesso.

²⁰É ben noto che la ionizzazione causata da elettrodi alimentati a potenziali negativi produce più ozono rispetto al caso di alimentazione positiva [57, 3].

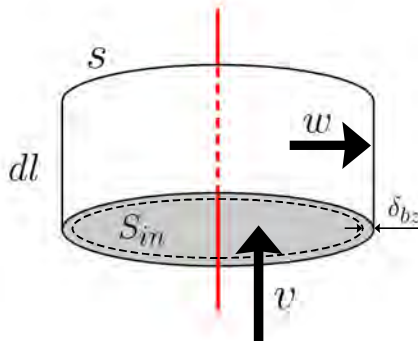


Figura 3.7: Rappresentazione delle variabili richiamate dal modello di Deutsch (spiegazione di White).

3. Il campo elettrico e la velocità di migrazione w sono costanti in prossimità della parete di cattura
4. Le particelle che entrano in uno strato prossimo alla parete di cattura di spessore δ_{bz} molto sottile sono catturate (bz sta per *boundary zone*). Si suppone una turbolenza contenuta.
5. La velocità media del gas entrante è uniforme, costante in tutto il volume e diretta longitudinalmente all'asse del disco, tranne in prossimità della parete dove l'ipotesi sarebbe ovviamente non verificata. Ciò significa che la velocità è uniforme per tutte le particelle nel flusso.
6. La cattura non è influenzata da disturbi quali reimmissione di particelle, back corona, accumulo di particelle, ecc. In altre parole non è considerato alcun limite fisico all'efficienza di cattura.
7. I parametri esterni in grado di interferire sull'efficienza sono trascurati: in particolare temperatura, pressione e umidità.

In riferimento alla Figura 3.7, le equazioni differenziali in grado di descrivere la cattura sono le seguenti:

$$dN = -\alpha N dl \quad (3.3.1)$$

con N il numero di particelle in uscita e α un valore empirico con dimensione 1/lunghezza detto *tasso di precipitazione*. Indicando con l la lunghezza del filtro e con N_0 il numero di particelle entranti e utilizzando tale valore come condizione iniziale, è immediato ricavare l'efficienza come frazione

percentuale delle particelle iniziali rimaste nel filtro, ovvero $N_0 - N$

$$\eta = \frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\alpha l} \quad (3.3.2)$$

Per quanto affermato ai punti (1) e (4), se le particelle sono uniformemente distribuite e in uno strato di spessore δ_{bz} sono sicuramente catturate, allora in un intervallo di tempo Δt nel quale il flusso d'aria sposta le particelle longitudinalmente di una lunghezza pari a $\Delta l = v \Delta t$ e ortogonalmente di una lunghezza pari a $\delta_{bz} = w \Delta t$ l'efficienza può essere riscritta come

$$\frac{\Delta N}{N} = -\frac{s\delta_{bz}}{S_{in}} = -\frac{sw\Delta t}{S_{in}} = -\frac{sw}{S_{in}v}\Delta l \quad (3.3.3)$$

dove s è la circonferenza del disco. Valida anche in termini infinitesimi, una volta integrata e utilizzata nell'equazione (3.3.2) questa dà come risultato

$$\eta = \frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\frac{sw}{S_{in}v}l} \quad (3.3.4)$$

dove si ricava $\alpha = \frac{sw}{S_{in}v}$.

Un aspetto importante da sottolineare è che il modello così come descritto può essere fuorviante. Gli eventi possibili per una qualunque particella immessa in un filtro e il cui moto è di tipo turbolento sono soltanto due: o viene catturata o viene espulsa, rispettivamente il rendimento del filtro sarebbe 100% o 0%. Non potendo prevedere il risultato, il problema assume una connotazione probabilistica; l'osservazione ha il solo obiettivo di sottolineare la natura del problema poiché, trattando contemporaneamente miliardi di particelle, la distinzione tra probabilità e certezza viene totalmente superata. Al fine di dare una spiegazione più puntuale dei termini che saranno utilizzati nel Capitolo 5 e di evidenziare alcuni aspetti importanti per la comprensione del processo di cattura, si riportano di seguito due spiegazioni che conducono allo stesso risultato pur procedendo con step diversi.

Spiegazione di White Pensando ad un precipitatore come ad un insieme di n dischi identici in cascata, in ciascuno dei quali la probabilità relativa ad una particella di essere catturata è p , si definisce

$$\lambda_{prob} = np = n(1 - q) \quad (3.3.5)$$

con q la probabilità di non-cattura. Dalla (3.3.5) è possibile calcolare la probabilità di cattura di una particella nelle n sezioni consecutive, ovvero l'efficienza globale del filtro, come

$$\eta = p^n = (1 - q)^n \simeq 1 - \left(1 - \frac{\lambda_{prob}}{n}\right)^n \simeq 1 - e^{-\lambda_{prob}} \quad (3.3.6)$$

dove si è utilizzata la proprietà matematica fondamentale

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{\lambda_{prob}}{n}\right)^n = e^{-\lambda_{prob}}.$$

È immediato ricavare λ_{prob} :

$$\lambda_{prob} = np = \left(\frac{l}{\Delta l}\right) \cdot \left(\frac{sw\delta_{bz}}{S_{in}}\right) = \left(\frac{l}{\Delta l}\right) \cdot \left(\frac{sw\Delta l}{S_{in}v}\right) = \frac{slw}{S_{in}v} = w\frac{S}{Q} \quad (3.3.7)$$

dove $S = sl$ è la superficie di raccolta totale e $Q = S_{in}v$ è la portata d'aria.

Spiegazione con piastre Calata nel caso di interesse per il presente lavoro di tesi, ovvero a un filtro dove la superficie di cattura è una piastra piana, la descrizione offerta da White [6] può essere in parte semplificata come segue. In riferimento alla Figura 3.8, si consideri una porzione infi-

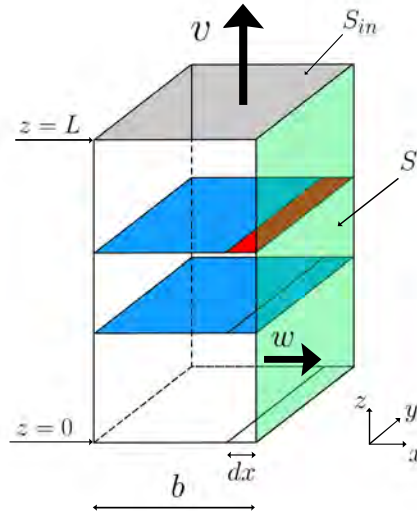


Figura 3.8: Rappresentazione delle variabili richiamate dal modello di Deutsch (spiegazione con piastre).

nitesima dx (equivalente al δ_{bz} di prima) del lato b . Come prima, sia w la

velocità di migrazione verso la piastra di cattura (verso x) e v la velocità del fluido (verso z). In questo modo $dx = w dt$ e $dz = v dt$. Per l'ipotesi (4) di Deutsch, tutte le particelle $dN(z)$ all'interno dello strato individuato dal segmento dx (indicato in rosso in figura) sono catturate. Analoga alla (3.3.3)

$$\frac{dN(z)}{N(z)} = -\frac{dx}{b} = -\frac{w dt}{b} = -\frac{w \frac{dz}{v}}{b} \quad (3.3.8)$$

Integrando in dz tra 0 e L

$$\int_0^L \frac{dN(z)}{N(z)} = -\int_0^L \frac{w dz}{vb} \Rightarrow N_L = N_0 e^{-\frac{wL}{vb}} \quad (3.3.9)$$

da cui, osservando che $Volume = S \cdot b = S_{in} \cdot L$, si può riscrivere la (3.3.9)

$$N_L = N_0 e^{-\frac{wS}{vS_{in}}} \quad (3.3.10)$$

e ricavare il rendimento analogamente al caso precedente e con medesimo risultato

$$\eta = \frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-w \frac{S}{Q}} \quad (3.3.11)$$

La procedura seguita in questo caso, non apporta informazioni aggiuntive ma consente di calare la teoria nel caso del prototipo disponibile e di dare un significato fisico all'esponente, il λ_{prob} del caso precedente. Osservando in che rapporto stanno le velocità e le superfici per cui esse sono moltiplicate, si intuisce come l'esponente sia il rapporto tra il flusso che si dirige verso la superficie di raccolta e il flusso longitudinale (verso z) che porterebbe le particelle ad uscire dal filtro: tanto più il primo termine cresce, tanto più incidente è il flusso verso la superficie di cattura, tanto maggiore sarà il rendimento per riduzione dell'intero esponenziale.

Efficienza di cattura in funzione della dimensione delle particelle

Da quanto emerso al Paragrafo 3.2, è possibile affermare che le particelle molto grandi sono catturate con elevata facilità. Al decrescere della dimensione delle particelle, la cattura diviene sempre più complessa perché, come descritto al Paragrafo 3.2.2, la quantità di carica che raccolgono durante il moto è inferiore e quindi, non essendo applicabile una forza di tipo coulombiano tale da deformare le traiettorie in modo sostanziale, la loro dipendenza dalla fluidodinamica è tanto più importante quanto inferiore è la loro inerzia ovvero, per densità comparabili, quanto inferiore è la loro dimensione. A

dimostrazione di ciò si riporta la Figura 3.9 dove sono raffigurati, in funzione al loro diametro, i percorsi e i punti di concentrazione delle particelle in un filtro monostadio wire-plate calcolati tramite il software FEM FLUENT[®].

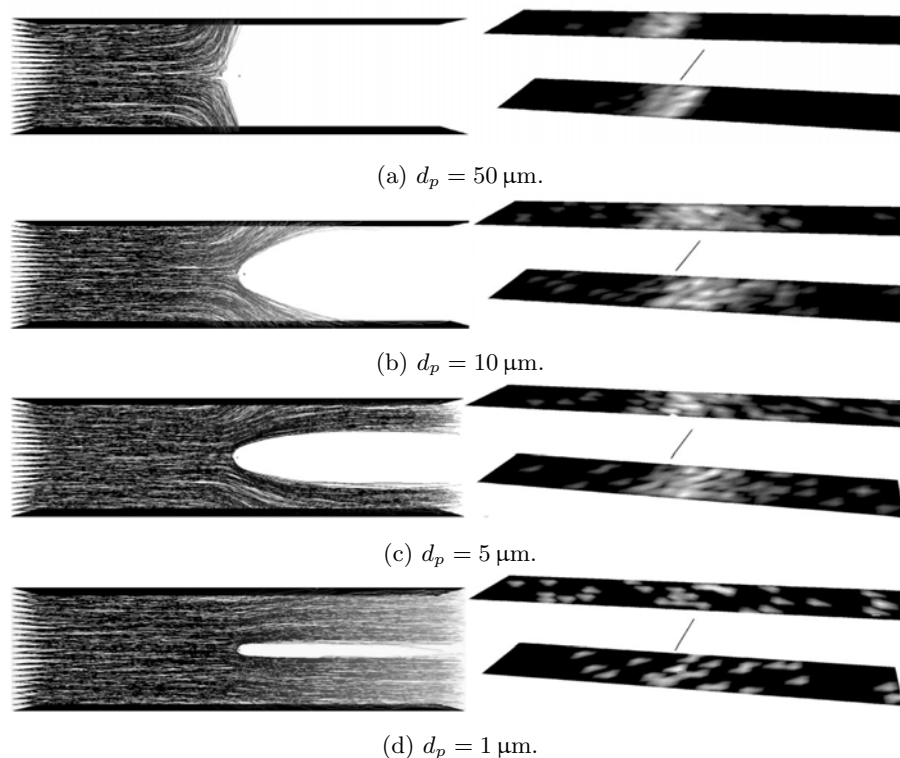
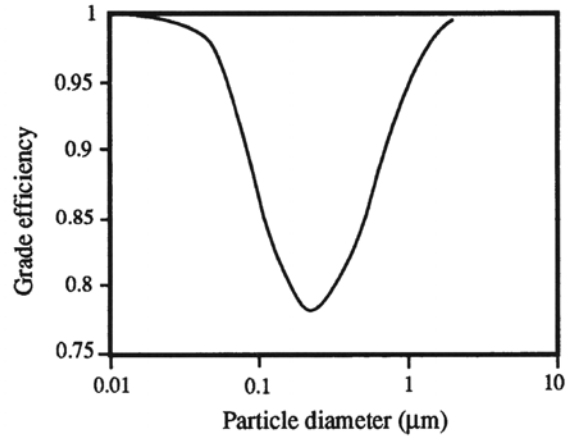


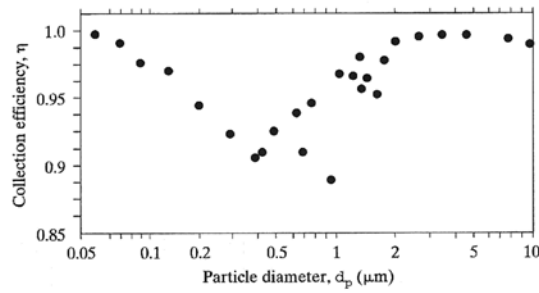
Figura 3.9: Percorso (sinistra) e concentrazione sulle pareti di cattura (destra) di particelle di diverso diametro d_p alla velocità dell'aria fissata a 1 m/s. Risultato ottenuto numericamente con FLUENT (Fonte: [7, 9])

Contrariamente al meccanismo di carica denominato *field charging*, tuttavia, la *diffusion charging* ha un effetto tanto più evidente quanto inferiore è il diametro delle particelle sospese. Hinds, Benitez e McCain [8, 10, 95] analizzarono il problema e dedussero che l'efficienza dovesse avere un minimo per una certa classe di particelle secondo quanto emerge dal grafico in Figura 3.10a e 3.10b, riproposto nei due contributi distinti con assi non logaritmici in Figura 3.10c.

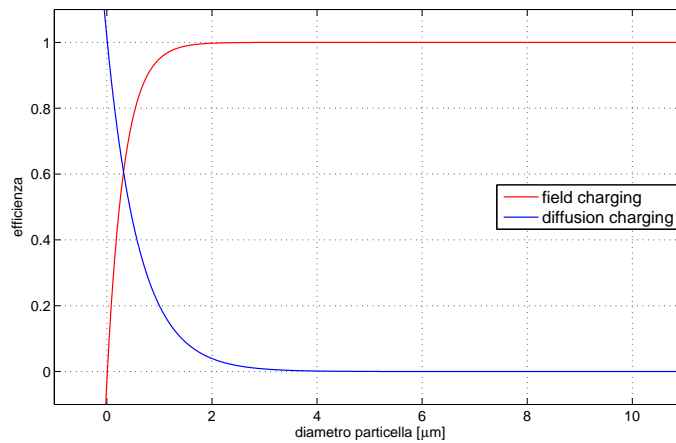
Va osservato come i diametri di interesse per l'Indoor Air-Cleaning, compresi tipicamente tra 0.1 e 3 μm , siano i più critici per la cattura e la sua modellizzazione. Inoltre, il valore di riferimento della normativa pari a 0.4 μm è prossimo al minimo dell'efficienza ottenibile come si vede in Figura 3.10a.



(a) Risultato tratto da [10].



(b) Risultato tratto da [95].



(c) Interpolazione dei risultati precedenti. Si noti che non è stato considerato il termine logaritmico nell'interpolazione della diffusion charging.

Figura 3.10: Efficienza in funzione del diametro delle particelle: la 3.10c rappresenta i due contributi distinti ottenuti come interpolazione dei risultati proposti in [10].

Modello globale

Con i risultati ricavati al Paragrafo 3.2 è possibile sostituire il valore di w con la relazione (3.2.15) e sostituire al suo interno la (3.2.9) e la (3.2.10) rispettivamente per la carica dovuta a field e diffusion charging secondo quanto affermato da Benitez e Hinds ed esprimibile con la (3.2.11). Si ottiene:

$$\begin{aligned}
 \eta &= 1 - e^{\left[-w \cdot \frac{S}{Q}\right]} \\
 &= 1 - e^{\left[-\left(q_{field} + q_{diff}\right) \frac{E_{ps} C_c}{3\pi\mu d_p} \cdot \frac{S}{Q}\right]} \\
 &= 1 - e^{\left[-\left(\left(\frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \pi \varepsilon_0 d_p^2 E_{cor}\right) + \left(\frac{d_p kT}{2K_E e} \log\left[1 + \frac{\pi K_E d_p c_i e^2 N_i t}{2kT}\right]\right)\right) \frac{E_{ps} C_c}{3\pi\mu d_p} \cdot \frac{S}{Q}\right]}
 \end{aligned} \tag{3.3.12}$$

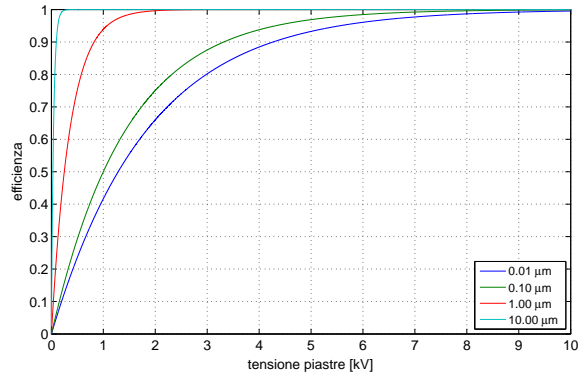
dove con E_{cor} si indica il campo di ionizzazione per effetto corona e con E_{ps} il campo di cattura tra le piastre.

I risultati che si ottengono per diversi diametri di particelle al variare della tensione applicata alle piastre e viceversa (si parla di tensione sulle piastre in quanto responsabile del campo elettrico presente nello stadio di cattura) sono riportati in Figura 3.11 e 3.12.

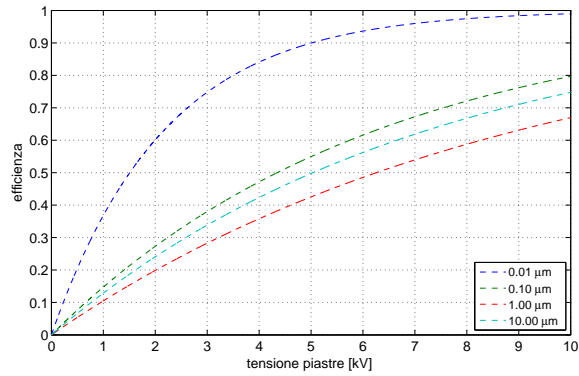
Come si vede chiaramente, i risultati sono in accordo con quanto affermato in [10] e in [95]: mentre l'efficienza dovuta a field charging cresce al crescere del diametro, la diffusion per i diametri considerati ha un minimo per le particelle da 1 μm ; particelle da 0.1 e 10 μm sono caratterizzate da rendimenti simili e per questo si nota l'effetto del termine logaritmico; le particelle da 0.01 μm , ovvero le più piccole considerate, sono quelle dove l'efficienza è massima, in accordo con i risultati sperimentali.

Altri modelli presenti in letteratura

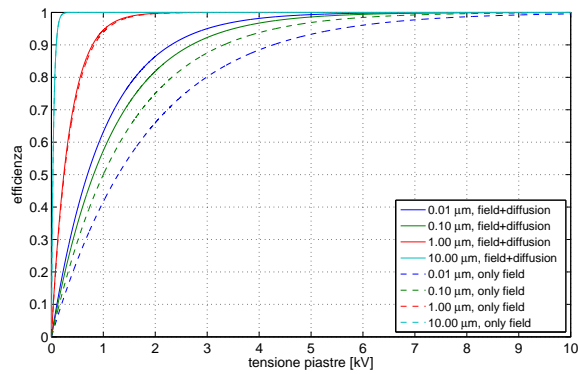
Una delle ipotesi del modello di Deutsch-Anderson è l'assenza di fenomeni non-ideali (si veda il Paragrafo 3.2.4) che allontanano i risultati sperimentali dal modello teorico; non di rado il modello relativo alla sola field charging ha presentato errori di un fattore 2 [96, 97]. Tra i miglioramenti proposti, il più supportato è l'utilizzo di una *velocità di migrazione "effettiva"* calcolata empiricamente in base al tipo di gas e particelle in sostituzione alla velocità di migrazione appena individuata; alcuni valori tipici sono riportati in [96]. Questa è un parametro globale e, diversamente dalla precedente, non dipende dalla singola particella. Studi successivi hanno comunque dimostrato come l'aleatorietà di alcuni degli eventi non-ideali comporti anche in questo caso un'incertezza non trascurabile [98].



(a) Solo *field charging*.

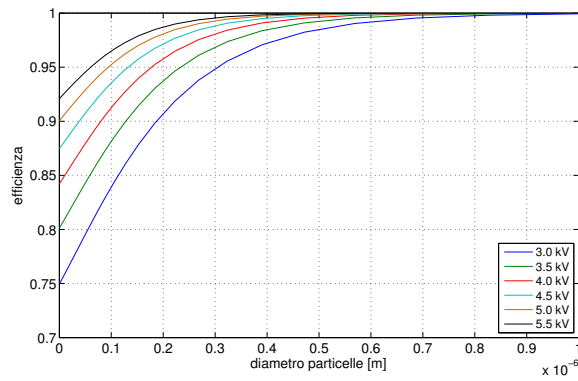


(b) Solo *diffusion charging*

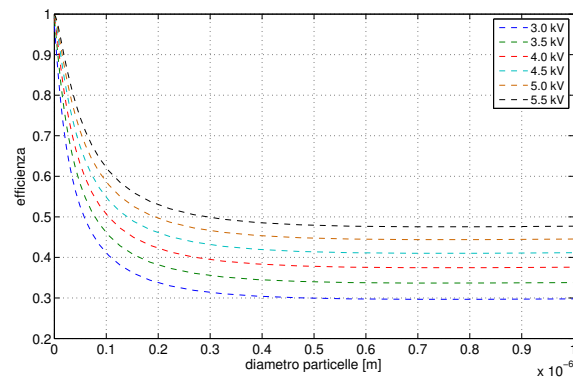


(c) Somma dei due contributi field e diffusion confrontati con la sola field charging.

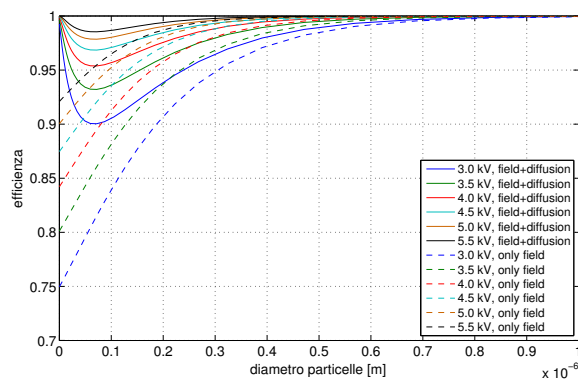
Figura 3.11: Efficienza di cattura in funzione del potenziale applicato alle piastre calcolata con la relazione (3.3.12) per diversi diametri di particelle (in distribuzione logaritmica).



(a) Solo *field charging*.



(b) Solo *diffusion charging*



(c) Somma dei due contributi field e diffusion confrontati con la sola *field charging*.

Figura 3.12: Efficienza di cattura in funzione del diametro delle particelle calcolata con la relazione (3.3.12) per diversi potenziali applicati alle piastre.

Seppur basato sulla teoria fin qui esposta, un approccio alternativo fu presentato da Matts e Ohnfeldt che per primi compresero il grande limite del modello di Deutsch e proposero una soluzione molto pratica: l'efficienza calcolata con Deutsch-Anderson doveva dipendere da un fattore costante $k < 1$ in modo da considerare tutti gli effetti che si riscontrano nella realtà. Si otteneva quindi

$$\eta = 1 - e^{-w\left(\frac{S}{Q}\right)^k} \quad (3.3.13)$$

Nella pratica $k = 0.4 \div 0.6$ fornisce risultati soddisfacenti. La difficoltà di determinazione di k e l'errore comunque non nullo fecero spesso propendere per il modello originale di Deutsch, considerando una semplice costante moltiplicativa come correzione.

Theodore [97] propose un modello più complesso e basato su tecniche statistiche. Anziché utilizzare una sola equazione globale, suddivise le particelle in classi ed assegnò ad ognuna un'equazione descrittiva per l'efficienza a partire da condizioni e proprietà come dimensione, posizione all'ingresso, frazione della carica di saturazione acquisita, ecc. In questo modo le stesse forze agenti sulle particelle vengono definite in maniera più pertinente. A rendere il complicato modello definitivamente sconveniente sono tuttavia le forti ipotesi:

- Una particella che raggiunge la parete di raccolta è considerata definitivamente catturata. In altre parole non sono considerati i fenomeni indesiderati, uno tra tutti la reimmissione.
- Le particelle seguono percorsi predefiniti durante il primo step. Ciò significa che le fluttuazioni della componente laterale della velocità di migrazione che si vengono a presentare nei diversi step risolutivi sono completamente trascurati.

Quello che il modello propone è un limite superiore di efficienza, valore che per Deutsch-Anderson era sempre pari a 1. La scarsa utilità di tale dato in assenza di informazioni sui fenomeni non-ideali porta a preferire nuovamente un modello più semplice ed analitico, seppur con le stesse problematiche.

Capitolo 4

SIC S.r.l.: azienda, progetto e prototipo

4.1 L'azienda

SIC (Sistemi Integrati di Condizionamento) S.r.l. è una Società Unipersonale di Cologna Veneta (VR) che progetta, produce e commercializza macchine e unità per impianti di condizionamento, riscaldamento e trattamento dell'aria in ambienti residenziali (abitazioni), commerciali (negozi, uffici, alberghi) e industriali. SIC è attiva sia sul mercato nazionale che su quello estero ed è in particolare presente in partnerships con marchi di primaria importanza nel panorama europeo. La spinta del mercato verso dispositivi a basso consumo energetico e basso impatto ambientale hanno spinto aziende come SIC, operanti in settori con margini di miglioramento notevoli, ad investire in prodotti cosiddetti “*a recupero energetico*”: prodotto esemplare in tal senso è lo scambiatore entalpico a recupero “totale” che permette di utilizzare non solo il calore sensibile, ma anche il calore latente contenuto nell'umidità dell'aria in espulsione¹. Con lo stesso obiettivo, SIC realizza dispositivi a *recupero termodinamico* e *pompe di calore* ad alta efficienza. Per disporre di prodotti che, oltre ad un contenuto consumo energetico, garantiscano anche il rispetto del comfort secondo normativa, SIC si occupa anche di *trattamento dell'aria* e *ventilazione* al fine di mantenere condizioni uniformi di temperatura, umidità e purezza dell'aria.

¹I recuperatori entalpici, detti anche ERV (Energy Recovery Ventilation), si distinguono dai classici HRV (Heat Recovery Ventilation) per la capacità non solo di realizzare una ventilazione controllata, ma anche di riscaldare, raffreddare, deumidificare.

4.2 Il progetto

Il presente lavoro di tesi si inserisce in un progetto di ricerca di SIC S.r.l. in qualità di soggetto committente e S.G.E. (Società Generale di Elettronica S.r.l. Unipersonale) come soggetto commissionario. Tale progetto, dal titolo *“Studio, progettazione e realizzazione di una nuova tecnologia di filtrazione e decontaminazione elettrostatica dell’aria totalmente priva di produzione di ozono e NO_x per il miglioramento dell’Air Indoor Quality (AIQ) negli edifici non residenziali, con efficienze di filtrazione di classe D (secondo la normativa UNI 11254) con filtri monostadio e successivamente di classe A con moduli bistadio”*, andrà a sua volta inserito in un progetto più grande di progettazione e realizzazione di un sistema ERV ad alto rendimento con obiettivo l’ottimizzazione di un dispositivo che concili risparmio energetico e miglioramento della qualità dell’aria secondo le normative vigenti attraverso l’utilizzo di un sistema di filtrazione, decontaminazione, ricambio e scambio termico dell’aria.

Come già riportato in Introduzione al presente lavoro, la filtrazione elettrostatica è considerata il metodo più efficiente ed efficace per la purificazione dell’aria in quantità importanti: garantisce una cattura quasi totale del particolato con un basso costo energetico conseguente alla ridotta perdita di carico. Tuttavia le alte tensioni necessarie al funzionamento del filtro generano ozono, prodotto inquinante e dannoso specie se introdotto in ambienti interni con un ridotto ricambio d’aria. Lo studio si è quindi concentrato sull’individuazione di geometrie, materiali e grandezze elettriche da utilizzare per ridurre l’ozono prodotto mantenendo un’efficienza di cattura a livelli richiesti da norma e competitivi nel mercato.

4.3 Il prototipo e gli strumenti utilizzati

4.3.1 Filtro elettrostatico multistadio

Elemento principale del sistema, il precipitatore elettrostatico di tipo bistadio è stato realizzato per lo studio di soluzioni al fine di limitare l’emissione di ozono per mantenere una concentrazione totale inferiore a 50 ppb e livelli di efficienza media per particelle di dimensione pari a $0.4 \mu\text{m}$ (come da normativa, vedi 3.1.1) a valori inizialmente compresi tra l’80% e il 90% (classe D) con l’obiettivo di superare il 99.5% (classe A) in una seconda fase del progetto.

In dettaglio, il filtro progettato e realizzato da SIC è caratterizzato da:

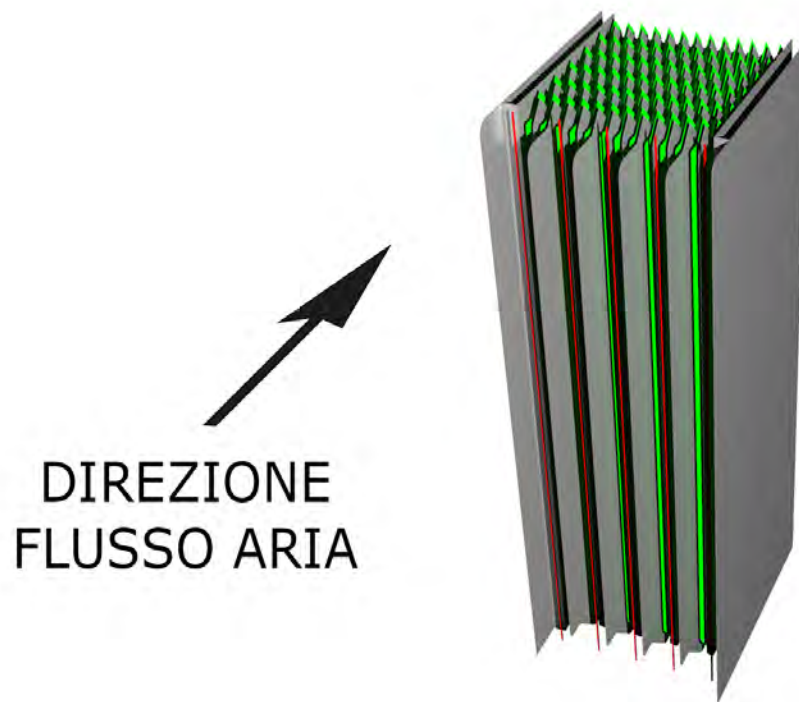


Figura 4.1: Rappresentazione grafica del prototipo utilizzato in tale studio. A sinistra è indicata la direzione del fluido.

- uno **stadio di ionizzazione** dove sono presenti elettrodi filiformi (di colore rosso in Figura 4.1) portati ad alta tensione DC.
- uno **stadio di captazione e filtrazione** dove le particelle cariche nella sezione precedente vengono respinte dal campo creato dalla differenza di potenziale tra le piastre di repulsione (di colore verde in Figura 4.1) e le piastre di raccolta disposte in modo alternato come si vede nei disegni tecnici riportati in Appendice A.

Elettrodi di ionizzazione Sono filamenti del diametro sull'ordine dei 100 micrometri di materiale conduttore ai quali si applica il massimo potenziale del sistema, per questo talvolta si parla di "elettrodo stressato" o "elettrodo di ionizzazione" qualora il campo sia tale da ionizzare l'aria circostante. Nel prototipo in analisi il potenziale è stato imposto manualmente mediante un potenziometro a valori $V_1 = 6 \div 9$ kV: al di sopra dei 10 kV il campo elettrico che si viene a creare è tale da superare, nelle condizioni ambientali presenti durante le varie misurazioni, la rigidità dielettrica dell'aria e portare alla

scarica tra elettrodo e piastre a terra. Tale fenomeno è assolutamente indesiderato sia per le importanti sollecitazioni elettromeccaniche che si vengono a creare, sia per le perturbazioni elettriche che provocano il malfunzionamento delle apparecchiature elettroniche di misura (per prevenire eventuali guasti si è provveduto a realizzare una separazione galvanica tra ingresso e uscita dell'interfaccia di gestione dei segnali con schede commerciali che ripropongono in uscita un'immagine del segnale processato in ingresso), sia perché il controllo di un ESP, realizzato per mantenere condizioni di non-scarica, in caso di annullamento della differenza di potenziale stacca l'alimentazione per un breve periodo rendendo inattivo il filtro (il periodo di tempo e la tecnica utilizzata per staccare varia in realtà da controllo a controllo). Durante il presente studio sono stati utilizzati elettrodi in tungsteno con diametro pari a 0.16 mm, 0.2 mm (con piastre piene) e 0.3 mm (con piastre forate). In Figura 4.2 e in Figura 5.26b sono visibili gli elettrodi e i sistemi di ancoraggio alla struttura portante.

Piastre di raccolta Sono piastre metalliche poste a potenziale nullo così da generare un campo elettrostatico che attragga le impurità presenti nell'aria una volta che si siano caricate grazie al flusso di cariche uscenti dall'elettrodo di ionizzazione: tali impurità si accumulano sulle piastre e devono essere pertanto rimosse periodicamente così da mantenere i livelli di prestazioni e di igiene del filtro. Nel prototipo si sono utilizzate piastre in alluminio dello spessore di 0.5 mm. La continuità elettrica tra le piastre è assicurata da perni che fungono anche da sostegno per fornire robustezza alla struttura: tali perni, passando attraverso fori realizzati appositamente sulle piastre (Figura 5.26), sono sede di una riduzione di superficie utile di raccolta e di un aumento della perdita di carico, quindi di un peggioramento generale delle prestazioni. Le piastre di tipo 2, come evidenziato in Figura A.1 e Figura A.2, hanno una dimensione maggiore rispetto alle altre così da dividere il filtro in cinque sezioni identiche, ognuna costituita da un filamento e uno stadio di filtrazione². Su un lato parallelo alla direzione del fluido presentano una configurazione a dente di sega, utile nel caso di ionizzazione con elettrodo alimentato negativamente, ininfluenza se non peggiorativa nel caso di alimentazione nulla o di polarità positiva (si veda il Paragrafo 2.3.3).

²In verità, per il distanziamento tra l'involucro e le piastre più esterne necessario per sicurezza, i cinque blocchi presentano posizioni dell'elettrodo rispetto alla mezzeria verticale leggermente diverse: esiste tuttavia una simmetria rispetto al blocco centrale.

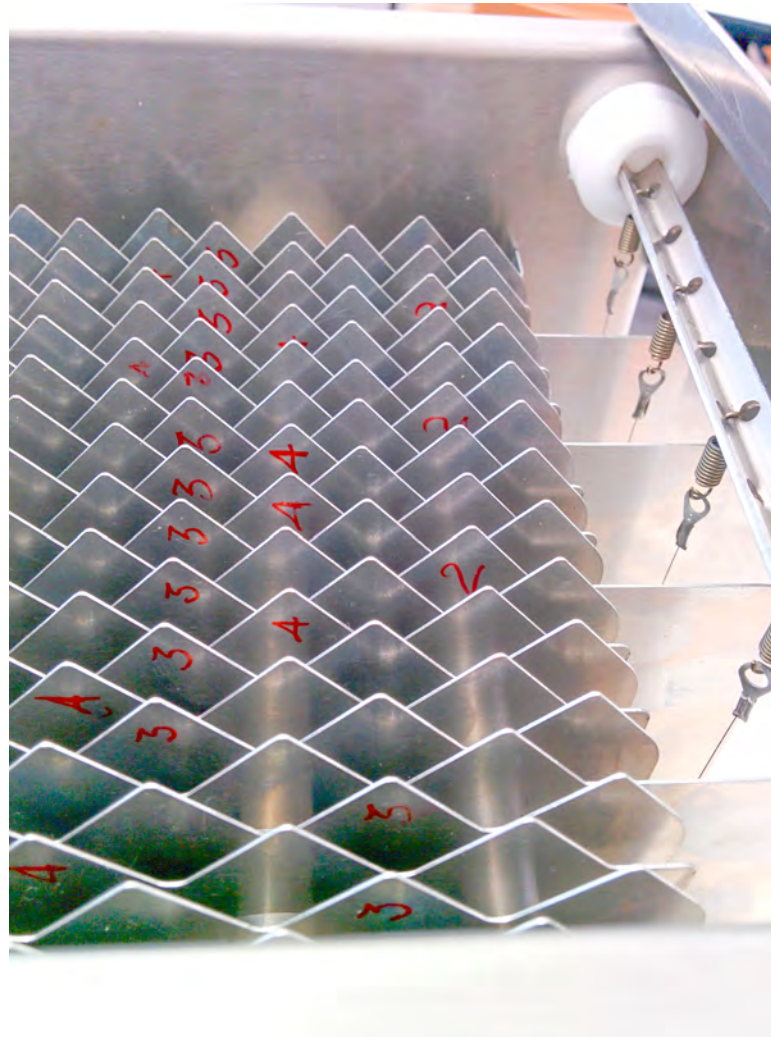


Figura 4.2: Foto scattata a lato del filtro. Sono visibili le piastre piene dentate (numerate a seconda del tipo in riferimento alla A.2) e gli elettrodi con il proprio sistema di aggancio alla struttura.

Piastre di repulsione Sono piastre metalliche poste ad un potenziale inferiore rispetto al potenziale dell'elettrodo ma dello stesso segno. Interposte tra due piastre a potenziale nullo, hanno la funzione di respingere le particelle verso le piastre di raccolta, favorendone la cattura: il potenziale concorde permette infatti di realizzare un campo equiverso al campo creato dall'elettrodo filiforme (si veda la Figura 6.3). Al filamento metallico anche come elettrodo di repulsione si sono preferite le piastre per la minore produzione di ozono dovuta a geometrie non in grado di produrre campi eccessivamente elevati, per la maggiore robustezza, maggiore durata (praticamente infinita) e maggiore uniformità di campo che favorisce la cattura. L'utilizzo di perni/colonnine come soluzione per garantire rigidità meccanica e continuità elettrica è applicato anche in questo caso. Le geometrie presenti nei prototipi utilizzati sono visibili in Figura 4.3 (i disegni tecnici in Figura A.2 e Figura A.3): la piastra piena (a destra) è analoga alle piastre di raccolta con dente di sega sfalsati così da evitare scariche rispettivamente perno-piastra e piastra-piastra essendo il campo elettrico più elevato nella zona più appuntita, mentre nella versione forata (a sinistra) la dentatura laterale è stata rimossa e sono stati effettuati dei fori a disposizione triangolare equilatera. La tensione operativa per tali piastre è circa la metà della tensione applicata all'elettrodo di ionizzazione, circa $3 \div 5$ kV.

4.3.2 Generatore di alta tensione DC

Per il funzionamento del filtro sono necessarie due tensioni continue: una tensione V_1 da applicare all'elettrodo filiforme e una tensione $V_2 < V_1$ da applicare alle piastre di repulsione. L'alimentazione del filtro ad alta tensione continua avviene connettendo il sistema alla rete BT e trattando opportunamente le grandezze elettriche con convertitori statici e trasformatori, in particolare tramite un **trasformatore elevatore** con rapporto spire pari a 10 pilotato da un oscillatore ad una frequenza fissa di 30 kHz tramite mosfet in grado di produrre tensioni di ± 15 kV DC con passo 10 V e corrente massima 5 mA. Per rendere l'uscita insensibile alle variazioni di tensione in ingresso mantenendo però la possibilità di variarne manualmente il valore con l'utilizzo di due potenziometri, il prototipo è provvisto di un **alimentatore stabilizzato** con frequenza di switching pari a 150 kHz e con range operativi di $4 \div 40$ V per la tensione e una corrente massima di 3 A alimentato anch'esso dalla rete di BT tramite un trasformatore abbassatore provvisto di un raddrizzatore monofase a diodi. Il circuito finora descritto, compren-

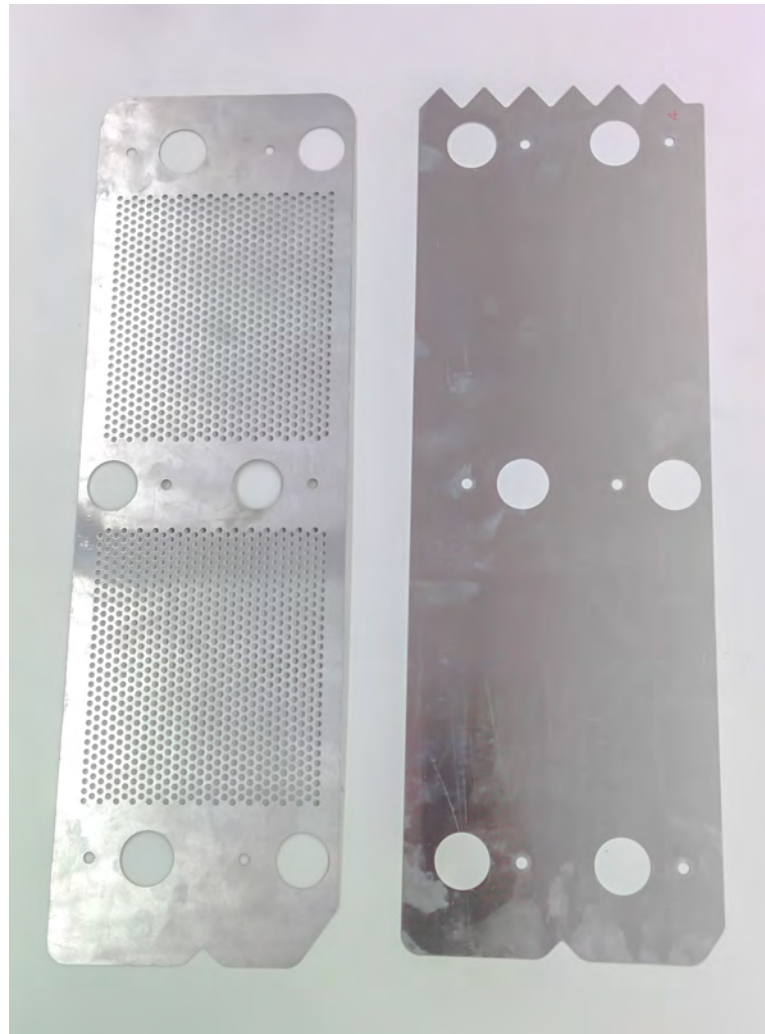


Figura 4.3: Foto delle piastre di repulsione utilizzate nei diversi prototipi: a sinistra una piastra forata, a destra una piastra piena e dentata.

sivo di trasformatore, alimentatore stabilizzato e circuito di risonanza LC (cioè fino ai blocchi centrali dello schema a blocchi in Figura 4.4), sarebbe in grado di raggiungere a secondario del trasformatore soltanto i 5000 V, non sufficiente per l'alimentazione di un filtro elettrostatico. Risulta quindi necessario utilizzare un moltiplicatore di tensione (diodi e condensatori) in grado di produrre una tensione continua di valore fino a 4 volte il valore efficace a monte.

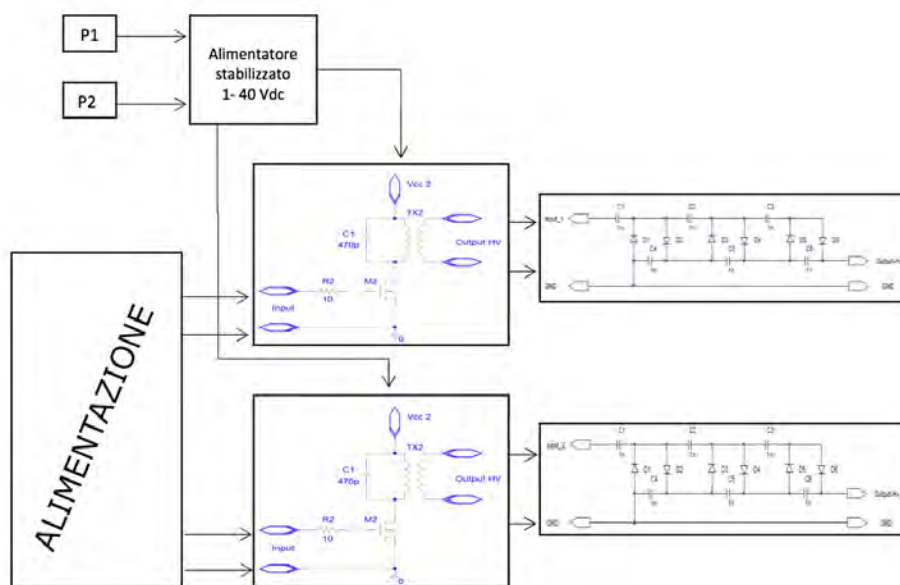


Figura 4.4: Schema a blocchi del sistema di alimentazione del prototipo: P1 e P2 indicano i due potenziometri che agiscono sullo switcher. I blocchi a destra rappresentano i moltiplicatori di tensione.

4.3.3 Cabina e Cella

La cabina utilizzata per le misurazioni, in termini di efficienza di cattura e generazione di ozono, è una cella usualmente utilizzata per analisi biologiche: è infatti commercializzata per studiare ambienti con elevato ricircolo d'aria, pressurizzati o depressurizzati, con scambio di gas controllato da tubature in ingresso e in uscita. Il ricircolo d'aria è garantito da un ventilatore centrifugo azionato da un motore asincrono (0.8 kW a 230 V e 50 Hz) e operante a portata costante di 630 m³/h con una pressione statica massima di 580 Pa; è possibile aumentare la portata fino a 2000 m³/h ammettendo una perdita di pressione statica che assume in tal caso un valore massi-

mo di 300 Pa³. L'uniformità cinetica dell'aria sulla sezione d'ingresso del filtro è realizzata con un pannello appositamente posto appena a monte. La presenza di un impianto di climatizzazione permette sperimentazioni in tutte le condizioni di temperatura e umidità: l'impianto è composto da un compressore/condensatore generatore di micro-goccioline ad ultrasuoni da 700 W e un evaporatore posti appena a monte del ventilatore centrifugo per il controllo dell'umidità e da una resistenza elettrica da 32 Ω (\simeq 1.5 kW con alimentazione a 220 V) per il riscaldamento; per uniformare la temperatura in corrispondenza del filtro è posta una batteria alettata percorsa d'acqua in grado da realizzare una sorta di "volano termico" e mantenere quindi la temperatura dell'aria nel filtro e nel circuito a valori prestabiliti. Importante da evidenziare è come il sistema di umidificazione sia posto a monte del ventilatore, cioè nella parte bassa della cabina, così da sfruttare la depressione ivi presente per facilitare l'immissione di aria umida nel circuito, mentre il sistema di deumidificazione e controllo fine dell'umidità (necessario essendo la regolazione dell'umidificatore molto grossolana) è posto a valle del ventilatore, dopo il filtro, sulla parte alta della cabina dov'è presente un sistema batteria fredda-calda.

La cabina è realizzata quasi interamente in alluminio con pannelli di tipo "sandwich" per assicurare una buona coibentazione. Con riferimento alla rappresentazione di Figura 4.5, sul lato sinistro è inserito il filtro posto esattamente sopra alla sezione di mandata del ventilatore e separato da questo solo dalla batteria di riscaldamento e dal pannello per uniformare il flusso d'aria (visibili nell'immagine in alto a sinistra). A destra situa la camera di accesso per l'utente dove sono disposti i sensori e dov'è possibile l'inserimento di strumentazione aggiuntiva. Per un miglior accesso alla zona di sistemazione del filtro, lo sportello in alluminio anodizzato, analogo al resto della struttura, è sostituibile con un pannello in policarbonato antistatico trasparente opportunamente forato e sigillato tale da permettere di avere sia una buona visibilità su quanto avviene all'interno del vano contenente il filtro, sia l'accesso alle sonde per la strumentazione (contatore di particelle, anemometro, ecc.) come visibile in Figura 4.6.

³Per controllare la pressione interna della cella in modo da evitare ingressi o uscite indesiderate d'aria, la cabina è provvista di un manometro differenziale. Nel caso di applicazioni non biologiche, il problema principale potrebbe essere l'ingresso di aria che andrebbe a falsare i valori di efficienza di filtrazione misurando effettivamente "arie diverse": la regolazione della sovra-pressione avviene azionando delle valvole a farfalla appositamente inserite nella struttura.

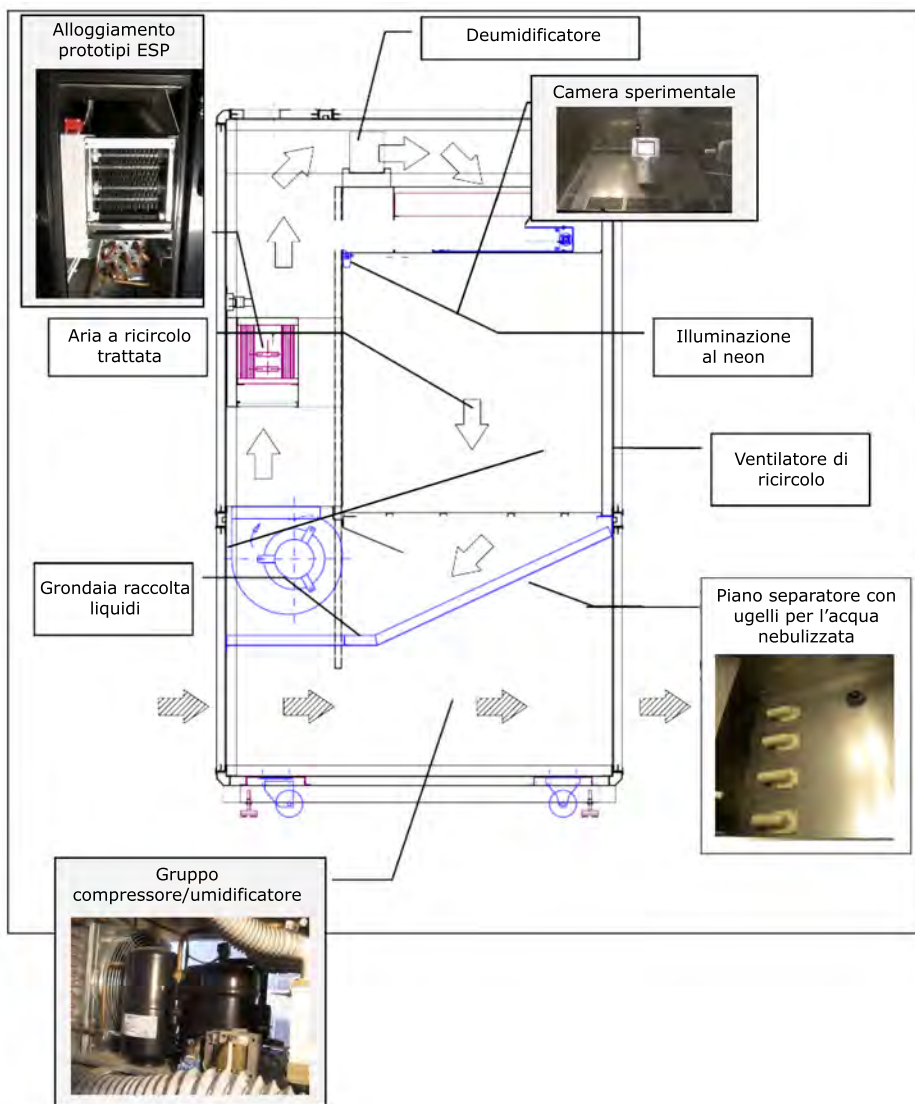


Figura 4.5: Rappresentazione semplificata della cabina con indicazione della direzione dell'aria e dei principali componenti.



Figura 4.6: Esempio di strumentazione (anemometro a filo caldo) inserita nel vano del filtro attraverso il pannello in policarbonato trasparente.

4.3.4 Analizzatore di Ozono

La misura della concentrazione di ozono si basa sulla tecnica spettrofotometrica dell'assorbimento, da parte delle molecole di ozono, di radiazioni ultraviolette di lunghezza d'onda pari a 254 nm. Una lampada al mercurio, costruita in maniera tale da emettere prevalentemente radiazioni ultraviolette con lunghezze d'onda pari a 254 nm, viene posta in una cella alternativamente riempita di gas da analizzare e gas privo di ozono: un detector permette di valutare le intensità della luce passata attraverso il gas in analisi e il gas campione e di calcolarne il rapporto (sempre inferiore a 1 poiché in presenza di ozono si verifica un assorbimento che riduce l'intensità misurata). In base alla legge di Lambert-Beer, qui di seguito riportata, è possibile determinare la concentrazione di O_3 nel gas:

$$O_3[ppm] = \frac{L}{a \cdot I} \cdot \frac{T}{273K} \cdot \frac{29.92Hg}{P} \cdot \log \frac{I}{I_0} \cdot 10^6 \quad (4.3.1)$$

dove:

- a è il coefficiente di assorbimento⁴
- L è la lunghezza del percorso ottico

⁴Quantifica la caratteristica propria dell'ozono di assorbire radiazioni a 254 nm. Il valore più utilizzato in letteratura è $a = 308 \text{ cm}^{-1} \text{ atm}^{-1}$.

- T è la temperatura del gas campione in Kelvin
- P è la pressione in Hg
- I e I_0 indicano rispettivamente l'intensità della luce passata attraverso il gas in analisi e il gas campione

Lo strumento utilizzato per tale funzione è l'analizzatore di ozono HORIBA APOA-370 il quale aspira aria dal fondo della camera di sperimentazione (Figura 4.7) e fornisce un valore di concentrazione con precisione pari a 0.1 ppb.

4.3.5 Sensore di temperatura e umidità

La cabina è provvista di un PLC in grado di controllare parametri ambientali quali temperatura e umidità. Si è ritenuto opportuno inserire un sensore ulteriore in grado di misurare tali grandezze in modo tale da avere sensori appositi per l'esportazione dei risultati nonché una ridondanza di misurazioni. Per la misura si sono utilizzate sonde Carel (Figura 4.7) presenti sul mercato e tipicamente utilizzate in siti per applicazioni alimentari come la stagionatura, dove temperatura e umidità sono parametri che devono essere accuratamente monitorati.

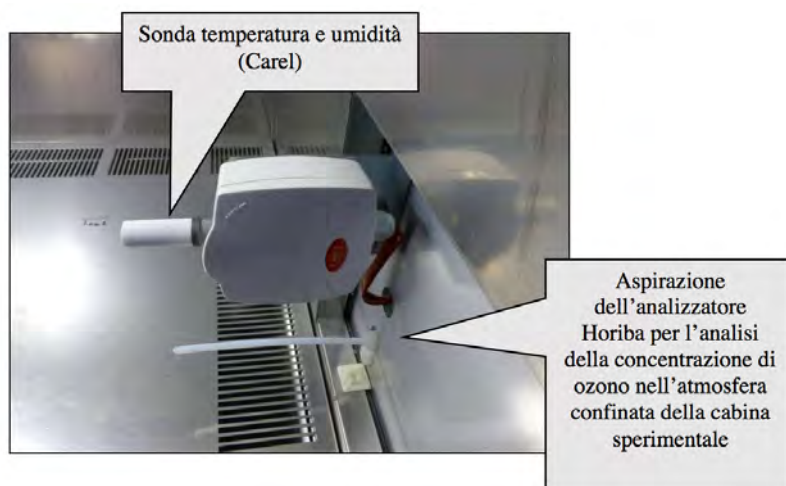


Figura 4.7: Sensori di temperatura e umidità Carel. In basso, il punto di aspirazione dell'analizzatore di ozono.

4.3.6 Interfaccia Gestione Segnali e Data Logger

Tutta la strumentazione indicata finora è in grado di acquisire dati e inviare segnali in forma analogica. Per rilevare, memorizzare e analizzare contemporaneamente tutti i dati è necessario un'Interfaccia Gestione Segnali (IGS) in grado di sincronizzare tutti gli ingressi. A questo livello i segnali vengono condizionati e tradotti in segnali di tensione misurabili dal data logger: in ordine

1. Tensione V_1 di alimentazione dell'elettrodo filiforme. Tale tensione viene ridotta di un fattore 1000 cosicché a 1000 V sull'elettrodo corrisponda una misura al data logger di 1 V.
2. Tensione V_2 di alimentazione delle piastre di repulsione. Tale tensione viene ridotta di un fattore 1000 cosicché a 1000 V sull'elettrodo corrisponda una misura al data logger di 1 V.
3. Corrente uscente dagli elettrodi carichi positivamente. La corrente viene trattata da un trasduttore in modo che ad 1 μA corrisponda una tensione di 1 mV.
4. Concentrazione di ozono. La misura è già fornita come segnale di tensione.
5. Umidità. La misura è già fornita come segnale di tensione.
6. Temperatura. La misura è già fornita come segnale di tensione.

Il data logger (il modello utilizzato è un Power Analyzer Agilent 34970A) analizza quindi i segnali di tensione generati dall'IGS e li converte in formato digitale per poter essere inviati ad un software tramite interfaccia USB dov'è possibile visualizzare e memorizzare i risultati real-time.

4.3.7 Contatore ottico di particelle - OPC

Strumento stand-alone non collegato all'IGS, lo strumento utilizzato è il contatore laser Lighthouse Handheld 3016, adatto a misure di qualità dell'aria in camere bianche: tale caratteristica si è rivelata talvolta limitante essendo l'ambiente di misura e la tipologia di misura stessa ben diversi da una camera bianca⁵. Un contatore ottico concorrente di pari prestazioni

⁵Il Lighthouse ha un fondo scala pari a 10^6 particelle per classe di dimensioni. In alcune circostanze, probabilmente dovute ad emissioni contingenti di particolato nella zona industriale dove situa SIC, il fondo scala veniva raggiunto in meno di 10 minuti di misurazione.

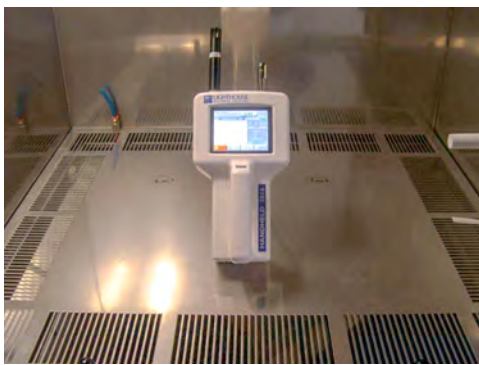


Figura 4.8: Foto della cabina presente in SIC durante una misurazione. In primo piano è ben visibile la strumentazione utilizzata per le misure, in secondo piano la cabina con la camera di sperimentazione illuminata.

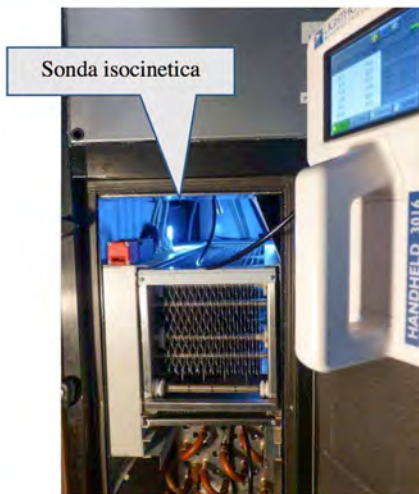
(Met One) ma con un fondo scala leggermente più permissivo era stato considerato in fase di acquisto, ma ad esso è stato preferito il Lighthouse per la possibilità offerta di misurare anche temperatura e umidità. Importante da sottolineare è come test analoghi effettuati con i due diversi strumenti abbiano fornito risultati molto diversi nonostante l'estrema somiglianza dei due prodotti, entrambi appena tarati dalla casa madre secondo normativa: si sono raggiunte diversità anche del 20% senza che fosse possibile stabilire quale dei due desse risultati più attendibili.

Il conteggio può avvenire in modo cumulativo (conteggio tutte le particelle insieme) o differenziale (conteggio le particelle separatamente dividendo per dimensione) su otto classi di particelle: in ordine crescente 0.3 μm , 0.4 μm , 0.5 μm , 1.0 μm , 2.5 μm , 3 μm , 5 μm , 10 μm . Durante le prime campagne di misura, le sei dimensioni considerate erano 0.3 μm , 0.5 μm , 1 μm , 3 μm , 5 μm , 10 μm . La classe 0.4 μm richiesta dalla UNI 11254, seppur molto prossima alle prime classi analizzate, non era presente. Considerando che analizzare particelle da 0.5 μm porterebbe infatti a sovrastimare il rendimento del filtro, considerare invece particelle da 0.3 μm come indicative potrebbe comportare una sottostima dell'efficienza di cattura, si è ritenuto opportuno sostituire una delle due classi con la misura richiesta dalla normativa: la scelta è ricaduta sulle particelle da 0.5 μm , così da mantenere la misura di efficienza su particelle di diametro inferiore, più difficili da catturare. Considerato poi quanto espresso dalla UNI 11254 in merito all'errore statistico, si è ritenuto opportuno trascurare le particelle di dimensioni maggiori (le particelle di diametro 10 μm talvolta non superavano la decina in un intervallo di misura): si sono quindi sostituite le particelle da 3, 5 e 10 μm con un'unica misura su particelle del diametro pari a 2.5 μm . Per la misura dell'efficienza del filtro il contatore è stato posto al centro della camera come si vede in figura Figura 4.9a. In realtà, per una misura secondo normativa, il contatore dovrebbe essere posizionato contemporaneamente prima e dopo il filtro: il sistema è provvisto di due sonde di campionamento isocinetiche collegabili alternativamente all'OPC tramite dei tubi passanti attraverso la parete della cabina come in Figura 4.9b. Non essendo attualmente possibile una doppia misura contemporanea per assenza di un secondo contatore, una misura globale nel tempo effettuata su più cicli fornisce risultati comunque soddisfacenti. Considerando che la portata di campionamento dello strumento è pari a 1.7 m^3/h , che la superficie della cella è inferiore ad 1 m^2 e che la portata del ventilatore è pari a circa 650 m^3/h , campioni di cir-

ca 10 minuti⁶ l'uno equivalgono al 2.6 ‰ dell'aria ricircolata e quindi un campionamento statisticamente significativo. Per un valore più attendibile in un'unica misurazione vengono realizzati almeno 3 campionamenti a filtro spento seguiti da almeno 3 a filtro acceso, ciascuno separato dal successivo da 10 secondi di pausa. In alcune misure si è ritenuto opportuno aumentare questo periodo di pausa così da minimizzare effetti di sedimentazione che si possono presentare.



(a) OPC al centro della camera. Questa è la posizione utilizzata per le misure effettuate durante questo studio.



(b) OPC connesso a sonde isocinetiche poste in prossimità del filtro (a valle nell'immagine). Questa sarebbe la posizione richiesta da normativa.

Figura 4.9: Posizioni possibili del contatore ottico di particelle nella configurazione prevista da SIC.

Tipico file che lo strumento fornisce in output è una tabella in formato *.xls* come in Figura 4.10.

4.3.8 Anemometri e Manometro

Per saper stimare le modeste perdite di carico che caratterizzano i filtri elettrostatici, SIC dispone di un multimetro che tra le funzioni offerte annovera anche un manometro per il rilevamento della pressione differenziale fra entrata ed uscita: le perdite di carico rilevate nei prototipi non superano mai i 50 Pa con velocità di attraversamento pari a $2.5 \div 3.5$ m/s. La velocità indicata è stata misurata con la stessa sonda del multimetro appena citato,

⁶In realtà ad essere imposto è il volume campionato, fissato a 0.3 m^3 , equivalente a 10 minuti e 36 secondi.

Timestamp	Location (Name)	0,3 micron (Counts)	0,4 micron (Counts)	1,0 micron (Counts)	2,5 micron (Counts)	Sample Time (s)	Sample Volume (m³)	Temperature (C)	Relative Humidity (%)
16/06/2014 10:28:18	LOC001	445898	46634	3243	221	636	0,030	26,2	42,2
16/06/2014 10:39:04	LOC001	398793	39188	2127	145	636	0,030	26,4	41,0
16/06/2014 10:49:50	LOC001	392454	39373	2216	152	636	0,030	27,0	39,7
	Average	412381,7	41731,7	2528,7	172,7	636,0	0,0	26,5	41,0
	Maximum	445898	46634	3243	221	636	0	27	42
	Minimum	392454	39188	2127	145	636	0	26	40
	Standard Deviation	29198,5	4246,6	620,2	42,0	0,0	0,0	0,4	1,3
16/06/2014 11:00:36	LOC001	4155	496	53	6	636	0,030	27,6	38,3
16/06/2014 11:11:22	LOC001	2872	478	72	21	636	0,030	27,8	36,7
16/06/2014 11:22:08	LOC001	2806	461	80	17	636	0,030	28,4	35,7
	Average	3277,7	478,3	68,3	14,7	636,0	0,0	27,9	36,9
	Maximum	4155	496	80	21	636	0	28	38
	Minimum	2806	461	53	6	636	0	28	36
	Standard Deviation	760,5	17,5	13,9	7,8	0,0	0,0	0,4	1,3
	EFFICIENZA	0,99205186	0,98853788	0,97297654	0,81505792				

Figura 4.10: Tipico output esportato dal contatore ottico tramite il software LMS XChange e modificato per calcolare l'efficienza (in giallo) a partire dai valori medi calcolati su ogni terna di campionamenti.

la quale possiede un anemometro a filo caldo in grado di rilevare la velocità dell'aria misurando la variazione di resistenza del filamento dovuta ad una variazione di temperatura a sua volta dovuta al flusso d'aria che raffredda il filamento. La misura è stata effettuata inserendo la sonda nel pannello in policarbonato come in Figura 4.6. È intuibile la difficoltà insita nella misura essendo necessario posizionare il filamento al centro dello spazio interpiastre e con filamento ad esse parallelo così da risentire il meno possibile da turbolenze locali. Per garantire una maggiore accuratezza dei valori utilizzati è stato confrontato il valore di velocità dell'aria misurato dal multimetro con quanto fornito da un altro strumento in grado di misurare la portata d'aria attraverso un ventolino: non essendo possibile posizionarlo a valle del filtro in modo analogo al precedente poiché la sezione della ventola non permette l'inserimento interpiastre come l'altra sonda, la misura di velocità è stata eseguita nella sezione di mandata del ventilatore, con conseguente maggiore errore rispetto alle misure effettuate in aspirazione (sezione non disponibile all'utente) dove le turbolenze sarebbero inferiori. Si sottolinea che il ventilatore, al momento, è provvisto di regolazione manuale tramite potenziometro senza tacche, quindi non controllato, e senza la possibilità di conoscere la variazione di una grandezza tale da poter almeno risalire alla variazione di

velocità dell'aria.

4.4 Considerazioni sugli strumenti e sui metodi di misura

È importante ricordare che il filtro e l'intero sistema di sperimentazione presente in SIC è un prototipo e pertanto, in tale contesto, l'elevata accuratezza delle misure non è un requisito essenziale. Lo stesso mancato rispetto della normativa per alcune caratteristiche costruttive o metodologie di misurazione può essere ritenuto accettabile. Alcune problematiche affrontate durante le misurazioni sono state:

- La misura di particelle diverse da $0.4\ \mu\text{m}$, come riportato in 4.3.7, non garantisce risultati perfettamente confrontabili con le classi di efficienza definite dalla normativa. Inoltre, il posizionamento del contatore in modo diverso da quanto definito dalla norma comporta valori di cattura inevitabilmente diversi, seppur sia dimostrato valido l'approccio "globale" utilizzato in SIC. Altre considerazioni riguardo la UNI 11254 sono già state discusse in 3.1.4.
- Tutte le misure di efficienza effettuate utilizzano, diversamente da quanto richiesto da normativa, aria ambiente anziché il DEHS generato da un apposito macchinario. L'assenza di un generatore in grado di immettere nel circuito particelle nella medesima quantità e medesima dimensione spiega come i risultati siano affetti da una deviazione standard importante, spesso eccessiva in particolar modo per le particelle di diametro superiore ad $1\ \mu\text{m}$. Le misure effettuate per grandi particelle sono infatti affette da incertezze eccessive proprio per la loro scarsità; per le particelle submicrometriche l'incertezza si riduce ma la deviazione standard in alcuni casi rimane grande proprio per la grande variazione di concentrazione che vi può essere anche in due istanti diversi di una stessa giornata, specialmente in una zona industriale (dove si sono effettuate tutte le misure). Per risultati più attendibili sarebbe pertanto opportuno disporre di un generatore di particelle, attualmente in fase di acquisto.
- Durante le misure effettuate si è impostato il PLC Carel in modo da mantenere all'interno della cabina condizioni di temperatura e umidità costanti. Le condizioni che si sono riscontrate, tuttavia, non presen-

tavano una stretta corrispondenza con i valori desiderati, nonostante la somiglianza ai valori ambientali esterni rendesse comunque accettabile l'ambiente in cabina. Con un'analisi più accurata si è scoperto che i valori di temperatura e umidità misurati dalla sonda Carel di riferimento per il PLC erano fallaci, con errori in valore assoluto rispettivamente pari a $3.5 \div 4.5^{\circ}\text{C}$ e al $20 \div 30\%$. Si è stabilito che fosse il dato della sonda del PLC ad essere errata confrontandolo con le misure di temperatura e umidità effettuate con il data logger (la sonda che utilizza è una sonda Carel identica a quella del PLC), con il contatore di particelle Lighthouse che, come già detto, consente di misurare anche temperatura e umidità e con l'anemometro a ventola anch'esso in grado di effettuare tale misura: tra di essi vi era una differenza tra i valori visualizzati inferiore al 10%, il che ha portato ad affermare che fosse la sonda del PLC a non funzionare, cosa che, tuttavia, comportava un mancato controllo accurato delle condizioni ambientali in cabina.

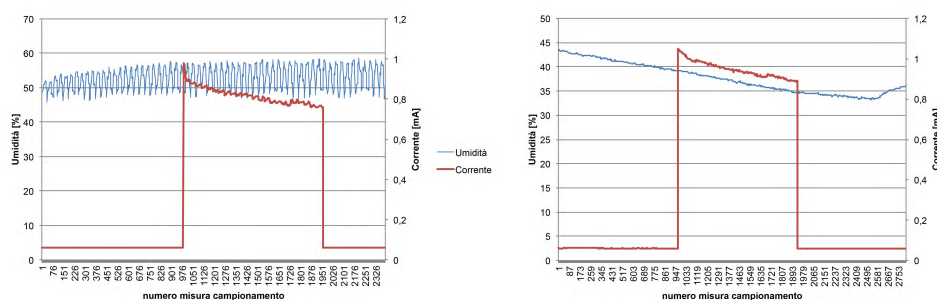
- Per il corretto funzionamento dell'analizzatore di ozono, la lampada presente al suo interno dev'essere preriscaldata almeno per 15 min. Durante le misurazioni, tuttavia, al preriscaldamento corretto seguiva spesso un distacco del riscaldamento della lampada, il che comportava il malfunzionamento dell'apparato anche durante la misurazione del data logger. Era necessario quindi bloccare manualmente la misurazione e riavviare l'Horiba attendendo nuovamente la corretta temperatura di funzionamento della lampada. Cause del fenomeno sono probabilmente dei tamponi o dei filtri difettosi interni alla macchina. Problematiche e meno facilmente individuabili sono le conseguenze sulle misure: non essendoci alcuna comunicazione al data logger del momento in cui l'analizzatore di ozono smetteva di funzionare correttamente, alcuni risultati potrebbero essere fallaci. In particolare, non è stato possibile individuare se la causa di alcuni valori inattesi di ozono fosse una misura errata dell'analizzatore o se effettivamente l'ozono raggiungesse concentrazioni che il modello non prevedeva. Essendo comunque modesta la differenza dal valore atteso, per le misure effettuate si sono considerati validi i valori indicati dall'Horiba e dal data logger.
- Ulteriore problematica individuata durante la misurazione della concentrazione di ozono riguarda il sistema di acquisizione dati realizzato da EAS S.p.A. il quale prevede, come già accennato, un sistema di pro-

tezione che previene malfunzionamenti e danneggiamenti da impulsi di corrente dovuti a scariche all'interno del filtro. Effetto collaterale causato da tali protezioni è la presenza di soglie di precisione oltre le quali il valore di ozono misurato dall'analizzatore Horiba non è correttamente letto dal sistema di acquisizione: in particolare, durante le misure effettuate a concentrazioni crescenti nel tempo, oltre 127 ppb, concentrazione in realtà superiore al limite ammesso da normativa ma relativamente piccolo per le misure necessarie a ricavare relazioni utili, il software BenchLink importava un valore che diventava improvvisamente costante, mentre sul display del dispositivo si visualizzavano valori ancora crescenti coerentemente con quanto atteso. Per consentire di misurare e importare correttamente anche concentrazioni di ozono superiori ai 127 ppb, le protezioni sono state modificate e configurate così da ammettere tre configurazioni con tre rispettive soglie: 100 ppb (la stessa presente in origine), 200 ppb e 500 ppb⁷. Quest'ultima soglia, sebbene più permissiva, è tuttavia facilmente raggiungibile con tensioni e correnti relativamente modeste. Pertanto si è rivelato necessario procedere con una registrazione manuale dei valori oltre il limite imposto dall'acquisizione (vedi 5.2).

- La velocità dell'aria si è rivelata una misura altamente problematica, la misura con l'incertezza maggiore. Tra strumenti diversi a parità di condizioni, le misurazioni si discostavano in alcuni casi di oltre 1 m/s, ovvero del 40%. Considerazione ancor più importante, tuttavia, è l'enorme variabilità che uno stesso strumento misurava nel tempo senza che la velocità del ventilatore variasse: a causa della batteria per il mantenimento della temperatura, della turbolenza introdotta dal pannello per uniformare la velocità sulla sezione di ingresso del filtro (e quindi anche all'interno del filtro stesso) e a causa del posizionamento non perfettamente parallelo alle piastre del filamento dell'anemometro, la variabilità assumeva valori anche del 60% rispetto al valor medio nel tempo di misura. Per gli stessi motivi, anche la caduta di pressione dovuta al filtro è difficilmente stimabile se non come valore globale.
- Come evidenziato in 4.3.3, i componenti dell'impianto di climatizzazione e controllo dell'umidità si trovano sia a monte, sia a valle del filtro: a monte il sistema di umidificazione, a valle il sistema di deu-

⁷Va sottolineato che essendo la modifica realizzata con la semplice modifica di un valore di guadagno, all'aumentare della concentrazione ammessa, la precisione di misura cala.

midificazione e che funge da controllo. Questo posizionamento è però problematico perché l'umidità misurata dagli strumenti e dalla sonda del PLC Carel è quella presente all'interno della cella, ovvero l'umidità presente nell'aria dopo che il deumidificatore ha corretto il valore di umidità immesso dall'umidificatore; sul filtro invece, l'aria presenta un'umidità relativa nettamente più alta poiché il deumidificatore interviene a valle. Quello che accade quindi è che la misura di umidità è indicativa per l'aria nella cella, ma non per il filtro che è l'oggetto di interesse. Se si aggiunge che l'umidificatore presente è dimensionato per volumi d'aria molto maggiori di quello della cabina (il modello era la più piccola taglia commerciale di umidificatore non da modellismo), si intuisce come l'effetto sia tale da poter affermare che, in tali condizioni, non è possibile monitorare e controllare attivamente l'umidità sul filtro come desiderato. Una soluzione potrebbe essere avvicinare i dispositivi di umidificazione e deumidificazione spostando anche l'umidificatore a valle del filtro, ma la pompa utilizzata non è sufficiente a garantire la prevalenza aggiuntiva richiesta per funzionare in una zona di sovra-pressione com'è quella a valle del ventilatore. Se si considera anche l'errore di misura dell'umidità introdotto dalla sonda del PLC responsabile del controllo dei parametri ambientali in cabina, è possibile affermare che, con la configurazione e la strumentazione attuale, l'umidità non è un parametro controllabile con sufficiente attendibilità. In Figura 4.11 è visibile un tipico andamento dell'umidità in cabina con e senza controllo.



(a) Con controllo attivo.

(b) Senza controllo attivo.

Figura 4.11: Andamento di corrente e umidità nel filtro in presenza o meno del controllo attivo ottenuto azionando umidificatore e deumidificatore tramite i valori letti dalla sonda Carel.

Capitolo 5

Modello e risultati

5.1 Software utilizzati

Durante la realizzazione del presente sono stati utilizzati due software sia in fase di acquisizione dati, sia in fase di post-processing, modellizzazione e simulazione numerica.

Acquisizione Dati

I software utilizzati durante l'acquisizione dati sono BenchLink ed LMS Express 7, rispettivamente per l'acquisizione real-time dei dati provenienti dal data logger e per l'esportazione dei risultati dal contatore di particelle LightHouse. Il BenchLink permette di settare numerosi parametri per campionare e visualizzare molteplici segnali contemporaneamente e con un campionamento anche piuttosto sostenuto per l'analisi effettuata: in particolare i segnali indicati al Paragrafo 4.3.6 sono stati campionati contemporaneamente ogni 2 secondi così da riuscire a registrare con sufficiente dettaglio gli incrementi di concentrazione di ozono successivi all'innesco. A fine acquisizione, un file in formato .csv viene reso disponibile. Per la comodità del formato, importabile e modificabile nella maggior parte dei software di calcolo, tale file è stato utilizzato come input per un'applicazione appositamente realizzata. Il software LMS Express permette di scaricare dalla memoria del contatore ottico un file in formato .xls dove sono contenuti il numero delle particelle per classe per intervallo di campionamento.

Post-Processing e simulazione

Per il post-processing e le simulazioni numeriche sono stati utilizzati principalmente due software: MATLAB[®]R2013a e COMSOL Multiphysics[®]4.4, ultima versione disponibile.

MATLAB Abbreviazione di *Matrix Laboratory*, è un linguaggio di alto livello scritto in C per il calcolo numerico, l'analisi, la visualizzazione dei dati e la programmazione. Al suo interno vi sono numerose applicazioni integrate che facilitano l'accesso ad analisi dei dati: un esempio è il *Curve Fitting Tool*, applicazione presente nel pacchetto della MathWorks[®]. Tutte le funzioni elencate sono state utilizzate in questo capitolo e nei successivi: dalla visualizzazione dei dati con grafici, al calcolo numerico necessario per la modellizzazione e la verifica dei risultati con i dati sperimentali. Le applicazioni incorporate hanno consentito sia di effettuare interpolazioni con funzioni esponenziali parametriche oltre che polinomiali e logaritmiche, sia di realizzare, tramite una *Graphical User Interface*, un'applicazione stand-alone in grado di ricavare automaticamente dal file in uscita dal BenchLink informazioni altrimenti difficilmente accessibili quale, nel caso citato, la generation rate a partire da informazioni sulla concentrazione di ozono nell'aria; al Paragrafo 5.2.2 sarà riportata la motivazione che ha portato alla necessità di calcolare tale parametro, in Appendice C.1 e C.2 rispettivamente la descrizione dell'applicazione *generation_rate_calculator* e il codice di base.

COMSOL Multiphysics È un software di Analisi agli Elementi Finiti contenente moduli e pacchetti in grado di descrivere numerose fisiche e, come si evince dal nome stesso, particolarmente adatto al loro accoppiamento. Nonostante tutti i software FEA basati sul Metodo agli Elementi Finiti (FEM) pongano le loro basi sull'interpolazione polinomiale rendendo spesso accessibili problemi anche molto complessi, COMSOL si distingue per la sua capacità di definire parametri agenti nella definizione di una fisica come dipendenti da altri parametri calcolati nella stessa soluzione e di analizzare le mutue interazioni che rendono il problema spesso non lineare ma più vicino alla realtà, dove i problemi sono sempre multifisici. Ulteriori vantaggi offerti da COMSOL sono la possibilità di definire manualmente una fisica a partire da equazioni differenziali utilizzando un apposito modulo dove, con diversi gradi di complessità, sono inseribili dei coefficienti per la soluzione di PDE (Partial Differential Equations) accoppiate tra loro o con moduli standard

e la possibilità di una comunicazione reciproca tra COMSOL e MATLAB tramite il LiveLink nativamente presente e particolarmente utile in sede di ottimizzazione; nel presente lavoro non si è utilizzata questa funzionalità. Numerose sono le possibilità offerte anche dai tools di pre-processing, a partire dal motore CAD integrato, tools di programmazione e post-processing. In questo capitolo e nel seguente si vedranno numerose applicazioni di COMSOL per il calcolo numerico di problemi elettrostatici e non. Per lo studio del precipitatore elettrostatico e della fisica alla base, sono stati utilizzati in particolare i moduli:

- PDE manualmente inserite a partire dalle equazioni di Maxwell per il problema dell'effetto corona unipolare (equazioni (2.4.12) e (2.4.13))
- Elettrostatico
- Fluidodinamico per moto laminare
- Fluidodinamico per moto turbolento, modello $k-\varepsilon$
- Particle Tracing nel gas flow, dove tra le proprietà è contemplata sia la massa che la carica associata come richiesto dalla due forze principali coulombiana e di trascinamento.

Tra le applicazioni disponibili vi sarebbero anche il modulo *Plasma Physics*, adatto allo studio della ionizzazione: la necessità di conoscere nel dettaglio molte proprietà del gas e delle reazioni che ne caratterizzano lo stato non ne ha permesso l'utilizzo.

Schema iterativo per la soluzione del problema

Per la corretta simulazione del problema di carica delle particelle dovute a ionizzazione e diffusione e di cattura come risultato delle forze applicate sulle particelle lo schema iterativo da seguire suggerito in letteratura [99, 50, 84] è il seguente:

Come si vedrà al Paragrafo 5.2.2, la definizione delle equazioni (2.4.12) e (2.4.13) tramite due moduli PDE richiede condizioni al contorno che non rimangono fisse ma variano durante la soluzione a seconda della direzione assunta dal campo elettrico. Questa complicazione, non facilmente definibile in COMSOL, non ha consentito l'implementazione del metodo nel presente lavoro di tesi.

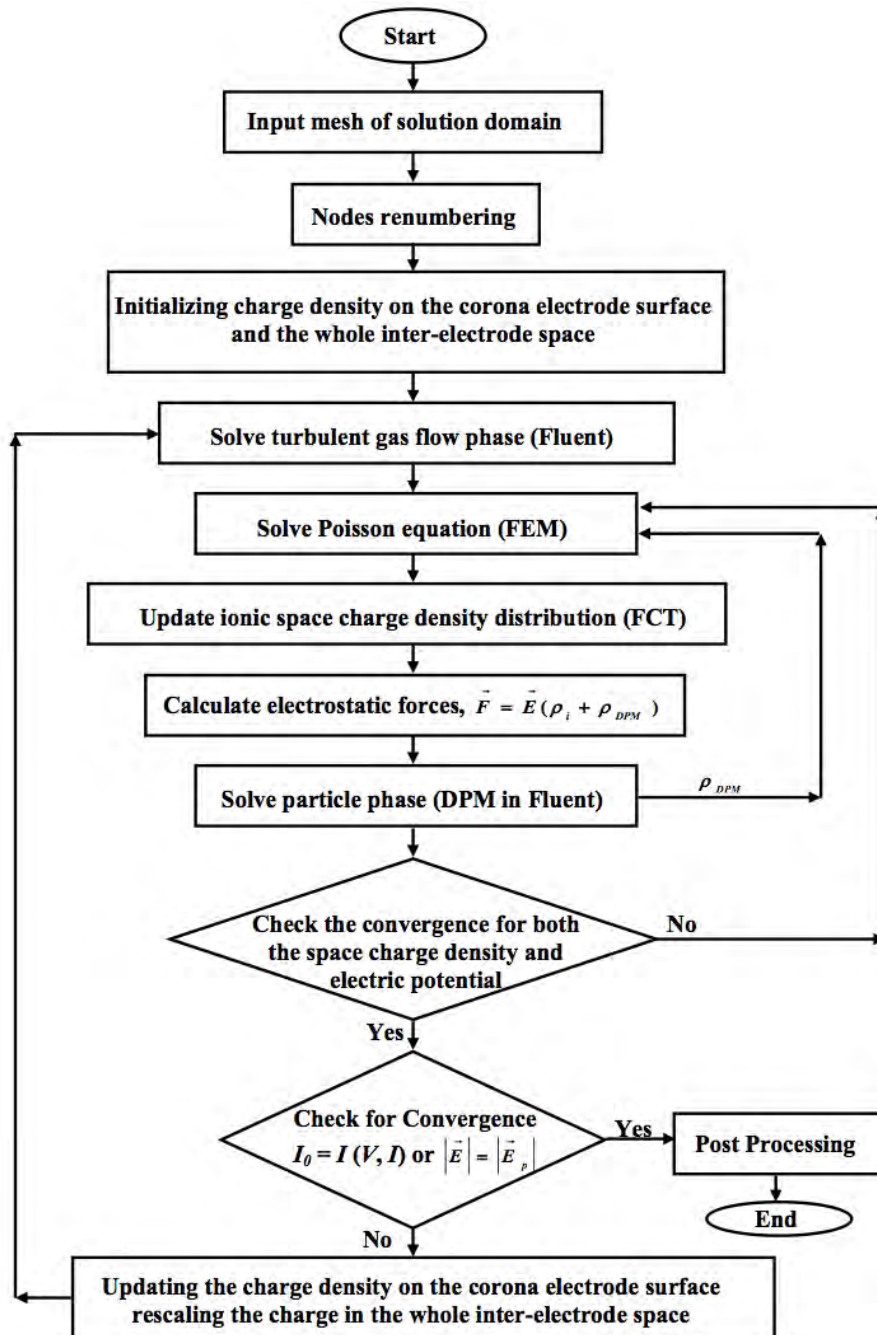


Figura 5.1: Diagramma di flusso della procedura di simulazione (ρ_{DPM} è la densità di carica delle particelle).

5.2 Risultati ottenuti: misure effettuate, ipotesi e procedure utilizzate, modello finale.

Output delle misure effettuate con gli strumenti elencati in 4.3 sono due file, uno contenente i dati esportati dal software *BenchLink Data Logger Pro*, uno esportato dal contatore ottico di particelle col software *LMS XChange*. Il primo contiene tutte le informazioni sullo stato ambientale ed elettrico della cabina con misure in mV opportunamente tradotte nelle unità di misura corrette: in particolare tempo di acquisizione in *s*, tensione V_1 applicata all'elettrodo in *kV*, tensione V_2 applicata alle piastre in *kV*, corrente *I* di diffusione in *mA*, concentrazione di ozono in *ppm*, umidità relativa in %, temperatura in °C. Per quanto riguarda le ultime due grandezze, va ricordato che in tutte le misure effettuate nel presente lavoro si sono utilizzate le condizioni ambientali, ben più costanti dei valori che si ottenevano con il controllo di temperatura e di umidità¹, come si vede in Figura 4.11. La frequenza di acquisizione è fissata per tutte le misure pari a un campionamento ogni 2 secondi.

5.2.1 Risultato 1: verifica condizione di Peek

Quasi percorrendo cronologicamente le teorie presentate in 2.4, la prima verifica effettuata si basa sulla teoria di Peek secondo la quale è possibile definire una tensione di innesco, o meglio un campo elettrico nel nostro caso, oltre la quale sicuramente è presente l'effetto corona. La relazione, funzione del raggio dell'elettrodo, della densità relativa dell'aria (e quindi di temperatura e pressione) e da altri parametri meno influenti e meno facilmente stimabili (si pensi ad es. al coefficiente di rugosità superficiale dell'elettrodo) ha consentito di ottenere dei valori di campo sulla superficie degli elettrodi di ionizzazione che sono stati confrontati con i campi risultanti dal calcolo numerico realizzato con COMSOL a partire da grandezze misurate sul prototipo.

Ipotesi e Metodo di Misura

Come si può notare in Figura A.1, le diverse sezioni del filtro, nel presente prototipo delimitate ed evidenziate da due piastre di tipo 2 di larghezza

¹La variazione di temperatura, più contenuta rispetto alla variazione di umidità, è meno problematica perché, essendo misurata in kelvin, la sua influenza sui risultati finali è modesta.

superiore alle altre, presentano una posizione dell'elettrodo non identica in tutti i casi: mentre nella sezione centrale l'elettrodo si trova equidistante dalle piastre di tipo 2, le due sezioni più esterne, in modo simmetrico rispetto alla sezione centrale, presentano un elettrodo spostato tanto più verso l'esterno quanto più esterna è la sezione in analisi, ciò dovuto ad un'equispaziatura degli elettrodi sull'asta d'aggancio realizzata senza considerare lo spazio esterno necessario per garantire la sicurezza e il corretto posizionamento delle piastre nello stadio di cattura. Sulla sezione più esterna la distanza dell'elettrodo dal piano centrale della sezione è pari a 3 mm. Soltanto in questo caso nel calcolo si è considerata questa differenza presente tra le sezioni e si è effettuato il confronto tra la sezione centrale e la sezione più esterna come casi limite. In tutti i casi successivi, la non perfetta identità tra le sezioni è stata trascurata assumendo la sezione centrale come rappresentativa della configurazione del prototipo. Avendo a disposizione due parametri elettrici su cui agire, quali V_1 tensione sull'elettrodo e V_2 tensione sulle piastre, si sono effettuate 5 misure a tensione V_2 fissata da 3 a 5 kV con step 500 V e per ognuna di esse si è fatta variare gradualmente la tensione V_1 sull'elettrodo.

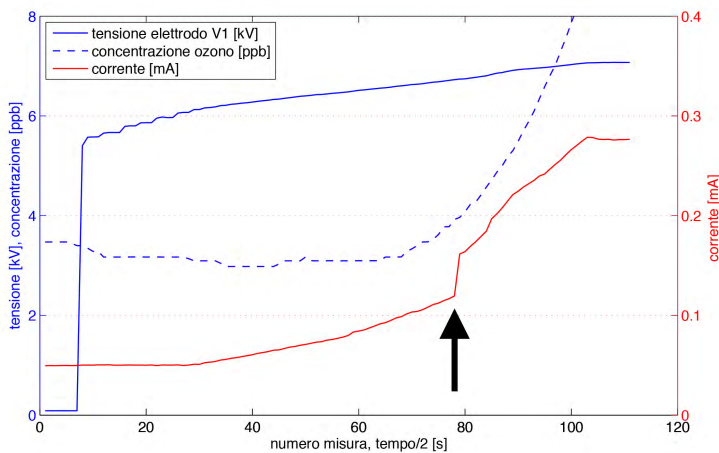


Figura 5.2: Andamento di tensione sull'elettrodo, corrente, concentrazione di ozono. La tensione è stata modificata manualmente tramite un potenziometro fino ad individuare la tensione di innesco dove si verifica un salto di corrente e la rampa di crescita dell'ozono.

Come si vede in Figura 5.2, per un determinato valore di tensione V_1 la corrente inizia a crescere piuttosto velocemente evidenziando che il processo di ionizzazione, e quindi di passaggio di corrente in aria non più isolante nel-

le zone a campo maggiore, è avvenuto. Come ulteriore conferma, il livello di ozono inizia a crescere nello stesso momento, a meno di un ritardo dovuto al tempo necessario all'ozono per raggiungere il punto di aspirazione dell'analizzatore situato sulla parete della cella. Considerato che una corrente pari a $50 \div 70 \mu\text{A}$ è comunque presente a causa del non perfetto isolamento garantito dall'aria, si è scelta come tensione di innesco quella tensione alla quale la corrente presenta un salto evidente (come si vede in Figura 5.2); per automatizzare l'individuazione del punto di innesco si è stabilita come V_1 quella che per prima genera una corrente non inferiore a $150 \mu\text{A}$. L'ipotesi così formulata è in accordo con l'affermazione di Goldman, secondo cui «La tensione di soglia V_s della scarica per effetto corona è caratterizzata da un aumento improvviso della corrente tra i due elettrodi (da circa 10^{-14} a 10^{-6} A)», in realtà superiore di almeno due ordini di grandezza nel nostro caso rispetto a quanto affermato in [100], «e dalla comparsa di una flebile luminescenza in prossimità dell'elettrodo con le dimensioni inferiori (l'elettrodo "attivo")». Al di sotto di V_s , la corrente consiste di cariche dovute alla naturale ionizzazione del gas, notoriamente dovuta a raggi cosmici e radiazioni dovute a sostanze radioattive che generano una media di $7 \div 20$ coppie elettrone-lacuna per centimetro cubo al secondo in aria» [47].

Risultati

Calcolato il campo di innesco previsto dalla relazione di Peek per un elettrodo filiforme a superficie liscia ($m = 1$) tenendo conto delle piccole variazioni di temperatura tra una misura e l'altra, per effettuare il confronto si è realizzato un modello semplificato bidimensionale del filtro elettrostatico in oggetto (Figura 5.3).

Sulla superficie di tutti gli elettrodi è stato imposto il potenziale di innesco ed è stato calcolato il campo lungo la linea verde visibile in Figura 5.3: il valore di campo elettrico da considerare è ovviamente il campo massimo. Un esempio è visibile in Figura 5.4.

Valutata la media della norma del campo elettrico calcolato con COMSOL lungo la linea che nel modello bidimensionale definisce la superficie degli elettrodi (sia per quello centrale che per quelli più esterni), i risultati che si sono ottenuti sono riportati in Tabella 5.1. In Figura 5.5 è riportato l'andamento della tensione di innesco V_1 sull'elettrodo in funzione della tensione V_2 sulle piastre e l'andamento della temperatura durante le diverse misure. L'andamento pressoché lineare di $V_1(V_2)$ si spiega considerando che essendo il campo il gradiente del potenziale, variando linearmente V_2 , V_1

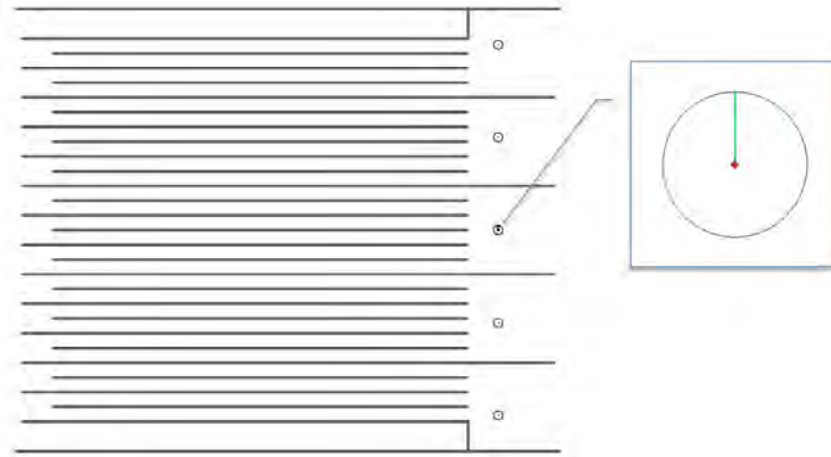


Figura 5.3: Modello bidimensionale del prototipo realizzato in COMSOL Multiphysics. I cerchi di diametro maggiore, ben visibili nel riquadro di zoom, non sono un'entità fisica ma soltanto una linea per definire la mesh; la linea verticale verde è stata utilizzata come *cut-line data set* lungo la quale calcolare parametri quale ad es. il campo elettrico. L'elemento in rosso è l'elettrodo.

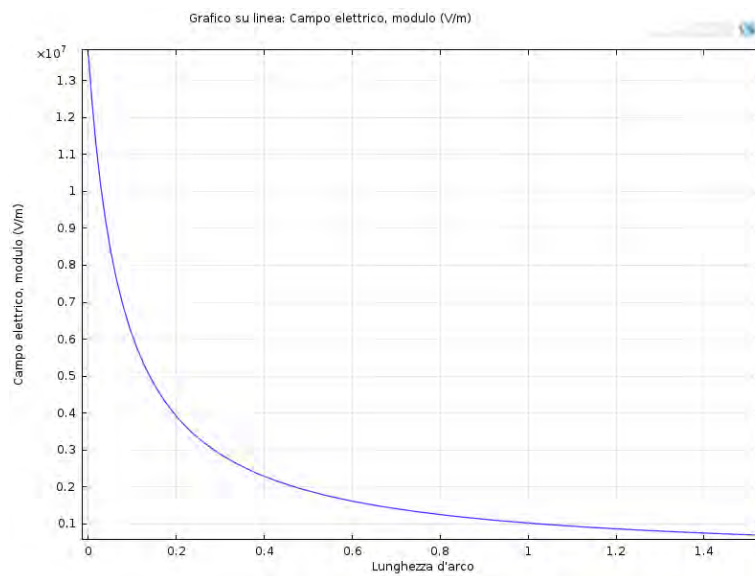


Figura 5.4: Andamento del campo elettrico lungo la linea verticale verde nel riquadro di Figura 5.3 calcolato nel caso con $V_1 = 6790$ V e $V_2 = 5087$ V.

varierà secondo una funzione dello stesso tipo così da mantenere il campo elettrico quanto più possibile invariato come secondo la teoria di Peek.

V ₁ - elettrodo [kV]	V ₂ - piastre [kV]	E Peek		E el. centr. [V/mm]	E el. est. [V/mm]
		[°C]	[V/mm]		
6.472	3.017	8.6	13560	13783	14422
6.574	3.567	9.6	13529	13773	14501
6.653	4.058	9.7	13527	13735	14544
6.738	4.573	10.0	13518	13701	14594
6.790	5.087	10.0	13518	13591	14566
6.751	5.564	10.2	13513	13284	14334

Tabella 5.1: La tabella dimostra come la relazione di Peek sia verificata nella configurazione del prototipo. Le colonne da sinistra a destra rappresentano: tensione applicata sull'elettrodo di diametro 0.16 mm, tensione applicata sulle piastre di repulsione, campo elettrico calcolato secondo la teoria di Peek tenendo conto della variazione di temperatura che modifica la densità relativa dell'aria secondo la relazione (2.4.4), campo elettrico calcolato numericamente sulla superficie dell'elettrodo della sezione centrale del filtro, campo elettrico calcolato numericamente sulla superficie dell'elettrodo delle sezioni più esterne del filtro. L'ultima riga ha valori fisicamente errati, probabilmente dovuti ad un errore nella misura per tensione elevata nelle piastre.

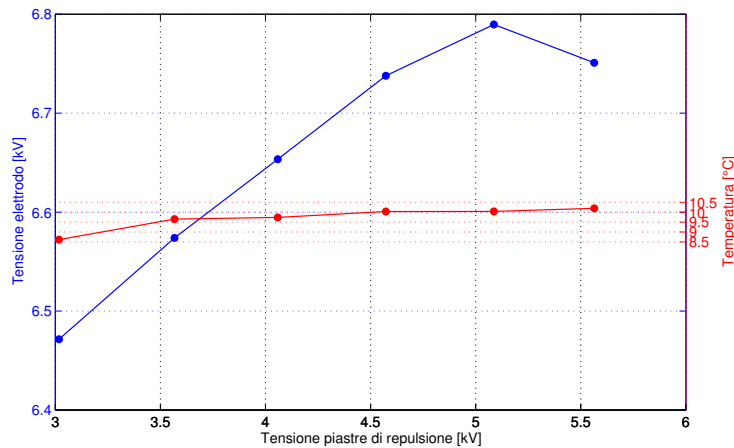


Figura 5.5: Tensione di innesco applicata sull'elettrodo in funzione della tensione sulle piastre e andamento della temperatura nelle diverse misure. Si osservi la contenuta variazione della tensione sull'elettrodo.

Considerazioni I risultati ottenuti dimostrano che la teoria di Peek è valida anche nel nostro caso con una configurazione geometrica più complessa

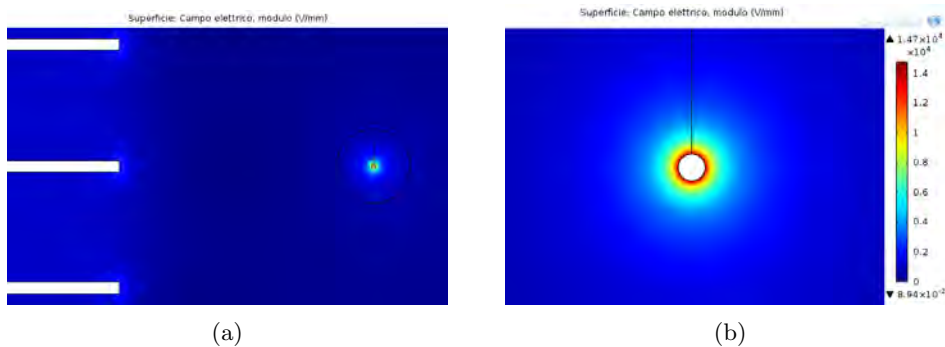


Figura 5.6: Campo elettrico calcolato con COMSOL Multiphysics utilizzando tensioni su elettrodo e piastre come in Figura 5.4. La Figura 5.6b raffigura il dettaglio del campo elettrico in prossimità dell'elettrodo centrale.

NOTA: il limite massimo indicato in legenda non corrisponde al campo dell'elettrodo raffigurato, bensì il valore assunto dal campo sulla superficie dell'elettrodo più esterno.

del caso coassiale e multitensione: in questo caso la validità permane perché l'influenza del potenziale delle piastre sul campo presente sulla superficie dell'elettrodo è, in prima approssimazione, trascurabile come si può desumere dalla Figura 5.6.

L'impossibilità di trascurare completamente il potenziale V_2 è evidenziata innanzitutto dal potenziale V_1 applicato all'elettrodo e tale da originare il campo di innesco: come si vede in Tabella 5.1 e in Figura 5.5, l'innesco avviene a tensioni crescenti al crescere della tensione applicata sulle piastre così da compensare la riduzione del campo dovuta proprio all'aumentare del potenziale dello stesso segno presente sulla piastra e riportare quindi il gradiente a valori sufficienti a provocare l'innesco dell'effetto corona. Un ulteriore effetto del potenziale V_2 è visibile nei diversi valori di campo elettrico superficiale presenti sull'elettrodo centrale del filtro e sugli elettrodi più esterni, spostati rispetto al centro della sezione corrispondente: questi ultimi presentano un campo di entità maggiore proprio per la loro maggiore distanza dalla piastra che, essendo alimentata con una tensione V_2 dello stesso segno di V_1 , riduce in maniera meno sensibile il gradiente di tensione come si vede in Figura 5.7.

I valori riscontrati sono comunque molto prossimi a quelli ricavati dalla relazione di Peek. È quindi possibile affermare che esiste una relazione che ci permette di predire quale sia la tensione applicata all'elettrodo o, più importante, quale sia il campo elettrico che innesca il fenomeno di ionizzazione e scarica per effetto corona. Inoltre, come già evidenziato in 2.4.1,

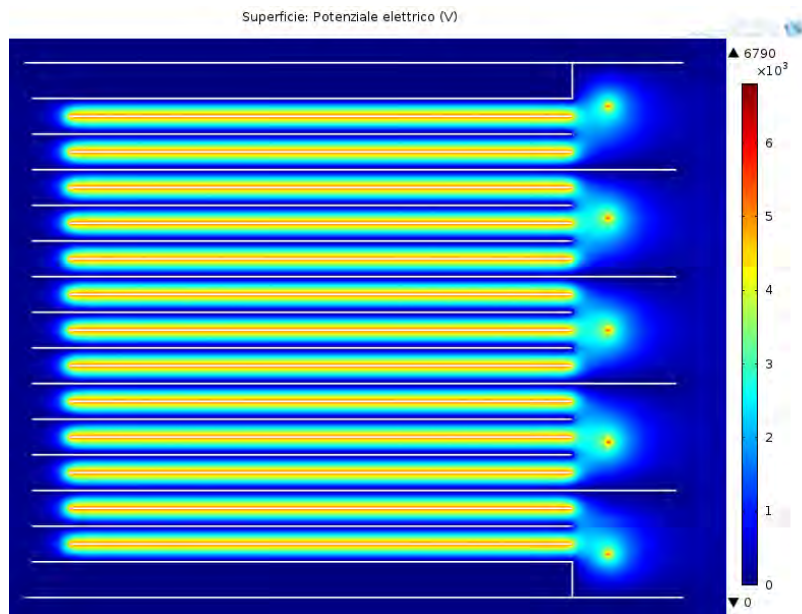


Figura 5.7: Potenziale elettrico calcolato con COMSOL Multiphysics utilizzando tensioni su elettrodo e piastre come in Figura 5.4.

diversamente da quanto effettuato negli esperimenti di Peek [45] e riportato in numerosi studi successivi [6, 101], saper calcolare la tensione di innesco, dipendente dalla capacità logaritmica della configurazione coassiale come si vede in (2.4.2), è per noi di scarsa utilità potendo ragionare direttamente con i campi elettrici e, dal momento che si è dimostrata la validità della teoria di Peek anche nel nostro caso, potendo ricorrere al modello FEM per l'applicazione della teoria ad una configurazione geometrica ben precisa.

5.2.2 Risultato 2: modello per la produzione ozono.

Con una relazione analitica in grado di descrivere lo stato elettrico all'interno del filtro, come primo obiettivo del presente lavoro di tesi si sono fissate l'analisi e la formulazione di un modello in grado di descrivere la produzione di ozono in un filtro elettrostatico. Pressoché assente in letteratura se non sotto forma di osservazioni e risultati sperimentali o relazioni empiriche [57] dipendenti da parametri quali temperatura, umidità e corrente uscente dal filamento (i primi due difficilmente analizzabili con gli strumenti presenti in cabina), lo studio si è basato sui risultati ottenuti al Paragrafo 5.2.1 che, integrati alle misure effettuate presso SIC utilizzabili per osservazione e verifica dei risultati e a quanto presente in letteratura, davano le basi per una formulazione sufficiente a realizzare un modello numerico in grado di descrivere il fenomeno elettrostatico e di densità di carica presentato in precedenza. Una volta nota la soluzione elettrostatica, ed in particolare la corrente uscente dagli elettrodi, era possibile stimare la produzione di ozono in quanto da questa dipendente [61, 57, 101, 6, 45].

Analisi matematica

Come visto in 2.4.1, per conoscere la corrente (o meglio la densità di corrente) che interessa principalmente il primo stadio di un filtro elettrostatico è richiesta la conoscenza di due grandezze: il campo elettrico e la densità di carica spaziale, entrambi sull'intero spazio interelettrodo². In particolare, il dato sulla superficie dell'elettrodo è una condizione obbligatoria, mentre nello spazio d'aria l'intensità del campo e la sua direzione sono determinabili per sovrapposizione degli effetti dove l'effetto della geometria dell'elettrodo (una volta definito il potenziale ad esso applicato) è combinato con quello della distribuzione risultante della densità di carica (dovuta all'effetto corona).

Una soluzione analitica rigorosa del campo di ionizzazione è possibile solamente nel caso di sfere concentriche o cilindri coassiali [11]. Mentre Peek [45] considerò il problema "space-charge-free", Townsend [102] per primo analizzò il problema complessivo e dimostrò per il secondo caso che la particolarità delle suddette configurazioni risiede nell'elevato grado di simmetria; numerosi tentativi sono stati effettuati per geometrie più complicate

²La densità di corrente in realtà sarebbe composta di tre contributi come descritto in 2.4.1, ma il contributo principale è dato dal campo elettrico; gli altri termini, salvo diversa indicazione, sono normalmente trascurati.

ed utili nella pratica [103, 99, 104], ma, dovendo necessariamente introdurre assunzioni semplificative e introducendo quindi inevitabili errori, non si sono raggiunti risultati paragonabili. A presentare un'eccessiva complicazione vi sono anche le configurazioni punta-piano e filo-piano (il wire-plate è proprio la configurazione di interesse per il prototipo utilizzato nel presente lavoro di tesi) dove lo stesso campo di Peek, essenziale per la conoscenza del campo sulla superficie dell'elettrodo da usare come condizione di Dirichlet, perde di validità sovrastimando fortemente il valore reale e non considerando la dipendenza del campo dalla direzione secondo una funzione del tipo $\cos^2(\theta)$ con θ l'angolo che il vettore campo elettrico assume rispetto al segmento minimo che congiunge l'elettrodo, sia esso una punta o un filamento, al piano [46].

Esempio per un cilindro coassiale Grazie alla simmetria cilindrica del problema, le distribuzioni del potenziale φ , del campo elettrico E e

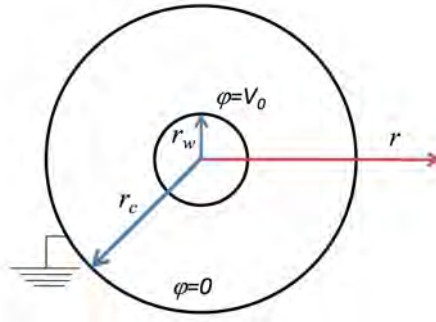


Figura 5.8: Sezione di una configurazione wire-cylinder.

della carica spaziale δ sono funzioni esclusivamente della coordinata radiale e pertanto riducibili ad un problema monodimensionale. Per una tale configurazione con $r_w = 1$ mm e $r_c = 20$ mm, l'effetto corona inizia a manifestarsi a 17.5 kV, la scarica a 29.7 kV in condizioni standard [102]. In riferimento alla Figura 5.8, la soluzione esatta per φ, E e δ lungo un qualunque segmento $[r_w; r_c]$ sono le seguenti [11]:

$$\varphi(r) = V_0 - k_1 \left(f_1(r) - k_2 + k_3 \left(\log \frac{r}{r_w} + \log(k_3 + k_2) - \log(k_3 + f_1(r)) \right) \right)$$

$$E(r) = \frac{k_1}{r} f_1(r)$$

$$\delta(r) = \frac{\sqrt{r_w E_0 \epsilon_0 \delta_0}}{f_1(r)}$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{r_w E_0 \delta_0}{\epsilon_0}}$$

$$\begin{aligned}
k_2 &= \sqrt{\frac{r_w E_0 \varepsilon_0}{\delta_0}} \\
k_3 &= \sqrt{k_2^2 - r_w^2} \\
f_1(r) &= \sqrt{r^2 + k_2^2 - r_w^2} \\
\delta_0 &= \delta(r_w)
\end{aligned}$$

quest'ultimo determinato implicitamente ponendo $\varphi(r_c) = 0$. V_0 indica la tensione applicata, E_0 il campo sulla superficie dell'elettrodo (usualmente si pone assunzione Kaptzov), ε_0 la permittività dielettrica del vuoto. Per un confronto rispetto al caso space-charge-free si veda il Paragrafo 2.4.

Analisi numerica

Dalle equazioni presentate al Paragrafo 2.4.1 si può dedurre che non appena la tensione applicata supera il valore di innesco calcolabile con la relazione di Peek, nello spazio d'aria prossimo all'elettrodo si presenta un effetto corona DC unipolare sotto forma di flusso unidirezionale di particelle cariche dall'elettrodo verso l'esterno. La polarità di tali ioni è la stessa del potenziale utilizzato per aumentare il filamento. Il flusso è stazionario e determinabile dall'intensità e dalla direzione del vettore campo elettrico locale il quale, tuttavia, dipende non solo dal potenziale e dalla geometria dell'elettrodo, ma anche dalla distribuzione della carica spaziale presente³. In altre parole la soluzione elettrostatica è, in realtà, risultante da due fisiche intrinsecamente accoppiate. Per geometrie più complesse è quindi necessario risolvere il problema agli elementi finiti dove, anziché cercare una soluzione globale, si cercano singole soluzioni locali nei vari elementi della mesh che vengono successivamente interpolate a fornire la soluzione cercata. In COMSOL è presente nativamente un modulo fisico in grado risolvere problemi elettrostatici, ma, per l'intrinseco accoppiamento esistente tra la soluzione elettrostatica e di densità di carica, non è stato possibile utilizzarlo; se il modulo era infatti in grado di calcolare la soluzione elettrostatica una volta forniti i potenziali con le opportune condizioni al contorno e la geometria, esso non era altresì in grado di considerare la modifica apportata a tale valore dalla densità di carica nel dominio (spazio d'aria). È stato quindi necessario scrivere manualmente le equazioni (2.4.12) e (2.4.13) utilizzando il modulo equation-based, in particolare la General Form disponibile tra le PDE (Par-

³Per l'assunzione di Deutsch, solo il modulo di E dipende da δ .

tial Differential Equation)⁴ proposte da COMSOL la cui equazione base per una singola variabile dipendente u è

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = f \quad (5.2.1)$$

dove, essendo il problema stazionario [11], i primi due termini si annullano per $\frac{\partial}{\partial t} \equiv 0$. Per la presenza della divergenza al di fuori del campo vettoriale Γ definibile manualmente, si comprende il motivo per cui si è preferito mantenere nelle definizioni $\nabla \cdot \nabla \varphi$ anziché $\nabla^2 \varphi$. Essendo necessario utilizzare le due equazioni (2.4.12) e (2.4.13) per descrivere il problema, si sono utilizzate due fisiche, ovvero due General Form accoppiate: una per φ , l'altra per δ .

Condizioni al contorno Come sottolineato in 2.4.1, le condizioni al contorno sono in numero sufficiente per risolvere l'equazione (2.4.14), ma presentano l'inconveniente che una condizione al contorno su δ è totalmente assente. Il suo valore sulla superficie dell'elettrodo è incognito e non vi è alcun modo per determinarlo senza chiamare in causa fisiche ulteriori (ad es. la fisica del plasma) che tuttavia richiedono informazioni sul materiale, sulle condizioni ambientali e sulla chimica normalmente non disponibili. Per l'equazione in φ le due condizioni richieste sono la (2.4.16) e la (2.4.17), rispettivamente di Dirichlet per imporre il potenziale sul cilindro esterno al limite del dominio e di Neumann per fissare il campo sulla superficie dell'elettrodo utilizzando l'assunzione di Kaptzov. La terza equazione al contorno (2.4.15) è anch'essa relativa alla tensione e non vi è alcun modo per correlarla alla densità di carica essendo trattate come due fisiche distinte.

Per eludere il problema, una soluzione individuata in letteratura [105] e utilizzata in una COMSOL Conference [106] consiste nel dividere la variabile densità di carica δ in due parti, una costante e un'altra funzione della posizione:

$$\delta(x, y) = \delta_0 + d\delta(x, y) \quad (5.2.2)$$

Per semplicità di notazione, l'indicazione delle variabili spaziali verrà d'ora

⁴In COMSOL è disponibile anche un modulo PDE semplificato denominato *Coefficient Form*. Nel nostro caso non è applicabile perché in tal caso si imporrebbero delle condizioni di Neumann omogeneo sul contorno che non ci dovrebbero essere; mentre nella General Form avere flusso nullo significa porre $\Gamma \cdot \vec{n} = 0$ (è come non far nulla), nella Coefficient Form sarebbe come porre $\frac{\partial}{\partial n} = 0$ e ciò significa ritrovarlo nella weak form di Galerkin (*Weighted Residual Approach*).

in poi trascurata. Supposta δ_0 nota, l'equazione (2.4.13) diventa

$$\nabla(d\delta) \cdot \nabla\varphi - \frac{(\delta_0 + d\delta)^2}{\varepsilon_0} = 0$$

con unica variabile $d\delta$: la condizione quindi posta è

$$d\delta_{r=r_w} \equiv 0$$

fissata sulla superficie dell'elettrodo. Essendo proprio la superficie dell'elettrodo la zona col massimo effetto corona e dunque con densità di carica massima, appare evidente come $d\delta$ sia una variabile che non ammette valori positivi per la configurazione coassiale. Il problema principale, come annunciato in precedenza, è conoscere il valore di δ sulla superficie dell'elettrodo che, per quanto appena affermato su $d\delta$, significa individuare il valore della costante δ_0 . In assenza di una condizione su δ , il valore di δ_0 può essere calcolato sfruttando la condizione al contorno rimanente (2.4.15) e attraverso l'uso di un moltiplicatore di Lagrange δ_{0p} integrato sulla superficie dell'elettrodo⁵. Quella che si ottiene è quindi una condizione al contorno in forma debole⁶

$$\text{boundary_weak} = \delta_{0p} (V_0 - \varphi) \quad (5.2.3)$$

sulla linea (o un punto a seconda che si sia trascurata o meno la simmetria radiale nella definizione) che in 2D identifica la superficie dell'elettrodo. Essendo δ_0 una costante nell'intero dominio, è necessario calcolarne l'integrale sulla linea (o sul punto) appena citata: in questo modo si ricava la δ_0 presente in (5.2.2). Si sottolinea come le due fisiche definite in COMSOL nel presente problema abbiano come variabili dipendenti $d\delta$ e φ : la forma debole, nella cui equazione compare φ , è contenuta nella fisica dipendente da φ . In Appendice B.2 sono riportati i valori inseriti in COMSOL.

Risultati con geometria semplice (coassiale) Assumendo che la presenza della carica spaziale δ abbia effetto soltanto sul modulo del campo

⁵Per la simmetria radiale che caratterizza la configurazione, è sufficiente integrare in un punto arbitrario della superficie dell'elettrodo.

⁶Una forma debole, che per il teorema fondamentale del calcolo variazionale ha la stessa soluzione della forma forte, si definiscono due classi di funzioni: una *test function* che soddisfi le condizioni al contorno di ordine 0 e la condizione di integrabilità quadra $\int_0^1 (\text{test_function}_{,x})^2 dx < \infty$, una *funzione peso* che soddisfa le condizioni al contorno essenziali omogenee e sia di classe $C^1(\mathbb{R})$ [107]. Di fatto, il metodo è quello noto in meccanica come *principio dei lavori virtuali* dove si fissa una soluzione di tentativo e si analizzano gli effetti di spostamenti virtuali.

elettrico, ma ne lasci invariata la direzione⁷, il problema può quindi essere risolto con l'accortezza di evitare la soluzione banale ponendo $\varphi(0) \neq 0$. L'idea di base di uno schema iterativo per risolvere il problema è riportata in Figura 5.9.

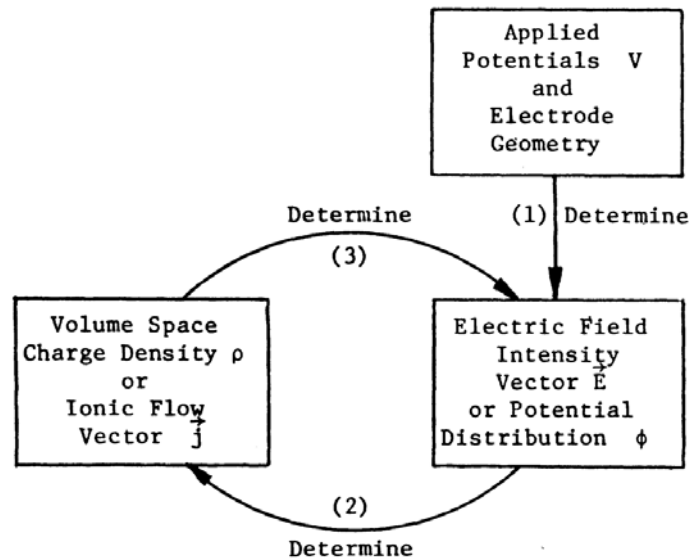


Figura 5.9: Mutua interazione tra E e δ . Schema iterativo per la soluzione del problema elettrostatico e di densità di carica spaziale (tratto da [11]).

Nel dettaglio lo schema iterativo:

1. si assume una distribuzione arbitraria della carica spaziale nel dominio ($d\delta^{(0)} = 0$) e un valore iniziale non nullo del potenziale φ nell'intero dominio
2. con la forma debole si calcola δ
3. con δ valuto il campo elettrico utilizzando le equazioni (2.4.12) e (2.4.13)
4. per l'assunzione di Kaptzov, se il campo elettrico ottenuto dal calcolo sulla superficie dell'elettrodo è inferiore ad E_{peek} allora significa che la δ calcolata sulla medesima superficie è maggiore (in modulo) della densità di carica reale e deve essere ricalcolata assegnandole un valore

⁷Altrimenti la distribuzione di δ può essere espressa in forma semplificata, ma nessun tentativo finora effettuato ha portato ad una soluzione a meno di utilizzare assunzioni che influiscono sul mutuo accoppiamento tra E e δ [11].

inferiore con

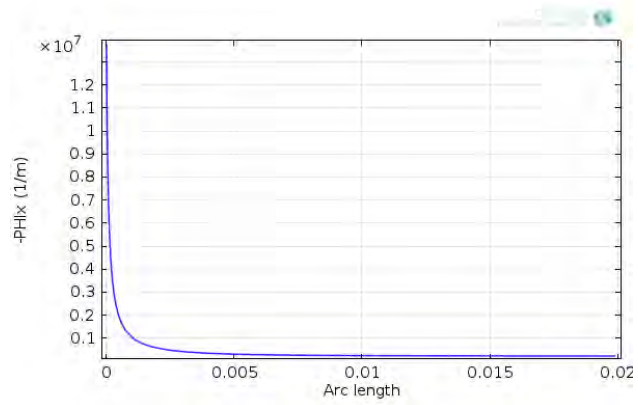
$$\delta_{elec}^{(k+1)} = \delta_{elec}^{(k)} \frac{E_{elec}^{(k)}}{E_{peek}}$$

Tipici risultati (Figura 5.10), in accordo con i risultati teorici calcolabili con le relazioni del Paragrafo 5.2.2, sono stati calcolati in COMSOL lungo una linea $[r_w; r_c]$ con un elettrodo di diametro pari a 0.16 mm, una tensione ad esso applicata di 8500 V, cilindro esterno di diametro 40 mm a 0 V ed il campo elettrico sulla superficie calcolato con la relazione di Peek per configurazioni coassiali. Per stabilire un modello numerico in grado di portare ai risultati presentati si sono poste le seguenti ipotesi (citate singolarmente nei capitoli precedenti):

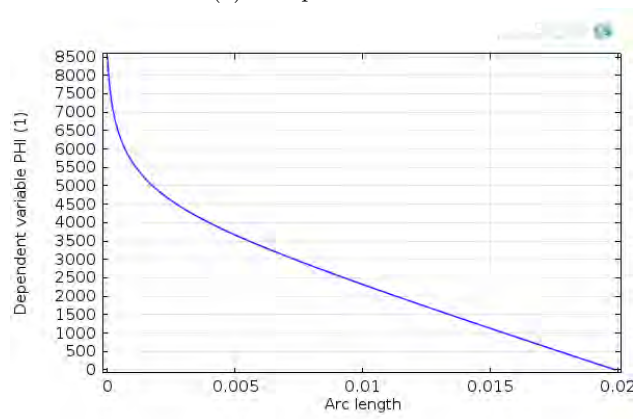
- Assunzione di Kaptzov secondo cui il campo elettrico sulla superficie dell'elettrodo è pari al campo di Peek anche per ogni tensione al di sopra del valore di innesco
- Assunzione di Deutsch: la carica spaziale influenza solo il modulo del campo elettrico e, pertanto, non ne modifica la direzione rispetto al caso Laplaciano (space-charge-free)
- La carica degli ioni nello spazio d'aria tra gli elettrodo è unipolare e in condizioni steady-state (posso omettere componenti ad alta frequenza e interazioni tra campi elettromagnetici garantendo così un effetto corona stabile)
- La mobilità ionica è costante
- La diffusione termica è trascurata
- Lo spessore dello strato ionizzato prossimo all'elettrodo è di dimensioni trascurabili

Risultati con geometria complessa e un solo elettrodo (attivo) La geometria presente nel prototipo è, tuttavia, una configurazione diversa dal caso semplice coassiale, approssimabile alla configurazione wire-plate. Si è quindi costruito un nuovo modello con geometria semplificata rispetto a quella reale del prototipo utilizzando gli stessi moduli fisici descritti nel caso coassiale, definendo manualmente le PDE anche in questo caso, per testare se il metodo presentato fosse ugualmente applicabile. Le dimensioni geometriche utilizzate sono:

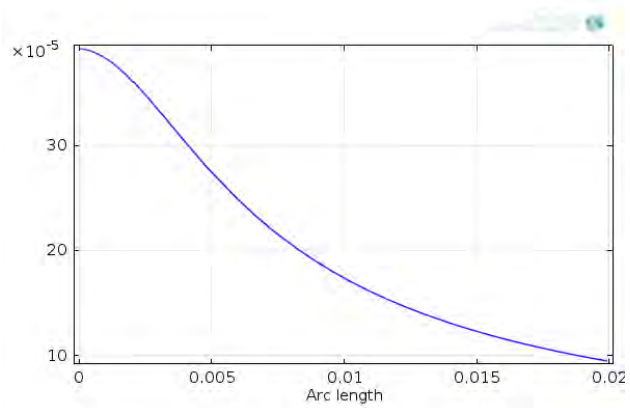
- elettrodo (filamento) di diametro 2 mm alimentato a 50 kV



(a) Campo elettrico.



(b) Variabile φ (potenziale elettrico).



(c) Densità di carica spaziale δ .

Figura 5.10: Risultato del problema elettrostatico e densità di carica considerato come costituito da due fisiche accoppiate, una in φ e una in δ .

- piastre (in alto e in basso) fissate a 0 V lunghe 50 mm, poste ad una distanza di 35 mm e tali da formare in 2D un rettangolo concentrico all'elettrodo
- Campo calcolato con Peek per il caso wire-plate (vedi 2.4.1).

Una volta raggiunta la convergenza, i risultati individuati da COMSOL sono presentati in Figura 5.12÷5.14. Dai risultati rappresentati sull'intero dominio si sono estratte, come nel caso coassiale in Figura 5.10, le curve di E , φ e δ lungo i due semiassi positivi, indicati con le cut-lines in Figura 5.11.

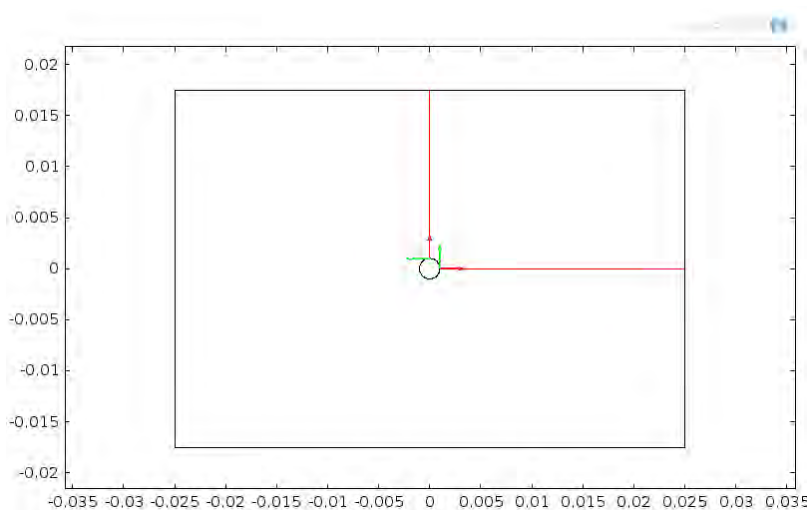
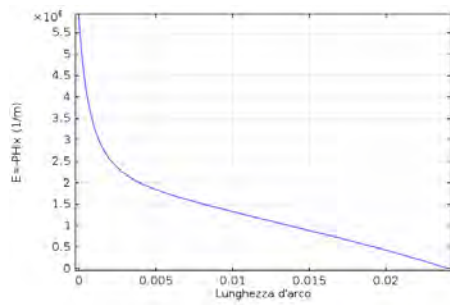
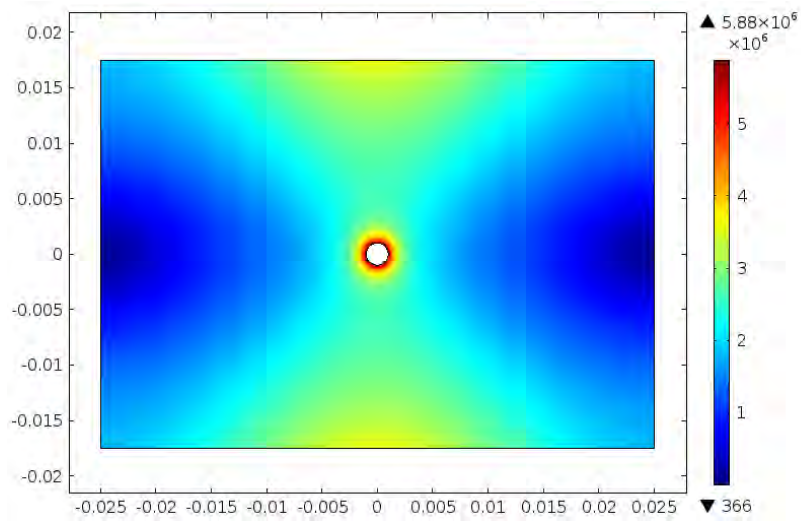
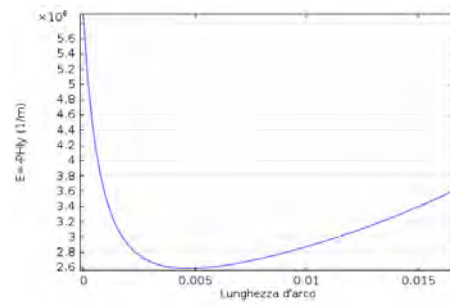


Figura 5.11: Cut-lines lungo cui si sono calcolati gli andamenti rappresentati in Figura 5.12÷5.14.

Come si vede, la procedura presentata rimane valida anche nel caso di configurazioni complesse dove, oltre all'elettrodo a ground e alle condizioni di Neumann automaticamente imposte sui lati dove non è posto Dirichlet, è stato fissato un unico potenziale. In altre parole, il modello funziona ancora se si ha una sola componente elettricamente attiva nel sistema.

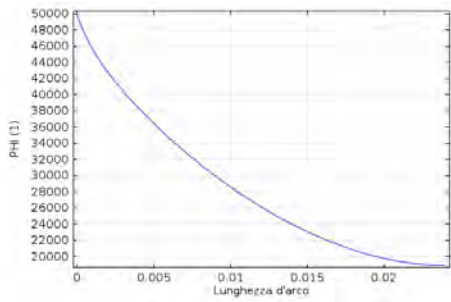
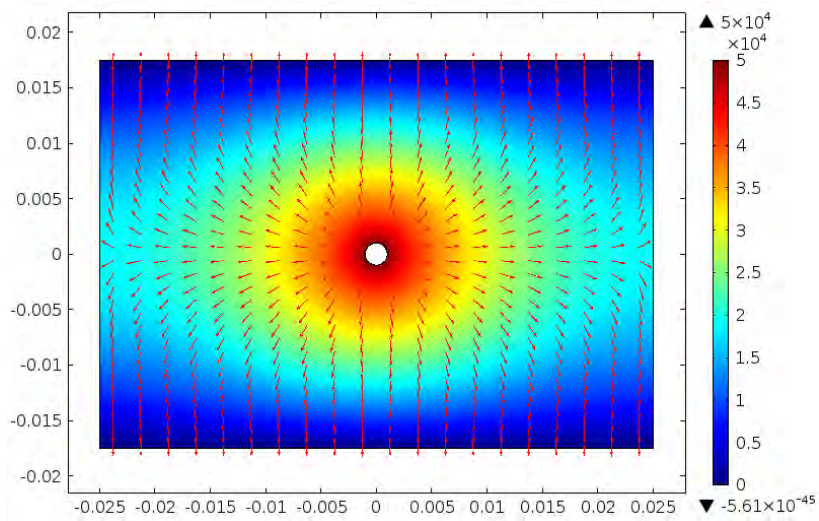


(a) E lungo l'asse x.

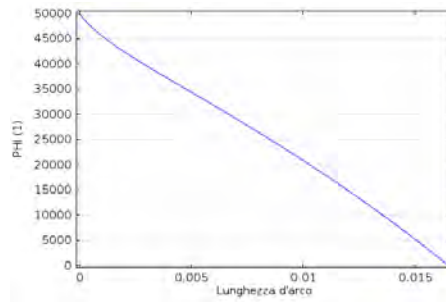


(b) E lungo l'asse y.

Figura 5.12: Campo elettrico

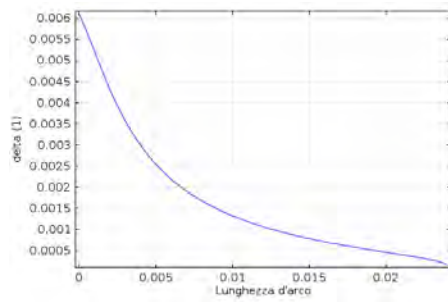
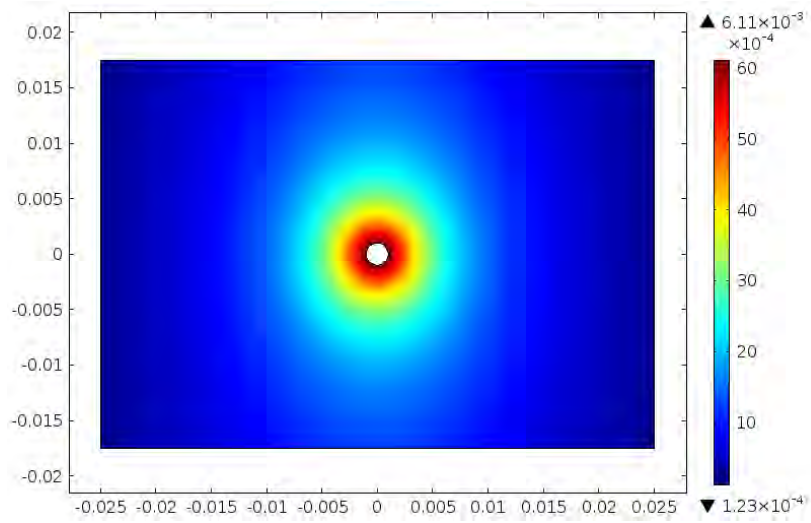


(a) φ lungo l'asse x.

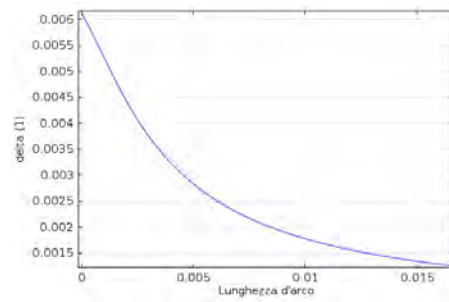


(b) φ lungo l'asse y.

Figura 5.13: Variabile φ (potenziale elettrico).



(a) δ lungo l'asse x.



(b) δ lungo l'asse y.

Figura 5.14: Densità di carica spaziale δ .

Risultati con geometria complessa e più elettrodi (attivi) La nostra configurazione, come si può vedere nelle Figure 5.38 e 6.3, non può essere approssimata al caso wire-plate con un unico elettrodo per la presenza delle piastre alimentate su cui si chiudono delle linee di flusso non consentendo di considerare il primo e il secondo stadio come due regioni disaccoppiate per il problema elettrostatico e di densità di carica. Per rendere il problema semplificato più simile al caso reale si è utilizzata la medesima geometria vista nel caso precedente con l'aggiunta di due lamelle poste simmetricamente ai lati del dominio rettangolare sul quale è stato imposto un potenziale $V_1 < V_0$, relazione analoga al caso reale. Imponendo sull'elettrodo una tensione pari a 50 kV come nel caso precedente e sulle lamelle una tensione pari a 10 kV, applicando la procedura descritta si ottengono i risultati raffigurati in Figura 5.16.

Aumentando il potenziale sulle lamelle, si è tuttavia riscontrato che, oltre un determinato valore di potenziale, l'algoritmo non converge e la soluzione non è individuabile. Nella configurazione attuale, il valore di potenziale V_1 limite per la convergenza è stato individuato pari a $0.2562 \cdot V_0 = 12.81$ kV. Durante il presente lavoro di tesi si sono effettuati numerosi tentativi con diversi modelli geometrici (sia realizzati appositamente, sia con geometrie ricavate dalla letteratura) e diverse formulazioni delle equazioni di Maxwell per trovare soluzione al problema.

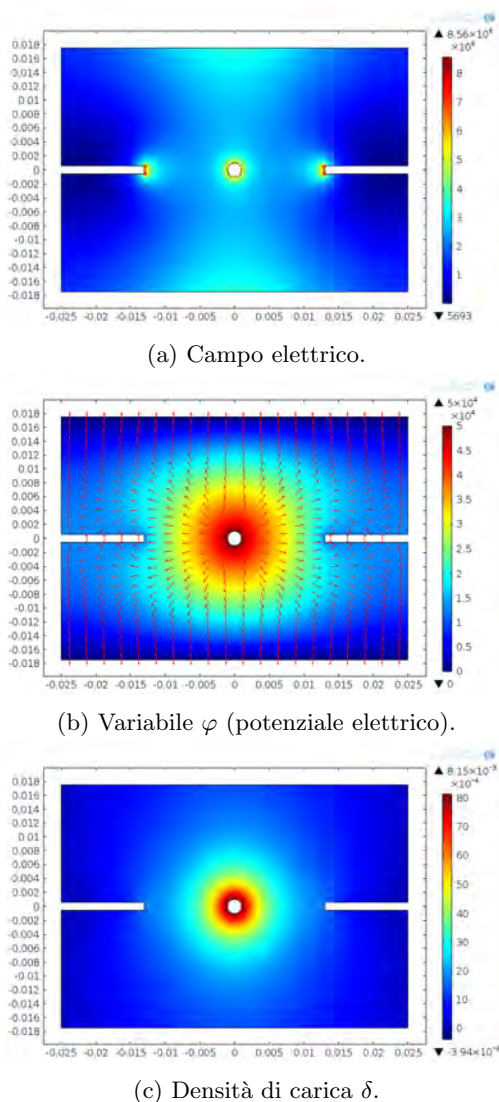


Figura 5.15: Risultati nel caso multi-potenziale con $V_0 = 50$ kV e $V_1 = 12.81$ kV.

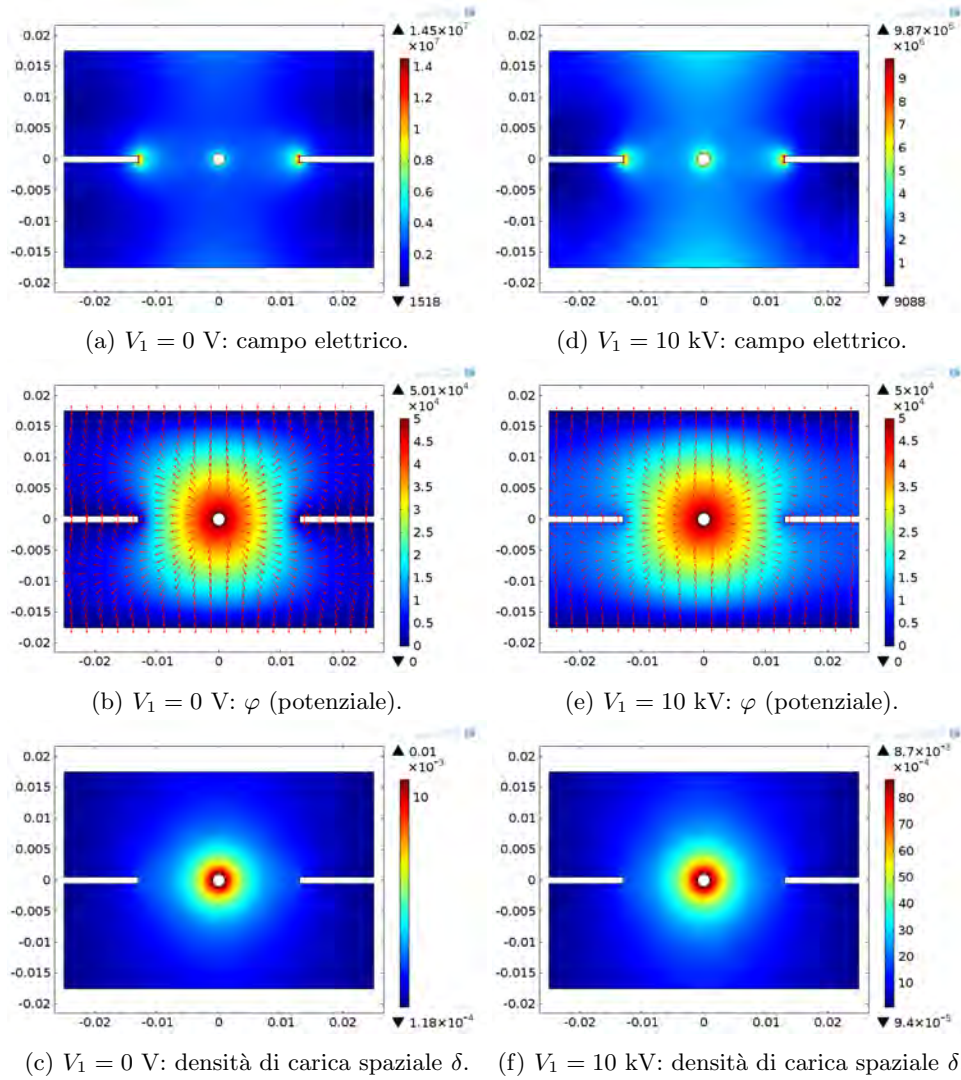


Figura 5.16: Risultati nel caso multi-potenziale con $V_0 = 50$ kV e $V_1 = 0$ kV (sinistra) a confronto con $V_1 = 10$ kV (destra). Si notino le diverse scale di valori per il campo elettrico e la densità di carica.

Soltanto analizzando il caso limite appena citato si è compreso quale fosse la causa della mancata convergenza. I risultati ottenuti col valore limite di $V_1 = 0.2562 \cdot V_0$ (Figura 5.15), seppur molto simili al caso con $V_1 = 10 \text{ kV}$, evidenziano un aspetto di fondamentale diversità: in Figura 5.15b si può notare come il campo elettrico, la cui direzione è indicata dalle frecce di colore rosso, diversamente dal caso precedente sia rivolto verso l'alto ed uscente (o entrante nel dominio) ortogonalmente alla superficie nella zona della lamella a distanza maggiore dall'elettrodo centrale.

Per una migliore visione del fenomeno si sono riportati in Figure 5.17 e 5.18 i grafici rappresentanti il potenziale e la direzione del campo elettrico nella porzione del dominio più lontana dall'elettrodo in corrispondenza delle lamelle.

Osservando la definizione del problema elettrostatico si può notare come, a δ dato, esso sia un problema di tipo *diffusivo* spesso noto come “divgrad”. Le condizioni al contorno corrette per la fisica elettrostatica sono quindi Dirichlet e Neumann, rispettivamente sugli elettrodi (filamento, piastre a ground, eventualmente lamelle alimentate a V_1). Una volta risolto il problema, tipicamente con una δ di tentativo, si risolve $\nabla \cdot J = 0$. Evidenziando in tale espressione la variabile δ , $\nabla \cdot [(bE)\delta] = 0$, si vede chiaramente come il problema sia di tipo *advection*: in modo analogo ad un problema fluidodinamico dove la velocità è imposta solo dove entrante nel dominio, così la condizione di campo elettrico (Dirichlet) dev'essere imposta dove il campo è entrante. Finché si ha un solo elettrodo e un solo potenziale, l'unica linea (se in 2D) dove il campo è entrante è la superficie dell'elettrodo. Qualora siano presenti più elettrodi, come nel caso con le lamelle a tensione V_1 imposta, il metodo continua a convergere fintanto che il potenziale sull'elettrodo a tensione minore non è tale da causare l'inversione di direzione del campo passando da uscente ad entrante. Nell'esempio qui riportato, fino al potenziale $V_1 = 0.2562 \cdot V_0 = 12.81 \text{ kV}$ si vede come il campo sia uscente dal dominio o, per V_1 molto prossime al limite indicato, entrante ma non perfettamente ortogonale alla lamella. Con $V_1 > 12.81 \text{ kV}$ il campo diventa esattamente entrante e l'assenza di una condizione di Dirichlet sul campo (ovvero Neumann sul potenziale) rende le condizioni al contorno insufficienti. Soluzione al problema sarebbe il porre delle condizioni al contorno che dipendono da δ : ad ogni step mutano sia il valore delle condizioni sia gli elementi in cui tali condizioni vanno poste. Se la soluzione al problema elettrostatico e di densità di carica consiste nella soluzione iterativa di due problemi accoppiati in cui il risultato di ogni singolo step deriva a sua volta

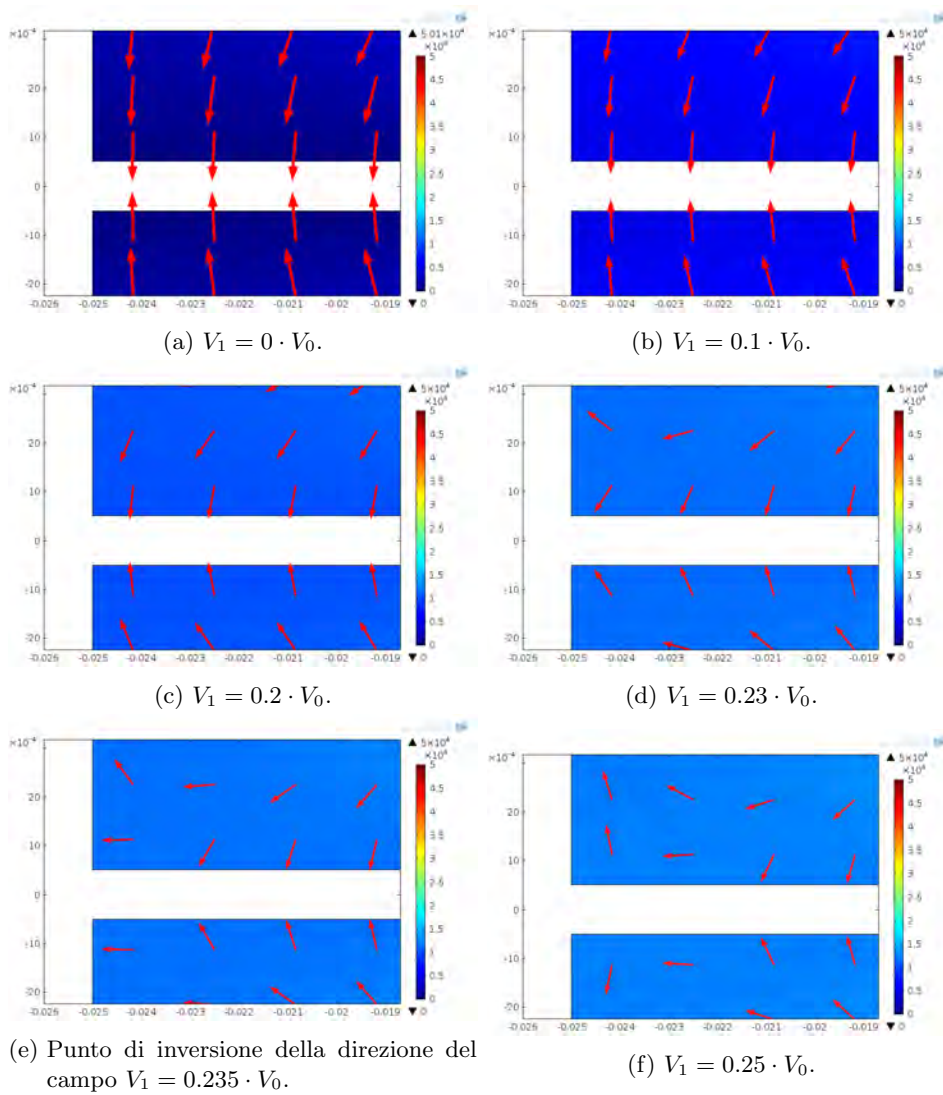


Figura 5.17: Potenziale e direzione del campo elettrico al variare di V_1 (tensione sulla lamella) lontano dall'elettrodo.

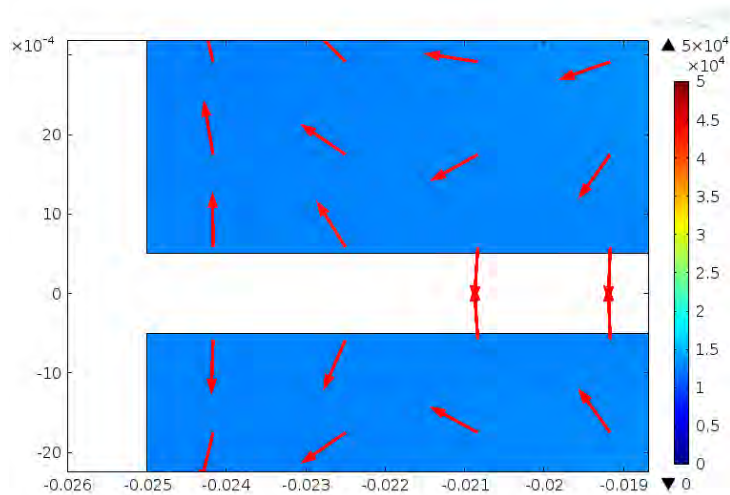


Figura 5.18: Potenziale e direzione del campo elettrico nel caso limite di convergenza $V_1 = 0.2562 \cdot V_0$.

da una procedura iterativa, a ciò si aggiunge il fatto che il campo imposto dev'essere modificato ad ogni passo iterativo variando l'ambiente dove la soluzione del passo precedente è stata generata e dilatando inevitabilmente i tempi di calcolo.

Considerazioni analisi numerica

Il problema appena presentato può essere risolto in COMSOL scrivendo manualmente non solo le equazioni, come descritto in precedenza, ma anche un metodo per fissare di volta in volta le condizioni al contorno su quegli elementi che presentano un campo entrante nel dominio. La procedura, piuttosto complessa da realizzare, presenta quindi un onere computazionale notevole: nonostante si possano sfruttare delle simmetrie per ridurre la dimensione della *stiffness matrix*, la necessità di elementi molto piccoli per una descrizione puntuale in prossimità dell'elettrodo e in corrispondenza dei punti di inversione del campo rende il problema complesso da risolvere e difficilmente utilizzabile dal punto di vista industriale per un controllo della produzione di ozono da parte di un filtro elettrostatico nelle varie condizioni in cui si possa trovare sia dal punto di vista elettrico (alimentazione), sia, eventualmente complicando il modello, da un punto di vista ambientale (temperatura, pressione, umidità). Per i motivi appena citati, la ricerca di una soluzione numerica è stata abbandonata in favore di un'analisi più semplice ma ugualmente efficace e più in sintonia con i requisiti industriali,

specialmente di costo, espressi da SIC (si veda il Paragrafo 5.2.2).

Analisi sperimentale

Per gli obiettivi del presente lavoro di tesi, conoscere esattamente la produzione di ozono sarebbe stato un risultato interessante dal punto di vista scientifico, ma non indispensabile e di scarsa utilità pratica per la realizzazione di un modello non essendo necessario che esso sia unico e tale da tenere in considerazione contemporaneamente entrambi gli aspetti in analisi: efficienza di cattura e generazione di ozono. Vista la difficoltà computazionale non commisurata all'utilità che il risultato avrebbe conferito, si è preferito indagare su quale fossero i parametri geometrici e soprattutto elettrici in grado di influenzare la produzione di ozono. Come si è visto in 2.4 e 2.3.3, i parametri su cui è possibile agire sono molteplici: dal materiale, alla forma degli elettrodi, ai parametri ambientali e atmosferici, ecc. Considerato che il materiale universalmente ritenuto più idoneo per la realizzazione degli elettrodi per motivi di resistenza meccanica e conducibilità elettrica è il tungsteno, che i diametri utilizzabili sono quelli reperibili sul mercato, che le piastre non producono ozono ai livelli di tensioni utilizzati⁸, che i parametri ambientali sono difficilmente trattabili e comunque, essendo questa tipologia di filtro adatta ad infrastrutture per usi civili, poco variabili nell'intorno dei valori che garantiscono il miglior comfort, l'attenzione del presente studio si è concentrata sul valutare quali fossero i parametri elettrici controllabili (tensioni di elettrodo e piastre, eventualmente corrente da questi dipendenti) che agissero direttamente sulla produzione di ozono. In assenza di una posizione univoca in letteratura in grado di fornire una base teorica generale ed utilizzabile in ogni tipo di configurazione geometrica, all'analisi numerica si è preferita un'analisi di tipo sperimentale, col limite di rendere il risultato adatto alla configurazione geometrica del prototipo utilizzato.

È stata quindi effettuata una campagna di misure che valutasse l'effetto di diversi parametri sulla concentrazione di ozono variandone soltanto uno per ogni misura così da comprendere quali fossero quelli più significativi. Per impossibilità di controllare in modo puntuale i parametri ambientali e

⁸In realtà le imperfezioni superficiali e di lavorazione (si veda a titolo d'esempio la Figura 5.28) creano zone dove il campo si concentra tanto da raggiungere la condizione di innesco e quindi generare ozono seppur in quantità nettamente inferiori rispetto a quanto generato dall'elettrodo a pari tensione; tipicamente alimentando le sole piastre la concentrazione massima raggiunta nel volume d'aria contenuto in cabina è un ordine di grandezza inferiore. Va ricordato che queste imperfezioni limitano le tensioni massime raggiungibili per il sopraggiungere della scarica anche a tensioni relativamente contenute.

la portata d'aria (vedi 4.4) e per semplicità di misura in vista anche della necessaria economicità di un controllo da realizzare, la scelta è ricaduta sull'effetto dovuto alla variazione dei parametri elettrici, come suggerito in [61]: come già sottolineato in 2.4.2, la relazione (2.4.20) presenta una dipendenza soltanto da E_{av} e I dove E_{av} , ammessa l'assunzione di Kaptzov descritta e verificata in [4], è un parametro che, al di sopra della tensione di innesco, dipende soltanto dalla configurazione geometrica (se i parametri ambientali sono supposti costanti⁹) ed è quindi costante.

Risultati analisi sperimentale

Per avere una conferma sperimentale che le piastre non sono primariamente implicate nella produzione di ozono, si sono innanzitutto effettuati due cicli di misura, uno a corrente costante e uno a tensione di elettrodo costante, in ciascuno dei quali la tensione nelle piastre è stata fatta variare da 3 a 5 kV. I risultati sono riportati in Tabella 5.2. La concentrazione indicata in tabella è la massima raggiunta in cabina durante le misurazioni (la motivazione e il significato di questo parametro sono spiegati di seguito).

Tipo di controllo	V ₁	I	V ₂	[O ₃]	Efficienze			
	[kV]	[μA]	[kV]	[ppb]	0.3 μm	0.4 μm	1 μm	2.5 μm
<i>I</i> costante	8.43	450	3.5	295	0.9910	0.9926	0.9868	0.9781
	8.48	450	4.0	366	0.9922	0.9934	0.9898	0.9762
	8.55	450	4.5	382	0.9929	0.9941	0.9909	0.9520
	8.64	450	5.0	384	0.9944	0.9944	0.9911	0.9760
	8.74	450	5.5	380	0.9946	0.9946	0.9917	0.9683
<i>V</i> ₁ costante	8.5	508	3.5	340	0.9887	0.9905	0.9879	0.9724
	8.5	425	4.0	302	0.9908	0.9926	0.9865	0.9774
	8.5	391	4.5	260	0.9916	0.9921	0.9730	0.8577
	8.5	315	5.0	201	0.9902	0.9925	0.9931	0.9813
	8.5	258	5.5	161	0.9885	0.9898	0.9826	0.9741

Tabella 5.2: La tabella raccoglie la massima concentrazione di ozono raggiunta in cabina durante le misure indicata con [O₃] e le efficienze riscontrate a diverse tensioni V₂ applicate sulle piastre mantenendo costante la corrente I o la tensione sull'elettrodo V₁. Le misure sono state realizzate con un filtro a piastre forate ed elettrodi da 0.3 mm.

⁹La piccola variazione percentuale dei parametri ambientali all'interno della cabina per misure effettuate in una giornata permettono di considerare questi parametri costanti.

Guardando i valori in quarta colonna della Tabella 5.2, si può facilmente notare come la massima concentrazione di ozono raggiunta si mantenga su valori stabili quando sul dispositivo è presente una corrente costante, diversamente da quanto accade alimentando le piastre in modo analogo ma mantenendo costante la tensione di elettrodo: in questo secondo caso, la concentrazione di ozono cresce al crescere della corrente che si stabilisce sul dispositivo. Come già visto in 5.2.1, fissata la tensione sull'elettrodo e facendo variare la tensione sulle piastre, la configurazione geometrica è tale da far aumentare la corrente al calare della tensione V_2 perché in questo modo il campo elettrico, proporzionale alla corrente per quanto visto in 2.4.1, aumenta. Dai risultati emersi, la grandezza elettrica più interessante da considerare è la corrente, in accordo con lo studio di Awad e Castle [61] e con la spiegazione fisica della ionizzazione essendo la corrente un indicatore dell'entità del fenomeno e quindi della probabilità che avvenga almeno una delle reazioni indicate in 2.3.2. Un tipico andamento risultante da una misurazione a tensioni V_1 di elettrodo e V_2 di piastre fissate è indicato in Figura 5.19. L'accensione del filtro è indicata dall'aumento di corrente.

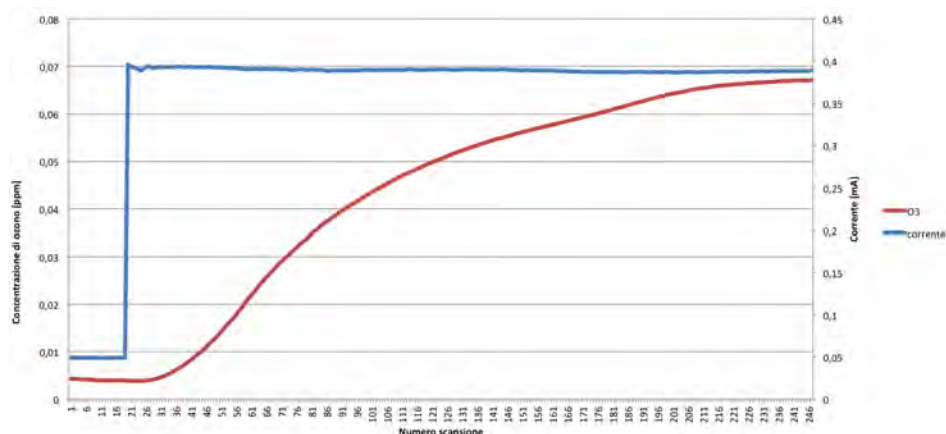
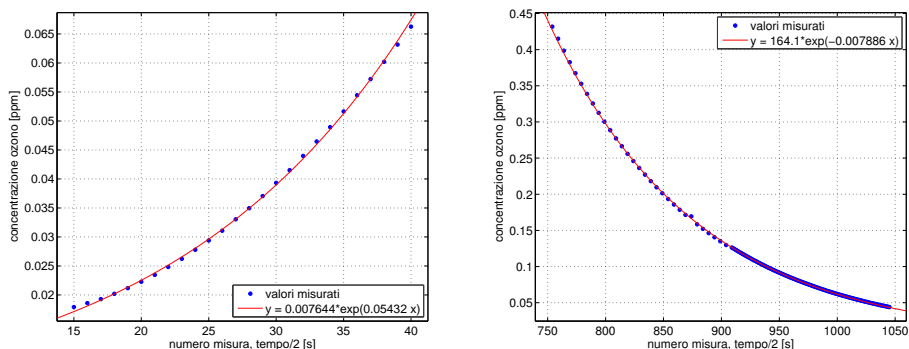


Figura 5.19: Andamento dell'ozono e della corrente in cabina misurati con un campionamento ogni 2 secondi. La misura è stata effettuata con un elettrodo di diametro 0.16 mm a cui è stata applicata una tensione pari a 7 kV, mentre sulle piastre (piene con dentatura) la tensione è pari a 3 kV.

Il dato presente in Tabella 5.2 sulla concentrazione di ozono massima raggiunta durante le misure¹⁰ non è in realtà il dato più interessante. Esso è, infatti, un dato globale che non fornisce indicazioni su quale sia l'entità dei fenomeni di ricombinazione, quante le perdite di ozono per non perfetta

¹⁰Il raggiungimento della concentrazione massima impiega tanto più tempo quanto più alta è la corrente.



(a) Crescita dell'ozono durante le misure nei primi istanti successivi l'accensione del filtro. (b) Decrescita dell'ozono durante le misure dopo lo spegnimento del filtro.

Figura 5.20: Interpolazione con funzione esponenziale della concentrazione di ozono nel tempo. Nella funzione interpolante non è presente l'intercetta perché si è utilizzata la procedura automatica di fitting di MATLAB con funzione esponenziale ($y = a * \exp(b * x)$).

ermeticità della cabina e quale invece l'effettiva produzione di ozono generata dal filtro; i fenomeni di ricombinazione, in particolare, sono favoriti dalle zone a campo elettrico elevato presente sia nello stadio di ionizzazione che di cattura e sono tanto più importanti quanto più alto è il campo, quanto più estesa è l'area interessata da questi campi e quanto più alta è la concentrazione di ozono. Quest'ultima osservazione è ben visibile in Figura 5.19: negli istanti immediatamente successivi all'accensione del filtro, la concentrazione sale in modo esponenziale (Figura 5.20a), negli istanti successivi allo spegnimento del filtro la concentrazione cala in modo nuovamente esponenziale (Figura 5.20b) ad indicare che tante più molecole di ozono sono presenti nell'aria, tanto più probabile è una reazione di distruzione dell'ozono e ritorno alle sostanze presenti nell'aria in origine. La massima concentrazione è evidentemente una condizione di equilibrio tra generazione e distruzione di ozono dove i due esponenziali si compensano.

Il raggiungimento di una concentrazione massima visibile in Figura 5.19 è tuttavia possibile soltanto perché il circuito d'aria presente in cabina è caratterizzato da un volume d'aria molto contenuto e il ricircolo è prossimo al 100%¹¹, condizioni ben lontane da quelle operative standard di un filtro installato in un ambiente civile/residenziale.

Una misura più opportuna per una descrizione generale della produ-

¹¹Sono inevitabilmente presenti sia delle perdite dall'interno della cabina verso l'esterno, sia immissioni d'aria dall'ambiente esterno.

zione di ozono indipendente dal circuito d'aria in cui è inserito il filtro è, anziché la massima concentrazione, la velocità di variazione della concentrazione, anche detta *generation rate* (misurata in ppm/s). Se l'andamento della concentrazione forniva una descrizione globale del problema e rendeva inscindibili le cause che avevano condotto a tale valore, la *generation rate*, in particolare il suo valore massimo raggiunto nella rampa di crescita negli istanti successivi all'accensione del filtro, indica quale sia la generazione dovuta esclusivamente al filtro in un determinato stato di alimentazione prima che intervengano fenomeni ricombinativi che riportano la *generation rate* a valori inferiori fino a stabilizzare la concentrazione ad un valore pressoché costante (il valore massimo finora citato e ben visibile in Figura 5.19). In altre parole, anziché utilizzare l'andamento della concentrazione nel tempo come valore fondamentale, d'ora in poi si utilizzerà la sua pendenza. Per quanto detto, d'ora in poi col termine *generation rate* ci si riferirà alla pendenza massima, valore costante per tempi di permanenza delle molecole di gas nel primo stadio compresi tra 0.75 e 30 ms¹² [54]. In Figura 5.21 è riportata una rappresentazione grafica di quanto appena descritto, dove si sono evidenziati la *generation rate* (in rosso) come da definizione e il punto di flesso (in verde) che indica il punto oltre il quale la concentrazione continua a crescere ma con velocità inferiore a causa dei fenomeni di ricombinazione non più trascurabili.

Per calcolare la retta tangente rappresentante la *generation rate* e il punto di flesso, è stato necessario interpolare l'andamento della concentrazione nel tempo utilizzando una funzione analitica. La scelta, per semplicità applicativa e per la buona interpolazione offerta, è ricaduta sull'inversa di una funzione cubica¹³ (ovvero simmetrica rispetto alla bisettrice del primo e terzo quadrante) raffigurata in Figura 5.22.

La procedura utilizzata per ogni misura effettuata è la seguente:

1. Considero i valori nell'intervallo compreso tra l'aumento iniziale dell'ozono nell'aria e il verificarsi della riduzione di velocità di generazione oltre il punto di flesso

¹²Valori di permanenza tipici per Indoor air-cleaners sono 10÷20 ms [54]. Il motivo della scarsa sensibilità della *generation rate* alla variazione del tempo di permanenza è da cercarsi nei fenomeni ricombinativi che avvengono anche al di fuori della zona di ionizzazione [108].

¹³Quello che operativamente si è effettuato, in realtà, è stato invertire i valori misurati e interpolare con una cubica.

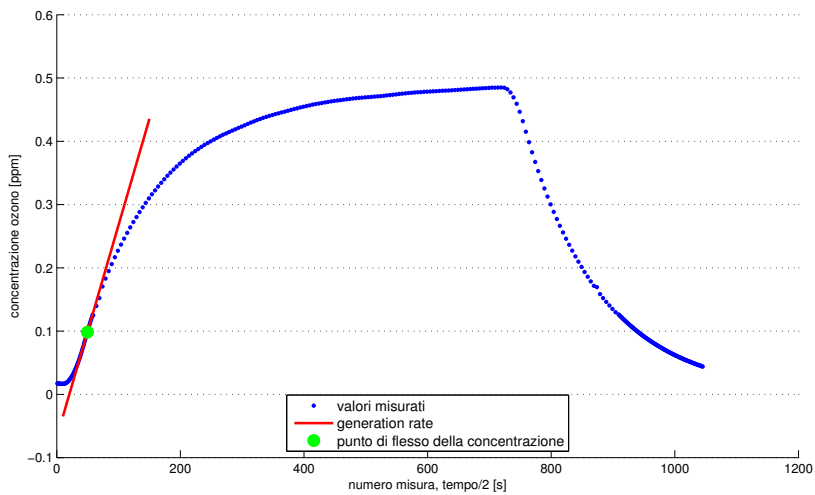


Figura 5.21: Concentrazione di ozono misurata applicando sul filtro una corrente costante pari a 0.6 mA.

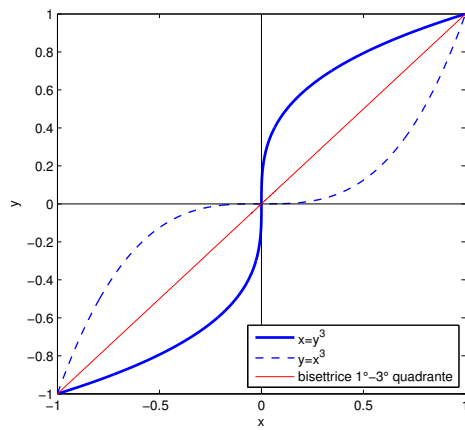


Figura 5.22: Rappresentazione della funzione analitica utilizzata per interpolare i valori di concentrazione d'ozono misurati.

2. Inverto tali valori, rappresentandoli nel piano concentrazione di ozono–numero misura (gli assi sono invertiti rispetto ai grafici riportati finora)
3. Interpolo i risultati con una cubica
4. Calcolo derivate prima e seconda e ricavo le coordinate del punto di flesso, in cui si annulla la derivata seconda
5. Calcolo il valore della derivata prima nel punto di flesso
6. Calcolo l'inverso di tale valore che mi fornisce il valore della generation rate in ppb/s

In Appendice C.2 è riportato il codice MATLAB con cui si è realizzata l'operazione appena descritta, mentre in Figura 5.23 è presente una rappresentazione dei risultati ottenuti. Per consentire il calcolo anche agli operatori presso SIC non aventi MATLAB disponibile e non conoscendo nei dettagli il codice, si è realizzata un'applicazione con interfaccia grafica in grado di effettuare la procedura appena elencata una volta caricato il file così come dato in output dal BenchLink e dichiarato manualmente quale sia l'intervallo d'interesse per il calcolo della generation rate. L'applicazione è descritta in dettaglio in Appendice C.1.

La misura è stata effettuata per correnti pari a 150, 300, 450, 600, 750, 900 e 1050 μA . Considerando una corrente di circa 70 μA presente anche in assenza di innesco, si sono riportati su un grafico i valori di generation rate ottenuti in funzione alla corrente presente.

Come si vede in Figura 5.24, i valori possono essere ben rappresentati da una retta ed è pertanto possibile affermare che la relazione tra generation rate e corrente presente nel filtro è lineare, in accordo con [61], ed è possibile predire, data una certa corrente facilmente misurabile, quale sia la generazione di ozono esclusi i fenomeni di ricombinazione presenti in ambienti piccoli e con elevato ricircolo. L'equazione della retta interpolante che descrive la generation rate $[O_3]'$ espressa in ppb/s in funzione della corrente totale I nel prototipo utilizzato espressa in μA è

$$[O_3]' = 0.003796 \cdot (I - 70) \quad (5.2.4)$$

con il termine all'interno delle parentesi rappresentativo della corrente di 70 μA esistente anche in condizioni pre-innesco¹⁴. Essendo presenti 5 elettrodi nel prototipo, è possibile affermare che la generation rate dovuta ad

¹⁴È dovuta al non perfetto isolamento garantito dall'aria.

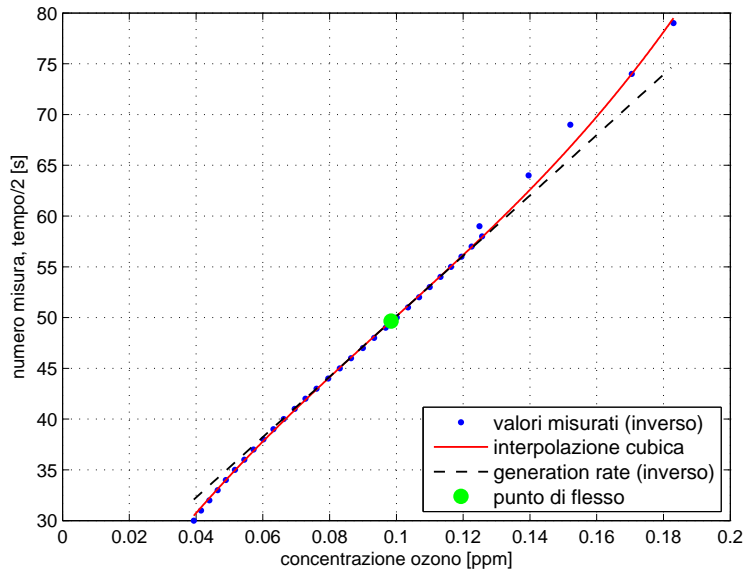


Figura 5.23: Risultato dell'interpolazione cubica sui valori misurati e del calcolo della generation rate (nel grafico è rappresentata la sua inversa) e del punto di flesso come da procedura descritta.

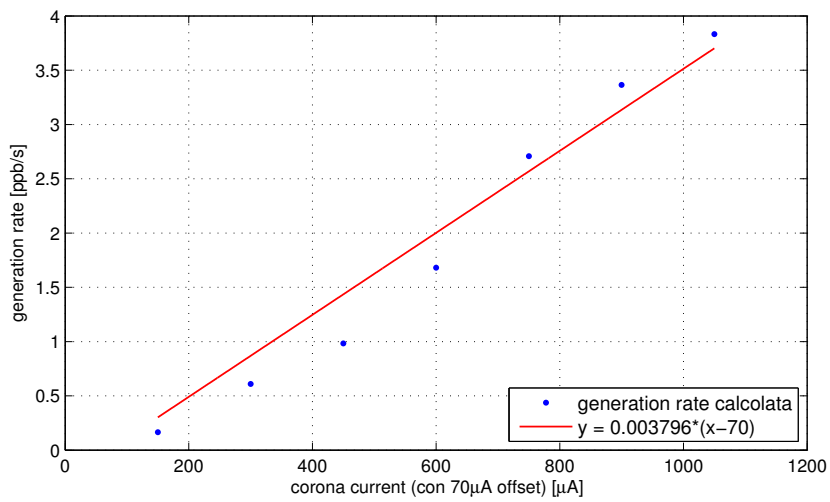


Figura 5.24: Generation rate in funzione della corrente costante imposta.

un singolo filamento è pari ad $\frac{1}{5}$ della totale essendo la corrente misurata la risultante delle correnti dovute ai singoli filamenti connessi in parallelo¹⁵.

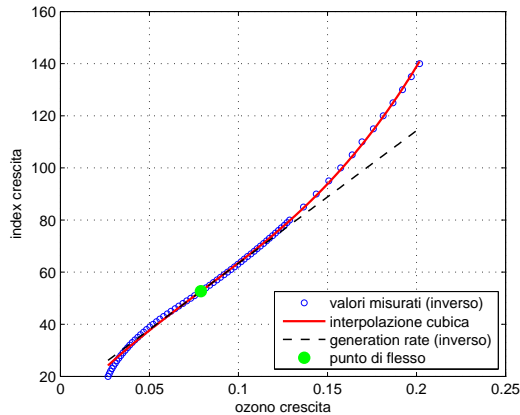


Figura 5.25: Il grafico rappresenta l'inverso dei valori di concentrazione misurati applicando una corrente costante pari a $450 \mu\text{A}$. L'interpolazione, in questo caso, comporta una sottostima della generation rate: come si vede nel grafico in basso a sinistra, l'interpolante cubica passa sotto i valori misurati e la tangente (in nero tratteggiato) è più pendente di quanto dovrebbe essere. Essendo la generation rate l'inverso della retta tangente appena citata è evidente come una sottostima sia inevitabile.

Lo scarto che i valori presentano è principalmente dovuto ad un errore di interpolazione dei risultati: a titolo d'esempio, in Figura 5.25 si vede l'errore di interpolazione introdotto dal metodo in particolare per i punti iniziali di crescita dell'ozono (sarebbe necessaria una funzione di grado superiore al terzo) che porta a sottostimare la generation rate ed introdurre quindi l'errore visibile in Figura 5.24: infatti tanto più l'interpolazione non segue l'andamento dei punti misurati per concentrazioni basse, tanto più la retta tangente nel punto di flesso nei grafici di Figura 5.23 e 5.25 avrà un coefficiente angolare elevato e quindi tanto più piccola sarà la generation

rate, ovvero la sua inversa.

La linearità presente tra generation rate e corrente si può estendere, per ambienti sufficientemente grandi, anche alla relazione tra concentrazione di ozono e corrente, in accordo con gli studi di Viner [62].

Verifica ozono dovuto allo stadio di cattura

Seppur di entità quasi trascurabile¹⁶ rispetto alle concentrazioni raggiunte nello stadio di ionizzazione, durante le misure si è riscontrato che una ten-

¹⁵In realtà le piccole differenze di campo tra l'elettrodo presente nella sezione centrale del filtro e quelle più esterne causano una differenza di corrente tra un filamento e l'altro, in particolare l'elettrodo più esterno sarà interessato da una corrente maggiore essendo maggiore il campo elettrico.

¹⁶Le forti limitazioni imposte e le piccolissime concentrazioni ammesse dalla normativa rendono difficilmente trascurabili anche contributi modesti.

sione di innesco esisteva anche per lo stadio di cattura, dove le curvature dei componenti presenti sono almeno un ordine di grandezza superiore a quelle presenti nello stadio di ionizzazione (l'elettrodo è molto più piccolo della curvatura minima delle piastre). La tensione di innesco, di valore sempre inferiore ai 9 kV, è presente sia per le piastre piene con la dentatura laterale, sia per le piastre forate dove l'innesco avveniva a potenziali ancora inferiori, nell'intorno dei 6 kV. Si sono quindi cercate le cause di tale fenomeno analizzando tutti gli elementi strutturali che allontanavano il filtro dalla configurazione teorica utilizzata in COMSOL per valutare i campi presenti: se si verifica l'innesco, secondo quanto detto in 5.2.1, si dovrebbe avere un campo elettrico non inferiore a quello di Peek anche nello stadio di cattura (seppur di difficile stima non conoscendo la curvatura ad esempio dei bordi di taglio).

In assenza di una camera UV che consentisse di identificare dove si instaurasse l'effetto corona nella zona delle piastre¹⁷, in prima battuta, si sono analizzate le zone prossime alle colonnine distanziatrici presenti tra le piastre (Figura 5.26), la cui funzione è duplice: garantire rigidità meccanica alla struttura evitando vibrazioni e movimenti durante il passaggio dell'aria tra le piastre e creare continuità elettrica tra piastre da alimentare allo stesso potenziale. L'esiguo spessore delle piastre direttamente affacciato alla colonnina cilindrica in corrispondenza del foro passante poteva essere un punto dove il campo si concentrava. Si è quindi effettuato in COMSOL uno studio elettrostatico 2D analogo a quello descritto in 5.2.1 il cui risultato è riportato in Figura 5.27.

Il massimo campo elettrico calcolato con COMSOL nell'area prossima alle colonnine è pari a $5.17 \cdot 10^6$ V/m lo si trova in corrispondenza al punto in cui la piastra è stata forata al laser. Anche se la configurazione si discosta da quella ipotizzata nella teoria di Peek, si è considerata la piastra centrale come un elettrodo equivalente essendo qui il punto a raggio inferiore del sistema analizzato e, di conseguenza, con campo maggiore. Approssimando cautelativamente il diametro dell'elettrodo equivalente allo spessore della piastra¹⁸ e quindi pari a 0.5 mm, la relazione di Peek in condizioni STD

¹⁷Dove insorge l'effetto corona si forma una luminescenza dovuta a microscariche elettriche a bassa temperatura che emettono raggi UV identificabili da un'apposita fotocamera.

¹⁸La curvatura della zona interessata è quasi nulla essendo il taglio eseguito al laser. Essendo il campo di innesco tanto più piccolo quanto più grande è il raggio di curvatura, effettuare il calcolo con un raggio più grande di quello reale difficilmente stimabile significa calcolare un campo di innesco sicuramente più piccolo del reale e una condizione quindi più restrittiva.

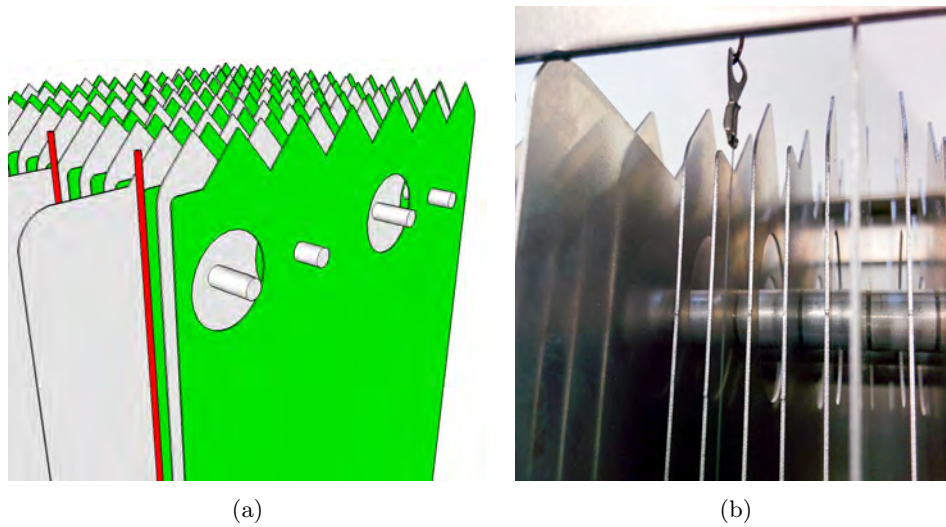


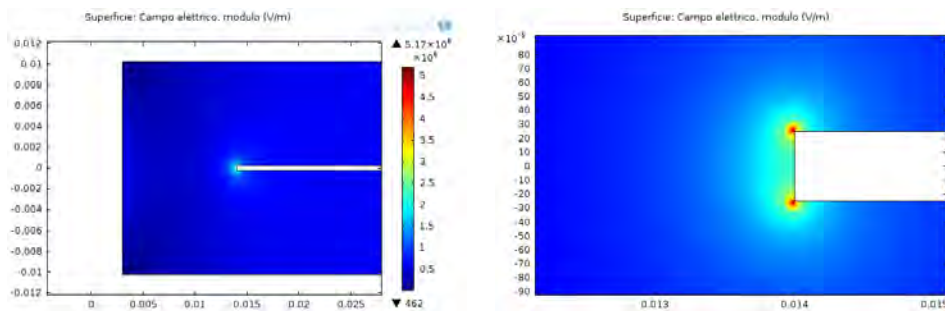
Figura 5.26: Modello 3D e foto del filtro con dettaglio delle colonnine e dei fori passanti.

stima un campo di innesco pari a

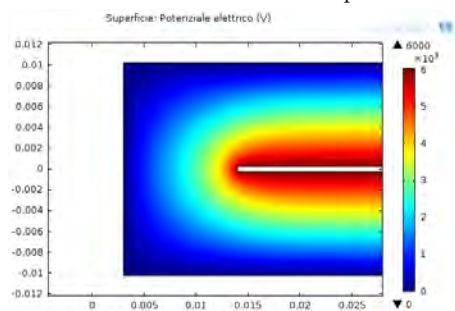
$$E_{innesco} = 3.01 \cdot 10^6 \cdot \left(1 + \frac{0.0301}{\sqrt{r[m]}} \right) = 3.01 \cdot 10^6 \cdot \left(1 + \frac{0.0301}{\sqrt{2.5 \cdot 10^{-4}}} \right) \simeq 8.74 \cdot 10^6 \frac{V}{m}$$

valore ben superiore a quanto calcolato per via numerica. Le colonnine inserite nei fori passanti non creano quindi le condizioni necessarie all'innesco e non sono le responsabili della produzione di ozono nello stadio di cattura.

Per le piastre piene e dentate (vedi Figura 4.3), non essendovi altre irregolarità superficiali a meno di piccolissimi, rari e locali residui successivi al taglio laser, la causa è facilmente individuabile nei denti di sega presenti a lato. Diversa questione per le piastre forate che, nonostante l'assenza della dentatura, presentano tensioni di innesco inferiori che causano una generazione di ozono inferiore rispetto alla configurazione a piastre piene, ma che raggiungono facilmente la condizione di scarica anche a potenziali relativamente bassi, nell'intorno dei 6 kV. La spiegazione a tale problematica si è individuata nel processo di foratura della piastra, non realizzata con taglio al laser, ma tramite punzonatura. L'effetto del diverso tipo di taglio è la presenza di un bordino sporgente e particolarmente appuntito su una superficie della piastra in direzione della pressione esercitata dal punzone durante la realizzazione dei fori e visibile in Figura 5.28. Questa irregolarità superficiale di dimensioni molto ridotte è sicuramente un ottimo "concentratore di campo". Essendo difficilmente stimabili le dimensioni di tale bordino e,



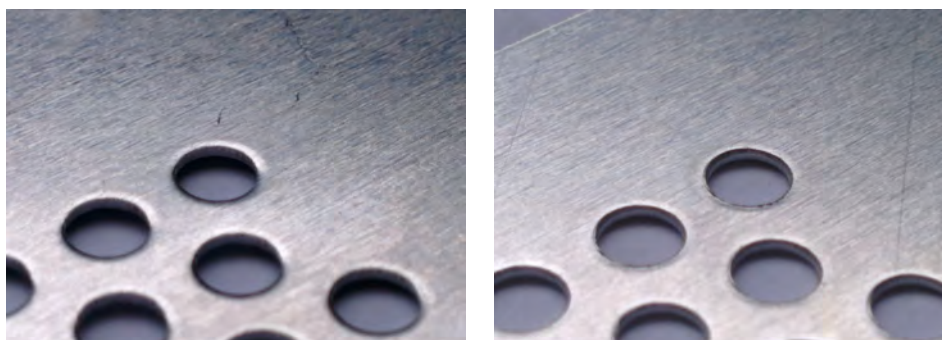
(a) Campo elettrico sulla sezione colonna-piastra alimentata. (b) Dettaglio del campo elettrico sulla piastra alimentata in corrispondenza del foro passante.



(c) Potenziale elettrico sulla sezione colonna-piastra alimentata.

Figura 5.27: Campo elettrico e potenziale sulla sezione colonna-piastra alimentata per valutare se si raggiunge l'innesco in questa zona con una tensione sulle piastre di 6000 V, condizione alla quale si verifica la scarica e/o la produzione di ozono. Il modello qui rappresentato è un assialsimmetrico 2D: nelle Figure 5.27a e 5.27c la linea verticale a potenziale nullo rappresenta la colonna a ground (l'ascissa pari a 3 mm indica il raggio delle colonnine), le linee orizzontali superiori e inferiori le piastre di raccolta. La piastra centrale è quella alimentata come si vede dal potenziale.

quindi, per impossibilità di costruire una geometria verosimile, non si sono effettuate simulazioni FEM sul fenomeno. Un'ulteriore conferma dell'ipotesi che su questo bordino si formino campi elevati che creano una condizione idonea all'innesco, si è ottenuta valutando l'efficienza di cattura utilizzando questo tipo di piastre. Il risultato è riportato e discusso in 5.2.3.



(a) Foro sulla superficie superiore (di inizio punzonatura).

(b) Foro sulla superficie inferiore (di fine punzonatura).



(c) Dettaglio del bordino sui fori.

Figura 5.28: Le figure presentano in dettaglio i fori realizzati sulle piastre; in particolare evidenziano la presenza di una deformazione in direzione della pressione di punzonatura.

Alle tensioni previste per le piastre (vedi 4.3.1), tuttavia, le piastre forate non causano alcun aumento di ozono. Alimentando esclusivamente lo stadio di cattura fino a 5 kV, infatti, la concentrazione di ozono rimane fissa al valore ambientale, come raffigurato in Figura 5.29. Se la tensione sale sopra questo valore, nell'esempio pari a 5.5 kV, l'ozono comincia a salire pur rimanendo sotto la concentrazione ammessa per normativa; va sempre

ricordato, tuttavia, che il volume d'aria e il forte ricircolo sono condizioni lontane dalla realtà. Con l'aumentare della tensione si verifica anche l'insorgere dei fenomeni di scarica come testimoniano le repentine variazioni della tensione riportata nel grafico in Figura 5.30 dove si riporta anche un esempio di confronto tra i due tipi di piastre disponibili. Durante le misure le piastre forate hanno dimostrato una produzione d'ozono sempre inferiore alla concentrazione raggiunta dalle piastre piene e dentate; d'altro canto i fenomeni di scarica nelle piastre forate cominciano a manifestarsi a tensioni più basse non consentendo quindi il raggiungimento di campi elevati per aumentare la cattura, qualora fosse accettabile l'ozono prodotto o vi fosse un dispositivo in grado di controllarne la concentrazione a valle.

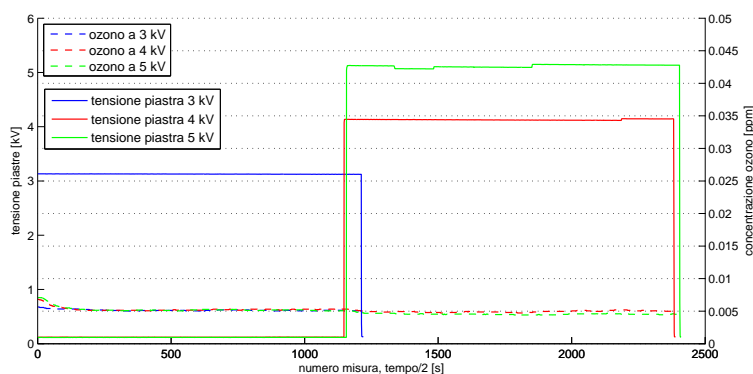


Figura 5.29: Concentrazione di ozono misurata alimentando le piastre a tensioni inferiori all'innesco. Si sottolinea come la concentrazione rimanga invariata all'accensione del filtro.

Considerazioni analisi sperimentale

Considerato il miglior comportamento delle piastre forate rispetto alle piastre piene e dentate, per quanto riguarda la produzione di ozono l'utilizzo delle nuove piastre comporta un miglioramento sensibile a parità di tensione applicata. Se la tensione viene poi ridotta appena al di sotto della tensione di innesco, nel caso in misura pari a 5.5 kV, la produzione di ozono si annulla completamente garantendo quindi uno stadio ozone-free. Diverso è il caso dello stadio di ionizzazione poiché la sua ragion d'essere sta nell'applicarvi alte tensioni e quindi elevati campi elettrici tali da creare un flusso di cariche che, dirigendosi dall'elettrodo alle piastre a potenziale nullo, carichino le particelle che incontrano (vedi 3.2.2). Come osservato in [13], avere uno stadio di ionizzazione alimentato a tensioni al di sotto dell'innesco significa

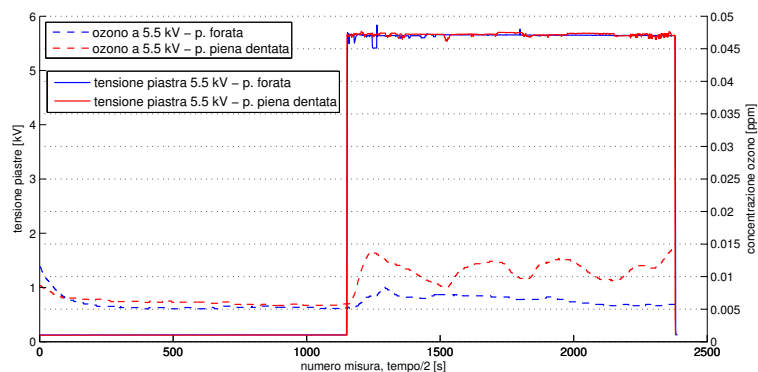


Figura 5.30: Concentrazione di ozono misurata alimentando le piastre a tensioni prossime all'innesco. Si sottolinea come la concentrazione cominci a salire non appena le piastre (soltanto) vengono alimentate e come si formino delle scariche locali nello stadio di cattura. Il grafico riporta anche un confronto tra piastre forate e piene-dentate dove si può vedere come le piastre piene, originariamente presenti nel filtro, abbiano un comportamento peggiore per quanto riguarda la produzione di ozono a tensioni elevate.

aver preso il peggio delle configurazioni possibili perché uno ionizzatore che non genera ozono, ma che al contempo non ionizza, non ha senso di esistere e crea ingombro inutile. Come riportato in 2.3.3, gli accorgimenti possibili per realizzare uno stadio di ionizzazione tale da produrre la minor quantità di ozono possibile, a parità di altre condizioni, sono sicuramente molteplici; comprensibilmente, ad una riduzione nell'ozono consegue un aumento dei costi o una riduzione della resistenza meccanica garantita dall'elettrodo qualora si intervenga sul materiale o, per quanto appena riportato, una riduzione di efficacia nel caricare le particelle in ingresso.

Un accorgimento che si è preso in considerazione e che SIC sta sviluppando in collaborazione con EAS S.p.A., è l'utilizzo di un controllo per limitare quanto possibile la produzione di ozono a parità di configurazione geometrica e materiali utilizzati (si veda il Paragrafo 7.1.1).

5.2.3 Risultato 3: modello per la cattura.

Per quanto affermato e riportato al Paragrafo 3.3, la scarsità di materiale presente in letteratura sulla captazione elettrostatica di particelle sub-micron ha reso necessarie la creazione di un modello e una verifica sperimentale. Per effettuare le misure di efficienza col prototipo disponibile, si è utilizzato il contatore ottico LightHouse Handheld 3016 già descritto al Paragrafo 4.3.7 dove si sono riportate anche le modalità di misura utilizzate in precedenza e riprese nel presente lavoro di tesi.

Modello di cattura

Lo studio si è inizialmente basato sulla relazione di Deutsch descritta al Paragrafo 3.3 e la cui relazione finale è qui riportata per comodità:

$$\eta = 1 - e^{-w \cdot \frac{S}{Q}} \quad (5.2.5)$$

dove S è la superficie di raccolta, Q la portata d'aria e w la velocità di migrazione delle particelle interessate dal fenomeno. Per w si è utilizzata la relazione (3.2.15)

$$\mathbf{w} = \frac{q \mathbf{E}_{ps} C_c}{3\pi\mu d_p} \quad (5.2.6)$$

dove q è la carica associata alla particella, \mathbf{E}_{ps} il campo elettrico presente tra le piastre nello stadio di cattura¹⁹, C_c il fattore di Cunningham (vedi Paragrafo 3.3), μ la viscosità dell'aria e d_p il diametro delle particelle in esame. Per la sezione di cattura si è semplicemente calcolata la superficie coperta dalle piastre di raccolta²⁰ e pari a $26 \cdot (0.159 \cdot 0.440 - 6 \cdot S_{foro}) \simeq 1.723 \text{ m}^2$: 26 è il numero delle facce disponibili per la cattura (14 piastre, le 2 più esterne offrono solo una faccia disponibile). Per Q si è fissato un valore pari a $630 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, ovvero $0.175 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$. Considerando che la carica di saturazione è presto raggiunta, come spiegato in 3.2.2, essa può essere calcolata con

$$q = q_s = \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \pi \varepsilon_0 d_p^2 \cdot \mathbf{E}_{cor} \quad (5.2.7)$$

¹⁹ $E_p = E_{ps}$ perché il campo tra le piastre di cattura e di repulsione è costante.

²⁰L'altezza delle piastre è stata ridotta per tener conto delle superfici eliminate dai raccordi; sono stati considerati i fori realizzati per le colonnine.

dove ε_r è la costante dielettrica relativa del gas²¹, ε_0 la costante dielettrica del vuoto. Non immediata è, invece, la definizione del campo elettrico che stabilisce quale sia la carica entrante nello stadio di cattura. Tutti i modelli presenti in letteratura analoghi a quello riportato sono relativi a precipitatori monostadio: tipicamente il modello si riferisce ad un filtro con configurazione wire-plate, ovvero composto di più piastre tra le quali sono disposti elettrodi equispaziati che fungono sia da ionizzatori che da generatori di “campo di repulsione” per favorire la cattura. Se in quest’ultimo caso il campo non varia dallo stadio ionizzatore, vero responsabile della carica delle particelle, allo stadio di cattura poiché gli elettrodi sono fisicamente alimentati allo stesso potenziale, nel caso di un filtro bistadio con elettrodo di ionizzazione e piastre di repulsione alimentati a tensione diverse la definizione del campo elettrico, da cui la carica dipende, non è facilmente stimabile. Considerando quanto affermato da Awad e Castle [61] per la problematica dell’ozono, anche in questo caso si è considerato come campo di ionizzazione lo stesso che prima era il responsabile della produzione di ozono, ossia il valor medio tra il campo di Peek calcolato sulla superficie dell’elettrodo e il valore di rigidità dielettrica dell’aria: in altre parole si è posta l’ipotesi che il campo \mathbf{E}_{cor} coincida con il campo \mathbf{E}_{av} della relazione (2.4.20) e rappresenti il campo medio nello strato d’aria ionizzata presente nell’intorno dell’elettrodo.

I risultati che si ottengono per le particelle di dimensioni analizzabili dal contatore ottico, secondo l’ipotesi appena posta, sono riportati in Figura 5.31.

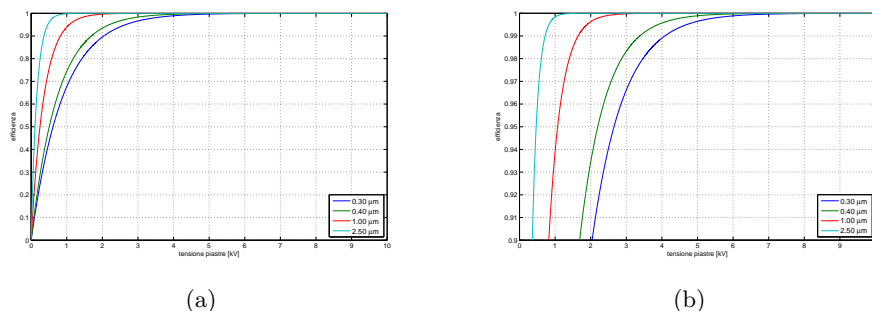


Figura 5.31: Curve analoghe a quelle presentate in Figura 3.11a ma con diametri di particelle misurabili dall’OPC.

Anche in questo caso, come descritto al Paragrafo 3.3, i risultati al variare

²¹Essendo il gas formato prevalentemente da aria ($\varepsilon_r = 1.00059$) con particelle sospese ($\varepsilon_r \approx 3 \div 5$, [109]), si è considerata una costante dielettrica del gas complessivo pari a quella dell’aria aumentata del 10%, ovvero $\varepsilon_r \approx 1.101$.

del diametro delle particelle sono in accordo con quanto individuato dagli studi di Gallimberti [50]. Le presenti curve sono state ottenute fissando nel filtro una corrente pari a 450 μA così da poterle confrontare con le misure riportate in Tabella 5.2. Per un confronto più accorto, si sono misurate le efficienze anche a tensioni inferiori a quelle finora utilizzate sulle piastre; i risultati sono riportati in Tabella 5.3.

tensioni settate [kV]	tensioni reali [kV]	Efficienze			
		0.3 μm	0.4 μm	1 μm	2.5 μm
1.50	1.61	0.9713	0.9770	0.9805	0.9701
2.25	2.37	0.9849	0.9874	0.9815	0.9524
3.00	3.11	0.9913	0.9926	0.9901	0.9705
3.50	3.64	0.9910	0.9926	0.9868	0.9781
4.00	4.14	0.9922	0.9934	0.9898	0.9762
4.50	4.61	0.9929	0.9941	0.9909	0.9520
5.00	5.16	0.9944	0.9944	0.9911	0.9760
5.50	5.61	0.9946	0.9946	0.9917	0.9683

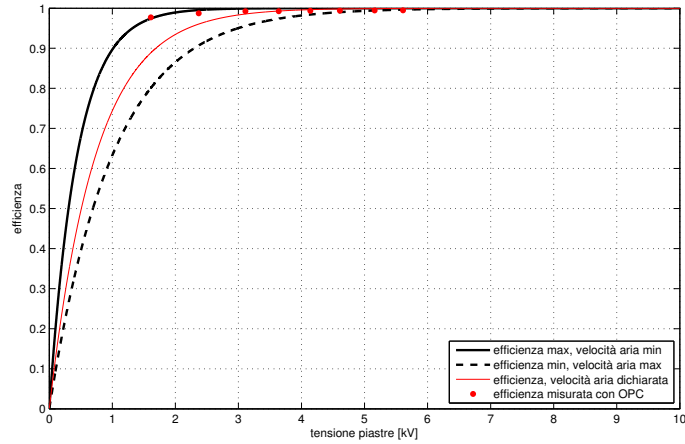
Tabella 5.3: La tabella riporta i valori di efficienza misurati in cabina alimentando il filtro in modo tale da mantenere una corrente pari a 450 μA e applicando sulle piastre di repulsione un potenziale pari a quello indicato. Il filtro è a piastre forate con elettrodo di diametro 0.3 mm.

Se i grafici in Figura 5.31 ottenuti dal modello di Deutsch sono in accordo con Gallimberti, le misure effettuate dal contatore ottico forniscono valori in disaccordo con questa: le particelle più grandi sono infatti caratterizzate da efficienze di cattura inferiori. Il principale motivo della discordanza è in realtà ben visibile in Figura 4.10 dov'è riportato il numero di particelle misurate in ogni ciclo divise per classe. Come già più volte ricordato, mentre le particelle submicron superano abbondantemente le 10000 unità (in alcuni casi superavano i 2 milioni), le particelle più grandi, specialmente quelle da 2.5 μm , sono in numero molto inferiore, spesso inferiore al minimo richiesto dalla normativa pari a 500 particelle. A confermare l'inaffidabilità di tali dati è l'elevata variabilità che li caratterizza tra i diversi cicli: la deviazione standard per le particelle maggiori è tipicamente pari al 20% del valore misurato a filtro spento, supera invece il 50% a filtro acceso, quando le particelle misurate sono talvolta soltanto alcune unità. Per questo motivo i risultati presentati in questo capitolo saranno relativi alle particelle da 0.4 μm , unico diametro considerato dalla normativa UNI 11254, e da 0.3 μm . Ulteriore considerazione non trascurabile è la più volte citata incertezza sulla portata d'aria, descritta in dettaglio al Paragrafo 4.4. Il valore di 630 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ utilizzato

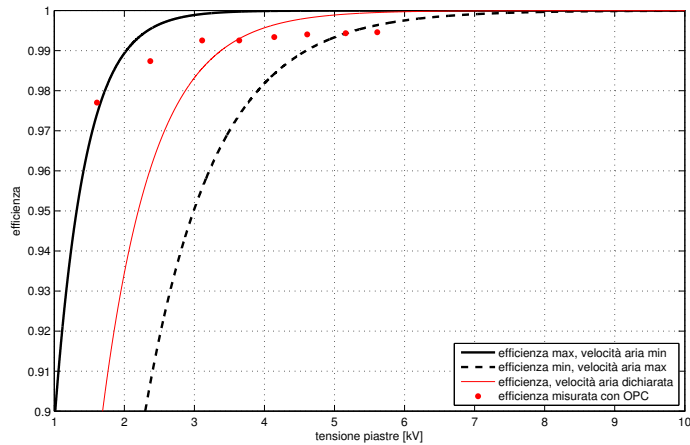
per la realizzazione dei grafici è in realtà un valore medio calcolato misurando con un anemometro a filo caldo la media nel tempo e nello spazio della velocità dell'aria in corrispondenza alla sezione di ingresso nel filtro. Durante la misura, infatti, si è mantenuta la sonda ferma per alcuni secondi in ogni punto di misura; i punti sono stati scelti posizionando manualmente la sonda in modo tale da coprire sia la parte centrale della sezione di ingresso, sia la zona di bordo. I valori che si sono visualizzati hanno presentato importanti e rapide variazioni tra 1.5 e $3.4 \frac{m}{s}$ con una media di circa $2.5 \frac{m}{s}$ cui corrisponde la portata media indicata. In Figura 5.32 sono riportate le efficienze che si otterrebbero con velocità dell'aria pari ai valori estremi di tale intervallo visualizzato anziché con una velocità di $2.5 \frac{m}{s}$ come dichiarato e per confronto riportato. Appare evidente come la pesante variabilità sulla portata incida sulla variabilità dell'efficienza calcolata con il modello di Deutsch, particolarmente problematica se si considera che l'obiettivo del presente lavoro è il raggiungimento di efficienze superiori a 99.5% con tensioni quanto più basse possibili, ovvero nella zona dove l'incertezza causata dalla variazione di velocità dell'aria è massima.

In generale, le efficienze misurate con il contatore ottico (pallini rossi in Figura 5.32) sono quasi totalmente contenute nella banda del modello contenuta tra le due linee nere spesse. Considerando comunque come valore nominale la portata di $630 \frac{m^3}{h}$, bisogna notare come il valore di efficienza fornito dal modello sottostimi i valori misurati per tensioni basse e come invece sovrastimi per tensioni elevate. Se nel secondo caso una motivazione può essere ricavata nell'effettiva impossibilità di raggiungere un rendimento unitario a causa dei fenomeni indesiderati citati nel Paragrafo 3.2.4, in particolare la re-immissione nell'aria di particelle precedentemente catturate per distacco dalle piastre di raccolta, la sottostima a basse tensioni è difficilmente spiegabile.

Numerose sono le tipologie di carica presenti in letteratura e riportate nel Capitolo 3. Storicamente i modelli consideravano soltanto la *field charging* poiché, per particelle dell'ordine della decina di micron, è sicuramente il fenomeno prevalente al punto da rendere trascurabili tutti gli altri effetti. Per dimensioni inferiori a $0.5 \mu m$ l'effetto della *diffusion charging* non è più trascurabile, tanto da diventare la tipologia di cattura prevalente per particelle di diametro inferiore a $0.2 \mu m$ [6, 110]. Nel nostro caso, essendo particolarmente interessati a particelle submicron, è evidente come l'effetto di questa seconda tipologia di carica debba essere considerata. Secondo la relazione (3.2.11), la carica complessiva acquisita dalle particelle è data dalla



(a)



(b)

Figura 5.32: Andamento dell'efficienza di cattura per particelle da $0.4 \mu\text{m}$ in funzione della tensione applicata sulle piastre secondo il metodo di Deutsch evidenziando la variazione di efficienza dovuta a diversi valori di portata (estremi dell'intervallo di variazioni visualizzato durante le misure) mantenendo invariate le altre grandezze. La linea rossa indica l'efficienza alla portata nominale come nei casi precedenti, i punti rossi indicano le misure effettuate col contatore ottico.

somma della carica dovuta alla field charging, considerata finora, e la carica acquisita per moto browniano detta diffusion charging. Mantenendo valida l'andamento esponenziale della teoria di Deutsch, rimanendo invariata la portata Q e la sezione di raccolta S , l'unico termine che varia è la *migration velocity*. Per comodità si riportano i risultati del Capitolo 3.

$$\mathbf{w} = (q_{field} + q_{diff}) \frac{\mathbf{E}_{ps} C_c}{3\pi\mu d_p}$$

$$q_{field} = \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \pi\varepsilon_0 d_p^2 \mathbf{E}_{cor}$$

$$q_{diff} = \frac{4\pi\varepsilon_0 d_p kT}{2e} \log \left(1 + \frac{(d_p/2) c_i N_i t e^2}{4\varepsilon_0 kT} \right)$$

dove k è la costante di Boltzmann, T la temperatura in gradi kelvin (fissata nei calcoli a 302 K), e la carica elementare, N_i la concentrazione degli ioni e t il tempo di carica (se la carica avviene lentamente si confonde con il tempo di attraversamento del secondo stadio) il cui prodotto, in assenza di ulteriori informazioni, è stato fissato a $N_i t = 1 \cdot 10^{13} \text{ s/m}^3$ come suggerito da Hinds [8]; $c_i = \sqrt{\frac{8kT}{\pi \left(\frac{M}{N_a}\right)}}$, dove N_a è il numero di Avogadro e M è la massa molecolare degli ioni fissata a 0.1 kg/mol come utilizzato in [112], è la velocità termica media quadratica (root-mean-square) degli ioni [111] il cui valore risultante poco superiore a 250 m/s è in accordo con i 240 m/s suggeriti nel paper [92]. Per quanto affermato da Abbott e Drehmel [113], le particelle con diametro pari a 0.3 e 0.4 μm sono proprio le particelle limite oltre le quali l'effetto della diffusion diventa importante. Nei grafici al Paragrafo 3.3, in particolare in Figura 3.10 e Figura 3.11b, si vede come vari l'effetto della diffusion charging al variare del diametro delle particelle. In Figura 5.33 è riportato il medesimo grafico per le particelle con diametro analizzato dall'OPC.

Per diametri poco diversi l'uno dall'altro l'effetto della diffusion charging è molto simile, ma è possibile vedere come i diametri considerati coprano l'intervallo di "inversione di tendenza dell'efficienza" come descritto in [113, 10]: nonostante il diametro più grande goda anche in questo caso dell'efficienza più alta per facilità nel raccoglimento di cariche, si vede come il diametro più piccolo (0.3 μm) sia il secondo in ordine di efficienza mentre i due valori centrali presentano efficienze inferiori e praticamente identiche ad indicare che il valore del diametro a cui avviene l'inversione è a questi molto prossimo. Sommando i due contributi il risultato che si ottiene è riportato

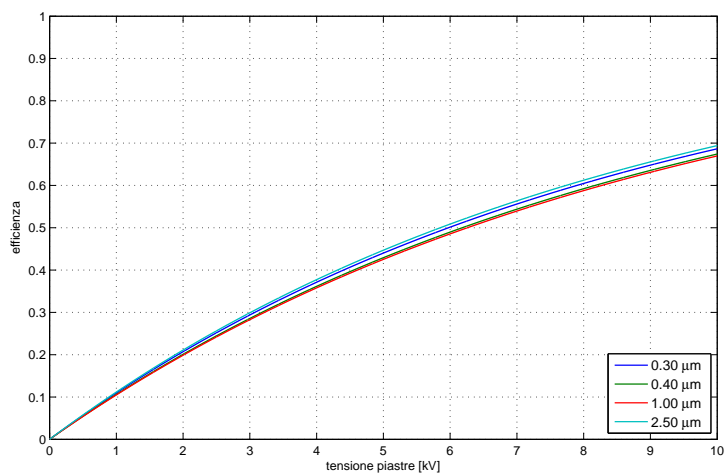


Figura 5.33: Curve analoghe a quelle presentate in Figura 3.11b ma con diametri di particelle misurabili dall'OPC.

in Figura 5.34. Come si può vedere il risultato si discosta dal precedente

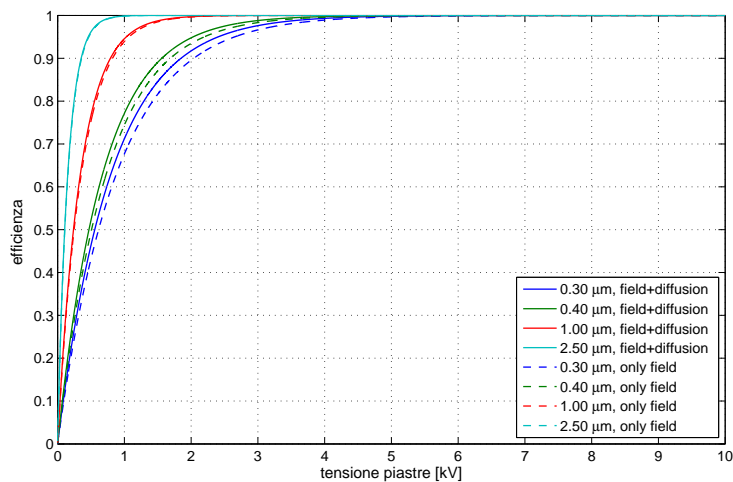


Figura 5.34: Confronto tra le efficienze calcolate col solo effetto della field charging e le *Overall efficiencies* somma dei due contributi, field charging e diffusion charging.

tanto più quanto più piccolo è il diametro delle particelle, in accordo con quanto atteso. Dal risultato si può immediatamente verificare come l'effetto principale responsabile della cattura di particelle di diametro prossimo al

micron sia la field charging²²; è da sottolineare, tuttavia, come considerare l'aumento di efficienza dovuto alla diffusion charging consenta un'efficienza superiore senza la necessità di applicare un potenziale maggiore che comporterebbe un aumento nella produzione di ozono. Considerando l'efficienza globale, le misure effettuate ricadono nella banda di incertezza anche nel caso di tensioni relativamente modeste (Figura 5.32a). Per comprendere il

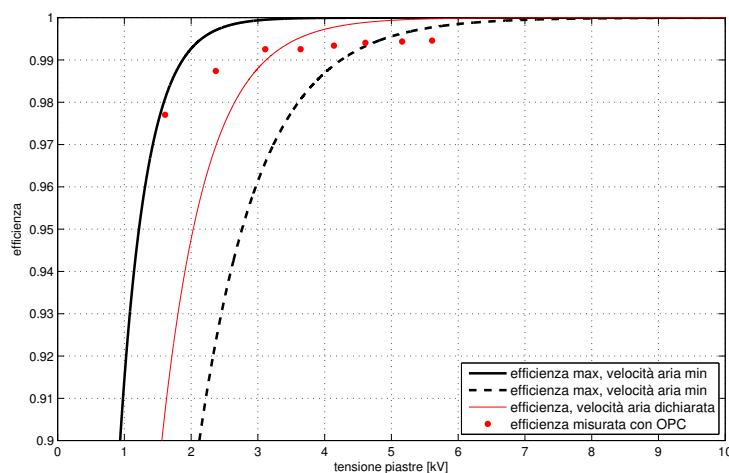


Figura 5.35: Grafico analogo alla Figura 5.32 con efficienza complessiva data dalla somma dei contributi dovuti alla field e alla diffusion charging.

motivo della fuoriuscita dei risultati a tensioni elevate dalla banda si sono interpolati i risultati con la funzione (5.2.8)

$$C \cdot \left(1 - e^{-A \cdot cost1 \cdot cost2 \cdot C_c \cdot \log\left(1 + cost3 \cdot \frac{d}{V}\right) \cdot V - B \cdot cost1 \cdot cost4 \cdot C_{cd} \cdot V^2} \right) \quad (5.2.8)$$

dove sono stati esplicitati i termini costanti (assoluti) che si ricavano dall'equazione di Deutsch considerando sia la field charge che la diffusion charge, le costanti dipendenti dal diametro delle particelle (indicate in blu) e le tensioni applicate alle piastre (indicate in verde)²³. I valori delle costanti e del fattore di Cunningham, nel caso di particelle del diametro di 0.4 μm richiamate dalla normativa, sono i seguenti:

$$cost1 = 0.9656$$

²²Raggiungendo velocemente la carica di saturazione, le particelle cariche non favoriscono cariche ulteriori acquisibili per moto browniano e per questo quanto più alto è l'effetto della field charging, tanto inferiore sarà quello della diffusion. I fenomeni non sono scorrelati [6].

²³In Appendice B.1 sono riportati i passaggi completi dai quali si è ricavata la (5.2.8).

$$\begin{aligned}
cost2 &= 0.026 \\
cost3 &= 1.0921 \cdot 10^8 \\
cost4 &= 1.3539 \cdot 10^5 \\
C_c(0.4\mu m) &= 1.4195
\end{aligned}$$

Il risultato dell'interpolazione per le suddette particelle, utilizzando come costanti i valori appena elencati, è visibile graficamente in Figura 5.36. L'interpolazione è stata ottenuta utilizzando come funzione interpolante la

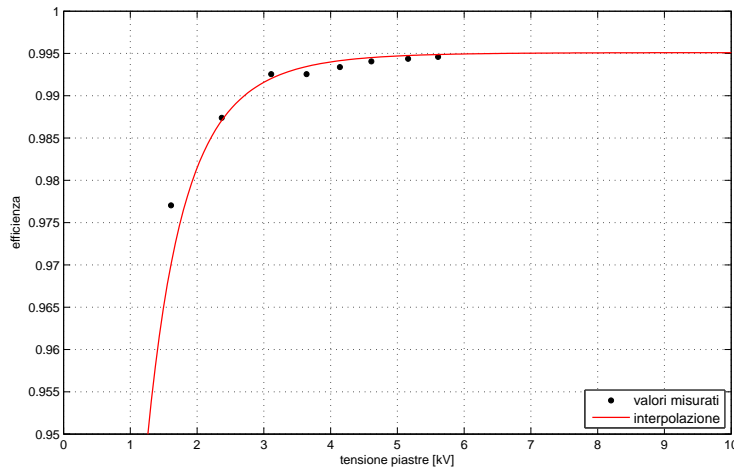


Figura 5.36: Interpolazione delle misure di efficienza effettuate presso SIC su piastre forate con elettrodo di diametro 0.3 mm. Si osservi che, rispetto ai casi precedenti, l'estremo inferiore dell'asse verticale è pari a 0.95 anziché 0.9.

(5.2.8), come robustezza la funzione $\psi(x) = \begin{cases} x \left(1 - \frac{x^2}{c^2}\right)^2 & \text{for } |x| < c \\ 0 & \text{for } |x| > c \end{cases}$

nota come *Tukey's Biweight* (o *Bisquare*)[114], come algoritmo il *Trust-Region*²⁴. I valori calcolati dei parametri indicati in rosso nell'equazione appena citata sono

$$\begin{aligned}
A &= 19.24 \\
B &= 8.3 \cdot 10^{-7} \\
C &= 0.9951
\end{aligned}$$

²⁴Non è possibile utilizzare la Levenberg-Marquardt poiché si è vincolata B in modo che assumesse valori non negativi e tale algoritmo non è adatto a lavorare con parametri vincolati.

con un'accuratezza del 95% e una somma dei quadrati spiegata (SSE)²⁵ pari a $7.4 \cdot 10^{-6}$.

Una prima considerazione evidenziata dal grafico di Figura 5.36 è la distanza che presenta la misura a tensione minore dall'interpolazione, ciò ad indicare che l'efficienza, così come misurata dal contatore ottico col metodo descritto al Paragrafo 4.3.7, è superiore a quanto descrivibile con una curva esponenziale della tipologia studiata da Deutsch. Va altresì sottolineato come i tre valori di tensione minori (1.5, 2.25 e 3 kV) siano stati acquisiti in un giorno diverso dagli altri, seppur con condizioni meteorologiche e ambientali simili, e quindi con una possibile differenza aggiuntiva dovuta a fattori esterni di difficile analisi. Dai tre coefficienti ricavati per tutte le classi di particelle, si sperava di individuare una relazione che dimostrasse come, al diminuire del diametro delle particelle, A, B, C rimanessero costanti o variassero in modo da sottolineare il peso maggiore del termine indicativo della diffusion charging (A) a discapito del termine indicativo della field charging (B). L'eccessiva vicinanza delle due classi inferiori (0.3 e 0.4 μm) e l'eccessiva incertezza delle misure superiori, specialmente per le particelle da 2.5 μm , non hanno consentito di ottenere un risultato soddisfacente. Il valore di C, tuttavia, ha un forte significato e spiega il motivo della fuoriuscita delle misure a tensione maggiore dalla banda di incertezza dovuta alla portata d'aria. C si è assestato in tutte le misure effettuate attorno al valore 0.995, in particolare pari a 0.9951 nel caso di particelle di diametro 0.4 μm , valore al quale la funzione interpolante si spiana senza raggiungere l'unità come invece stimato dal modello teorico. Motivo di tale discordanza è l'assenza nel modello di tutti quei fenomeni indesiderati descritti al Paragrafo 3.2.4 che non consentono di raccogliere tutte le particelle che la teoria prevede, primo tra tutti il fenomeno della re-immissione di particelle nel flusso d'aria dovuto al distacco delle stesse dalla piastra di raccolta; a regime le particelle raccolte sono il 99.51% di quelle immesse, oltre tale valore il prototipo, con la struttura meccanica e l'alimentazione utilizzata non può andare. Considerando quindi tale coefficiente come una costante, si è ricavato un modello di Deutsch-Anderson modificato

$$\eta = \left(1 - e^{-w \frac{S}{Q}}\right) \cdot k_{real} \quad (5.2.9)$$

in grado di descrivere i fenomeni di cattura anche per particelle al di sotto

²⁵È la somma degli scarti quadratici dei valori teorici di una variabile predetta da un modello dalla relativa media: $\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$.

del micron considerando, seppur in modo molto semplificato, i fenomeni non ideali presenti. Il risultato confrontato col caso ideale è riportato in Figura 5.37. Sarebbe opportuno, poter valutare diverse tipologie di prototipi per

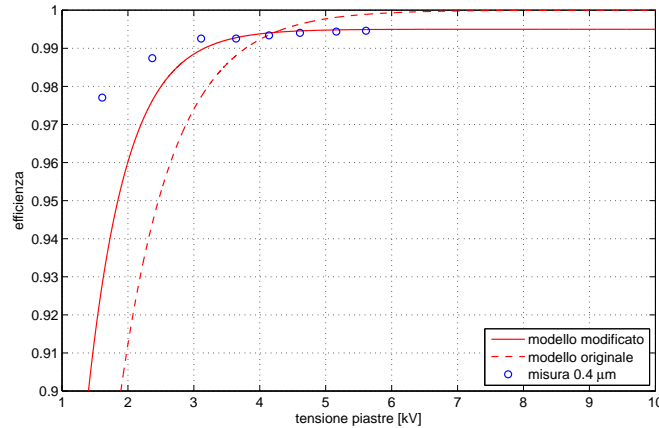


Figura 5.37: Risultato del modello di Deutsch-Anderson modificato confrontato con il modello originale e con le misure effettuate per particelle da 0.4 μm.

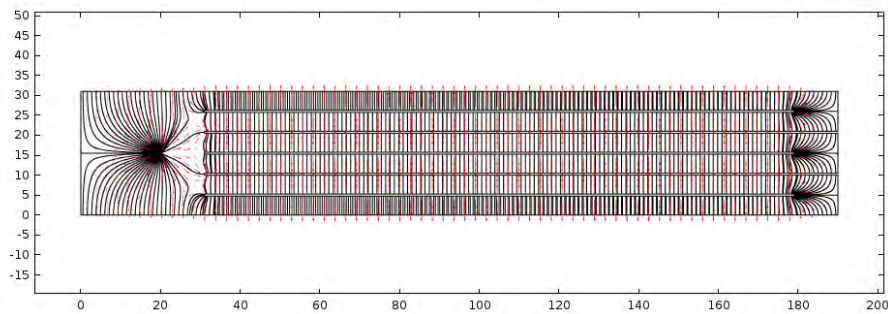
ricavare i diversi valori di perdita di efficienza globale per poter inserire nel modello teorico un parametro che possa tenere in considerazione tale effetto in modo più puntuale, generalizzando così il modello di Matts-Ohnfeldt in sostituzione a quello di Deutsch-Anderson (si veda il Paragrafo 3.3).

Considerazioni sul modello e sui risultati ottenuti

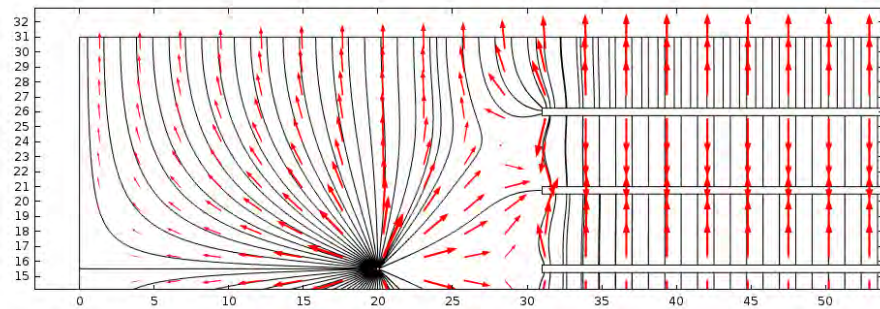
Il modello presentato nel precedente paragrafo si basa sul modello di Deutsch storicamente utilizzato per descrivere il fenomeno della cattura elettrostatica. Molte sono le ipotesi che si sono poste – la sfericità delle particelle, l’uniformità della loro distribuzione nella sezione di ingresso e l’uniformità di carica acquisita in entrambi gli stadi (in particolare il primo dove la densità di carica è estremamente variabile), la regolarità del flusso d’aria, l’associazione al primo e al secondo stadio rispettivamente del fenomeno della field charging e della diffusion charging senza interdipendenze, si è trascurata la foratura delle piastre, ecc. – e molti i valori tratti dalla letteratura relativa ad esperimenti e/o studi teorici su problemi analoghi alla filtrazione per ambienti civili qui presentata ma relativi a filtri con struttura diversa. Nonostante l’inevitabile incertezza, il modello risultante presenta un buon riscontro con le misure effettuate con il prototipo realizzato da SIC. Per quanto già detto, il modello non tiene in considerazione le grandez-

ze ambientali come umidità, temperatura e pressione. Come affermato in Appendice B.1, l'assenza di una soluzione numerica descrittiva del primo stadio di ionizzazione non ha permesso di ottenere un modello di cattura più preciso ed affidabile, proprio per l'impossibilità di utilizzare parametri globali per lo studio di fenomeni che possono presentare una forte disuniformità nello spazio; l'utilizzo di E_{cor} , valor medio del campo elettrico nello strato d'aria ionizzata limitrofo all'elettrodo, come valor medio del campo elettrico nella sezione di ingresso del secondo stadio è probabilmente l'ipotesi più forte considerata nel Paragrafo 5.2.3 essendo poco significativo per le aree relativamente lontane dal filamento. A rendere ancor più discutibile l'utilizzo del campo E_{cor} costante è la disuniformità del campo dovuta non solo al decadimento esponenziale del campo elettrico dall'elettrodo verso le piastre a ground che sulla sezione di ingresso nel secondo stadio presenta pertanto valori molto diversi (vedi Figura 5.6a), ma anche la disuniformità dovuta alla posizione dell'elettrodo diversa tra sezione e sezione e diversa anche tra gli spazi interpiastre della medesima sezione. Un'analisi delle linee di campo all'interno della sezione centrale del filtro (Figura 5.38), in realtà la meno problematica perché è l'unica che ha l'elettrodo alla stessa distanza dalle due piastre a ground centrali, ha dimostrato come esse si chiudano anche sulle piastre a ground in prossimità del comparto centrale di ogni sezione, interessando in misura minore i comparti più esterni di ogni sezione e sfruttando quindi molto male il filtro. Una configurazione più intelligente per quanto riguarda lo sfruttamento della superficie di cattura e della ionizzazione garantita dall'elettrodo sarebbe quella che prevede un elettrodo per ogni comparto, ovvero un elettrodo per ogni coppia di piastre così da pseudo-uniformare la distribuzione di particelle cariche che il secondo stadio vede transitare: in tal modo si eviterebbero anche accumuli disuniformi riducendo così gli interventi necessari per la manutenzione, si avrebbe la possibilità di aumentare l'efficienza a parità di potenziale applicato agli elettrodi (in numero maggiore tenendo invariate le dimensioni del filtro ed il numero di piastre) o di ridurre in parte il potenziale a parità di efficienza avendo un maggior numero di particelle in grado di transitare in prossimità dell'elettrodo ad alta tensione. Mantenendo la struttura attuale, si ha il peggio delle configurazioni: si hanno gli elettrodi che producono ozono ma che non sono in grado di caricare le particelle in modo tale da consentire una distribuzione ottimale della cattura all'interno del secondo stadio.

Ad allontanare ulteriormente il modello dalla realtà è la disuniformità del campo presente anche nel secondo stadio in presenza delle piastre forate.



(a)



(b)

Figura 5.38: Linee di flusso calcolate numericamente su una configurazione con elettrodo di diametro 0.2 mm e potenziali applicati all'elettrodo e alle piastre rispettivamente di 8500 V e 2360 V. Le frecce rosse sono rappresentate in funzione logaritmica del valore del campo nel loro punto di origine. In Figura 5.38b il dettaglio in prossimità dell'elettrodo. Le misure negli assi sono da intendersi in mm.

Nonostante la disposizione triangolare dei fori che garantisce dei “punti di blocco del potenziale” essi causano inevitabilmente la nascita di una componente orizzontale (relativamente alla Figura 5.38) del campo elettrico anche tra le piastre e una corrispondente riduzione della norma del campo stesso per la presenza di un potenziale inferiore al centro del foro rispetto al potenziale presente su punti materiali della piastra alimentata. Si veda in 6.2 una trattazione più accurata. Per il momento è sufficiente sottolineare come ad una riduzione del campo localizzata regolarmente in alcuni punti del secondo stadio, come accade se il filtro è realizzato con piastre forate, corrisponda inevitabilmente una riduzione di efficienza rispetto al caso di piastre piene. Per dimostrare quanto appena affermato, non essendo possibile effettuare un confronto diretto tra le due configurazioni a piastre forate e a piastre piene alimentando normalmente il filtro a causa della presenza di elettrodi di diverso diametro e rispettivamente pari a 0.3 mm e 0.2 mm, si è deciso di analizzare l’efficienza di cattura alimentando esclusivamente le piastre così da valutare la perdita di rendimento dovuta ai fori. I risultati, riportati in Tabella 5.4, presentano tuttavia valori inattesi.

	tensione [kV]	efficienze			
		0.3 μm	0.4 μm	1.0 μm	2.5 μm
piastra forata	4	0.7539	0.7252	0.6919	0.6034
	5.5	0.7949	0.7576	0.4380	0.1726
piastra piena	4	0.6466	0.6259	0.6177	0.5712
	5.5	0.7395	0.7345	0.5915	0.4224

Tabella 5.4: Efficienza di cattura ottenuta alimentando solo le piastre in due prototipi, uno con piastre forate, uno con piastre piene, a due livelli di tensione, uno al di sotto dell’innesco, uno prossimo alla scarica.

Le efficienze attese, supponendo che il tipo di carica principale presente nel secondo stadio fosse la diffusion charging per assenza del filamento, sono inferiori rispetto a quanto misurato (vedi Figura 5.33). Inoltre le piastre forate hanno un’efficienza più alta, seppur di poco, rispetto alla piastra piena, in completo disaccordo con quanto affermato finora. La motivazione di tale anomalia risiede nell’imperfetta realizzazione dei fori descritta al Paragrafo 5.2.2 e visibile in Figura 5.28. Un’ipotesi piuttosto forte posta nel modello presentato è la possibilità di separare la field charging dalla diffusion charging associandole rispettivamente al primo e al secondo stadio, ciò dovuto all’aver considerato \mathbf{E}_{cor} come campo responsabile dell’effetto della field charging (q_{field}), poiché in assenza di una soluzione numerica re-

lativa al primo stadio; inoltre non si è utilizzata alcuna dipendenza dalle grandezze elettriche a monte del secondo stadio per il calcolo del contributo dovuto alla diffusion charging. I bordini dovuti alla foratura delle piastre, tuttavia, creano delle zone di campo localizzato anche nel secondo stadio: questa concentrazione del campo elettrico non è sufficiente a produrre ozono (vedi 5.2.2) ma è sufficiente a creare una field charging superiore al caso con le piastre piene dentate (la dentatura è in periferia, la zona interessata da un'eventuale concentrazione di campo è in posizione svantaggiata). Inoltre questi punti di campo concentrato sono molto estesi e uniformemente distribuiti al centro delle piastre. Dai risultati ottenuti si evince che le particelle più grosse, pur tenendo presente la validità statistica dei risultati, sono quelle che risentono maggiormente della variazione della forza dovuta ai fori come ci si attenderebbe qualora l'effetto fosse effettivamente dovuto ad un fenomeno di field charging sito nel secondo stadio.

Implementazione del modello in COMSOL

Per il calcolo dell'efficienza in COMSOL effettuato in Tabella 6.2 si è utilizzata la fisica *Particle Tracing for Fluid Flow* ed in particolare la funzione *fpt.Nt* con cui si è calcolato il numero di particelle che dopo un tempo pari almeno a 3 volte quello di attraversamento della sezione con flusso laminare (come eseguito in [54]) alla velocità iniziale di 2.5 m/s hanno raggiunto la sezione di uscita (l'efficienza di cattura è il complementare di questo valore). Informazioni necessarie sulle caratteristiche delle particelle per questa fisica sono densità, diametro (supponendo sferica la particella) e *numero di carica*, ovvero il numero di cariche elementari associate alla singola particella, valore posto pari a 66.68 per i calcoli in Tabella. Tale valore è stato ricavato sperimentalmente imponendo in COMSOL il valore di efficienza misurato in cabina e riportato in Tabella 5.3 e calcolando con quale carica fosse possibile ottenere una tale efficienza, pur con le forti assunzioni effettuate: in particolare per particelle da 0.4 μm e tensione applicata alle piastre pari a 2360 V, con un numero di carica di 66.68 si ottiene un rendimento di 0.987, come ottenuto nelle misure. Così definito il numero di carica, il risultato che MATLAB fornisce con la relazione

$$n = \frac{q_{tot}}{e} \quad (5.2.10)$$

è un valore molto diverso da quello ricavato numericamente, ciò dovuto principalmente al fatto che mentre COMSOL calcola il numero di cariche

per particella, MATLAB fornisce un valore globale una volta nota la densità di particelle nel volume d'aria da filtrare. L'incertezza di quest'ultimo dato che ha condotto al considerare la semplificazione introdotta da White [6], non consente un'estrapolazione diretta dal modello teorico realizzato in MATLAB senza ammettere un'incertezza di dimensione difficilmente stimabile. Tralasciata la strada che permetteva di ricavare il numero di carica direttamente dal modello teorico si è pensato di integrare il risultato ottenuto in MATLAB dalla (5.2.10) con una relazione ricavata sperimentalmente dalle misure effettuate così da estrapolare un valore di *numero di carica* adatto all'inserimento in COMSOL per stimare numericamente l'efficienza di un modello di filtro o sezione. Ripetendo la procedura per alcuni valori di efficienza misurati per classi di particelle diverse da $0.4 \mu\text{m}$ e interpolando i risultati in funzione di V (potenziale elettrico) e d_p (diametro delle particelle) si è ricavata una relazione empirica che permette di tradurre la carica calcolata col modello matematico in MATLAB in numero di carica da inserire in COMSOL:

$$n_{COMSOL} = \frac{n_{MATLAB}(d_p = 1\mu\text{m}) \cdot d_p}{3 \cdot V_{piastra}} \quad (5.2.11)$$

con n il numero di carica, d_p il diametro delle particelle espresso in μm e $V_{piastra}$ la tensione applicata alle piastre espressa in kV. Nelle relazioni utilizzate nel modello, la carica delle particelle compare esclusivamente nella formula della migration velocity. Per validare la presenza di d_p nella (5.2.11) con esponente unitario si è tracciato un grafico di w in funzione di d_p a pari V . Il risultato in Figura 5.39 mostra come per $d_p > 0.15 \mu\text{m}$ l'andamento sia ragionevolmente lineare giustificando quindi la relazione: la presenza di d_p con esponente 1 consente quindi di calcolare in MATLAB un numero di carica relativo ad un determinato diametro di particelle relazionandolo ad un valore costante per semplicità individuato nel numero di carica per particelle di $1 \mu\text{m}$.

La presenza del 3 a denominatore è invece dovuta al campo percepito da ogni particella transitante in una regione a campo elettrico non nullo: tipicamente, come visto in 3.2.2, sulla superficie della particella si concentrano il triplo delle linee di campo altrimenti presenti in sua assenza. Spiegare la presenza di $V_{piastra}$ è, invece, un più complesso perché esso è un parametro che viene fornito direttamente a COMSOL per il calcolo della soluzione elettrostatica da cui la soluzione del Particle Tracing dipende; in altre parole il potenziale nel modello non compare solamente nella (5.2.11) ma anche nella

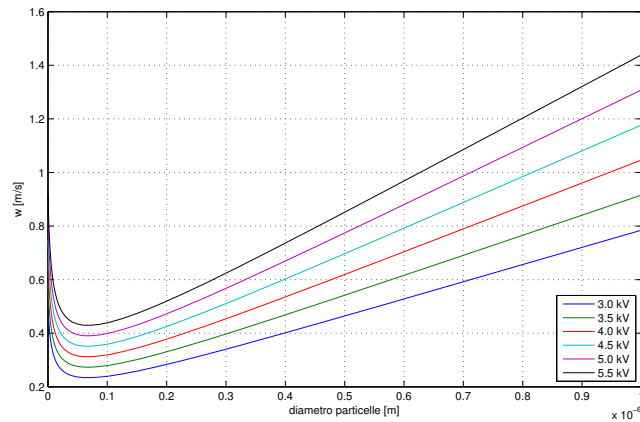


Figura 5.39: Migration velocity in funzione del diametro delle particelle a tensioni costanti.

soluzione elettrostatica. Una possibile motivazione, che richiederebbe uno studio ulteriore, è che mentre in MATLAB q è calcolata a prescindere dalla w in cui poi è inserita, in COMSOL $n_{COMSOL} \cdot e$ è un parametro globale che tiene conto di tutte le dipendenze. Per questo motivo, essendo w dipendente da V^2 e da $V \log(1 + \frac{1}{V})$, in questa sede trascurato per particelle al di sopra di $0.15 \mu\text{m}$, la carica va divisa per V in modo da avere una dipendenza lineare di w da V come si vede in Figura 5.40. Si ricorda comunque che la relazione presentata non si propone come risultato di uno studio teorico, ma semplicemente come una relazione ricavata da un'interpolazione delle misure effettuate e del modello teorico presentato.

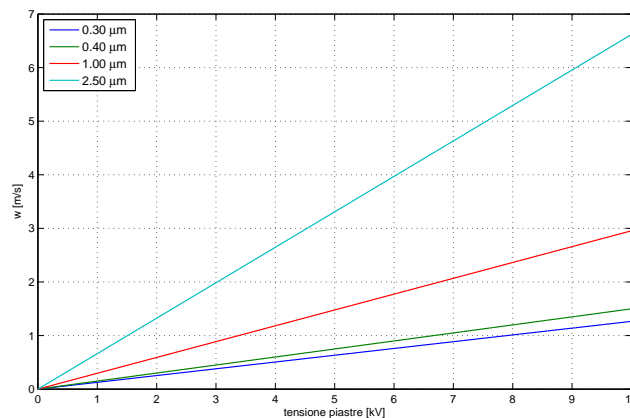


Figura 5.40: Migration velocity in funzione della tensione applicata alle piastre a diametro di particella costante.

Le efficienze ottenute col modello bidimensionale in COMSOL sono in buon accordo con il risultato sperimentale con uno scostamento massimo dello 0.3%²⁶ oltre l'intervallo di efficienza individuato dall'incertezza sulla misura di tensione pari a 0.01 kV. A titolo di esempio si riporta il caso utilizzato al Paragrafo 5.2.3: la misura a 0.4 μm e tensione applicata 2.37 kV aveva dato nelle misure un'efficienza pari a 0.987. Calcolato con MATLAB il valore di $n_{MATLAB} \simeq 1180.4$ per particelle da 1 μm , $n_{COMSOL} = \frac{1180.4 \cdot 0.4}{3 \cdot 2.37} \simeq 66.41$ dava come risultato numerico un'efficienza leggermente inferiore; considerando l'incertezza nella misura di tensione (2.37 ± 0.01), utilizzando nella relazione $V = 2.36 [kV]$ si è individuato il numero di carica utilizzato di 66.68 che dava come risultato numerico esattamente 0.987.

Osservazioni Quando finora riportato è stato realizzato utilizzando in COMSOL una mesh definita dalla fisica e mediamente fitta²⁷. Un'analisi più dettagliata ha dimostrato come la fisica relativa alla fluidodinamica fosse molto sensibile alla mesh ed in grado di modificare l'efficienza ottenuta con il suddetto metodo anche dell'1.5% passando ad una mesh più fitta. Il metodo, quindi, risulta adatto per stimare in modo abbastanza grossolano l'efficienza raggiungibile. Ulteriori studi e modifiche del modello, in particolare nel passaggio da modello esatto matematico in MATLAB a numerico in COMSOL, sono necessari per ottenere uno strumento affidabile e preciso come richiesto per analisi ed eventuale progettazione di dispositivi di classe A ($\eta \geq 99\%$).

²⁶L'errore è dello stesso ordine di grandezza dell'incertezza del contatore ottico.

²⁷Statistica della mesh:

- Numero di elementi = 72436
- Qualità minima = 0.3175
- Qualità media = 0.8501
- Rapporto aree elementi = 0.002134
- Area mesh = 4585 mm²
- Massimo rapporto di crescita = 2.381
- Rapporto medio di crescita = 1.345

Capitolo 6

Ottimizzazione

Nel Capitolo 5 si è costruito un modello in grado di calcolare, pur con ipotesi talvolta abbastanza forti, la produzione di ozono di un precipitatore elettrostatico a partire da valori di corrente misurata e l'efficienza di cattura in funzione dell'alimentazione elettrica e della struttura meccanica. Validati sperimentalmente i risultati o ricavate relazioni semi-empiriche necessarie alla descrizione del fenomeno, il modello è in grado di stimare l'efficienza di cattura modificando alcuni parametri geometrici ed elettrici¹. Di seguito sono riportati gli studi effettuati sulla variazione di efficienza risultante dalla modifica di un singolo parametro per ogni caso.

6.1 Distanza tra le piastre

Da sempre un parametro indagato per l'ottenimento di efficienze elevate a fronte di un potenziale applicato relativamente modesto, la distanza tra le piastre è stata indagata in quanto elemento ottimizzabile per eccellenza in un filtro elettrostatico. Analizzando gli effetti che un avvicinamento o un allontanamento comporta si evince che riducendo la distanza tra le piastre

- + si ottiene lo stesso campo elettrico riducendo la tensione applicata alle piastre
- + il percorso ortogonale al flusso d'aria che la particella deve percorrere è inferiore e pertanto, a parità di efficienza, il filtro risulta più corto e compatto

¹Come più volte detto, l'aver trascurato la soluzione numerica nel primo stadio ha comportato un'approssimazione pesante nel modello tale da non permettere una stima particolarmente accurata dell'efficienza di cattura al variare dei parametri elettrici.

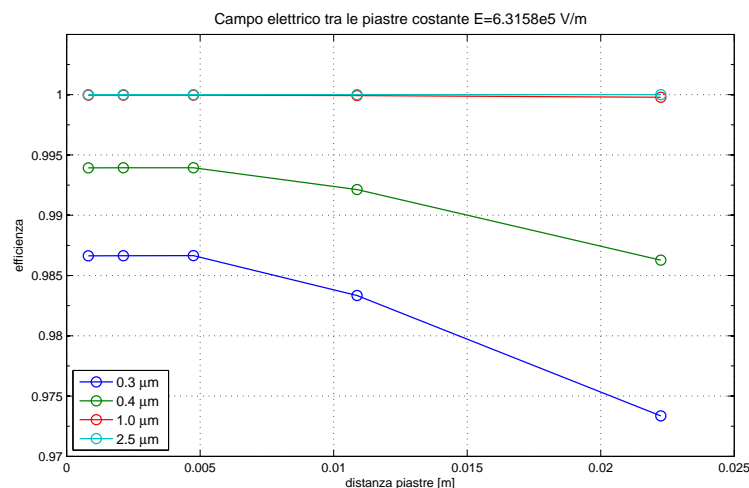
- + si riduce l'ingombro complessivo del dispositivo, con minori costi di trasporto, facilità di movimentazione per la manutenzione e minori problemi per eventuali strutture di sostegno nel sito di installazione
- la presenza di più piastre ostacola maggiormente il flusso d'aria causando una maggiore perdita di carico, seppur sempre molto minore del caso di filtri meccanici
- a parità di massa accumulata sulle pareti, la percentuale di spazio interpiastre occupata dalla sporcizia è maggiore favorendo l'evento di scariche e richiedendo quindi una manutenzione più frequente
- in ambienti civili, l'aria aspirata da filtrare è tipicamente priva di aggregati molto grandi di particelle. Accade talvolta che il sito di installazione del filtro non sia preceduto nel circuito d'aria da un filtro/grata sufficientemente efficace per bloccare piccoli insetti, aggregati di polveri e/o particelle, piccoli oggetti, ecc. Il passaggio di oggetti di questo tipo facilita l'evento della scarica e, in presenza di condotti molto piccoli, può causare il malfunzionamento del filtro per blocco del corpo estraneo tra le piastre. Tale condizione richiede nuovamente interventi di manutenzione più frequenti.

Appare evidente come una distanza ottimale sia, di fatto, un trade-off tra i vantaggi (+) e gli svantaggi (-) elencati. Bisogna tuttavia sottolineare quanto affermato negli ultimi due punti, ovvero che al ridursi dello spazio tra le piastre aumenta la frequenza di interventi di manutenzione e pulizia necessari, così come aumenta la probabilità di malfunzionamenti per presenza di corpi estranei. Se da un punto di vista progettuale il problema è pressoché nullo, a meno della complicazione necessaria nella struttura per permettere l'alloggio di piastre molto vicine a potenziali diversi, dal punto di vista economico per un'azienda che fornisce prodotto e assistenza come SIC, la soluzione di ridurre la spaziatura tra le piastre sarebbe difficilmente praticabile.

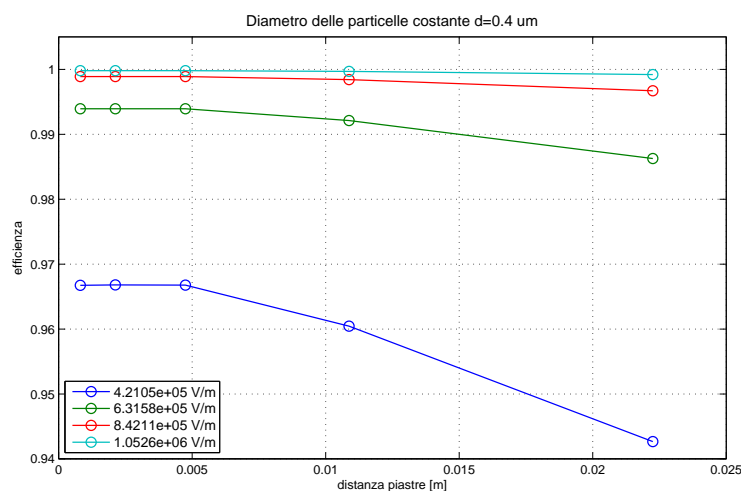
Ciononostante, si è realizzato uno studio dell'effetto sull'efficienza della variazione nella spaziatura mantenendo costante dal punto di vista geometrico la sezione di ingresso e la sezione di cattura, ovvero raddoppiando semplicemente la lunghezza delle piastre in direzione del flusso d'aria al raddoppiare dello spazio tra le piastre², dal punto di vista elettrico il campo tra

²Raddoppiando la lunghezza delle piastre si raddoppia la sezione della singola piastra: si è ipotizzato che i fori per i piloncini in tal caso non variassero in sezione e numero.

le piastre. I risultati sono riportati in Tabella 6.1 e nei grafici di Figura 6.1 raffiguranti le efficienze calcolate sia a campo costante per diversi diametri di particelle, sia per diversi valori di campo relativi ad una singola classe di particelle.



(a) Efficienza ad E costante.



(b) Efficienza a d_p costante con E variabile secondo i valori assunti nel caso originale alimentando le piastre a 2, 3, 4, 5 kV.

Figura 6.1: Calcolo dell'efficienza ottenuta modificando la spaziatura tra le piastre.

Viceversa, dimezzando la sezione della singola piastra mantenendo la sezione e il numero dei fori come in origine avrebbe comportato un rapporto pieno vuoto nella piastra (si sta parlando di piastre piene e non forate, gli unici fori sono quelli per i piloncini) sensibilmente inferiore: si è ipotizzato, in tal caso, che, dimezzando la sezione rispetto al caso originale, anche la sezione dei fori venisse dimezzata, mantenendone invece inalterato il numero.

PIASTRE ORIGINALI (14 piastre raccolta)						
grandezze geometriche ed elettriche			EFFICIENZE			
tensioni [V]	duct [m]	$E_{piastra}$ [V/m]	0.3 μm	0.4 μm	1.0 μm	2.5 μm
2000	4.7500E-03	4.2105E+05	0.94372	0.96677	0.99876	1
3000	4.7500E-03	6.3158E+05	0.98665	0.99394	0.99996	1
4000	4.7500E-03	8.4211E+05	0.99683	0.9989	1	1
5000	4.7500E-03	1.0526E+06	0.99925	0.9998	1	1
PIASTRE L/2 - piú fitte (27 piastre raccolta)						
grandezze geometriche ed elettriche			EFFICIENZE			
tensioni [V]	duct [m]	$E_{piastra}$ [V/m]	0.3 μm	0.4 μm	1.0 μm	2.5 μm
895	2.1250E-03	4.2105E+05	0.94377	0.9668	0.99876	1
1342	2.1250E-03	6.3158E+05	0.98664	0.99394	0.99996	1
1789	2.1250E-03	8.4211E+05	0.99683	0.99889	1	1
2237	2.1250E-03	1.0526E+06	0.99925	0.9998	1	1
PIASTRE L/4 - piú fitte (53 piastre raccolta)						
grandezze geometriche ed elettriche			EFFICIENZE			
tensioni [V]	duct [m]	$E_{piastra}$ [V/m]	0.3 μm	0.4 μm	1.0 μm	2.5 μm
342	8.1250E-04	4.2105E+05	0.94367	0.96673	0.99875	1
513	8.1250E-04	6.3158E+05	0.98663	0.99393	0.99996	1
684	8.1250E-04	8.4211E+05	0.99683	0.99889	1	1
855	8.1250E-04	1.0526E+06	0.99925	0.9998	1	1
PIASTRE 2·L - piú distanziate (7 piastre raccolta)						
grandezze geometriche ed elettriche			EFFICIENZE			
tensioni [V]	duct [m]	$E_{piastra}$ [V/m]	0.3 μm	0.4 μm	1.0 μm	2.5 μm
4579	1.0875E-02	4.2105E+05	0.93479	0.96044	0.99825	1
6868	1.0875E-02	6.3158E+05	0.98334	0.99213	0.99993	1
9158	1.0875E-02	8.4211E+05	0.99575	0.99844	1	1
11447	1.0875E-02	1.0526E+06	0.99891	0.99969	1	1
PIASTRE 3.5·L - piú distanziate (4 piastre raccolta)						
grandezze geometriche ed elettriche			EFFICIENZE			
tensioni [V]	duct [m]	$E_{piastra}$ [V/m]	0.3 μm	0.4 μm	1.0 μm	2.5 μm
9368	2.2250E-02	4.2105E+05	0.91077	0.94267	0.99637	1
14053	2.2250E-02	6.3158E+05	0.97335	0.98628	0.99978	1
18737	2.2250E-02	8.4211E+05	0.99204	0.99671	0.99999	1
23421	2.2250E-02	1.0526E+06	0.99762	0.99921	1	1

Tabella 6.1: Efficienze calcolate al variare della spaziatura delle piastre.

Come si evince dai grafici, all'aumentare della spaziatura, nonostante il campo rimanga costante (e quindi anche la forza applicata alle particelle caricate) e la superficie della singola piastra venga aumentato all'aumentare della distanza che la particella deve percorrere per essere raccolta, l'efficienza cala³. Osservando in particolare le particelle da 0.4 μm in Figura 6.1a, si vede come l'efficienza cali sensibilmente al di sopra di una spaziatura pari a 5 mm. Pertanto il prototipo, con una distanza interpiastre pari a 4.75 mm, presenta già un valore ottimale per l'efficienza ricavata dal modello.

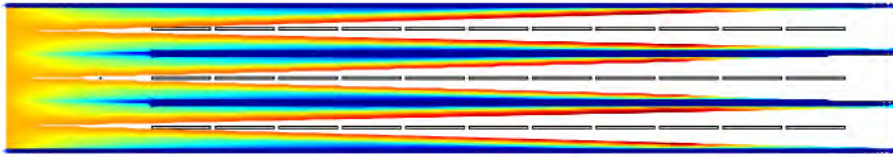
6.2 Dimensione dei fori

Un'analisi approssimativa della riduzione di efficienza dovuta ai fori è stata realizzata riproducendo in COMSOL un modello bidimensionale della sezione centrale del precipitatore con piastre aventi fori in ugual numero ma diverso diametro⁴. In particolare si sono calcolate numericamente le efficienze per particelle da 0.4 μm con densità pari a quella dell'aria (1.225 kg/m³) e "numero di carica", inteso da COMSOL come numero di cariche elementari associati alla singola particella, pari a 66.68 (si veda al Paragrafo 5.2.3 il motivo di tale valore). Ipotizzando un flusso laminare entrante con velocità 2.5 m/s, una distribuzione uniforme di 10000 particelle all'ingresso della sezione, un elettrodo di diametro 0.2 mm alimentato a 8500 V e le piastre di repulsione alimentate a 2360 V, si sono calcolate le efficienze di cattura con 10 fori per piastra di repulsione di diametro variabile⁵ tra 0 e 14.25 mm con passo 1.1 mm. In Figura 6.3 sono riportati i risultati grafici di cinque casi equispaziati.

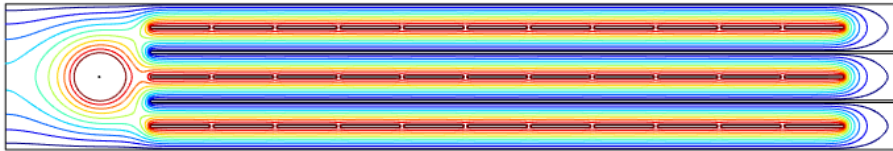
³Il risultato è sicuramente cautelativo poiché non si sono prese in considerazione le modifiche del flusso d'aria che, in un condotto più lungo, risulterebbe sicuramente più turbolento facilitando quindi l'avvicinamento delle particelle alla piastra di raccolta.

⁴Il modello bidimensionale non sarebbe adatto a studiare l'effetto dei fori su una piastra. Per un risultato più accurato si sarebbe dovuto realizzare un modello 3D del filtro; essendo necessaria per le fisiche utilizzate una mesh molto fitta ed essendo il tempo dipendente più che linearmente dal numero di elementi presenti, l'aumento del costo computazionale per ottenere una soluzione era eccessivo per l'utilità del risultato. Si è preferito mantenere il problema bidimensionale ammettendo un errore dovuto al considerare i fori come delle "fessure" nella piastra.

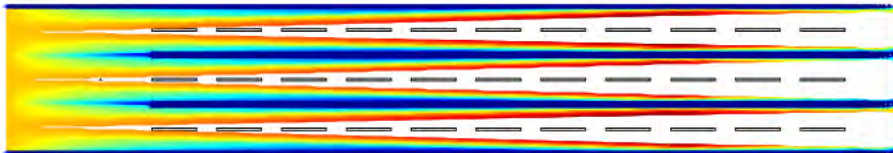
⁵In realtà nel modello si è imposta la lunghezza del pezzo di piastra che separa un foro dall'altro, variabile tra 13.5 e 0.5 mm con step 1 mm.



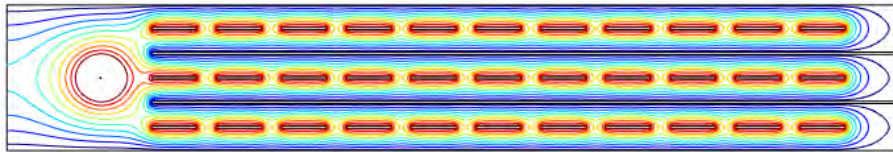
Cattura con foro 1.05 mm



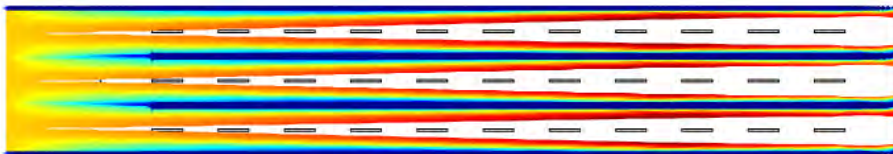
Linee equipotenziali con foro 1.05 mm



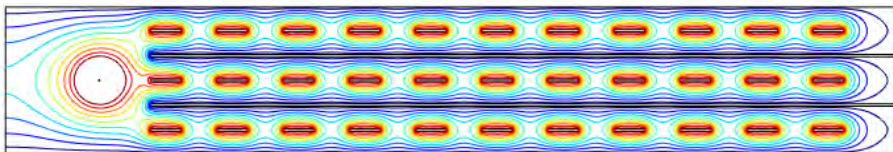
Cattura con foro 4.35 mm



Linee equipotenziali con foro 4.35 mm



Cattura con foro 7.65 mm



Linee equipotenziali con foro 7.65 mm

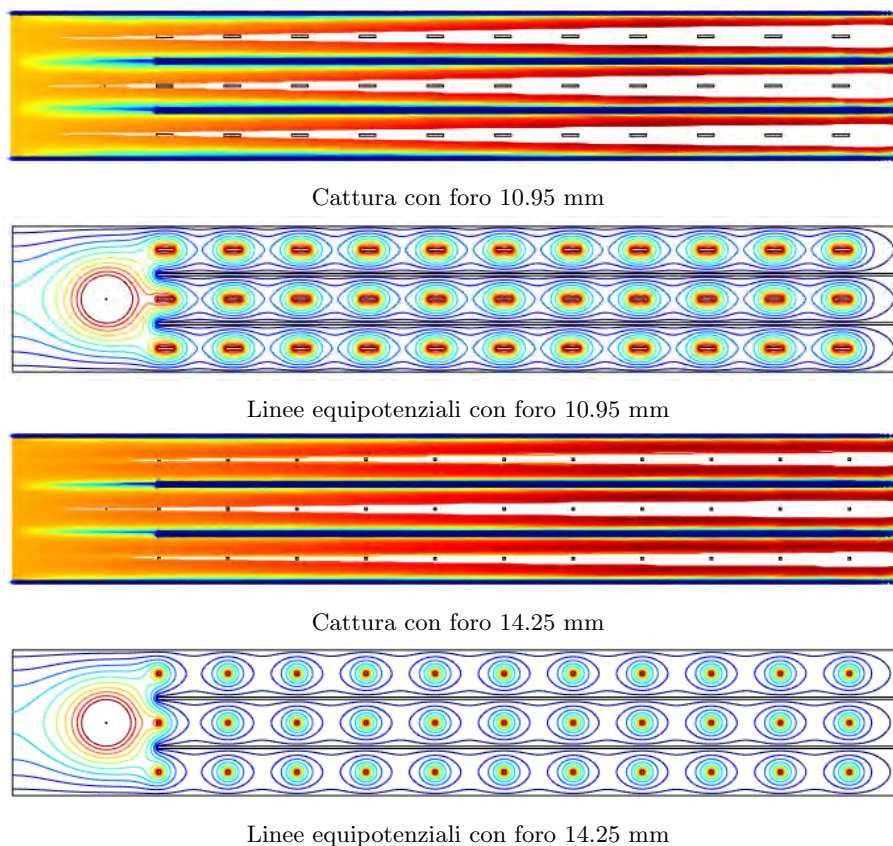


Figura 6.3: Grafici raffiguranti il percorso compiuto dalle particelle transitanti nella sezione secondo il calcolo numerico (la gradazione di colore dal rosso al blu indica la velocità delle particelle dalle più veloci alle più lente) e le linee equipotenziale (inferiori a 2400 V) al variare del diametro dei fori sulle piastre forate.

All'aumentare del diametro del foro è evidente come le linee equipotenziale si deformino facendo deviare il campo dalla verticale, come in precedenza spiegato, rendendo la configurazione a piastre forate sempre più simile al caso di filtro con configurazione wire-plate classica, ovvero dove tra le piastre a ground sono presenti elettrodi equispaziati. Le efficienze di cattura riscontrate nei diversi casi sono riportate in Tabella 6.2 e in Figura 6.4.

Dai risultati conseguiti, si evince come un diametro opportuno da usare per ridurre il peso delle piastre ma che non influenzi eccessivamente il rendimento del filtro (si ammetta ad esempio una riduzione di efficienza pari al 5%) sia 3 mm, ovvero il diametro dei fori delle piastre nel prototipo⁶; l'ef-

⁶Nonostante la riduzione in peso, non avrebbe senso aumentare il diametro dei fori essendo tale configurazione causa di una perdita di efficienza. Allo stesso modo ridurre il diametro dei fori non comporta miglorie sufficienti per giustificare l'utilizzo di una

diametro fori [mm]	$\frac{\text{pieno}}{\text{vuoto}}$	η
0	∞	0.9875
1.05	13.0952	0.9855
2.15	5.8837	0.977
3.25	3.5538	0.9613
4.35	2.4023	0.9294
5.45	1.7156	0.8873
6.55	1.2595	0.8382
7.65	0.9346	0.7832
8.75	0.6914	0.7243
9.85	0.5025	0.6607
10.95	0.3516	0.5943
12.05	0.2282	0.5243
13.15	0.1255	0.4484
14.25	0.0386	0.3579
senza piastra	0	0.0377

Tabella 6.2: Stima dell'efficienza di cattura calcolata numericamente in COMSOL al variare del diametro dei fori nelle piastre di repulsione.

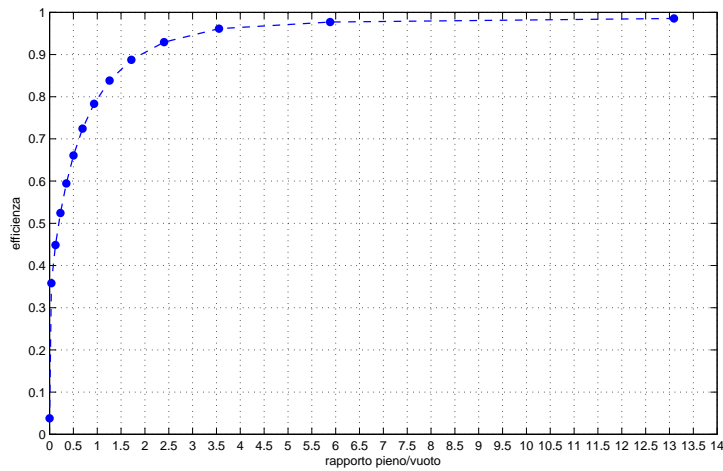


Figura 6.4: Efficienza di cattura in funzione del diametro dei fori come da descrizione.

ficienza calcolata, inoltre, è da considerarsi un valore cautelativo in difetto poiché, come già detto, la presenza di fori e non di fessure che interessano l'intera piastra impedisce alle linee/superfici equipotenziali di deformarsi lungo tutta una linea permettendo invece delle deformazioni locali come visibile in Figura 6.5.

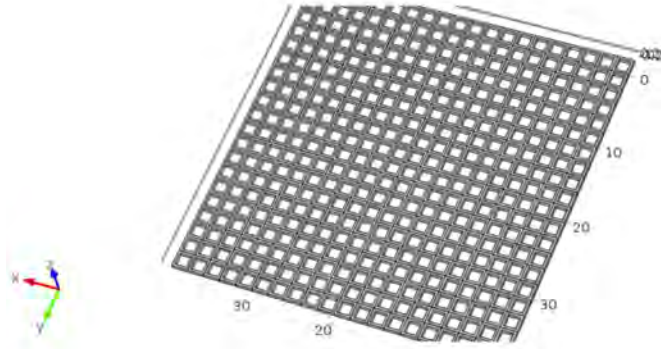
6.3 Filtro senza elettrodi

Per quanto detto al Paragrafo 5.2.2, alimentando le piastre con potenziali fino a circa 5 kV la generazione di ozono nello stadio di cattura è pressoché nulla e continua ad essere contenuta anche avvicinandosi al valore di innesco della scarica. Osservando i risultati presentati in 5.2.3, inattesi poiché da essi si evince che piastre forate hanno efficienza più alta delle piastre forate, si è compreso come un effetto di field charging si avesse anche nel secondo stadio con le piastre forate per la presenza di zone dove il campo si concentra (bordini attorno ai fori).

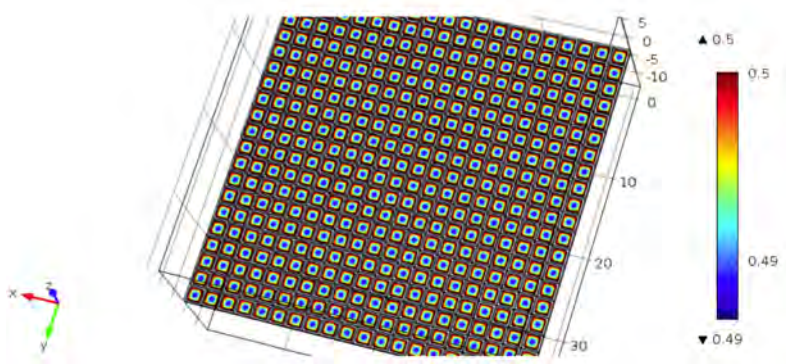
Avendo per di più ottenuto un valore di efficienza ben più alto dell'atteso calcolato con il solo effetto dovuto alla diffusion charging, si è quindi pensato di analizzare quale dovesse essere una superficie di raccolta in grado di raggiungere, a parità di portata, le efficienze desiderate eliminando completamente l'elettrodo dal filtro. Una tale modifica strutturale comporterebbe:

- + produzione nulla o molto bassa di ozono, in ogni caso inferiore al limite per normativa di circa un ordine di grandezza
- + eliminazione dell'inaffidabilità dovuta al filamento per elevata probabilità di rottura a causa di consumo per elettroerosione (peraltro non uniforme) e per riscaldamento localizzato dovuto ad un diametro non uniforme
- + eliminazione della struttura necessaria al sostegno degli elettrodi
- + semplificazione nell'alimentazione dovendo generare una sola tensione peraltro di valore inferiore a quello richiesto per i filamenti (aumenta anche la sicurezza)

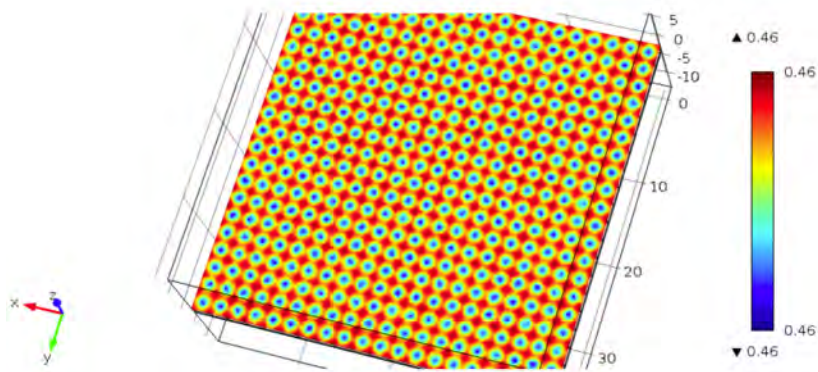
tecnologia più fine e di piastre più spesse in grado di reggere le tensioni superficiali che si vengono a creare e tale da garantire la rigidità meccanica richiesta (con la struttura attuale).



(a) Modello 3D di una piastra forata.



(b) Potenziale elettrico sul piano di mezzeria della piastra forata.



(c) Potenziale elettrico ad un'altezza pari a due volte lo spessore della piastra ($2 \cdot 0.4$ mm) dal piano di mezzeria della piastra forata stessa. Si noti la scala di valori.

Figura 6.5: Esempio di piastra forata con rapporto pieno/vuoto pari a 0.5: modello 3D e andamento del potenziale tratto dalla Relazione Tecnica del Prof. Piergiorgio Alotto [12].

- + possibilità di eliminare le piastre di lunghezza superiore che servivano a separare le varie sezioni semplificando la produzione delle piastre stesse poiché le diverse tipologie sono in numero inferiore
- + possibilità di raggiungere le efficienze volute semplicemente aumentando la lunghezza delle piastre
- ingombro maggiore
- caduta di pressione leggermente superiore

Se il terzultimo punto era di immediata comprensione osservando la relazione di Deutsch (5.2.5), non era ugualmente chiara quale fosse l'entità dell'aumento della dimensione delle piastre necessaria per il raggiungimento delle efficienze desiderate. Si sono quindi effettuate delle misure di efficienza col prototipo a piastre forate alimentandole con tre livelli di tensione, pari a 3, 4 e 5 kV, e le si sono confrontate con i risultati ricavati dal modello. I risultati sono riportati in Tabella 6.3.

	tensioni [kV]	EFFICIENZE			
		0.3 μm	0.4 μm	1.0 μm	2.5 μm
MODELLO	3	0.3753	0.3641	0.3572	0.3741
	4	0.4659	0.4531	0.4452	0.4646
	5	0.5434	0.5297	0.5212	0.5420
MISURE	3	0.5351	0.5026	0.3753	0.2952
	4	0.6012	0.5882	0.5012	0.3906
	5	0.7546	0.7537	0.6710	0.6255

Tabella 6.3: Efficienze misurate e calcolate con il modello alimentando solamente le piastre forate del prototipo.

Come più volte ricordato, il modello così come costruito non è in grado di considerare l'effetto della field charging nel secondo stadio poiché q_{field} dipende solo da E_{cor} relativo al primo stadio. Per il calcolo della sezione richiesta ed in particolare della nuova lunghezza delle piastre L_{nuova} si è posta l'ipotesi che l'errore introdotto dal modello sia sistematico ovvero che per una data tensione di alimentazione l'errore percentuale che il modello presenta rispetto a quanto misurato rimanga invariato nel tempo. Si è quindi assunta l'ipotesi che

$$\eta_{misura} = \alpha \cdot \eta_{modello} \quad (6.3.1)$$

Per particelle di classe 0.4 μm il valore di α è riportato in Tabella 6.4 con

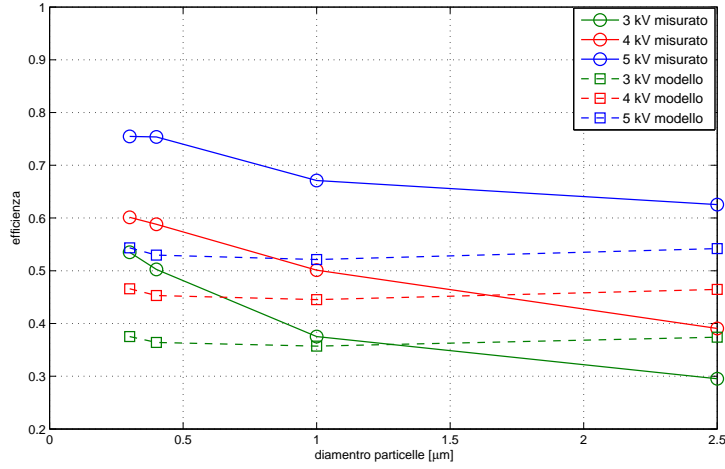


Figura 6.6: Rappresentazione grafica dei risultati in Tabella 6.3.

Tabella 6.4: Valori di α per particelle di $0.4 \mu\text{m}$ e i tre livelli di tensione misurati.

	$\eta_{modello}$	η_{misura}	α
3 kV	0.3641	0.5026	1.3805
4 kV	0.4531	0.5882	1.2979
5 kV	0.5297	0.7536	1.4227

valor medio 1.3671 ad indicare che il modello sottostima mediamente circa del 40% il valore misurato come conseguenza del non aver considerato la field charging nel secondo stadio, in realtà l'unico presente in questo caso. Supponendo che α rimanga costante, è quindi possibile ricavare una lunghezza delle piastre tale da raggiungere il 99.5% di efficienza richiesto per rientrare in classe A⁷:

$$\eta_{modello} = \frac{\eta_{misura}}{\alpha} = \frac{0.995}{\alpha} = 1 - e^{-w_{diff} \frac{S_{nuova}}{Q}}$$

$$\log \left(1 - \frac{0.995}{\alpha} \right) = -w_{diff} \frac{S_{nuova}}{Q}$$

$$\frac{-Q \log \left(1 - \frac{0.995}{\alpha} \right)}{w_{diff}} = S_{nuova} = (L_{nuova} \cdot H - 6 \cdot S_{foro}) \cdot 26$$

con $S_{foro} = \pi \cdot (14 \cdot 10^{-3})^2 = 6.1575 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ e H l'altezza delle piastre

⁷In realtà la classe A è definita per efficienze superiori al 99%. Cautelativamente si considera 99.5% come obiettivo da perseguire.

fissata a 440 mm

$$L_{nuova} = \frac{1}{H} \cdot \left(6 \cdot S_{foro} - \frac{Q \log \left(1 - \frac{0.995}{\alpha} \right)}{26 w_{diff}} \right) \quad (6.3.2)$$

Il risultato della (6.3.2) per i tre diversi livelli di tensione finora considerati è

Tabella 6.5: Valori di L_{nuova} al variare della tensione sulle piastre per ottenere un'efficienza del 99.5% con particelle di 0.4 μm supponendo sistematico l'errore sulla stima che il modello fornisce.

V_2	L_{nuova}
3 kV	0.5389
4 kV	0.4622
5 kV	0.3083

Come si può notare, partendo da piastre di lunghezza 0.159 m, le lunghezze necessarie non raggiungono valori irrealizzabili, ma si mantengono nell'intorno delle 2÷4 volte il valore originale. Come ci si aspettava, all'aumentare della tensione applicata la lunghezza necessaria per raggiungere le efficienze desiderate diminuisce. Non producendo ozono per nessuno dei valori di tensione considerati (5 kV è il limite di tensione oltre il quale si verifica una piccola produzione, a 5.6 kV cominciano a verificarsi scariche), il valore di tensione considerato ricade sui 5 kV così da ottimizzare lo sfruttamento del materiale e minimizzare i costi. In assenza di un prototipo con le caratteristiche indicate, ovvero con piastre di lunghezza doppia rispetto alle attuali⁸, il risultato rimane da essere verificato.

⁸Si sono commissionate piastre lunghe $2 \cdot 0.159 = 0.318$ mm, di lunghezza maggiore rispetto a quanto indicato per facilità di realizzazione e di montaggio utilizzando strutture analoghe alle presenti.

Capitolo 7

Conclusioni

Nonostante il fenomeno della filtrazione elettrostatica sia noto da oltre un secolo, gli studi focalizzati sull'applicazione di tali dispositivi per depurare l'aria da particolato fine sospeso si sono presentati nel panorama scientifico non prima degli ultimi vent'anni. L'improvvisa attenzione posta sul problema a seguito delle modifiche imposte dalle normative ha richiamato in causa studi del secolo scorso su cattura di particelle e sulla produzione di ozono dovuta alla ionizzazione; salvo alcune eccezioni, il risultato è una molteplicità di studi, analisi e sperimentazioni molto frammentati, calati in dettagli difficilmente spiegabili se non sperimentalmente e non di rado con errori. Nel presente lavoro di tesi si è innanzitutto cercato di ordinare ed elencare i principali lavori dal 1915, con [45], non con l'intento di migliorare quanto finora fatto ma di raggrupparli in modo organico facilmente collegabile con le fonti utilizzate. Sono state quindi effettuate numerose misurazioni utilizzando il prototipo di un filtro bi-stadio ad elettrodi filiformi di ionizzazione e a piastre per repulsione e cattura delle particelle. A partire dai risultati sperimentali e dai modelli presenti in letteratura, si sono analizzati analiticamente, numericamente e sperimentalmente i suddetti fenomeni di produzione di ozono e cattura delle particelle. Nel primo caso si è individuata una soluzione empirica, di gran lunga più semplice e adatta alle esigenze industriali per la realizzazione e gestione dei dispositivi rispetto al caso numerico: a vantaggio della soluzione stanno l'economicità, la semplicità e la possibilità offerta dalla relazione che governa il fenomeno di essere controllata elettronicamente in funzione di parametri immediati da misurare e in grado, inoltre, di fornire indicazioni sullo stato del filtro e sull'eventuale necessità di manutenzione. Nel caso della cattura, invece, il problema principale è stato l'individuare una relazione valida per l'applicazione del modello

storicamente validato di Deutsch-Anderson anche in caso di particelle fini, tipicamente sub-micron, con effetti e comportamenti molto diversi rispetto ai casi di applicazione industriali a cui tali modelli si riferiscono. Nonostante fossero disponibili alcuni modelli correttivi, si è preferito mantenere il suddetto modello riconosciuto universalmente come la miglior descrizione dei fenomeni di cattura; l'analisi dei risultati ottenuti nel prototipo e dei lavori presenti in letteratura ha consentito di descrivere con sufficiente dettaglio meccanismi ed efficienze di captazione in funzione delle particelle e dei parametri geometrici, elettrici, fluidodinamici, ecc. È stato condotto, infine, uno studio sull'effetto di alcuni parametri geometrici sull'efficienza di cattura e conseguente impatto sulla produzione di ozono, così da verificare possibili migliorie applicabili al prototipo oltre alle modifiche già apportate da lavori precedenti (ad es. l'utilizzo di piastre forate al posto di quelle piene dentate) [12]. I risultati hanno da un lato dimostrato come per molti aspetti il prototipo sia già ottimizzato in termini di efficienza raggiungibile, dall'altro hanno rivelato come una configurazione geometrica diversa potrebbe portare a soluzioni con efficienze comparabili e sufficienti a soddisfare i requisiti di classe A, riducendo (o eliminando del tutto) la problematica dell'ozono. Studi e sperimentazioni ulteriori devono essere effettuate per verificare tale ipotesi e validare il modello da cui sono state dedotte.

7.1 Possibili sviluppi futuri

Il lavoro effettuato e presentato nei Capitoli 5 e 6, come già riportato, è stato ottenuto fondendo modelli tratti dalla letteratura, in alcuni casi relativi a fenomeni sostanzialmente diversi dal campo di applicazione richiesto, con risultati sperimentali ottenuti su un prototipo appositamente realizzato. L'eccessivo costo richiesto in principio e la difficoltà realizzativa di un preciso sistema di controllo dei parametri ambientali come temperatura e umidità, hanno privato le sperimentazioni eseguite della possibilità di misurare l'effetto di tali grandezze su ozono e cattura per i quali, dove non trascurati, ci si è basati su osservazioni reperibili in letteratura e riportate in 2.3.3. Sarebbe auspicabile uno studio accurato dei fenomeni fisici e dei risultati ottenibili in presenza di condizioni ambientali controllate con precisione, così da permettere l'utilizzo del modello, eventualmente modificato, per nuove soluzioni operative agenti su questi parametri finora non considerati. In particolare la proposta di un filtro in grado di far incontrare la necessità di contenimento della produzione di ozono e di aumento della

cattura per mezzo di piastre forate di lunghezza doppia a fronte di un'eliminazione degli elettrodi dovrebbe essere validata con misure sperimentali, qualora in possesso di un prototipo, o con una soluzione numerica in grado di stimare la field charging dovuta alle imperfezioni superficiali delle piastre in corrispondenza dei fori. Peraltro, per un risultato in generale più accurato e in grado di analizzare l'intero problema di contemporanea presenza di carica delle particelle e cattura delle stesse, una soluzione numerica del problema elettrostatico e di densità di carica da accoppiare al problema fluidodinamico e di particle tracing sarebbe auspicabile, nonostante l'elevato costo computazionale necessario.

Oltre la validazione dei risultati e dei modelli, durante lo studio dei fenomeni sono state avanzate diverse proposte. Di seguito le principali.

7.1.1 Controllo elettronico

Con i risultati presentati in 5.2.2 è emerso che un controllo di corrente avrebbe permesso un controllo diretto sulla produzione di ozono. Una volta note le caratteristiche dell'ambiente e il tipo di ricambio d'aria presente, è possibile stimare quale sia la generation rate ammessa tale da non comportare il superamento del limite di concentrazione ammesso da normativa e normalmente considerato pari a 50 ppb (la più stringente) per tutti i tipi di lavoro (si veda il Paragrafo 2.2). Data la relazione (5.2.4) è possibile risalire all'intensità di corrente massima ammissibile perché la condizione sia verificata. Non essendo possibile realizzare un generatore di corrente per il rischio di scarica che comporterebbe una sollecitazione troppo elevata ai componenti elettronici non essendo controllata la tensione, la scelta è ricaduta su un generatore di tensione pilotato in corrente, quest'ultima considerata tra elettrodo ad alta tensione e il potenziale nullo.

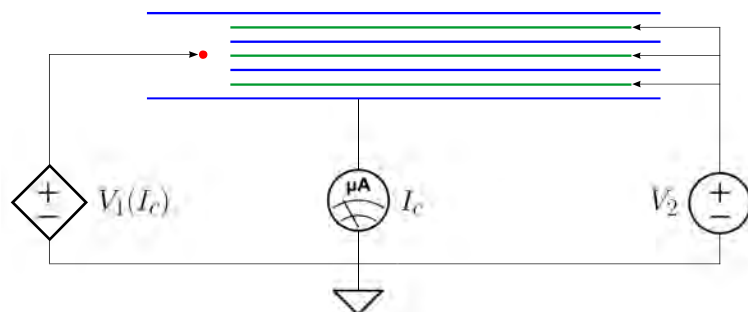


Figura 7.1: Rappresentazione schematica dell'alimentazione in presenza del controllo.

In presenza di più filtri, al fine di realizzare un controllo relativamente semplice si può assumere che la misura di corrente sia uguale in tutti i filtri e pari a quella misurata su un filtro “master”. Per far variare la corrente è necessario modificare la tensione sull’elettrodo, principale responsabile della corrente di ionizzazione. Una possibile procedura di controllo è quindi la seguente (in Figura 7.2 è raffigurato uno schema a blocchi semplificato):

1. Alimento il filtro a tensioni inferiori all’innesco
2. A tensione sulle piastre fissate, aumento la tensione sull’elettrodo fino a che anche la corrente inizia ad aumentare
3. Raggiunto il punto di massima corrente ammissibile, blocco la tensione a quel valore, cautelativamente ad un valore leggermente inferiore
4. Ad intervalli di tempo regolari controllo che il valore di corrente rimanga al di sotto del valore massimo, altrimenti riduco la tensione o, in caso di abbassamento al di sotto del valore desiderato, ripeto la procedura dal punto 2.

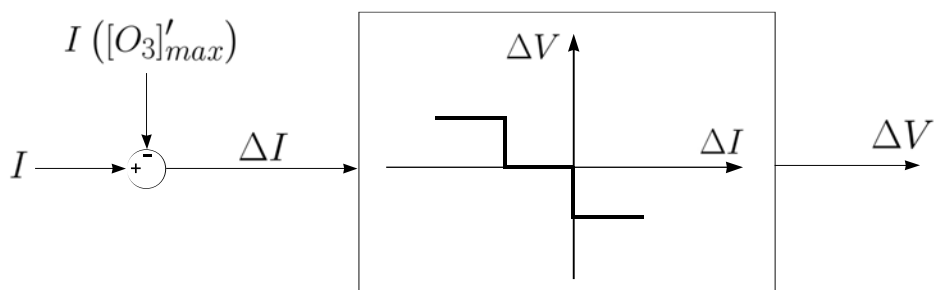


Figura 7.2: Rappresentazione schematica del controllo di corrente.

Il controllo e la procedura descritti sono realizzabili con un costo molto modesto e con un algoritmo semplicissimo, tanto da essere realizzabile anche per via analogica. La possibilità di considerare nell’algoritmo di controllo anche altri parametri come lo stato ambientale (temperatura, pressione, umidità, ecc.) o dell’aria (concentrazione di ozono, CO_2 , ecc.) porta comunque a preferire il controllo elettronico-digitale dove sensori per le grandezze appena citate possono essere facilmente integrati. Peraltro, un controllo sulla corrente consente di monitorare anche altri parametri necessari per il buon funzionamento del filtro e dell’elettronica associata:

- generation rate, secondo la (5.2.4)
- presenza di scariche che possono danneggiare l'elettronica di controllo. La scarica è infatti individuata da un aumento di corrente improvviso: monitorare la corrente, ad esempio al di sopra di una certa soglia, significa sapere quando e quante scariche si sono verificate. In presenza della scarica è possibile ridurre la tensione di elettrodo e riportare la corrente a valori inferiori dove la scarica non avviene.
- livello di sporcizia del filtro. Se la tensione necessaria per evitare le scariche è nettamente inferiore alla condizione nominale, significa che tra le piastre è presente un percorso che favorisce il passaggio di corrente, dovuto a un corpo estraneo entrato nel filtro o a sporcizia accumulata sulle piastre che riduce lo spazio d'aria isolante tra le piastre¹. In ogni caso, in presenza di una simile condizione, è necessario procedere immediatamente con la manutenzione e la pulizia del filtro.
- rottura di un elettrodo. Durante il funzionamento del filtro gli elettrodi, come in precedenza citato, si consumano variando le condizioni di ionizzazione. Ciò porta l'elettrodo a rompersi causando un'improvvisa e permanente variazione misurabile nella corrente.

La possibilità di monitorare da remoto i valori rilevati da un tale controllo locale, rende inoltre possibile programmare la manutenzione così da ottimizzare costi e interventi, aspetto essenziale per un'azienda che fornisce prodotti e assistenza nel tempo. Il modesto impatto sul costo finale del prodotto, rende la soluzione particolarmente appetibile.

7.1.2 Distruzione elettrochimica dell'ozono

Nonostante la UNI 11254 non nomini la problematica dell'ozono, le normative nazionali sull'inquinamento degli ambienti interni hanno imposto livelli ammissibili molto contenuti e tali da necessitare di un adeguamento dei dispositivi attuali. Le soluzioni sono due: realizzare filtri che producano meno ozono, ad esempio variando configurazioni geometriche o il tipo di alimentazione, o tentando di eliminare l'ozono prodotto. In parte la ricombinazione e la distruzione dell'ozono è processo che avviene naturalmente, come si è

¹La cattura di particelle non avviene uniformemente né lungo il percorso dell'aria, né all'interno dei comparti di ogni sezione: tale condizione comporta l'accumulo localizzato di sporcizia sulle pareti e favorisce il verificarsi di scariche indesiderate.

visto in 2.3.2; la loro entità non è però sufficiente a garantire la limitazione necessaria a poter affidare il contenimento della concentrazione alle sole reazioni spontanee, che peraltro necessitano esse stesse di un'elevata concentrazione per instaurarsi. In collaborazione con il Dipartimento di Chimica dell'Università degli Studi di Padova, è stata proposta una soluzione alternativa per l'abbattimento attivo dell'ozono. Essendo un gas molto reattivo ed altamente ossidante, motivo per cui è dannoso, mettendolo a contatto con un buon riducente, esso reagisce scomparendo dai prodotti. Tra i riducenti è stato proposto il carbone in forma di piastre di grafite con le quali sarebbe possibile costruire un terzo stadio di forma analoga al secondo stadio del prototipo utilizzato e a questo collegato in cascata. In tal modo l'ozono prodotto nel primo stadio e in piccola (o nulla) parte nel secondo passerebbe, dopo essersi ricombinato in minima parte, nel terzo stadio dove la presenza del riducente a base di carbone lo trasformerebbe in CO_2 . Un'ulteriore proposta è l'applicazione di un potenziale elettrico molto contenuto (~ -1 V) sulle piastre di carbone le quali sarebbero in grado di mutare l'esito della reazione con l'ozono da anidride carbonica ad ossigeno. La relativamente bassa concentrazione di ozono da abbattere garantirebbe il funzionamento del terzo stadio per diversi mesi prima di essere sostituito, permettendo così di ottimizzare gli interventi di manutenzione ordinaria.

Una prima analisi sperimentale dimostrerebbe che la presenza di una piccola piastra di grafite posta ortogonalmente al flusso d'aria (si veda la Figura 7.3) comporta una crescita della concentrazione di ozono più lenta e una decrescita dopo lo spegnimento del filtro più rapida, ad indicare che vi è un effetto di abbattimento attivo dell'ordine di grandezza di $10^{-5} \frac{\text{ppb}}{\text{s}\cdot\text{cm}^2}$. Ulteriori studi e sperimentazioni sono sicuramente necessarie per verificare i risultati ottenuti e per studiare l'effetto con la configurazione proposta, ovvero con piastre longitudinali al flusso d'aria.

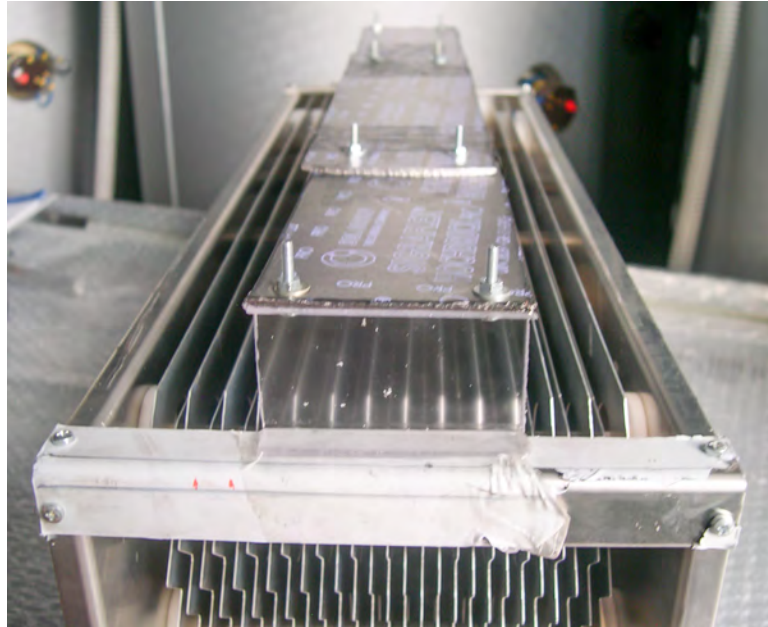


Figura 7.3: Foto del filtro con installata la piastra in carbone ortogonale al flusso d'aria.
La configurazione ufficiale sarà analoga alle piastre interne del filtro.

Appendice A

Disegni tecnici del precipitatore elettrostatico

Di seguito sono riportati i disegni tecnici del precipitatore elettrostatico esistente.

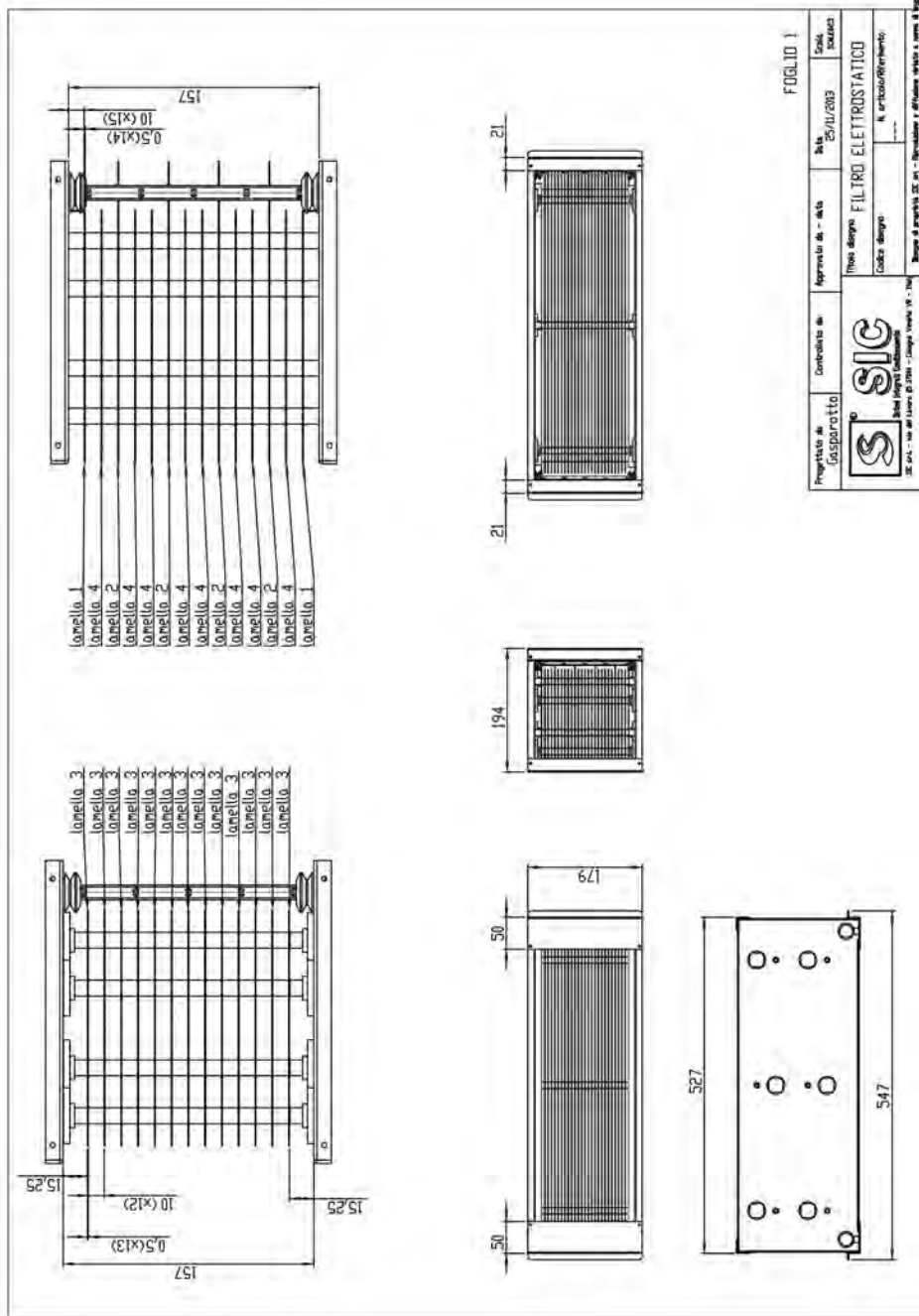


Figura A.1: Proiezioni del prototipo. In alto il filtro con le sole piastre di raccolta (in alto a destra) e di repulsione (in alto a sinistra).

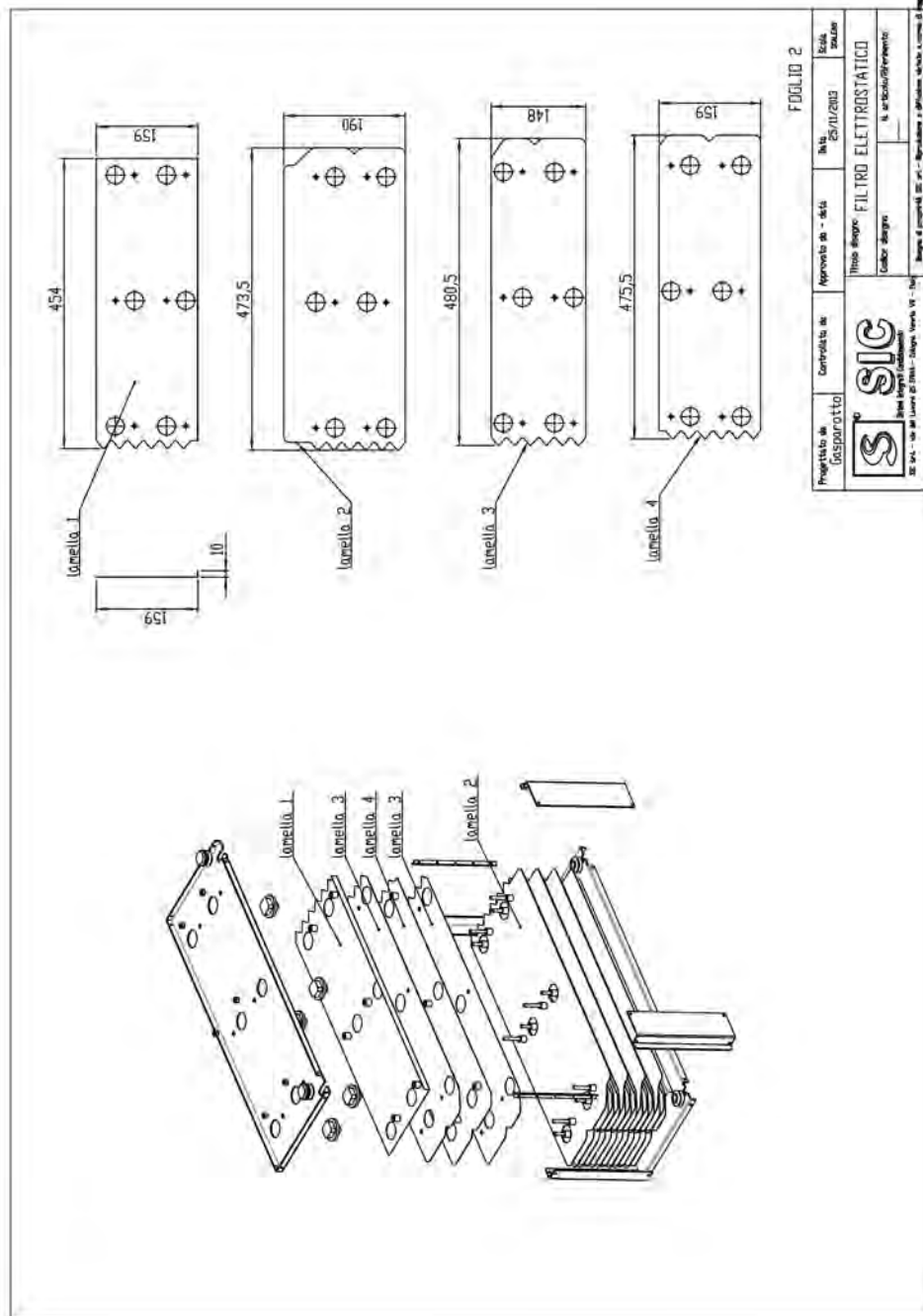


Figura A.2: Esploso e dettaglio delle piastre utilizzate nel prototipo.

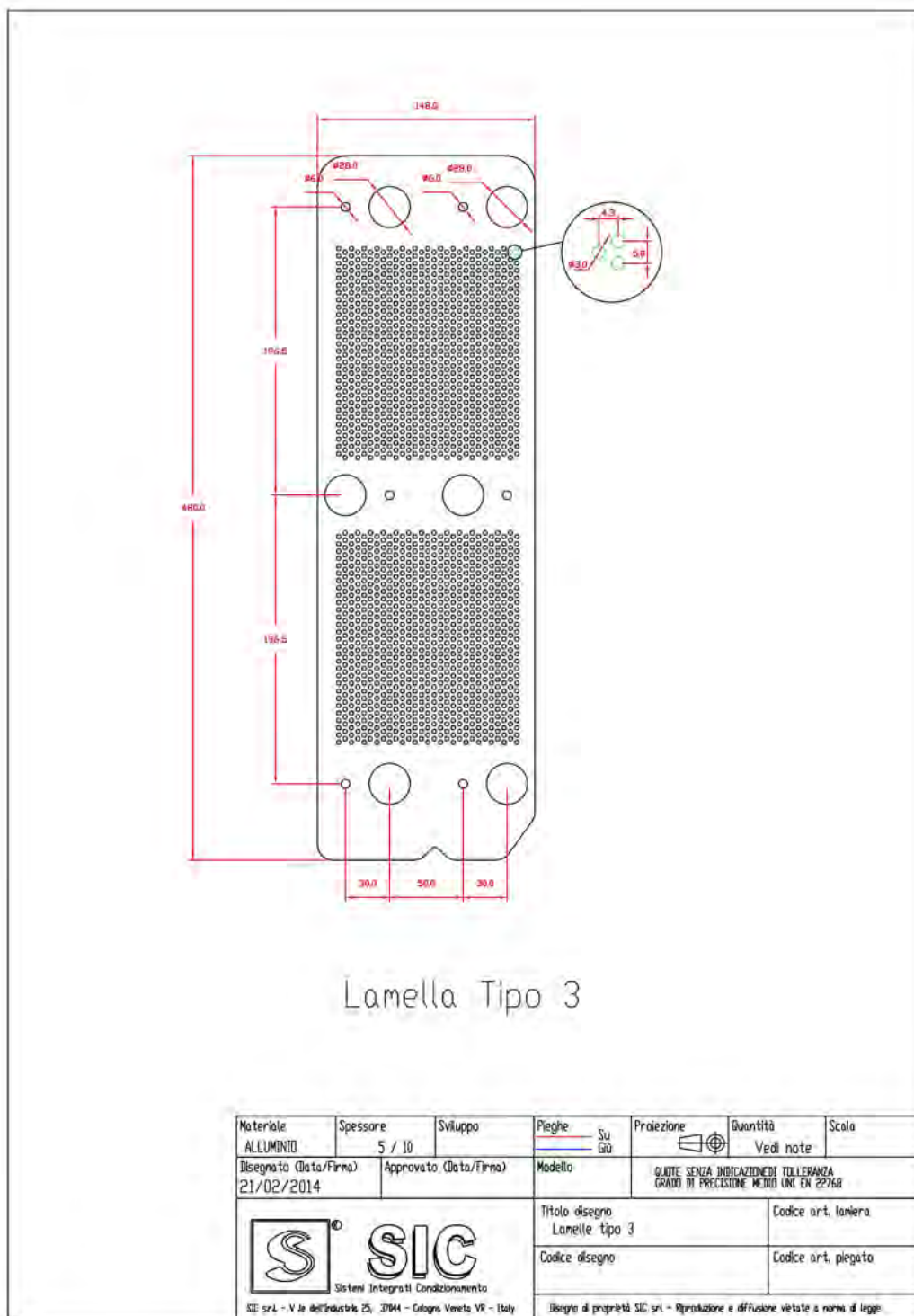


Figura A.3: Piastra forata innovativa realizzata in sostituzione alle piastre di repulsione (lamella di Tipo 3 indicata in FiguraA.2)

Appendice B

Equazioni utilizzate

B.1 Equazione interpolante

Nel modello è stata utilizzata la relazione semplificata proposta da White [6, 92] poiché, in assenza di una soluzione puntuale del problema elettrostatico e di densità di carica nel primo stadio, le informazioni sulla corrente e sul campo elettrico presente non erano sufficientemente attendibili per basare su di esse il modello. Con dei valori costanti suggeriti dalla letteratura come validi nella maggior parte dei casi applicativi in ambienti analoghi a quelli di interesse per il presente lavoro, si è pertanto preferito utilizzare equazioni che non dipendessero dalla corrente a monte per studiare l'effetto dello stadio di cattura, lasciando tale compito esclusivamente ad un valor medio del campo elettrico di ionizzazione nello strato d'aria limitrofo all'elettrodo (E_{cor}). Per estrapolare le costanti "assolute" utilizzate nella funzione interpolante si è utilizzata la relazione più accurata; il risultato è comunque valido e non si discosta dal caso precedentemente utilizzato poiché tali costanti sono poi moltiplicate da parametri individuati direttamente dall'interpolazione.

$$\begin{aligned}
\eta &= 1 - e^{-w \cdot \frac{S}{Q}} \\
&= 1 - e^{-\left[(q_{diff} + q_{field}) \frac{E \cdot C_c \cdot S}{3\pi\mu d_p \cdot Q} \right]} \\
&= 1 - e^{-\left[\left(\frac{4\pi\varepsilon_0 kT \frac{d_p}{2}}{e} \log\left(1 + \frac{t}{\tau_d}\right) + \frac{12\pi\varepsilon_0 \varepsilon_r E \left(\frac{d_p}{2}\right)^2}{\varepsilon_r + 2} \right) \frac{E \cdot C_c S}{3\pi\mu d_p Q} \right]}
\end{aligned}$$

dove $\tau_d = \frac{\varepsilon_0 \sqrt{8mk\pi T}}{e^2 N_i d_p} \simeq \frac{4\varepsilon_0 kT}{\delta e c_i \frac{d_p}{2}}$ è la costante di tempo di carica per diffusione (è questo il termine che cambia tra il modello semplificato e il modello completo[10]), $\delta = \frac{I}{EbS}$ è la densità di carica che andrebbe utilizzata come condizione al contorno a monte del secondo stadio, b la mobilità ionica, I la corrente uscente dal filamento e E il campo elettrico in prossimità del secondo stadio per semplicità imposto pari al campo tra le piastre così da far dipendere la funzione dal solo potenziale applicato alle piastre

$$\begin{aligned}
&= 1 - e^{-\left[4\pi\varepsilon_0 \frac{d_p}{2} \left(\frac{kT}{e} \log\left(1 + \frac{tIec_i \frac{d_p}{2}}{4\varepsilon_0 kT b S E}\right) + \frac{3\varepsilon_r E \frac{d_p}{2}}{\varepsilon_r + 2} \right) \frac{E \cdot C_c S}{3\pi\mu d_p Q} \right]} \\
&= 1 - e^{-\left[\frac{2\varepsilon_0 C_c S}{3\mu Q} \left(\frac{kT}{e} \log\left(1 + \frac{tIec_i \frac{d_p}{2}}{4\varepsilon_0 kT b S} \cdot \frac{1}{E}\right) E + \frac{3\varepsilon_r \frac{d_p}{2}}{\varepsilon_r + 2} E^2 \right) \right]}
\end{aligned}$$

ed esplicitando $V = E \cdot d_{pias}$ dove la distanza tra le piastre vale $d_{pias} = 4.75mm$ nel prototipo considerato

$$\begin{aligned}
&= 1 - e^{-\left[\left(\frac{2\varepsilon_0 S}{3\mu Q} \frac{1000}{d_{pias}} \right) \left(\frac{kT}{e} \right) C_c \log\left(1 + \left(\frac{tIec_i}{8\varepsilon_0 kT b S} \frac{d_{pias}}{1000} \right) \frac{d_p}{V} \right) V + \left(\frac{2\varepsilon_0 S}{3\mu Q} \frac{1000}{d_{pias}} \right) \left(\frac{3\varepsilon_r}{2(\varepsilon_r + 2)} \frac{1000}{d_{pias}} \right) C_c d_p \cdot V^2 \right]} \\
&= 1 - e^{-\left[cost1 \cdot cost2 \cdot C_c \log\left(1 + cost3 \frac{d_p}{V}\right) V + cost1 \cdot cost4 \cdot C_c d_p \cdot V^2 \right]}
\end{aligned}$$

con

$$cost1 = \frac{2\varepsilon_0 S}{3\mu Q} \frac{1000}{d_{pias}}$$

$$cost2 = \frac{kT}{e}$$

$$cost3 = \frac{tIec_i}{8\varepsilon_0 kT b S}$$

$$cost4 = \frac{3\varepsilon_r}{2(\varepsilon_r + 2)} \frac{1000}{d_{pias}}$$

B.2 Definizione dei coefficienti delle fisiche PDE in COMSOL

Fisica dipendente da φ

La fisica dipendente da φ è descritta dall'equazione (2.4.12): pertanto i valori inseriti nella fisica nella General Form di COMSOL, chiamando PHI la variabile φ , sono:

- $\Gamma = \begin{bmatrix} PHIx \\ PHIy \end{bmatrix}$
- $f = -\frac{\delta}{\epsilon_0}$
- Valore iniziale $PHI \neq 0$
- Condizione di Dirichlet ponendo $PHI = 0$ sull'elettrodo esterno
- Condizione di Neumann $-\mathbf{n} \cdot \Gamma = g = -E_{peak}$
- Vincolo debole in un punto
 - *Constraint expression:* $V_0 - PHI$
 - *Lagrange multiplier variable:* δ_0p

Si è definito $\delta = \delta_0 + d\delta$ con $\delta_0 = \text{intop}(\delta_0p)$ calcolato definendo nel modello un integrale intop in un punto dell'elettrodo. Il valore delle altre variabili è stato posto a 0.

Fisica dipendente da $d\delta$

Descritta dall'equazione (2.4.13) priva di una divergenza “pura”, la General Form con variabile $d\delta$, chiamata $d\delta$ presenta:

- $\Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
- $f = PHIx * ddeltax + PHIy * ddeltay - \frac{\delta^2}{\epsilon_0}$
- Condizione di Dirichlet ponendo $d\delta = 0$ sulla superficie dell'elettrodo.

Appendice C

Codici MATLAB realizzati

C.1 Applicazione per calcolo della generation rate

Per poter utilizzare un parametro “assoluto” che non dipenda dall’ambiente in cui è inserito il filtro, anziché considerare la concentrazione di ozono misurata dall’Horiba si è pensato di considerare la velocità con cui tale concentrazione varia. Tale dato, nei primi istanti successivi l’accensione del filtro, è indipendente dall’ambiente poiché l’assenza di ozono consente di non avere fenomeni di distruzione/ricombinazione e permette quindi di analizzare il problema trascurando la configurazione esterna al filtro. Il valor massimo della velocità di variazione della concentrazione d’ozono misurata è stata definita *generation rate*. Nel Paragrafo 5.2.2 si è descritta la procedura con la quale si è effettuato il calcolo della generation rate e in Appendice C.2 si è riportato il codice scritto in MATLAB utilizzato a tal fine. Per rendere disponibile il codice agli operatori presso la cabina, si è pensato di realizzare un’applicazione con interfaccia grafica user-friendly così da garantire sia una facilità di utilizzo senza la necessità di conoscere il linguaggio MATLAB e lo stesso codice nei dettagli, sia la non modificabilità del codice, requisito essenziale se utilizzato da più utenti. L’applicazione, scritta al momento per la sola piattaforma Windows[©], essendo quella utilizzata da SIC, sfrutta il compilatore MCR (MATLAB Compiler Runtime) reso disponibile gratuitamente da MathWorks e reperibile al sito <http://www.mathworks.com/products/compiler/mcr/>. Per l’applicazione, si è scelto di usare la Release 8.0 contenuta nella versione R2012b di MATLAB, attualmente la più utilizzata e che garantisce quindi la maggiore compatibilità.

Graficamente, l’applicazione denominata *generation_rate_calculator* si pre-

senta come in Figura C.1. Il pulsante *Browse* evidenziato in alto a sinistra

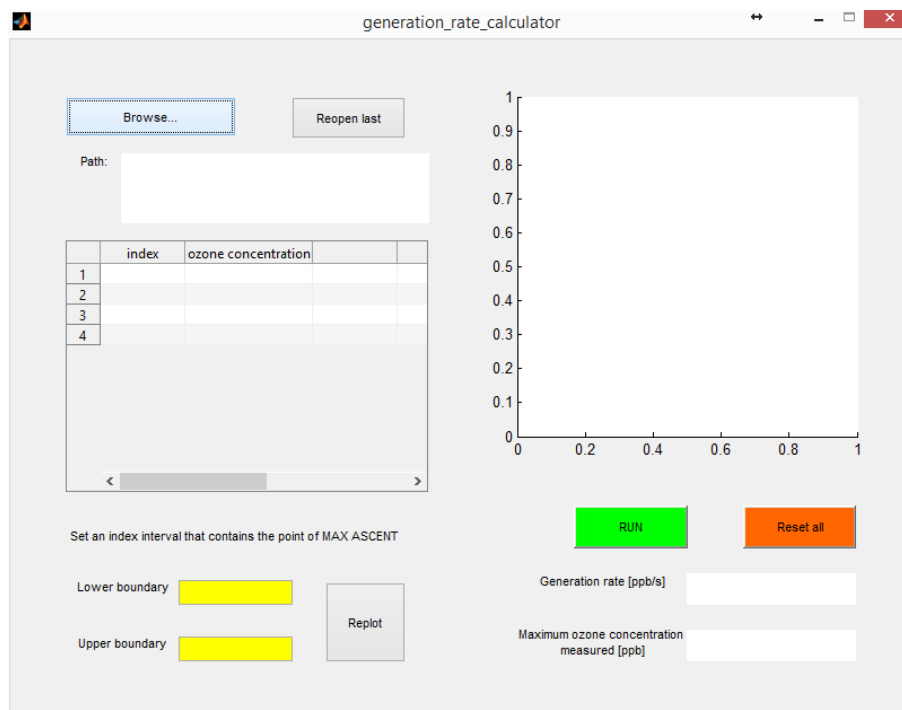


Figura C.1: Applicazione all'apertura.

consente di scegliere il file da fornire come input. Per semplificare la procedura e minimizzare i passaggi da effettuare manualmente, l'applicazione è stata realizzata in modo che il file da caricare sia quello fornito dal software di acquisizione dati BenchLink a fine misura (Figura C.2), un file *.csv* le cui prime righe contengono informazioni su data e ora di misura, legenda, ecc. Queste righe, inutili al fine dell'analisi, non sono considerate dallo script che importa invece tutti i valori contenuti nel file e li traduce in matrice. Una volta selezionato il file, sulla finestra sarà visibile il percorso dove esso situa e sulla tabella sottostante sono caricate le colonne relative all'indice della misura (prima colonna del file in input) e la concentrazione misurata dall'Horiba (settima colonna del file originale). La finestra apparirà come in Figura C.3. Nell'esempio si sono utilizzate le stesse misure presenti in 5.21.

Individuato visivamente un intervallo che contenga il punto di flesso della porzione di curva crescente, si inseriscono gli estremi nelle celle gialle in basso a sinistra; con il tasto *Replot* si ricalcola il grafico contenuto in tale intervallo. Qualora gli estremi non coprano un intervallo troppo grande

Scan	Time	Elapsed	101 <V1> (VDC)	102 <V2> (VDC)	103 <t> (VDC)	104 <HORIBA-O3> (VDC)	105 <Umidit> (VDC)	106 <Temperatura> (VDC)
1	16/07/14 10:19 00:01:29:28	0,0914436	0,12462301	0,068627621	0,016512795	50,582469	31,312025	
2	16/07/14 10:19 00:01:29:30	0,091422394	0,12425966	0,06884464	0,016506012	50,57085	31,314075	
3	16/07/14 10:19 00:01:29:32	0,091364744	0,12434625	0,068663404	0,016501945	50,623481	31,312712	
4	16/07/14 10:19 00:01:29:34	0,09125408	0,12459077	0,068799359	0,016316156	50,622112	31,320231	
5	16/07/14 10:19 00:01:29:36	0,091383298	0,12451655	0,068980815	0,016310737	50,62485	31,314075	
6	16/07/14 10:19 00:01:29:38	0,09139611	0,12451301	0,068935424	0,016122232	50,6269	31,316812	
7	16/07/14 10:19 00:01:29:40	0,091450448	0,12490376	0,06889699	0,016123584	50,625531	31,312712	
8	16/07/14 10:19 00:01:29:42	0,091420406	0,12474406	0,068992191	0,015933727	50,618694	31,242306	
9	16/07/14 10:19 00:01:29:44	0,091357012	0,12496031	0,0688072	0,015747938	50,623481	31,211544	
10	16/07/14 10:19 00:01:29:46	0,091339122	0,12488189	0,068886608	0,015742507	50,622112	31,211544	
11	16/07/14 10:19 00:01:29:48	0,091291852	0,12491061	0,068754077	0,015739791	50,62485	31,214962	
12	16/07/14 10:19 00:01:29:50	0,091362976	0,125029	0,068568865	0,015551286	50,625531	31,210862	

Figura C.2: File di output del software di acquisizione dati BenchLink a fine misura utilizzato come input nell'applicazione.

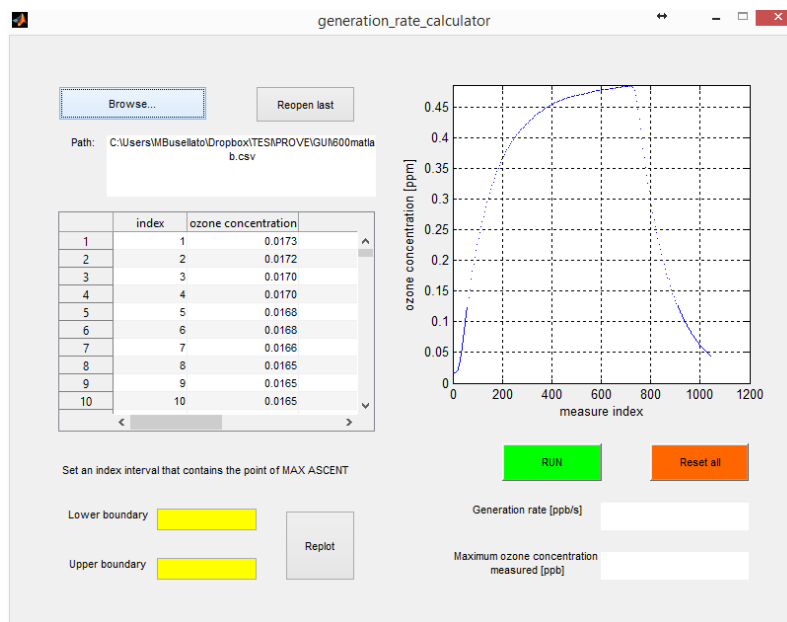


Figura C.3: Applicazione dopo il caricamento del file.

per un'interpolazione cubica o non contengano il punto di flesso, è possibile modificare gli estremi e cliccare nuovamente su *Replot* fino ad ottenere un andamento soddisfacente come in Figura C.4. Per procedere con il calcolo,

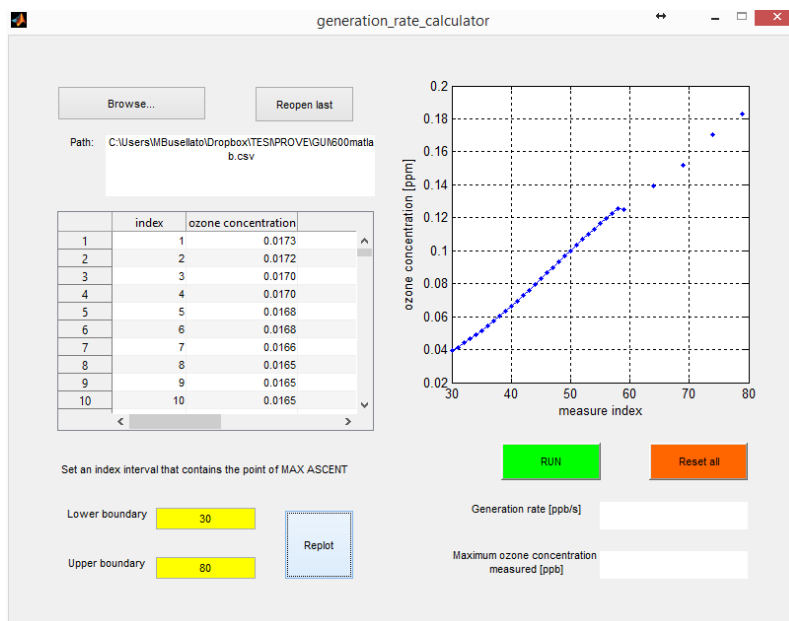


Figura C.4: Selezione dell'intervallo contenente il punto di flesso. Nell'esempio, dall'andamento visibile in Figura C.3 si è considerato come intervallo di interpolazione quello con indice compreso tra 30 e 80.

cliccare su *RUN*. Il grafico, ad assi invertiti rispetto al caso precedente come sottolineato in 5.2.2, raffigura i punti misurati (punti blu), la funzione cubica interpolante (linea rossa), il punto di flesso (punto verde) e la retta tangente alla funzione cubica nel punto di flesso indicante la generation rate (linea blu). In basso a destra è riportato il valore della generation rate in ppb/s e la massima concentrazione di ozono durante l'intera misurazione. Il risultato è visibile in Figura C.5.

Una volta eseguito il programma, non è possibile modificare ulteriormente l'intervallo e ricalcolare la generation rate a causa dell'inversione degli assi utilizzata per rendere più semplice il calcolo della funzione cubica. Per effettuare una nuova interpolazione è necessario riavviare l'applicazione cliccando su *Reset all* e, qualora si voglia effettuare un calcolo relativo allo stesso file caricato nel caso precedente, ricaricare il file cliccando su *Reopen last*, procedura che riconduce alla Figura C.3.

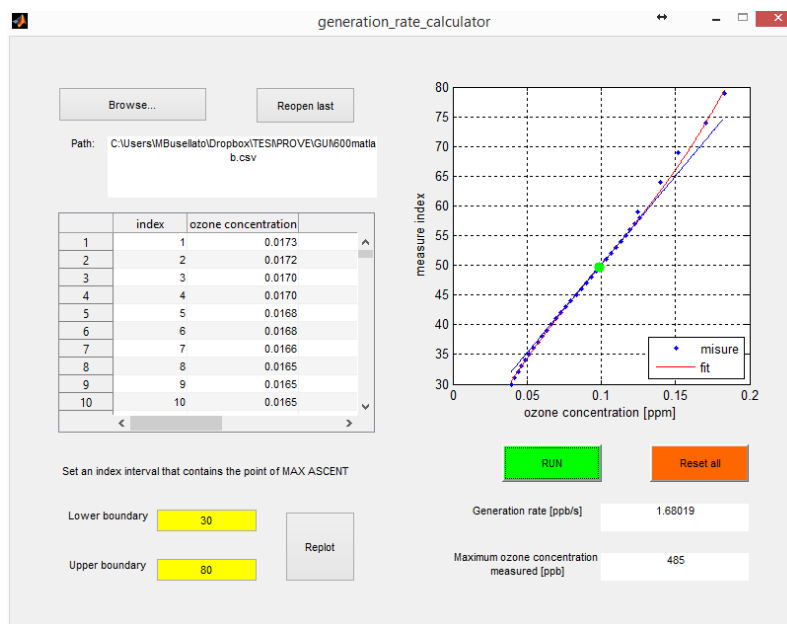


Figura C.5: Esempio di calcolo della generation rate.

Requisiti di sistema

- **Sistema operativo:** Windows Server 2003 R2 Service Pack 2 o superiori, Windows XP (versione Desktop) con Service Pack 2 o superiori. L'applicazione funziona indistintamente su architettura a 32-bit (x86) e 64-bit (x64), il compilatore MCR invece dev'essere scaricato per la specifica architettura.
- **Processore:** qualunque processore Intel o AMD che supporti le istruzioni SSE2.
- **Spazio su disco:** 550 MB
- **RAM:** 1024 MB (2048 MB raccomandati).

C.2 Calcolo generation rate con interpolazione cubica

```
1 close all
2 clear all
3 clc
4
5 % In dati600.mat si trova la matrice contenente i risultati ...
   così come
6 % esportati dal BenchLink alimentando il filtro a 0.6 mA costanti.
7 % Le colonne rappresentano:
8 %1) indice della misura
9 %2) data e ora (NaN in MATLAB)
10 %3) tempo trascorso dall'inizio della misura (NaN in MATLAB)
11 %4) tensione V1
12 %5) tensione V2
13 %6) corrente
14 %7) concentrazione di ozono misurata dall'Horiba
15 %8) umidità dell'aria in cabina
16 %9) temperatura dell'aria in cabina
17
18 load('dati600.mat')
19
20 index_campionamento=dati600(:,1);
21 ozono_campionamento=dati600(:,7);
22
23 %Prelevo manualmente gli indici nell'intorno del punto di ...
   flesso in modo da
24 %ottenere un'interpolazione migliore. Lo stesso per la curva ...
   di discesa
25 %dell'ozono
26 index_crescita=30:80;
27 ozono_crescita=ozono_campionamento(index_crescita);
28 index_decrescita=750:size(index_campionamento);
29 ozono_decrescita=ozono_campionamento(index_decrescita);
30
31 %% Fit: 'crescita 600uA'.
32 [xData, yData] = prepareCurveData( ozono_crescita, ...
   index_crescita );
33
34 % Set up fitype and options.
35 ft = fitype( 'poly3' );
36 opts = fitoptions( ft );
37 opts.Lower = [-Inf -Inf -Inf -Inf];
```

```

38 opts.Robust = 'LAR';
39 opts.Upper = [Inf Inf Inf Inf];
40
41 % Fit model to data.
42 [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
43 coeff_crescita=coeffvalues(fitresult);
44
45 %i seguenti numeri sono dovuti all'interpolante cubica
46 coeff_crescita_dydx(1)=3*coeff_crescita(1);
47 coeff_crescita_dydx(2)=2*coeff_crescita(2);
48 coeff_crescita_dydx(3)=coeff_crescita(3);
49
50 coeff_crescita_d2ydx2(1)=2*coeff_crescita_dydx(1);
51 coeff_crescita_d2ydx2(2)=coeff_crescita_dydx(2);
52
53 x_flesso=-coeff_crescita_d2ydx2(2)/coeff_crescita_d2ydx2(1);
54 x=x_flesso; %x è l'ascissa del punto in cuiandrò a calcolare ...
    la generation rate
55 %calcolo il valore della funzione in x
56 funzione_originale=coeff_crescita(1)*x^3+coeff_crescita(2)*x^2+...
57     coeff_crescita(3)*x+coeff_crescita(4);
58 rate_temp=coeff_crescita_dydx(1)*x^2+coeff_crescita_dydx(2)*x+...
59     coeff_crescita_dydx(3);
60 rate_ppm_campionamento=1/rate_temp;
61 rate_ppb_secondo=rate_ppm_campionamento*1000/2
62
63 ascissa=min(ozono_crescita):0.001:max(ozono_crescita)
64 ascissa_inversaok=index_campionamento(10:150);
65 retta_tangente=rate_temp*ascissa+(-rate_temp*x+funzione_originale);
66 retta_tangente_inversaok=ascissa_inversaok/rate_temp-...
67     (-rate_temp*x+funzione_originale)/rate_temp;
68
69 plot(index_campionamento,ozono_campionamento);
70 grid on
71 hold on
72 plot(ascissa_inversaok,retta_tangente_inversaok,'r')
73 plot(funzione_originale,x,'*g')
74
75 % Plot fit with data.
76 figure( 'Name', 'interpolazione crescita' );
77 h = plot( fitresult, xData, yData );
78 legend( h, 'index crescita vs. ozono crescita', 'fit', ...
    'Location', 'SouthEast' );
79 % Label axes
80 xlabel( 'ozono crescita' );
81 ylabel( 'index crescita' );
82 grid on

```

```

83 hold on
84 plot(ascissa,retta_tangente)
85 plot(x,funzione_originale,'*g')
86
87 %% Fit: 'decrecita 600uA'.
88 [xData, yData] = prepareCurveData( index_decrecita, ...
      ozono_decrecita );
89
90 % Set up fitype and options.
91 ft = fitype( 'expl' );
92 opts = fitoptions( ft );
93 opts.Display = 'Off';
94 opts.Lower = [-Inf -Inf];
95 opts.StartPoint = [45.2472734594005 -0.00646297231419596];
96 opts.Upper = [Inf Inf];
97
98 % Fit model to data.
99 [fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
100 coeff_decrecita=coeffvalues(fitresult);
101
102 %Show equation
103 testo = sprintf('y = %1.4f*exp(%1.4f ...
      x)',coeff_decrecita(1),coeff_decrecita(2))
104
105 % Plot fit with data.
106 figure( 'Name', 'interpolazione decrecita' );
107 h = plot( fitresult, xData, yData );
108 legend( h, 'valori misurati', testo, 'Location', 'SouthEast' );
109 % Label axes
110 xlabel( 'index decrecita' );
111 ylabel( 'ozono decrecita' );
112 grid on

```

Bibliografia

- [1] B. Weinhold, “Ozone nation: Epa standard panned by the people,” *Environ Health Perspect*, vol. 116, no. 7, pp. 302–305, July 2008. v, 19, 21
- [2] G. P. Castle, I. I. Inculet, and K. I. Burgess, “Ozone generation in positive corona electrostatic precipitators,” *Industry and General Applications, IEEE Transactions on*, no. 4, pp. 489–496, 1969. v, 28, 38, 52
- [3] T. Ehara, K. Ito, Y. Takagi, A. Zukeran, and K. Yasumoto, “Reduction of ozone generation in electrostatic precipitator.” v, 31, 32, 79
- [4] M. Khalifa and M. Abdel-Salam, “Calculating the surface fields of conductors in corona,” *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, vol. 120, no. 12, pp. 1574–1575, 1973. v, 43, 44, 142
- [5] R. Sigmond, “Simple approximate treatment of unipolar space-charge-dominated coronas: The warburg law and the saturation current,” *Journal of Applied Physics*, vol. 53, no. 2, pp. 891–898, 1982. v, 47
- [6] H. J. White, “Industrial electrostatic precipitation,” in *Industrial electrostatic precipitation*. Addison-Wesley, 1963. v, 5, 8, 12, 15, 27, 28, 32, 38, 41, 43, 45, 48, 66, 67, 68, 71, 72, 75, 76, 82, 123, 124, 159, 163, 171, 201
- [7] N. Farnoosh, K. Adamiak, and G. Castle, “3-d numerical analysis of ehd turbulent flow and mono-disperse charged particle transport and collection in a wire-plate esp,” *Journal of Electrostatics*, vol. 68, no. 6, pp. 513–522, 2010. vi, 31, 65, 84

- [8] W. C. Hinds, *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons, 1999. vi, 39, 68, 70, 72, 73, 76, 84, 161
- [9] N. Farnoosh, K. Adamiak, and G. Castle, “3-d numerical simulation of particle concentration effect on a single-wire esp performance for collecting poly-dispersed particles,” *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 1, pp. 211–220, 2011. vi, 31, 84
- [10] J. Benítez, *Process engineering and design for air pollution control*. Prentice Hall, 1993. vi, 72, 73, 84, 85, 86, 161, 202
- [11] W. C. Janischewskyj *et al.*, “Finite element solution for electric fields of coronating dc transmission lines,” *Power*, 1979. viii, 49, 124, 125, 127, 129
- [12] P. Alotto, “Studio di soluzioni per limitare emissioni di ozono da parte di precipitatori elettrostatici nel quadro del progetto miur - rif. prot. miur n.8309 del 5 settembre 2011.” xi, 184, 190
- [13] “Residential air cleaner: a summary of available information,” *United States Environmental Protection Agency (EPA)*, Revised August 2009. 1, 154
- [14] W. J. Fisk, D. Black, and G. Brunner, “Benefits and costs of improved ieq in us offices,” *Indoor Air*, vol. 21, no. 5, pp. 357–367, 2011. 2
- [15] J. D. Spitler, “Editorial: Research planning for the hvac&r industry,” *HVAC&R Research*, vol. 13, no. 5, pp. 681–682, 2007. 2
- [16] M. Jerrett, R. T. Burnett, C. A. Pope III, K. Ito, G. Thurston, D. Krewski, Y. Shi, E. Calle, and M. Thun, “Long-term ozone exposure and mortality,” *New England Journal of Medicine*, vol. 360, no. 11, pp. 1085–1095, 2009. 5, 19
- [17] C. Roberto, *Impianti di produzione dell’energia Elettrica*, pp. 131–135. 7, 78
- [18] W. Gilbert, *De magnetete*. Courier Dover Publications, 1958. 8
- [19] S. O. Lodge, *The Electrical Deposition of Dust and Smoke: With Special Reference to the Collection of Metallic Fume, and to a Possible Purification of the Atmosphere*, 1886. 8

- [20] F. G. Cottrell, "The electrical precipitation of suspended particles." *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 3, no. 8, pp. 542–550, 1911. 8
- [21] P. G. Landolt and P. H. M., "Air cleaning by the cottrell electrical precipitation process." 8
- [22] G. Penney, "A new electrostatic precipitator," *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, vol. 56, no. 1, pp. 159–128, 1937. 8
- [23] F. Favre, F. Villieras, Y. Duval, E. McRae, and C. Rapin, "Influence of relative humidity on electrical properties of α - Al_2O_3 powders: Resistivity and electrochemical impedance spectroscopy," *Journal of colloid and interface science*, vol. 286, no. 2, pp. 615–620, 2005. 15
- [24] D. Zucchelli and C. Vergani, "Filtri di nuova generazione per la purificazione dell'aria e il risparmio energetico," no. 4. 15
- [25] "Filtri di nuova generazione per la purificazione dell'aria e il risparmio energetico," no. 4. 16
- [26] NASA. [Online]. Available: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov> 18
- [27] R. S. Stolarski, "The antarctic ozone hole," *Scientific American*, vol. 258, pp. 30–36, 1988. 18
- [28] S. Madronich and F. R. de Gruijl, "Skin cancer and uv radiation," 1993. 18
- [29] O. Secretariat, "Action on ozone," *United Nations Environment Programme*, 2000. 18
- [30] G. Bonn, "Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide," *World Health Organization*, pp. 7–9, 2003. 18, 19
- [31] D. M. Olszyk, H. Cabrera, and C. R. Thompson, "California statewide assessment of the effects of ozone on crop productivity," *JAPCA*, vol. 38, no. 7, pp. 928–931, 1988. 19

- [32] S. K. Allen, G. Plattner, A. Nauels, Y. Xia, D. Qin, and T. Stocker, “Climate change 2013: The physical science basis. an overview of the working group 1 contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (ipcc),” in *AGU Fall Meeting Abstracts*, vol. 1, 2013, p. 0949. 19
- [33] V. Naik, A. Voulgarakis, A. M. Fiore, L. Horowitz, J.-F. Lamarque, M. Lin, M. J. Prather, P. Young, D. Bergmann, P. Cameron-Smith *et al.*, “Preindustrial to present-day changes in tropospheric hydroxyl radical and methane lifetime from the atmospheric chemistry and climate model intercomparison project (accmip),” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13, no. 10, pp. 5277–5298, 2013. 19
- [34] R. Dahl, “Ozone overload: Current standards may not protect health,” *Environ Health Perspect*, vol. 114, no. 4, p. 240, April 2006. 21
- [35] C. Baier-Anderson *et al.*, “Proposed revisions to the national ambient air quality standards for ozone,” *American Lung Association*, July 2007. 21, 56
- [36] “The total exposure assessment methodology (team) study: summary and analysis,” *U.S. Environmental Protection Agency*, 1987. 22
- [37] W. H. Organization, *Global health risks: mortality and burden of disease attributable to selected major risks*. World Health Organization, 2009. 22
- [38] “Report to congress on indoor air quality: Volume 2,” *U.S. Environmental Protection Agency*, 1989. 22
- [39] W. Adams, “Measurement of breathing rate and volume in routinely performed daily activities, final report,” *Contract*, no. A033-205, p. 185, 1993. 22
- [40] J. Lai, “Airplane air heavy on the ozone,” *Daily Brief*, May 2008. 23
- [41] A. Goldman and J. Amouroux, “Plasma chemistry,” *Electrical Breakdown and Discharges in Gases*, pp. 293–346, 1983. 26, 32, 37
- [42] J. Gaugain, “On the disruptive discharge,” in *Annales de Chimie et de Physique*, vol. 64, 1862, p. 175. 26

- [43] E. Warburg, “Ueber das verhalten sogenannter unpolarisirbarer elektroden gegen wechselstrom,” *Annalen der Physik*, vol. 303, no. 3, pp. 493–499, 1899. 27
- [44] J. S. E. Townsend and J. Townsend, *Electricity in gases*. Clarendon Press, 1915. 27, 38, 43, 45, 54
- [45] F. W. Peek, *Dielectric phenomena in high voltage engineering*. McGraw-Hill Book Company, Incorporated, 1915. 28, 36, 38, 123, 124, 189
- [46] F. Lattarulo and V. Amoroso, *Filamentary Ion Flow: Theory and Experiments*. John Wiley & Sons, 2014. 28, 29, 38, 41, 42, 44, 50, 125
- [47] M. Hirsh, *Gaseous electronics*. Elsevier, 1978, vol. 1. 28, 119
- [48] M. Abdel-Salam and E. Z. Abdel-Aziz, “A new charge-simulation-based method for analysis of monopolar poissonian fields,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 27, no. 4, p. 807, 1994. 29
- [49] B. Benamar, “La faisabilité de l’électrofiltration d’une atmosphère chargée en poussières de bois: Etude expérimentale et numérique,” Ph.D. dissertation, Nancy 1, 2008. 29, 41
- [50] I. Gallimberti, “Recent advancements in the physical modelling of electrostatic precipitators,” *Journal of electrostatics*, vol. 43, no. 4, pp. 219–247, 1998. 31, 32, 60, 61, 115, 158
- [51] K. Yasumoto, A. Zukeran, Y. Takagi, Y. Ehara, T. Takahashi, and T. Yamamoto, “Effect of electrode thickness for reducing ozone generation in electrostatic precipitator,” *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, vol. 128, pp. 689–694, 2008. 32, 35
- [52] A. Yehia, M. Abdel-Salam, and A. Mizuno, “On assessment of ozone generation in dc coronas,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 33, no. 7, p. 831, 2000. 32, 34, 53
- [53] T. Yamamoto and L. E. Sparks, “Numerical simulation of three-dimensional tuft corona and electrohydrodynamics,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, no. 5, pp. 880–885, 1986. 32

- [54] J. Chen and J. H. Davidson, "Ozone production in the positive dc corona discharge: Model and comparison to experiments," *Plasma chemistry and plasma processing*, vol. 22, no. 4, pp. 495–522, 2002. 33, 37, 38, 52, 145, 170
- [55] S. Yagi and M. Tanaka, "Mechanism of ozone generation in air-fed ozonisers," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 12, no. 9, p. 1509, 1979. 33
- [56] A. Schwarzenegger, "Evaluation of ozone emissions from portable indoor air cleaners: Electrostatic precipitators and ionizers," 2008. 34
- [57] K. J. Boelter and J. H. Davidson, "Ozone generation by indoor, electrostatic air cleaners," *Aerosol science and technology*, vol. 27, no. 6, pp. 689–708, 1997. 34, 35, 36, 38, 52, 79, 124
- [58] K. Nashimoto, "The effect of electrode materials on o_3 and no_x emissions by corona discharging," no. 32. 34, 36, 52
- [59] M. Jedrusik, J. B. Gajewski, and A. J. Świerczok, "Effect of the particle diameter and corona electrode geometry on the particle migration velocity in electrostatic precipitators," *Journal of Electrostatics*, vol. 51, pp. 245–251, 2001. 35
- [60] T. Ohkubo, S. Hamasaki, Y. Nomoto, J.-S. Chang, and T. Adachi, "The effect of corona wire heating on the downstream ozone concentration profiles in an air-cleaning wire-duct electrostatic precipitator," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 3, pp. 542–549, 1990. 36
- [61] M. Awad and G. Castle, "Ozone generation in an electrostatic precipitator with a heated corona wire," *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 25, no. 4, pp. 369–374, 1975. 36, 52, 124, 142, 143, 147, 157
- [62] A. S. Viner, P. A. Lawless, D. S. Ensor, and L. E. Sparks, "Ozone generation in dc-energized electrostatic precipitators," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 28, no. 3, pp. 504–512, 1992. 36, 37, 38, 52, 53, 149

- [63] R. Peyrous and R. Lapeyre, “Gaseous products created by electrical discharges in the atmosphere and condensation nuclei resulting from gaseous phase reactions,” *Atmospheric Environment (1967)*, vol. 16, no. 5, pp. 959–968, 1982. 37
- [64] W. Deutsch, “Über die dichtevertelung unipolarer ionenströme,” *Annalen der Physik*, vol. 408, no. 5, pp. 588–612, 1933. 38, 43, 45
- [65] P. Cooperman, “A theory for space-charge-limited currents with application to electrical precipitation,” *American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, Transactions of the*, vol. 79, no. 1, pp. 47–50, 1960. 38, 45
- [66] G. M. Colver and S. El-Khabiry, “Modeling of dc corona discharge along an electrically conductive flat plate with gas flow,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 35, no. 2, pp. 387–394, 1999. 41
- [67] M. Xu, Z. Tan, and K. Li, “Modified peek formula for calculating positive dc corona inception electric field under variable humidity,” *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 4, pp. 1377–1382, 2012. 42
- [68] R. Anyadike, “Assessment of various formulae for the computation of saturation vapour pressures over liquid water,” *Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology, Series A*, vol. 33, no. 2-3, pp. 239–243, 1984. 42
- [69] N. A. Kaptzov, *Elektricheskie Iavleniaa v Gazach i Vakuume*. 43
- [70] J. J. Thomson, *Conduction of electricity through gases*. University press, 1903. 45
- [71] T. Allibone and J. Saunderson, “Corona at very high direct voltages. vi. corona in rod/plane gaps,” in *Proc. of 6th Int. Symp. High Voltage Engineering (ISH), New Orleans*, 1989. 47
- [72] A. Bäck and J. Cramsky, “Comparison of numerical and experimental results for an electrostatic precipitator.” 51
- [73] J. Sheng, Z. Yan, B. Qin, and G. Gela, “Dc ion flow fields: uniqueness of solution and application of the charge simulation method,” *Journal of the Franklin Institute*, vol. 325, no. 3, pp. 315–334, 1988. 51, 67

- [74] W. H. Koh and I. H. Park, “Numerical simulation of a pulsed corona discharge plasma,” in *APS Meeting Abstracts*, vol. 1, 2001, p. 1143P. 51
- [75] M. Talaie, M. Taheri, and J. Fathikaljahi, “A new method to evaluate the voltage–current characteristics applicable for a single-stage electrostatic precipitator,” *Journal of Electrostatics*, vol. 53, no. 3, pp. 221–233, 2001. 50
- [76] P. Atten, “Etude mathématique du problème du champ électrique affecté par un flux permanent d’ions unipolaires et application à la théorie de la sonde froide,” Ph.D. dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 1969. 50
- [77] L. B. Loeb, *Electrical coronas: their basic physical mechanisms*. University of California Press United States, 1965. 52
- [78] C. Gallo and G. P. Castle, “Parametric study of ozone generation by coronas,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, no. 1, pp. 84–86, 1978. 53
- [79] *UNI 11254:2007 - Filtri per aria elettrostatici attivi per la ventilazione generale - Determinazione della prestazione di filtrazione*. 12, 55, 57
- [80] P. M. Tronville, “L’evoluzione dei metodi per la prova dei filtri hepa e ulpa,” 2006. 57
- [81] C. Gallo, J. Germanos, and J. Courtney, “The effect of humidity and temperature variations on the behavior of wire-to-plane coronas,” *Applied optics*, vol. 8, no. 101, pp. 111–119, 1969. 57
- [82] J. H. Turner, P. Lawless, T. Yamamoto, D. Coy, G. Greiner, J. McKenna, and W. Vatavuk, “Electrostatic precipitators,” *Air Pollution Engineering Manual*, pp. 89–113, 1992. 61
- [83] C. Inc., *Comsol Multiphysics 4.4 - Reference Manual*. 64
- [84] N. Farnoosh, “Three-dimensional modeling of electrostatic precipitator using hybrid finite element-flux corrected transport technique,” 2011. 66, 71, 115
- [85] S. Morsi and A. Alexander, “An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 55, no. 02, pp. 193–208, 1972. 66

- [86] X. Wang, C. Yao, C. Sun, Q. Yang, and X. Zhang, “Numerical modelling of mutual effect among nearby needles in a multi-needle configuration of an atmospheric air dielectric barrier discharge,” *Energies*, vol. 5, no. 5, pp. 1433–1454, 2012. 66
- [87] L. B. Loeb, “Static electrification,” in *Progress in Dielectrics*, vol. 1, 1962, p. 249. 67
- [88] H. Rohmann, “Methode zur messung der gröÙe von schwebeteilchen,” *Zeitschrift für Physik*, vol. 17, no. 1, pp. 253–265, 1923. 68
- [89] M. Pauthenier, M. Moreau-Hanot *et al.*, “La charge des particules sphériques dans un champ ionisé,” *J. Phys. Radium*, vol. 3, no. 12, pp. 590–613, 1932. 68, 76
- [90] J. H. Jeans, “The mathematical theory of electricity and magnetism,” p. 192. 69
- [91] P. Smith and G. Penney, “The charging of nonspherical particles in a corona discharge,” *American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, Transactions of the*, vol. 80, no. 3, pp. 340–346, 1961. 71
- [92] C. Ruttanachot, Y. Tirawanichakul, and P. Tekasakul, “Application of electrostatic precipitator in collection of smoke aerosol particles from wood combustion,” *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 11, no. 1, pp. 90–98, 2011. 71, 72, 161, 201
- [93] P. Arendt and H. Kallman, “The mechanism of charging mist particles,” *Z. Phys*, vol. 35, p. 421, 1926. 72
- [94] A. Mizuno, “Electrostatic precipitation,” *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 5, pp. 615–624, 2000. 75
- [95] J. D. McCain, J. P. Gooch, and W. B. Smith, “Results of field measurements of industrial particulate sources and electrostatic precipitator performance,” *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 25, no. 2, pp. 117–121, 1975. 84, 85, 86
- [96] Lesson 3 -esp design parameters and their effects on collection efficiency. [Online]. Available: <http://yosemite.epa.gov/oaqps> 86

- [97] J. P. Reynolds, L. Theodore, and J. Marino, “Calculating collection efficiencies for electrostatic precipitators,” *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 25, no. 6, pp. 610–616, 1975. 86, 89
- [98] P. Saiyasitpanich, T. C. Keener, S.-J. Khang, and M. Lu, “Removal of diesel particulate matter (dpm) in a tubular wet electrostatic precipitator,” *Journal of Electrostatics*, vol. 65, no. 10, pp. 618–624, 2007. 86
- [99] B. Bellagamba, F. Mattachini, I. Gallimberti, R. Turri, A. Gazzani, and U. TROMBONI, “A mathematical model for simulation of large scale electrostatic precipitators,” in *5th International Conference on Electrostatic Precipitation, Washington DC*, 1993. 115, 125
- [100] H. W. Bandel, “Point-to-plane corona in dry air,” *Physical Review*, vol. 84, no. 1, p. 92, 1951. 119
- [101] Z. Bo and J. Chen, “Dimensional analysis of detrimental ozone generation by positive wire-to-plate corona discharge in air,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 43, no. 6, p. 065204, 2010. 123, 124
- [102] J. S. Townsend, “Xi. the potentials required to maintain currents between coaxial cylinders,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 28, no. 163, pp. 83–90, 1914. 124, 125
- [103] H. Ziedan, J. Tlustý, A. Mizuno, A. Sayed, and A. Ahmed, “Corona current-voltage characteristics in wire-duct electrostatic precipitators, theory versus experiment,” *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, vol. 4, pp. 154–162, 2010. 125
- [104] A. A. Elmoursi and G. P. Castle, “Modeling of corona characteristics in a wire-duct precipitator using the charge simulation technique,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, no. 1, pp. 95–102, 1987. 125
- [105] S. Cristina, G. Dinelli, and M. Feliziani, “Numerical computation of corona space charge and v-i characteristic in dc electrostatic precipitators,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 1, pp. 147–153, 1991. 127

- [106] B. Benamar, E. Favre, A. Donnot, and M. Rigo, "Finite element solution for ionized fields in dc electrostatic precipitator," in *Proceedings of the COMSOL Users Conference*, 2007, pp. 23–24. 127
- [107] A. Quarteroni, R. Sacco, and F. Saleri, "Numerical mathematics. 2000." 128
- [108] A. Yehia and A. Mizuno, "Suppression of the ozone generation in the positive and negative dc corona discharges," *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, vol. 2, pp. 44–49, 2008. 145
- [109] B. Vishvakarma and C. S. Rai, "Measurement of complex dielectric constant of sand and dust particles as a function of moisture content," in *Microwave Conference, 1993. 23rd European*, Sept 1993, pp. 568–570. 157
- [110] A. Mizuno, "Electrostatic precipitation," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 5, pp. 615–624, 2000. 159
- [111] M. Falaguasta, J. Steffens, E. Valdes, and J. Coury, "Overall collection efficiency of a plate-wire electrostatic precipitator operating on the removal of pm_{2.5}," *Latin American applied research*, vol. 38, no. 2, p. 179, 2008. 72, 161
- [112] Y. Zhuang, Y. Jin Kim, T. Gyu Lee, and P. Biswas, "Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators," *Journal of Electrostatics*, vol. 48, no. 3, pp. 245–260, 2000. 161
- [113] J. Abbott and D. Drehmel, "Control of fine particulate-emissions," *Chemical Engineering Progress*, vol. 78, no. 12, pp. 47–51, 1976. 161
- [114] W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, and B. Flannery, "Numerical recipes in fortran 77: The art of scientific computing, 933 pp," 1992. 164