

**Bologna, 2 dicembre 2020**

**L'IMPIEGO DELL'OZONO NELLA SANIFICAZIONE DEGLI  
AMBIENTI DI VITA E DI LAVORO E METODOLOGIE  
ALTERNATIVE**

**Roberto Brisotto(1,2), Renato Cabella(3), Leonello Attias(4)**

- (1) Dipartimento di Prevenzione – Azienda Sanitaria Universitaria Friuli Centrale – Udine
- (2) Servizio Prevenzione, Sicurezza Alimentare e Sanità Pubblica Veterinaria - Direzione centrale salute, politiche sociali e disabilità - Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
- (3) Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale - Laboratorio Agenti Chimici – INAIL
- (4) Centro Nazionale Sostanze Chimiche, Prodotti Cosmetici e Protezione del Consumatore – Istituto Superiore di Sanità

**INTRODUZIONE**

L'ozono è un componente naturale dell'atmosfera, nei cui vari strati è presente in concentrazioni diverse. La maggior parte (circa il 90%) si forma nella stratosfera, fascia di atmosfera che va indicativamente dai 10 ai 50 km di altezza, concentrandosi soprattutto intorno ai 25 km, in seguito all'azione sull'ossigeno dei raggi ultravioletti UV-C con lunghezza d'onda compresa tra 100-280 nm, provenienti dal sole. Tale strato di ozono, per la sua capacità di assorbire le radiazioni ultraviolette nocive del sole (raggi UV-B con lunghezza d'onda compresa tra 280-315 nm), è essenziale per la vita sulla Terra. Nella troposfera (fascia di atmosfera che va dal suolo fino a circa 12 km di altezza) l'ozono è presente in basse concentrazioni e si forma a seguito di reazioni chimiche tra ossidi di azoto e composti organici volatili, favorite dal forte irraggiamento solare. Si tratta, quindi, di un inquinante secondario i cui precursori sono generalmente prodotti da combustione civile e industriale e da processi che producono o utilizzano sostanze chimiche volatili, come solventi e carburanti (l'ozono è uno dei principali componenti dello smog prodotto dall'uomo nelle grandi città). La sua presenza al livello del suolo dipende fortemente dalle condizioni meteorologiche e pertanto è variabile sia nel corso della giornata che delle stagioni. Le concentrazioni di ozono più elevate si registrano in estate quando maggiore è l'irraggiamento solare e normalmente nelle zone distanti dai centri abitati ove minore è la presenza di sostanze inquinanti con le quali, a causa del suo elevato potere ossidante, può reagire. In generale, la quota proveniente dall'esterno rappresenta la maggior parte dell'ozono presente in un ambiente confinato.

Nella troposfera l'ozono presente ad alte concentrazioni può causare irritazione agli occhi, al naso e alla gola. Se respirato in grandi dosi può provocare danni al sistema respiratorio e cardiocircolatorio.

L'ozono ha un odore pungente caratteristico che ha permesso a Martin Van Marum, nel 1785, di supporre l'esistenza vicino ad apparecchiature elettriche. Il gas fu dimostrato per la prima volta nel 1840 da Christian Friedrich Schonbein, che gli diede il nome di sostanza odorosa (dal greco ozein = odorare). La produzione artificiale di ozono fu ottenuta da Von Siemens nel 1857, mediante un arco voltaico.

L'ozono è una forma allotropica dell'ossigeno, di formula chimica O<sub>3</sub>. È un gas instabile e allo stato liquido è esplosivo. Non può pertanto essere prodotto e commercializzato in bombole come gli altri gas industriali. Deve essere prodotto al momento dell'uso da un generatore.

I principali metodi di produzione sono:

- Elettrico: effetto corona (o scarica corona).
- Fotochimico: radiazione UV.
- Elettrochimico: elettrolisi dell'acqua.
- Radiochimico: irradiazione dell'ossigeno con raggi radioattivi.

La generazione di ozono per via radiochimica comporta la necessità di filtrare isotopi pericolosi e pertanto non viene ritenuta una modalità di produzione commercialmente valida.

La generazione di ozono tramite via elettrolitica ha un ruolo importante per la storia dello stesso gas: le sperimentazioni condotte da Schönbein sulla generazione artificiale di ozono prevedevano la sua formazione a partire dall'elettrolisi dell'acido solforico. Attualmente, la produzione di ozono per via elettrolitica si realizza a partire dall'elettrolisi dell'acqua.

Per applicazioni che richiedono piccole quantità di ozono e in modesta concentrazione si ricorre al metodo di preparazione per via fotochimica. Il principio fotochimico riprende ciò che accade in natura in una fascia dello strato atmosferico terrestre come sopra richiamato.

Per ottenere quantità più elevate e concentrazioni maggiori, l'ozono viene preparato mediante ozonizzatori. I generatori di ozono si alimentano di aria ambiente od ossigeno ed energia elettrica e non necessitano di prodotti chimici aggiuntivi.

L'ozono è un energico ossidante (secondo solo a quello del fluoro, al quarto posto se consideriamo anche il radicale ossidrilico e l'ossigeno nascente, nettamente superiore comunque a quello del cloro). Reagisce facilmente con i composti organici contenenti doppi o tripli legami addizionando i 3 atomi di ossigeno al legame non saturo con formazione iniziale di gruppi ciclici (ozonuri) che poi aprendosi generano gruppi aldeidici e carbossilici. I gruppi

–SH, =S, –NH<sub>2</sub>, =NH, –OH (fenolico) e –CHO dei composti organici sono facilmente ossidati dall'ozono, mentre vengono attaccati più difficilmente gli idrocarburi saturi.

Grazie al miglioramento della tecnologia che riesce a produrne in grandi quantità e a costi relativamente bassi rispetto ad un tempo, l'ozono sta avendo una forte applicazione in ambito industriale. È senza dubbio conveniente in termini di costo ed energia, ha un basso impatto ambientale, inoltre decade in breve tempo senza lasciare residui: trascorso un tempo si trasforma in ossigeno e questo rappresenta un importante vantaggio.

L'impiego industriale più importante è nella depurazione dell'acqua potabile e delle acque per piscina; nella depurazione delle acque reflue e nelle industrie alimentari per il trattamento e la conservazione degli alimenti e per il controllo delle contaminazioni microbiche negli ambienti di lavorazione. È noto il suo utilizzo anche per l'abbattimento di COV (composti organici volatili) e composti odorosi nelle emissioni industriali. Già da tempo, l'ozono trova inoltre impiego nelle lavanderie industriali (alta efficienza di pulizia con risparmio del consumo di acqua e di agenti chimici) e nelle lavanderie specializzate nella sanificazione di oggetti che non possono essere lavati con acqua.

Grazie alle sue proprietà ossidanti ed al suo stato fisico di gas che ne favorisce l'applicazione potendo raggiungere punti difficilmente raggiungibili con altri metodi, l'ozono è proposto sul mercato anche come mezzo per la sanificazione di superfici e ambienti. Durante la pandemia Sars-Cov-2 si è osservato un incremento dell'offerta dei generatori di ozono ed un frequente ricorso all'uso di questo prodotto, spesso equiparando il suo impiego ad un trattamento di disinfezione alla stregua dei biocidi disinfettanti. A riguardo il Ministero della Salute ha emanato la Circolare MS 17644 del 22 maggio 2020 con cui ha ritenuto utile ribadire alcune precisazioni sull'impiego di apparecchiature di generazione "in situ" di ozono con riferimento al Rapporto dell'Istituto Superiore di Sanità n.25/2020 Covid-19 "Raccomandazioni ad interim sulla sanificazione di strutture non sanitarie nell'attuale emergenza COVID-19: superfici, ambienti interni e abbigliamento". Con il Rapporto n.56/2020 Covid-19 "Focus on: utilizzo professionale dell'ozono anche in riferimento a COVID-19" l'Istituto Superiore di Sanità, in collaborazione con INAIL, ha inoltre voluto fornire ulteriori evidenze tecnico scientifiche, ad oggi disponibili, sull'ozono nel contesto epidemico COVID-19.

Ai suddetti Rapporti si rimanda per gli aspetti non specificatamente trattati in questo documento, ma strettamente collegati, in particolare per quanto attiene la classificazione di pericolo, la tossicità e l'efficacia biocida dell'ozono, le misure di sicurezza per l'uso dell'ozono, i metodi per la determinazione della concentrazione di ozono negli ambienti indoor e le metodiche per la decomposizione dell'ozono.

## LA SANIFICAZIONE E L'UTILIZZO DEI GENERATORI DI OZONO

### Le caratteristiche delle celle ozonogene

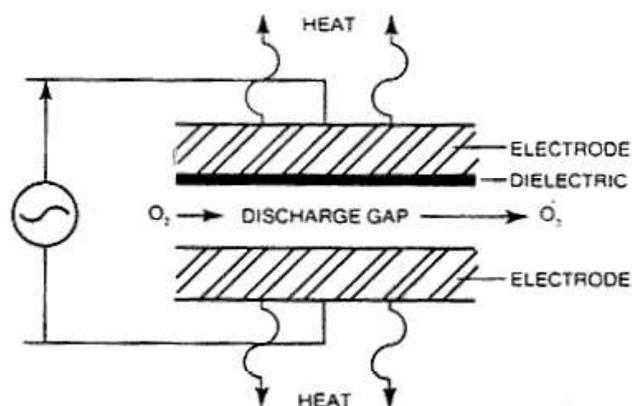
La scelta del tipo di ozonizzatore deve essere opportunamente considerata in funzione degli scopi. Di seguito vengono descritte le sue modalità di funzionamento la cui conoscenza è utile per un corretto impiego.

I principali generatori a effetto corona attualmente in commercio per la produzione di ozono, utilizzano celle che ricalcano il brevetto di Ernst Werner von Siemens del 1857 delle quali si sono sviluppate nel tempo diverse varianti. Tra i loro vantaggi, la possibilità di costruire generatori di dimensioni anche contenute, una vita operativa piuttosto lunga (diverse migliaia di ore) e l'elevata possibile produttività.

Sono disponibili diverse configurazioni di questi sistemi; i principi base di funzionamento sono comunque comuni e vengono di seguito illustrati.

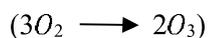
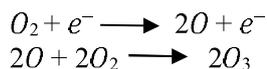
Si tratta di celle costituite da due elettrodi: un elettrodo è collegato al generatore di AC, mentre l'altro funge da elettrodo di terra. I due elettrodi sono separati da un'intercapedine di norma di pochi decimi di millimetro, nella quale viene fatta fluire aria o ossigeno, e da un materiale dielettrico che riveste almeno uno dei due elettrodi:

**Figura 1:** Schema di funzionamento dei generatori a effetto corona



Mantenendo una elevata differenza di potenziale tra i due elettrodi, l'aria che passa nell'intercapedine viene ionizzata. Tale ionizzazione si ha quando il valore del campo elettrico supera quello della rigidità dielettrica del materiale di rivestimento.

Quando gli elettroni che si generano hanno energia cinetica sufficiente per dissociare la molecola di ossigeno, una certa frazione di collisioni tra atomi e molecole di ossigeno porterà alla formazione di molecole di ozono:



L'efficienza nella produzione di ozono aumenta con l'aumentare della superficie del dielettrico e con la sua costante dielettrica, mentre diminuisce con l'aumentare dell'intercapedine.

Il generatore di ozono è corredato di trasformatore per aumentare la tensione di linea fino a 600 - 20.000 volt a seconda del dielettrico e della distanza tra gli elettrodi.

Se si usa corrente continua, gli elettroni si scaricano all'elettrodo con scarsa probabilità di urtare le molecole di ossigeno; usando invece una corrente alternata, gli elettroni sono costretti a invertire la propria direzione alternativamente verso l'uno o l'altro elettrodo, in accordo con la frequenza della corrente; in questo modo aumenta la probabilità degli urti e quindi la formazione di ozono.

Il dielettrico viene utilizzato per distribuire uniformemente il flusso di elettroni attraverso l'intercapedine consentendo loro di diffondere all'interno di un più ampio volume di gas e di entrare in contatto con più molecole di ossigeno: in questo modo la scarica elettrica si diffonde su un'area maggiore dando origine all'effetto corona.

L'effetto corona è quindi un fenomeno che si manifesta non direttamente tra potenziale positivo e negativo, bensì in porzioni limitate dello spazio gassoso con formazione di un gran numero di micro-scariche omogeneamente distribuite che si evidenziano come una luminescenza diffusa della zona gassosa interessata. L'ozono si forma in queste micro-scariche e non nello spazio circostante.

Poiché una quota variabile tra l'85% ed il 95% dell'energia che alimenta la cella viene trasformata in calore, è necessario raffreddare la cella. Per piccole potenze si può ancora sfruttare il raffreddamento naturale, ma, man mano che la potenza aumenta, è necessario ricorrere al raffreddamento forzato ad aria o ad acqua.

Un fattore particolarmente critico è lo spazio tra i due elettrodi. Con l'aumentare di questo spazio, diminuisce sensibilmente la produzione di ozono, anche in relazione ad un maggior sviluppo di calore che tende a distruggere l'ozono formato.

L'energia degli elettroni, e quindi l'efficacia del sistema, aumenta con la differenza di potenziale, ma poiché al crescere di questa, data la piccola

distanza che si deve tenere fra gli elettrodi, si avrebbero elevati riscaldamenti che favoriscono la decomposizione dell'ozono in ossigeno, si preferisce innalzare la frequenza della corrente mantenendo più bassa la tensione. Ciò consente di realizzare apparecchi di minore ingombro ma di maggiore produzione oltre che di aumentare la durata di tutto l'apparato.

La maggior parte delle celle ozonogene di norma lavora con tensioni intorno ai 7.000 V. La frequenza operativa di una cella ozonogena può superare di molto anche i 1000 Hz e raggiungere valori di 20.000 – 25.000 Hz.

La cella corona può essere costruita in acciaio inossidabile, alluminio o altri materiali comunque resistenti all'ozono. La configurazione dell'elettrodo e del dielettrico può essere una piastra piatta o un tubo cilindrico (cella tubolare). Il materiale dielettrico può essere vetro borosilicato, ceramica, mica o altri materiali non conduttivi.

Di norma l'involucro in metallo contenente l'apparato è sufficiente a schermare l'emissione di campi elettromagnetici a livelli non significativi.

Negli ultimi anni sono state prodotte celle a geometria innovativa, sempre basate sull'effetto corona, con impiego di tecnologie e/o materiali speciali: ad intercapedine ampia, a scarica fredda, a piccolissima intercapedine, a elettrodo in rete metallica, ad elettrodo in filo metallico fine, etc.

### **Effetti della scarica**

Come sopra evidenziato, in condizioni appropriate con un campo elettrico ad alta tensione applicato tra gli elettrodi, si verificano micro-scariche nell'intercapedine. Gli elettroni ad alta energia creati nel campo elettrico si scontrano con le molecole presenti nello spazio creando numerose entità chimiche come radicali, ioni, atomi eccitati e molecole eccitate, il cui insieme è denominato plasma. È poco probabile che molte di queste entità chimiche siano emesse da un generatore di ozono a causa della loro elevata reattività ed emivita estremamente breve. La concentrazione delle sostanze chimiche più longeve, come l'ozono, prodotte nella cella ozonogena dipende da molti fattori, quali:

- composizione del gas (concentrazione di ossigeno, umidità, contaminanti, ecc.);
- portata del gas di alimentazione;
- pressione di esercizio (può variare tra quella atmosferica fino a 3 bar - si tenga presente che la formazione di ozono dall'ossigeno è favorita dalla pressione);
- temperatura/raffreddamento della cella;
- tensione applicata, frequenza e caratteristiche d'onda;

- regolazione dei cicli di accensione e spegnimento della cella;
- spazio dell'intercapedine;
- configurazione dell'elettrodo e del dielettrico;
- tipo di materiale dielettrico, spessore, ecc.

### **Tipologia di precursore**

Il fattore chiave che influenza il livello dei sottoprodotti nell'uscita del generatore di ozono è il sistema di preparazione del gas di alimentazione (denominato precursore) della cella utilizzato. I metodi di preparazione del gas di alimentazione includono (in ordine decrescente di produzione di sottoprodotti):

- nessun trattamento: l'aria ambiente è convogliata direttamente all'interno della cella;
- aria secca - dove l'umidità viene rimossa a un livello solitamente  $< -40^{\circ}\text{C}$  di punto di rugiada;
- concentratore di ossigeno con livelli di ossigeno  $> 95\%$ ;
- ossigeno puro.

I generatori di ozono che non dispongono di preparazione dell'aria di alimentazione sono semplici e relativamente economici.

L'utilizzo di ossigeno da bombole o da appositi concentratori di ossigeno ha il vantaggio di disporre di una fonte di alimentazione controllata che non genera inquinanti secondari oltre a offrire la possibilità di raggiungere concentrazioni più alte di ozono nel flusso erogato e rese di produzione più alte. La produzione di calore inoltre, essendo collegata alla quantità di ozono formata, è più intensa con maggiore necessità di raffreddamento della cella.

In entrambi questi ultimi casi va controllato il rischio di incendio/esplosione adottando appositi accorgimenti. In particolare, il funzionamento della cella deve essere tale da evitare la formazione di scariche elettriche. Di norma l'impiego dei concentratori è preferito a quello delle bombole perché più sicuri.

La principale tipologia di concentratori di ossigeno prevede tipicamente due colonne di adsorbimento (servizio e rigenerazione) riempite con setacci molecolari di zeolite in grado di assorbire azoto, anidride carbonica e umidità dall'aria. Con tali concentratori si possono produrre concentrazioni di ossigeno  $> 90\%$  con un punto di rugiada  $< -40^{\circ}\text{C}$ .

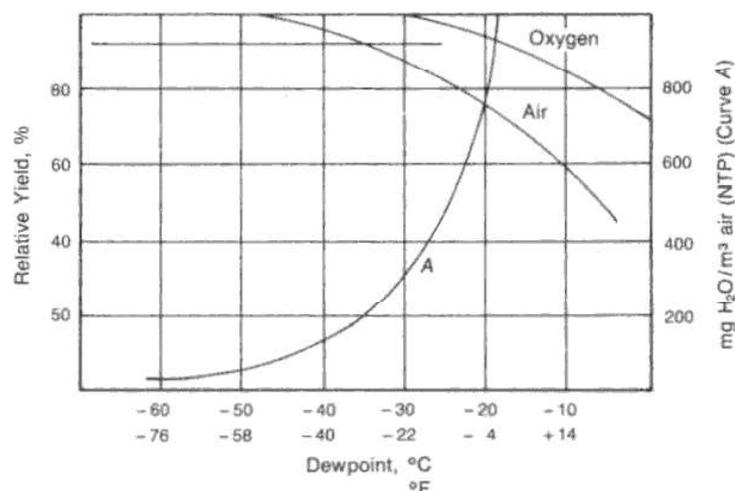
L'ossigeno in bombole è tipicamente disponibile a concentrazioni  $> 99,5\%$  di ossigeno.

La generazione di ozono dall'aria ambiente comporta una maggiore complessità degli apparati a monte delle celle ozonogene, in quanto l'aria

deve essere disidratata e purificata. Operando invece con ossigeno, esso può essere avviato direttamente alle celle ozonogene in quanto fornito già secco e molto puro.

La presenza di umidità nel gas di alimentazione determina un calo del rendimento (per reazione dell'acqua con l'ozono) e reazioni indesiderate nell'unità della corona con produzione di sottoprodotti. La figura seguente mostra l'effetto del contenuto di umidità dell'aria sulla resa relativa di ozono.

**Figura 2:** Effetto dell'umidità dell'aria sulla resa relativa di ozono



Il punto di rugiada minimo per garantire un buon funzionamento e una buona resa della cella è di  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Oltre alla minore efficienza, l'utilizzo di aria nel gas di alimentazione porta alla produzione di  $\text{NO}_x$  a causa della ionizzazione anche delle molecole di azoto. Vari autori riportano in letteratura la seguente composizione di  $\text{NO}_x$ :  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ . La concentrazione di questi composti diminuisce con il decrescere di concentrazione di azoto nel gas di alimentazione della cella. Oltre al gas di alimentazione, le caratteristiche costruttive ed operative specifiche del generatore di ozono influenzano la concentrazione di questi composti. Il fattore più importante che ne influenza la resa è la densità di potenza dell'unità: generalmente aumenta linearmente con la densità di potenza della cella (definita come rapporto tra la potenza elettrica applicata e la superficie dell'elettrodo,  $\text{W}/\text{m}^2$ ).

In presenza di umidità, oltre ad un rapido decremento della resa relativa in ozono, si ha nella cella la produzione di acido nitrico in grado di corrodere sia la cella sia i componenti a valle di essa e di vaporizzare e disperdersi

nell'ambiente attraverso il flusso di erogazione. Aumenta, inoltre, la possibilità dell'innesco di archi elettrici distruttivi all'interno della cella stessa.

Gli essiccatori d'aria possono essere utilizzati per rimuovere l'umidità dall'aria ambiente. Esistono due tipologie principali di essiccatori utilizzati con i generatori di ozono, vale a dire: essiccatori ad adsorbimento ed essiccatori a membrana. Gli essiccatori ad adsorbimento sono il principale tipo di essiccatore utilizzato con i generatori di ozono. Ne esistono diverse varianti. Il principio di funzionamento prevede l'assorbimento di umidità da parte di un materiale essiccante come gel di silice, ossido di alluminio o setacci molecolari. Con il tempo il materiale essiccante si satura di acqua e deve essere rigenerato. Per questo motivo gli essiccatori sono generalmente costituiti da 2 colonne essiccanti (servizio e rigenerazione). Questi essiccatori sono in grado di raggiungere punti di rugiada da 0 a  $-65^{\circ}\text{C}$ .

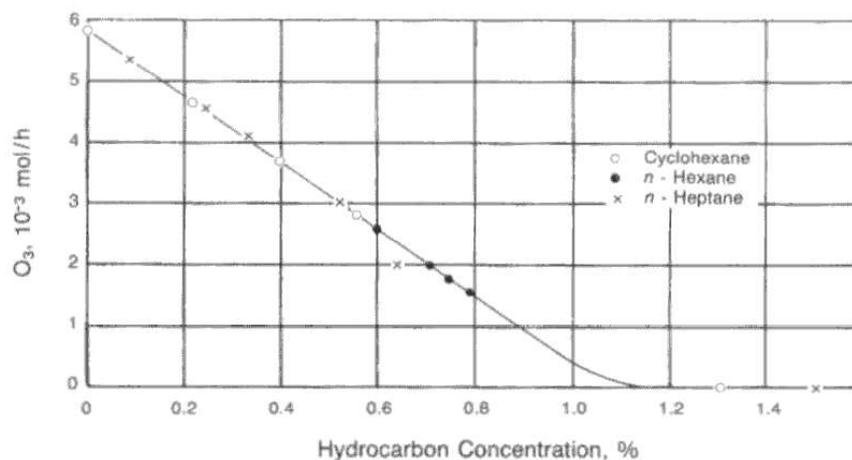
Gli essiccatori a membrana sono usati meno frequentemente e sono costituiti da fasci di fibre polimeriche cave che presentano una permeazione selettiva nei confronti del vapore acqueo e attraverso cui passa aria compressa. L'umidità dell'aria fuoriesce attraverso le pareti della fibra nella camera della cartuccia dalla quale viene espulsa con aria secca riciclata. Queste unità sono in grado di raggiungere punti di rugiada di  $-40^{\circ}\text{C}$ .

### **Purezza del gas in ingresso**

La presenza di impurità nel gas di alimentazione deve essere evitata. L'aria ambiente fornita al generatore deve essere molto pulita. È necessario che i generatori siano dotati di apposito sistema di filtrazione/adsorbimento (filtri combinati) in modo da trattenere, oltre l'umidità, i possibili contaminanti presenti (particolato di dimensioni inferiori a  $1\mu\text{m}$ , composti organici volatili, ecc...) per evitare o limitare la generazione di sottoprodotti di reazione (inquinanti secondari) dannosi all'organismo umano. Il precursore aria ambiente non va utilizzato in presenza di attività lavorative che comportano il rilascio di inquinanti chimici.

Tali contaminanti tra l'altro possono ridurre la produzione di ozono. Un esempio è riportato in figura, dove la concentrazione di idrocarburi è collegata al rendimento dell'ozono. Questa figura indica che ad una concentrazione di idrocarburi di circa l'1%, la produzione di ozono si avvicina quasi a zero.

**Figura 3:** Decadimento della produzione di ozono in presenza di determinate concentrazioni di idrocarburi in aria



### Il ciclo di trattamento per la sanificazione ambientale

Il processo deve essere in grado raggiungere tutte le superfici e i punti critici, distribuendo il gas ozono in forma omogenea e costante per esplicare la sua azione.

Per poter sviluppare il ciclo di trattamento è quindi determinante conoscere:

- caratteristiche dell'ambiente da trattare,
- caratteristiche del generatore.

I *dati tecnici del generatore di ozono* da prendere in considerazione sono:

- concentrazione di ozono nel punto di erogazione (ppm o mg/ m<sup>3</sup>);
- portata di erogazione della miscela aria (o ossigeno) / ozono (m<sup>3</sup>/h);
- capacità di produzione di ozono del generatore (g/h).

Tali parametri infatti determinano la concentrazione e la distribuzione di ozono nell'ambiente e il tempo di azione necessari per raggiungere l'obiettivo prefissato in relazione alle dimensioni del locale. Per ambienti di grandi dimensioni sarà necessario utilizzare generatori dotati di ventilatori a lunga gittata atti a garantire una distribuzione omogenea del gas.

La produzione di ozono normalmente viene misurata in g/h. Per determinare tale grandezza occorre determinare i grammi di ozono che sono prodotti in un dato periodo di tempo. Questo si ottiene misurando la portata del gas in uscita dal generatore (m<sup>3</sup>/h) e la concentrazione di ozono nel gas, normalmente espressa in mg/ora o in ppm (tenendo presente che in aria 1 ppm = 2,14 mg/m<sup>3</sup>).

La maggior parte dei macchinari in commercio sono dotati solo di un timer, alcune attrezzature dispongono di programmi approssimati che definiscono la durata del ciclo in relazione ai mq/m<sup>3</sup> del locale interessato al trattamento e, a volte, anche di dispositivi di controllo/allarme/blocco per un impiego sicuro. Le attrezzature più evolute sono dotate di un sistema che gestisce il funzionamento del generatore al fine di controllare la produzione di ozono, la concentrazione in ambiente e le tempistiche del trattamento e successivo decadimento dell'ozono.

Le *caratteristiche dell'ambiente* da valutare preliminarmente al trattamento di sanificazione sono:

- la cubatura;
- la presenza di aperture;
- il sistema di ventilazione meccanica (se esistente);
- la presenza di persone e la tipologia di utenza (con particolare attenzione ai soggetti sensibili quali anziani e bambini);
- la presenza di materiali aggredibili dall'ozono in relazione al protocollo adottato;
- le caratteristiche di arredamento (es. presenza di arredi in stoffa o di moquette);
- la tipologia di attività svolta (con particolare attenzione all'impiego di sostanze chimiche).

Importante valutare anche le condizioni ambientali di temperatura/umidità relativa che rivestono un'importante influenza sulla suscettibilità dei microrganismi all'ozono. Dati di letteratura evidenziano che la suscettibilità aumenta in presenza di alti livelli di umidità relativa (> 70%): l'effetto combinato dell'ozono e dei radicali OH rafforza l'efficacia del trattamento. L'impiego dell'ozono è indicato per ambienti contaminati da quantità minime di sostanze chimiche. Ambienti con grande afflusso di persone o con importante presenza di sostanze chimiche volatili richiedono una attenta valutazione preliminare: alcune classi di composti organici (in particolare prodotti chimici organici che contengono legami carbonio-carbonio insaturi, ad es. isoprene, stirene, terpeni, squalene e acidi grassi insaturi e loro esteri, spesso presenti nei contaminanti indoor) possono reagire rapidamente con l'ozono (o con altre forme reattive dell'ossigeno formatesi nella cella quali radicali idrossilici o radicali superossido) per formare, a seguito di un'ossidazione incompleta in relazione al protocollo di trattamento adottato, inquinanti secondari, tra cui composti carbonilici o carbossilici, anche stabili o comunque di vita abbastanza lunga, che hanno effetti avversi sulla salute umana. In questi casi l'impiego dell'ozono può essere accompagnato da esposizione a prodotti di reazione dell'ozono con possibili contaminanti

indoor che includono gli occupanti stessi, mobili, tappeti, linoleum, prodotti per la pulizia, deodoranti per ambienti, tessuti, ecc... In tali circostanze è bene misurare, tramite appositi strumenti, la quantità di COV (composti organici volatili) prima e dopo il trattamento. A tale riguardo un adeguato ricambio dell'aria al termine del trattamento assume particolare importanza.

Le *fasi* tipiche *del processo di trattamento* sono:

- *Fase di predisposizione dell'ambiente da trattare (operazioni preliminari)*

Prima di avviare il trattamento è necessario procedere a:

- detersione preliminare delle superfici per la rimozione dello sporco,
- arresto dell'impianto di ventilazione meccanica, se esistente, e chiusura delle bocchette di immissione ed estrazione dell'aria,
- allontanamento di eventuali persone e animali presenti (tale misura va applicata anche nelle aree adiacenti al locale sottoposto a trattamento),
- chiusura di porte e finestre del locale interessato (le porte di accesso vanno chiuse a chiave),
- apposizione della cartellonistica di pericolo e di divieto di accesso nel locale.

Tra le operazioni preliminari rientra anche la verifica della disponibilità di idonei DPI, soprattutto per le vie respiratorie, nel caso fosse necessario accedere nell'ambiente in corso di trattamento e, quindi, con presenza di concentrazioni pericolose di ozono nell'aria.

- *Fase di condizionamento*

Questa fase coincide esattamente con quella in cui si inizia ad erogare ozono nel locale da trattare. Tale erogazione deve consentire in breve tempo il raggiungimento della concentrazione di ozono stabilita come necessaria in relazione al target da raggiungere.

Durante il processo di ozonizzazione, la concentrazione di ozono aumenta molto lentamente nel periodo iniziale. Il ritardo nell'accumulo della concentrazione di ozono è dovuto al consumo di ozono per la presenza di inquinanti nel periodo iniziale. Successivamente, dopo aver ossidato i principali inquinanti, la concentrazione di ozono all'interno della stanza aumenta rapidamente fino al livello desiderato. Tempi di salita lunghi sono indice di una forte contaminazione ambientale. Umidità relativa, temperatura, sostanze chimiche, microrganismi presenti determinano infatti la reale quantità di ozono necessaria per

raggiungere la concentrazione prestabilita e mantenerla per il tempo necessario. A tale riguardo si ribadisce l'importanza di procedere alla detersione preliminare delle superfici per la rimozione dello sporco.

- *Fase di azione dell'ozono*

Questa fase ha lo scopo di garantire, una volta raggiunta la concentrazione di ozono programmata, l'efficacia del ciclo protraendosi per il tempo necessario mantenendo porte e finestre chiuse. Per garantire il risultato, la concentrazione di ozono va quindi mantenuta per il tempo previsto (tempo di azione).

- *Fase di eliminazione dell'ozono residuo e riconsegna dei locali*

Questa fase deve garantire l'eliminazione dell'ozono dall'aria nel locale trattato e si protrae sino al raggiungimento delle concentrazioni di ozono richieste per la sicurezza degli occupanti. Quando il generatore viene spento, la concentrazione di ozono diminuisce gradualmente per riconversione dell'ozono in ossigeno.

Come già evidenziato, l'ozono è un gas instabile e decade spontaneamente a ossigeno. Il tempo necessario per il decadimento dell'ozono per riportarlo alla concentrazione ideale per la sicurezza degli occupanti è sempre in funzione delle concentrazioni di ozono utilizzate nel trattamento. Il tempo di decomposizione dell'ozono dipende inoltre molto dalla temperatura, umidità relativa e dai livelli di contaminazione chimica e biologica dell'ambiente. Tempi di discesa brevi indicano di norma una forte contaminazione.

In condizioni reali il tempo di decadimento naturale necessario per rendere accessibili i locali è di almeno 2 ore. La concentrazione residua deve essere comunque inferiore alla soglia di percettibilità olfattiva per l'uomo, compresa tra 0,02 ppm (40 µg/m<sup>3</sup>) e 0,05 ppm (100 µg/m<sup>3</sup>) e pari a circa 1/10 della soglia di 0,2 ppm definita sicura negli ambienti di lavoro per un tempo di esposizione max di 2 ore.

Se possibile, è preferibile eseguire i trattamenti nelle ore notturne in modo che alla ripresa del lavoro la quantità di ozono ambientale si trovi entro i limiti di sicurezza sanitaria.

Per accelerare i tempi di riconversione dell'ozono ad ossigeno si può ricorrere comunque all'impiego di lampade a raggi ultravioletti UV-C 254 nm o di appositi catalizzatori chimici (di norma filtri catalitici a base di ossidi metallici attraverso i quali l'ozono residuo viene convogliato mediante degli aspiratori).

In alcuni casi tali sistemi vengono già installati all'interno delle apparecchiature e attivati nella fase finale del ciclo, a cella ozonogena spenta.

È buona norma procedere inoltre alla ventilazione dei locali trattati prima della loro rioccupazione.

### **La validazione e la certificazione del ciclo di trattamento**

È importante sottolineare che per la sanificazione con l'ozono, tutti i parametri di trattamento devono essere adattati alle diverse condizioni ambientali delle realtà produttive considerate. Perciò è necessario, soprattutto nel caso di contesti importanti per dimensioni o caratteristiche o tipologia di utenza, che siano eseguite prove tecniche di concentrazione, di omogeneità di distribuzione e di sicurezza per poter trasferire l'impiego nella specifica realtà operativa.

È buona norma validare l'intero ciclo del trattamento attraverso il monitoraggio delle concentrazioni di ozono mediante appositi dispositivi di misura digitali in grado di memorizzare e restituire i valori rilevati (prove di raggiungimento e mantenimento delle concentrazioni necessarie, di diffusione nonché di decadimento/eliminazione dell'ozono).

Qualunque certificazione di avvenuto trattamento ambientale deve riportare le seguenti informazioni:

- tipo di generatore impiegato;
- tipo di precursore adottato ovvero se ossigeno o aria ambiente indicando gli accorgimenti per evitare la formazione di inquinanti secondari;
- strumentazione utilizzata per la misura dell'ozono ed eventualmente dei COV indicando gli estremi dell'ultimo certificato di taratura;
- modalità adottate per l'abbattimento dell'ozono residuo;
- data e ora di inizio e fine dell'intero ciclo di trattamento;
- dati di concentrazione di ozono per tutto il ciclo del trattamento (report o grafico) per la visualizzazione dell'andamento del tempo di salita, di azione e di decomposizione dell'ozono;
- dati di temperatura e umidità relativa rilevati in ambiente;
- concentrazione di ozono alla riconsegna dei locali;
- quantità di COV prima e dopo il trattamento e alla riconsegna dei locali.

La certificazione deve anche contenere il protocollo di riferimento adottato e validato da Laboratorio accreditato per il raggiungimento dell'obiettivo prefissato che ha determinato la definizione della concentrazione e del tempo di azione dell'ozono, delle condizioni di umidità relativa e di temperatura dell'aria.