

Cristiano Vergani

Responsabile R & D

Deparia Engineering S.r.l.

## **La disinfezione dell'aria per mezzo dei raggi ultravioletti**

*Nel mondo industrializzato è in atto un pericoloso ritorno di malattie che si credevano sconfitte: tra queste, la tubercolosi polmonare è una delle più preoccupanti, poiché si trasmette attraverso l'aria che respiriamo. Per combattere efficacemente questa ed altre malattie a trasmissione aerogena, si va riaffermando l'impiego dei raggi ultravioletti, un metodo molto efficace che richiede tuttavia una buona padronanza dei criteri di progettazione per assicurare buoni risultati.*

La presenza di microrganismi patogeni nell'aria di un ambiente affollato è scontata: a scuola o sul lavoro è sufficiente lo starnuto di una persona influenzata per provocare una veloce ed inesorabile epidemia (vaccinati esclusi). Nella maggioranza dei casi un raffreddore o una influenza rappresentano per l'individuo un fastidio sopportabile, ma il costo sociale complessivo che ne consegue è comunque elevatissimo ed una maggiore attenzione al livello della qualità dell'aria porterebbe notevoli benefici alla collettività. Esiste purtroppo anche l'allarmante fenomeno delle cosiddette patologie di ritorno: ovvero la ricomparsa di malattie legate ad un passato di sottosviluppo e povertà, che sorprendentemente risorgono più aggressive e resistenti nelle società industrializzate. Alcune di queste malattie ci interessano da vicino perché gli agenti infettivi che le provocano si trasmettono veicolati dall'aerosol e dal pulviscolo atmosferici. La tubercolosi polmonare, fino all'avvento degli antibiotici, è stata una delle principali cause di mortalità: attualmente, i casi di tubercolosi sono di nuovo in aumento, al punto da determinare la massima mobilitazione delle autorità sanitarie. La pertosse, il morbillo, le infezioni polmonari acute, sono altri esempi di malattie a trasmissione aerogena, che unitamente alla TBC, sono responsabili di oltre 8 milioni di decessi l'anno su scala mondiale. Rispetto a questo problema, gli impianti di trattamento dell'aria possono agire come veicolo potenziale di cariche infettanti, oppure divenire essi stessi focolaio diffusivo, nei casi di scarsa o assente manutenzione. Ad ogni modo, è necessario volgere in positivo il ruolo

degli impianti di trattamento dell'aria, attraverso l'impiego di tecniche di filtrazione e sterilizzazione dell'aria trasportata nelle condotte.

### **Strategie di intervento**

I contaminanti biologici sono molto problematici da controllare. Poiché la maggior parte dei microrganismi possiede dimensioni inferiori ad un micron (alcuni virus misurano pochi millesimi di micron), anche filtri ad altissima efficienza possono rivelarsi insufficienti. Un aspetto che può facilmente divenire causa di contaminazione è rappresentato dai fenomeni che avvengono allo spegnimento degli impianti, a causa dei differenziali di temperatura e di pressione tra ambiente ed impianto, si instaura un moto convettivo "controcorrente" che trasporta i contaminanti ambientali all'interno delle canalizzazioni, dove spesso esistono condizioni ideali per la crescita di colonie infettanti. In presenza di fessurazioni, il fenomeno può assumere dimensioni molto gravi. Quando ci si trova in presenza di un caso di contaminazione, in genere si interviene con una radicale pulizia delle canalizzazioni, seguita da un trattamento biocida. Purtroppo, è però molto difficile mantenere uno stato soddisfacente di pulizia per un periodo oltre i tre mesi dal trattamento.

### **Ruolo dei raggi ultravioletti**

L'impiego dei raggi ultravioletti come arma contro i microrganismi è una realtà a partire dalla fine del secolo scorso: un fisico danese, Niels Ryberg Finsen, fu il primo ad utilizzare gli ultravioletti come agenti sterilizzanti. Da allora, la radiazione UV nella sua frazione a lunghezza d'onda più corta, da 200 a 280 nanometri (UV-C), ha trovato ampia applicazione contro batteri, funghi, lieviti e virus. Dopo la Seconda Guerra Mondiale, le radiazioni UV-C cominciarono ad essere usate in modo generalizzato negli ospedali, nelle case farmaceutiche, nell'industria alimentare, per mezzo di lampade installate negli ambienti in modo da irraggiare lo strato d'aria che lambisce il soffitto. Più recentemente, con il diffondersi degli impianti di ventilazione forzata, ci si accorse che la movimentazione dell'aria, specialmente a temperature inferiori a 25°C, poteva ridurre l'efficacia dell'irraggiamento. A questo inconveniente si cercò di porre rimedio aumentando il numero

delle lampade e sostituendole ad intervalli più frequenti. Durante gli anni 50, a causa del diffondersi della TBC, l'impiego delle lampade ultraviolette divenne molto più ampio, estendendosi anche all'interno delle condotte di distribuzione dell'aria. Negli anni successivi, a causa della comparsa di sostanze disinfettanti sempre più potenti, unitamente agli inconvenienti legati alla tecnica ancora approssimativa di costruzione delle lampade (scarse efficienza e durata, manutenzione onerosa), l'utilizzo dei raggi ultravioletti divenne sempre più raro, fin quasi a scomparire del tutto. Al giorno d'oggi però, la tecnica della disinfezione dell'aria per mezzo delle lampade UV-C è ritornata decisamente in auge, per una serie di motivazioni diverse: innanzi tutto molti germi sono diventati molto più resistenti agli agenti chimici di disinfezione, mentre la domanda di elevati livelli di Indoor Air Quality è andata sempre più crescendo con la divulgazione degli studi sulla diffusione degli agenti patogeni negli ambienti chiusi. Inoltre, la tecnologia odierna mette a disposizione del progettista lampade più efficienti ed affidabili, unitamente a metodi di calcolo più accurati.

### **Nozioni generali sulle radiazioni ultraviolette**

Si tratta di radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa tra 100 e 400 nm, nella porzione di spettro compresa tra la luce visibile ed i raggi X. I raggi ultravioletti vengono convenzionalmente classificati in tre bande:

- radiazioni UV-A (onde lunghe) da 315 a 400 nm;
- radiazioni UV-B (onde medie) da 280 a 315 nm;
- radiazioni UV-C (onde corte) da 100 a 280 nm.

Le radiazioni della banda UV-C sono caratterizzate da un marcato effetto germicida, con un picco di massima efficacia in corrispondenza della lunghezza d'onda di 255 nm. Le radiazioni UV-B e UV-C possono causare irritazione cutanea (eritemi) ed infiammazione oculare (congiuntivite) in caso di esposizione non protetta da indumenti ed occhiali (Figura 2). In presenza di radiazioni dirette oppure di radiazioni indirette prolungate, è assolutamente indispensabile l'utilizzo di mezzi di protezione (camici, guanti, visiere ed occhiali con lenti in vetro comune). Il vetro comune costituisce una protezione efficace

contro gli ultravioletti, mentre il vetro utilizzato per le lampade deve assicurare la migliore trasparenza possibile alla porzione di spettro utile (Figura 3). Le radiazioni UV-C al di sotto dei 220 nm sono così "energetiche" da indurre la formazione di ozono: per questo motivo il vetro del tubo UV-C deve essere in grado bloccare le radiazioni estremamente corte.

### **Produzione e caratteristiche delle radiazioni UV a corta lunghezza d'onda**

La sorgente di radiazione ultravioletta più utilizzata è rappresentata dalle lampade a scarica in vapore di mercurio a bassa pressione. La lunghezza d'onda fondamentale emessa è di 254 nm che corrisponde al massimo effetto germicida. I modelli comunemente usati sono del tutto simili alle comuni lampade fluorescenti destinate all'illuminazione e ne utilizzano gli accessori (portalampada, starter, reattore). Come tutte le lampade a scarica, il massimo rendimento corrisponde ad una ben determinata pressione dei gas contenuti all'interno del tubo, corrispondente alla temperatura ambiente di 20°C. Per questo motivo, a temperature inferiori corrispondono rendimenti inferiori. Ad esempio, una tipica lampada UV, alla temperatura di 10°C in aria calma, possiede solo l'88% del rendimento ottimale a 20°C.

### **Azione germicida**

Irradiazioni sperimentali hanno permesso di riscontrare il massimo effetto germicida alla lunghezza d'onda di 255 nm, praticamente coincidente con l'emissione dei vapori di mercurio. Alcuni fattori ambientali possono influenzare la resistenza dei microrganismi all'azione dei raggi UV. Ad esempio, la presenza di acqua o di pulviscolo può diminuire fortemente l'efficacia dell'irraggiamento. La tabella 1 mostra le dosi minime approssimate necessarie ad inattivare determinate percentuali di una popolazione di un batterio campione (*Escherichia coli*). Nella tabella 2 troviamo invece le dosi richieste per inattivare altre specie di microrganismi patogeni. La durata dell'irradiazione  $t_1$ , ad una data percentuale di disinfezione e per una determinata specie, è data dalla formula che definisce il rapporto tra dose necessaria  $D(J/m^2)$  ed irradiazione  $E(W/m^2)$ :

$$t_1 = \frac{D(J/m^2)}{E(W/m^2)}$$

### **Nozioni generali sulla disinfezione dell'aria con lampade UV**

Nell'utilizzo delle lampade UV per disinfezione dell'aria occorre tenere presenti due punti principali:

1- lo scarso potere di penetrazione delle radiazioni ultraviolette a corta lunghezza d'onda: nella maggior parte delle sostanze, l'energia radiante viene completamente assorbita dagli strati superficiali,

2- il possibile effetto nocivo delle radiazioni UV possono provocare congiuntiviti ed eritemi. Per questo motivo le persone non devono essere esposte più dello stretto necessario, in ogni caso mai più a lungo dei tempi riportati in tabella 3.

I microrganismi fluttuanti in sospensione negli ambienti possono essere distrutti dalle radiazioni UV anche in situazioni dove i normali mezzi di disinfezione sono inadeguati o inapplicabili, seguendo quattro sistemi fondamentali di installazione:

a- lampade UV installate in ambiente a soffitto con emissione verso il basso (irraggiamento diretto),

b- lampade UV installate in ambiente a parete con emissione verso l'alto (irraggiamento indiretto),

c- lampade UV installate in ambiente a parete con emissione verso il basso per la disinfezione dei pavimenti (normalmente in abbinamento al metodo b);

d- lampade UV installate direttamente nei condotti dell'impianto di condizionamento.

### **Installazione ad irraggiamento diretto**

Le lampade vengono installate in plafoniere con riflettore in alluminio rivolto verso il basso (figura 4), in modo da irraggiare direttamente l'intero volume d'aria del locale. E' un metodo da utilizzare in ambienti normalmente non occupati, oppure con l'obbligo di indossare appositi mezzi di protezione:

viso: occhiali con lenti in vetro, paraocchi o visiere in plastica;

mani                      guanti (in plastica, meno sensibile della gomma ai raggi UV)  
testa e collo              cappuccio.

### **Installazione ad irraggiamento indiretto**

In questo tipo di installazione le lampade vengono installate a parete o a soffitto, a circa due metri di altezza, ma con il riflettore rivolto verso l'alto (figura 5). In questo modo, solamente lo strato d'aria sovrastante le lampade viene irraggiato direttamente, mentre il volume sottostante viene irraggiato per riflessione da parte del soffitto, rendendo superfluo il ricorso a speciali metodi di protezione per le persone. I naturali movimenti convettivi portano via via l'aria presente nel locale nella zona irradiata, permettendo così una graduale disinfezione dell'intera carica batterica in sospensione.

Questo metodo viene spesso impiegato per la disinfezione dell'aria nelle zone di passaggio tra una stanza e l'altra, come barriera tra zone sterili e contaminate.

### **Installazione per irraggiamento dei pavimenti**

Questo metodo si utilizza generalmente ad integrazione del precedente nei casi in cui è indispensabile raggiungere il massimo livello di disinfezione dell'ambiente (figura 6). Consiste nell'installazione di lampade a parete a circa 60 cm dal pavimento, orientate verso il basso, in modo da irraggiare direttamente lo spazio sottostante.

### **Installazione delle lampade ultraviolette nelle condotte per la movimentazione dell'aria**

Si tratta del metodo di elezione quando si vogliono ottenere elevatissime percentuali di disinfezione senza per questo dovere esporre gli occupanti dei locali ad elevati livelli di irraggiamento (figura 7): in alcuni locali è necessario abbinare a questo metodo anche l'irraggiamento in ambiente di tipo indiretto, in modo da colpire rapidamente le cariche batteriche che possono essere diffuse in ambiente, senza aspettare che vengano raccolte dalle bocchette di ripresa e distrutte in condotta (sale operatorie, laboratori di microbiologia e virologia, reparti di isolamento per pazienti infettivi). In ambienti non sanitari, come ad

esempio locali pubblici ed uffici, questo metodo è in grado di mantenere livelli molto bassi di contaminazione da microrganismi a condizione che l'impianto canalizzato sia dotato di un sistema di ricircolo ben progettato ed efficiente. L'aria immessa nel locale può essere teoricamente portata a livelli di disinfezione del 99,99 %, adottando livelli e tempi di irraggiamento adeguati.

Dovendo affrontare la progettazione di un impianto di distribuzione dell'aria canalizzato dotato di sterilizzazione a UV, occorre tenere presente i seguenti punti:

- il dimensionamento standard permette di trattare aria contaminata da batteri; per eliminare completamente le muffe occorrono irraggiamenti molto superiori da riservare a casi limite;
- a monte delle lampade devono essere predisposti filtri adeguati per evitare cali di efficienza dovuti all'impolveramento;
- il rendimento delle lampade dipende dalla temperatura, dall'umidità relativa, dalle dimensioni della camera di irraggiamento e dal coefficiente di riflessione UV del materiale di rivestimento interno di tale camera.

Nelle figure 8...11 sono riportati dei diagrammi che permettono di determinare il numero di lampade occorrenti in funzione delle dimensioni della condotta, del grado di disinfezione desiderato e del volume d'aria trattato, tenendo conto delle diverse variabili in gioco.

Il metodo per il dimensionamento è il seguente:

- con il grafico di figura 8, si individua in ascisse la misura del diametro della condotta e si sale fino ad incontrare la curva corrispondente al livello di disinfezione desiderato: il punto corrispondente sulle ordinate individua il numero di metri cubi al minuto trattabili per watt irradiato (da non confondere con la potenza assorbita dalle lampade). In presenza di condotte a sezione rettangolare il volume d'aria ricavato deve essere moltiplicato per il fattore migliorativo  $K_1$  che può essere ricavato dal diagramma in figura 9,
- a questo punto si divide il valore della portata effettiva della condotta per il numero di metri cubi al minuto trovato precedentemente, ottenendo così la quantità di watt da erogare con le lampade. Il valore trovato è valido per l'*Escherichia coli* per avere il

corrispondente per altre specie, occorre moltiplicarlo per il rapporto che esiste tra la dose di riferimento per E. coli e quello per la specie prescelta (vedi tabelle 1 e 2);

- introdurre nel calcolo i fattori di correzione dovuti a:

1. umidità dell'aria: maggiore è l'umidità, minore il rendimento delle lampade. Perciò il primo conteggio deve essere diviso per il fattore  $K_2$ , ricavato dal diagramma di figura 10.

2. temperatura e velocità dell'aria influenzano molto il rendimento: nel plenum è bene non superare la velocità di 0,5 m/s. Nella figura 12 è possibile trovare la percentuale di rendimento a 0,5 m/s alle varie temperature;

3. calo di rendimento a fine vita operativa: individuare il calo percentuale massimo dai dati tecnici della lampada. A titolo di esempio, un modello comunemente impiegato (TUV 40), dopo 2500 ore di funzionamento accusa un calo del 15%;

4. il valore ottenuto deve essere quindi moltiplicato per il fattore  $K_3$  (figura 11), che dipende dal potere di riflessione del materiale impiegato per il rivestimento delle pareti interne della camera di irradiazione (l'alluminio lucidato riflette la radiazione UV con un rendimento del 60-89% secondo il grado di finitura, la lamiera zincata e l'acciaio inox non superano il 25-30%).

Per l'installazione vera e propria occorre considerare anche i seguenti punti:

- le lampade UV devono essere montate perpendicolarmente al flusso d'aria (figura 4),
- la distanza tra lampada e lampada non deve superare i 10 cm,
- è utile provvedere mensilmente alla pulizia dei tubi e delle pareti riflettenti con un panno di lana,
- le lampade devono essere sostituite ogni 3000 ore di funzionamento,
- l'accensione delle lampade deve essere segnalata esternamente per mezzo di una spia luminosa (l'accesso per la manutenzione deve avvenire rigorosamente a lampade spente).

### **Dimensionamento per l'installazione di lampade UV-C a radiazione indiretta direttamente in ambiente**

In questo caso è conveniente ricorrere alla tavola sinottica riportata in tabella 4, che si riferisce a lampade del commercio comunemente impiegate a questo scopo. Le lampade devono essere installate a soffitto o a parete ad una altezza non inferiore a 2,10 m.

### **Conclusioni**

La disinfezione dell'aria per mezzo di lampade ultraviolette viene attualmente impiegata in una moltitudine di applicazioni in ambito sanitario (cliniche, ospedali, laboratori di analisi, sale operatorie), industriale (industrie farmaceutiche, alimentari) e nell'allevamento animale (stabulari, incubatoi, sale parto). Il costo complessivo dell'installazione e gli elevati ingombri necessari hanno invece impedito una auspicabile diffusione di questo metodo nei settori degli uffici, dei locali pubblici e delle abitazioni. Tuttavia, sul mercato sono recentemente apparse lampade ultraviolette di nuova generazione, che promettono rendimenti fino a 5 volte superiori a quelli delle lampade tradizionali: questi nuovi dispositivi permetteranno l'utilizzo di questa tecnologia a costi complessivamente più bassi, offrendo nuove e più ampie opportunità di intervento.

### Esempio pratico di calcolo per installazione di lampade UV-C in condotta

Caratteristiche dell'impianto:

- portata 2500 m<sup>3</sup>/h (42 m<sup>3</sup>/min.)
- umidità aria 80%
- temperatura aria 10°C
- percentuale di riflessione della superficie della camera di irraggiamento 75%
- dimensione condotta di forma rettangolare 80 x 180 cm
- velocità dell'aria 0,48 m/sec

Si desidera un livello di disinfezione del 99,99% per Escherichia coli

Procedura:

utilizzando il grafico di fig. 8 si traccia una retta dal punto 80 (lato minore della condotta) delle ascisse fino ad incontrare la curva corrispondente al 99,99% di distruzione. Si individua il punto corrispondente sulle ordinate, che corrisponde a 0,71 m<sup>3</sup>/min. di aria disinfettata per minuto e per W di UV. Quindi si introducono i fattori di correzione K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> e K<sub>3</sub>.

- 1 il fattore migliorativo K<sub>1</sub> dipende dal rapporto tra la maggiore e la minore delle dimensioni della condotta (180:80 = 2,25). Riportato sul grafico di figura x corrisponde al fattore di moltiplicazione pari a 1,25;
- 2 ad una umidità dell'aria dell'80% corrisponde un fattore di divisione K<sub>2</sub> pari a 1,66 secondo quanto indicato nel grafico di figura x;
- 3 ad una riflessione della camera del 75% corrisponde un fattore di moltiplicazione K<sub>3</sub> pari a 1,8, individuato dal grafico di figura x.

Impiegando il valore di portata in m<sup>3</sup>/m per W trovato nella prima fase del calcolo, corretto per i fattori K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, si può trovare l'effettivo numero di m<sup>3</sup>/min. d'aria trattata per watt erogato UV a 254 nm:

$$V = 0,71 \times K_1 \times \frac{1}{K_2} \times K_3 = 0,71 \times 1,25 \times \frac{1}{1,66} \times 1,8 = 0,97 m^3$$

Data la portata dell'impianto di 42 m<sup>3</sup>/min., la potenza di UV da irradiare sarà 42:0,97=44 Watt. A questo punto occorre considerare l'influenza di temperatura e della velocità dell'aria. Secondo il grafico di figura x, una temperatura di 10°C ad una velocità di 0,48 m/sec riducono l'emissione al 60% del valore nominale. Il decadimento viene considerato all'85% dell'ottimale dopo 2500 ore.

Se consideriamo di utilizzare una lampada da 30 W assorbiti che renda 9 W di emissione a 245 nm, avremo 9 W x 0,60 x 0,85 = 4,6 W di effettiva emissione: poiché la potenza che ci serve irradiare è di 44 W, 44 W / 4,6 W = 10, ovvero il numero di lampade da utilizzare.

## **I microrganismi**

I microrganismi rappresentano una delle forme di vita più semplice: comprendono batteri, protozoi, muffe, fermenti e virus (nella figura 1 è visibile la struttura di un tipico rappresentante dei batteri, l'Escherichia coli). La maggior parte dei batteri ha dimensioni variabili da 0,2 a 1,5 micron: alcune specie possono raggiungere i 30 micron. Protozoi e fermenti misurano in media una decina di micron, mentre le muffe sono caratterizzate da dimensioni molto variabili. I virus, molto più piccoli dei batteri, vivono e si riproducono all'interno delle cellule di altri esseri viventi. I microrganismi si considerano morti, dal punto di vista sperimentale, quando perdono la capacità di crescere e moltiplicarsi. Per sterilizzazione si intende la morte di tutti i microrganismi presenti, condizione difficilmente raggiungibile in un ambiente normale. Più realisticamente, si parla di disinfezione di un ambiente intendendo la massima riduzione possibile di germi patogeni ottenuta con mezzi fisici (riscaldamento, filtraggio, irradiazione) o chimici (alcool, fenolo, cloro, sali dell'ammonio quaternario, antibiotici).

### **Batteri e spore**

#### **Batteri**

I batteri sono caratterizzati dalla possibilità di moltiplicarsi rapidamente per mezzo di una semplice divisione cellulare. La struttura tipica di una cellula batterica è visibile nella figura 1, anche se tra i batteri troviamo esempi di forme molto diverse tra loro (bastoncini, spirali, filamenti). I batteri sono pressoché ubiquitari: li troviamo infatti nell'aria, nell'acqua, nel suolo, all'interno e sulle superfici di altri esseri viventi come animali e piante. La grande maggioranza dei batteri è saprofiti, cioè si nutre di sostanze organiche in putrefazione: altri invece sono parassiti ed inducono malattie a carico di piante o animali. Una piccola percentuale è invece autotrofica, cioè in grado di sopravvivere in presenza di acqua e sostanze inorganiche.

#### **Spore**

Alcuni batteri sono in grado di trasformarsi in spore se esposti a condizioni microclimatiche avverse: in questo modo possono resistere impunemente a temperature molto alte ed alla mancanza di acqua, anche per centinaia di anni. Un esempio di batterio sporigeno è il Clostridium tetani, agente infettivo del tetano. Le spore batteriche sono forme di sopravvivenza, da non confondere con le spore dei funghi, che sono forme riproduttive.

### **Muffe e fermenti**

#### **Muffe**

Le muffe sono molto diffuse e nella maggioranza dei casi si limitano a nutrirsi di sostanze in decomposizione (sono responsabili del deterioramento dei cibi conservati). Alcune specie sono patogene e causano malattie della pelle e delle mucose. Altre sono responsabili di forme allergiche. Alcuni ceppi di muffe sono di estremamente utili in quanto produttori di antibiotici (penicillina, streptomycina ecc.). Le muffe sono formate da un filamento chiamato micelio, contornato alle estremità da una corolla di spore in grado di generare altri miceli.

#### **Fermenti**

I fermenti sono muffe unicellulari, che differiscono dalle altre specie per le modalità di propagazione e moltiplicazione. Molti fermenti sono impiegati nella industria alimentare per la produzione di vino, aceto, pane, birra, in virtù della capacità di sintetizzare enzimi che provocano trasformazioni chimiche negli alimenti (fermentazioni). Alcune specie sono patogene, oppure possono provocare allergie.

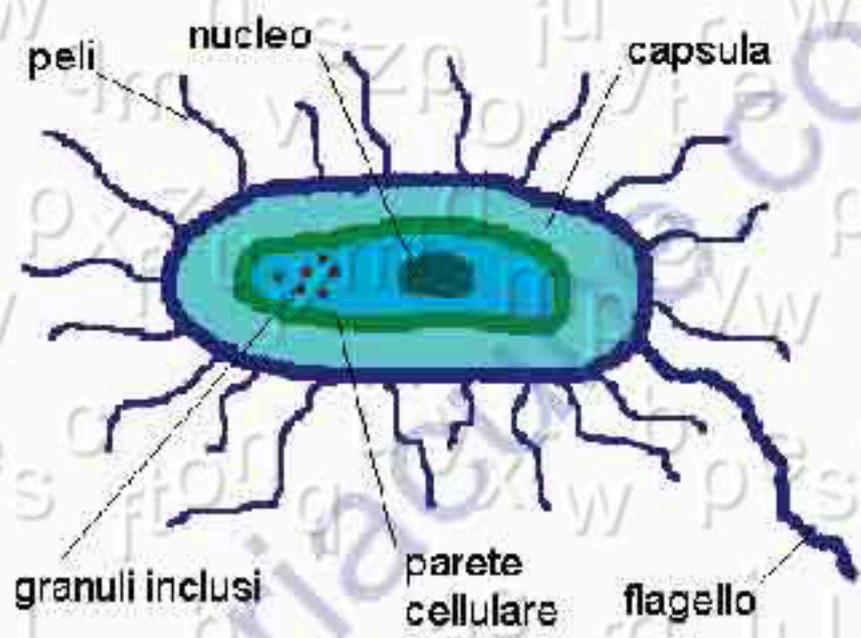


Figura 1. Struttura tipica di un batterio (*Escherichia coli*).

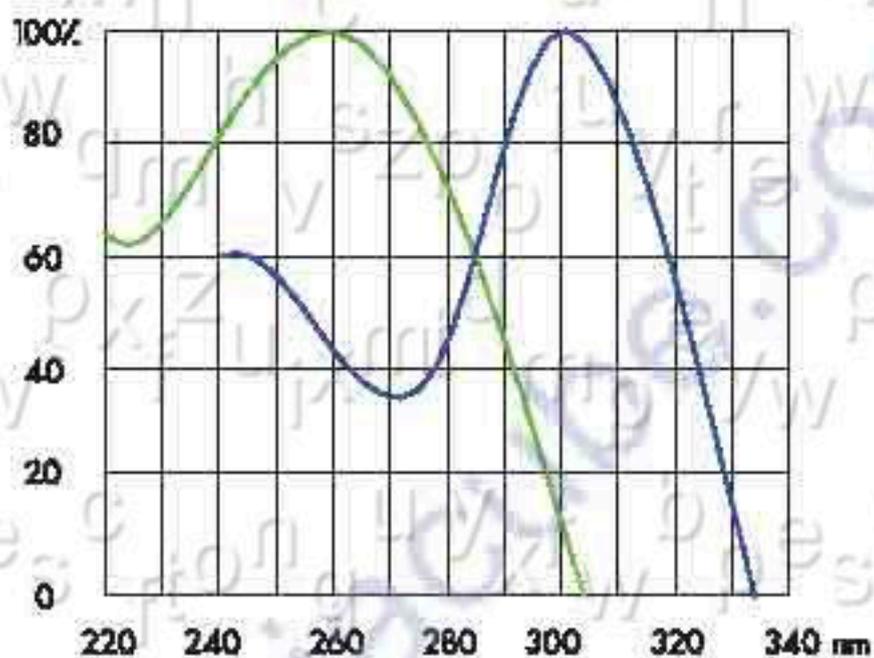


Figura 2. Curve di sensibilità spettrale per l'eritema (blu) e per la congiuntivite (verde).  
 Le radiazioni più irritanti per la pelle sono quelle a 296 nm, mentre per l'occhio il picco di sensibilità è 260 nm

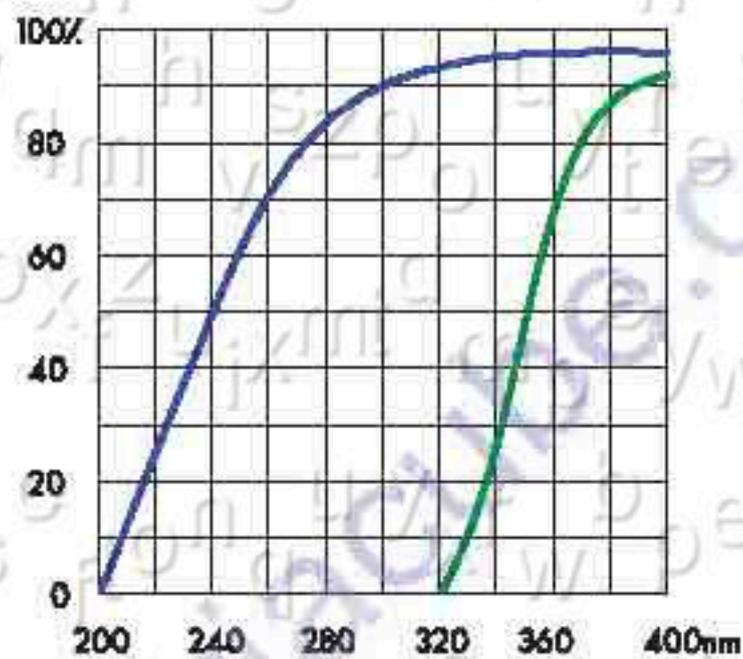


Figura 3. Confronto tra la curva di assorbimento UV del vetro comune (verde) e quella del vetro di contenimento della lampada (blu).

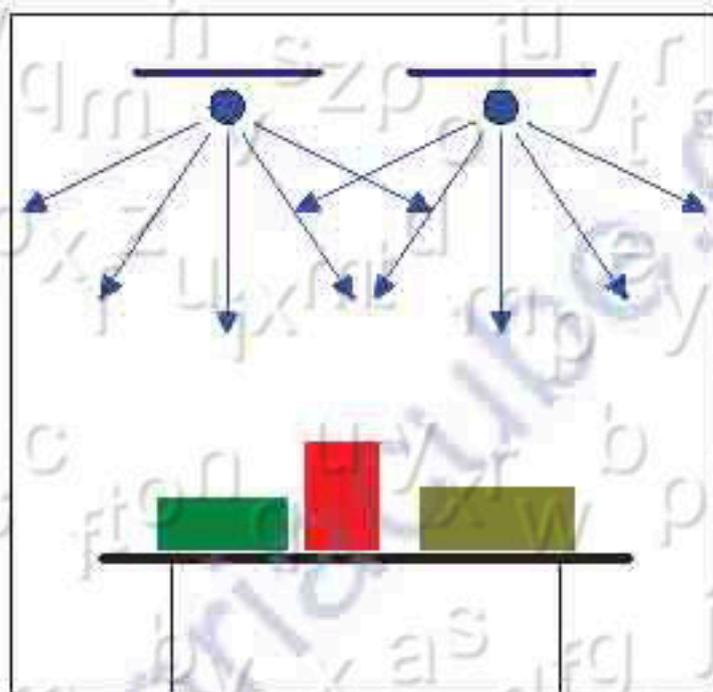
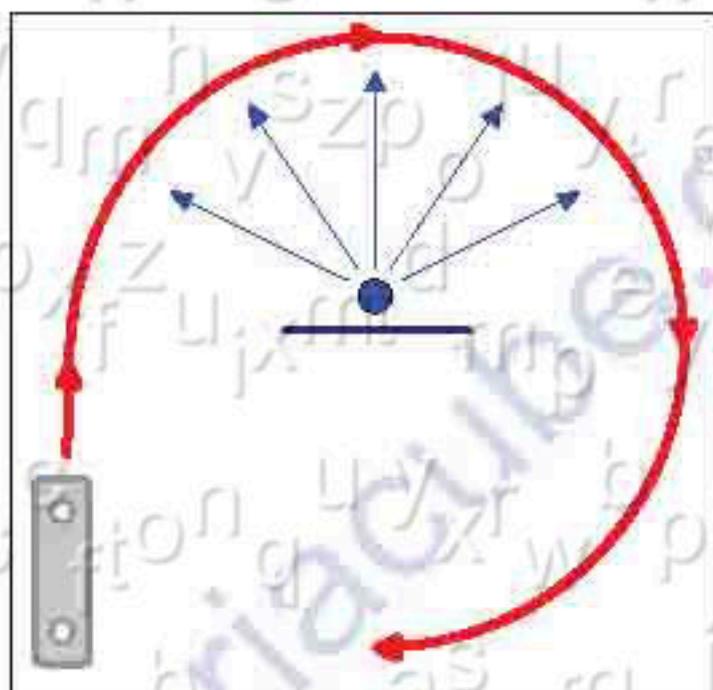


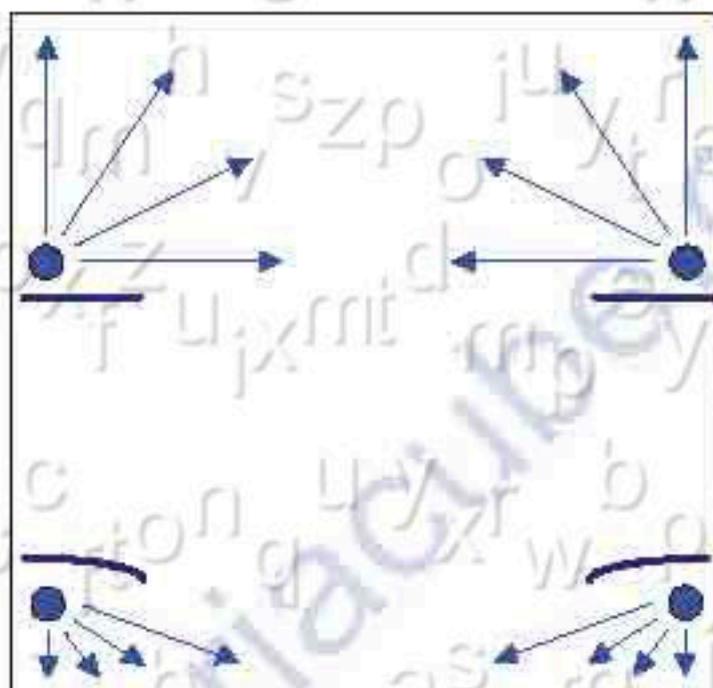
Figura 4. Schema di installazione ad irraggiamento diretto.

È un metodo da utilizzare in ambienti non frequentati, oppure con personale adeguatamente protetto: anche materiali sensibili all'azione dei raggi ultravioletti devono essere protetti dall'irraggiamento (ad esempio gli alimenti irrancidiscono rapidamente).



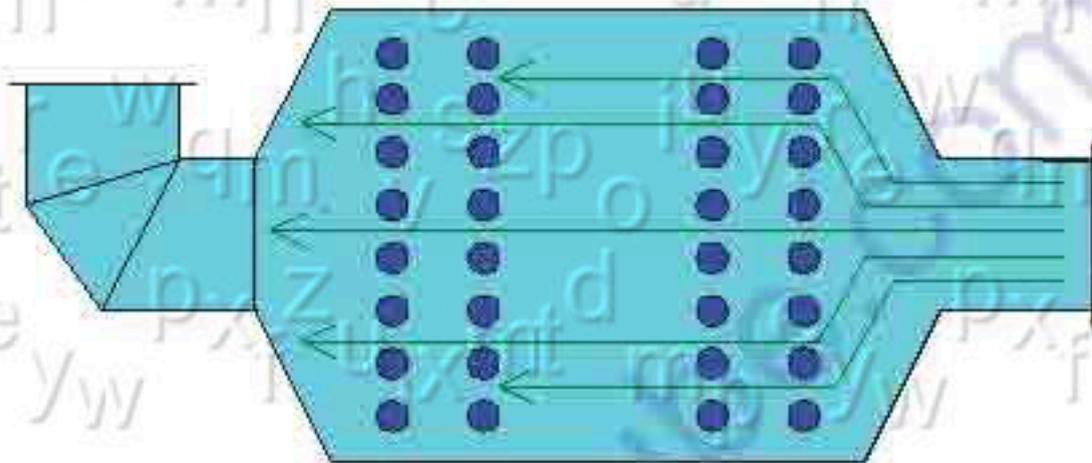
*Figura 5. Schema di installazione ad irradiazione indiretta.*

L'aria viene sterilizzata mentre scorre per moti convettivi naturali nella parte alta della stanza.



*Figura 6. Schema di installazione mista ad irradiazione indiretta per l'aria ambiente, diretta per il pavimento*

Si tratta di un metodo indicato per esigenze di disinfezione molto spinte, senza dover esporre il personale all'azione dei raggi ultravioletti.



*Figura 7. Installazione schematica di lampade UV tubolari in condotta.*

E' necessario installare le lampade tubolari in un plenum di dimensioni adeguate, perpendicolarmente rispetto al flusso, in modo da ridurre la velocità dell'aria raggiungendo così tempi di esposizione sufficienti alla massima inattivazione dei microrganismi.

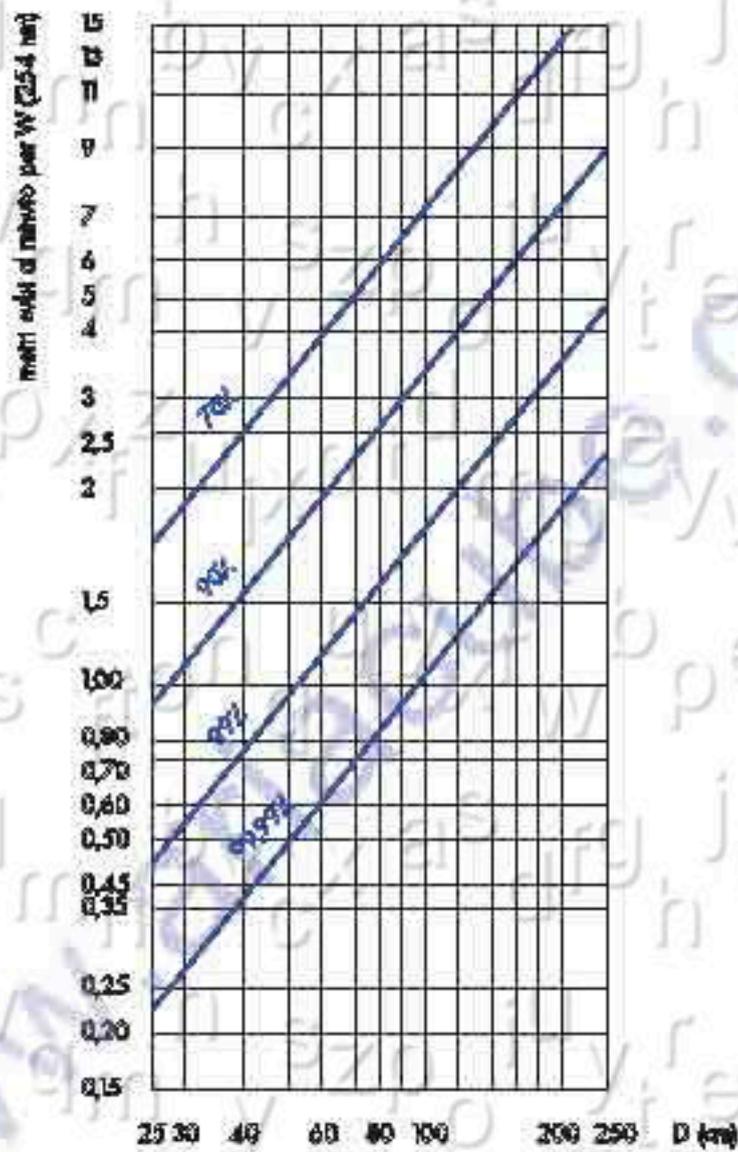


Figura 8. Volume d'aria trattabile per minuto e per  $W$  di irradiazione UV a 254 nm, per differenti diametri di condotta e percentuali di inattivazione di *Escherichia coli*



Figura 9. Fattore di correzione  $K_1$  per tubazioni a sezione rettangolare.  $L$ =lato maggiore,  $D$ =lato minore

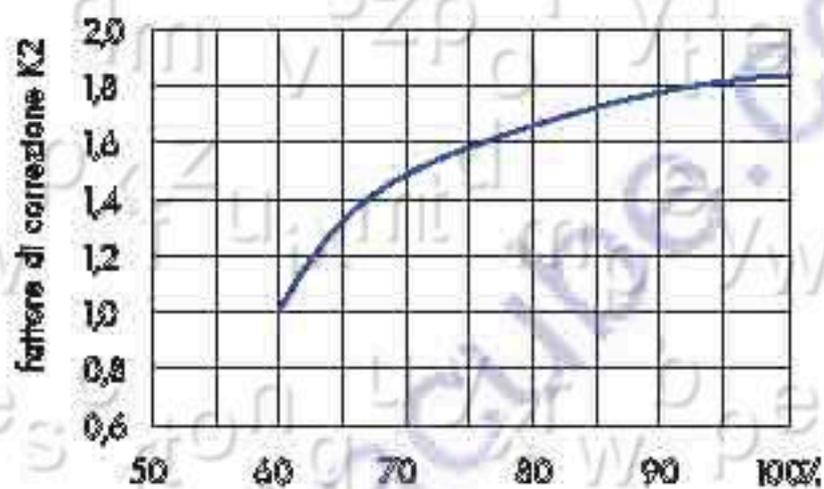


Figura 10. Fattore di correzione  $K_2$  relativo ad umidità dell'aria superiore al 60%

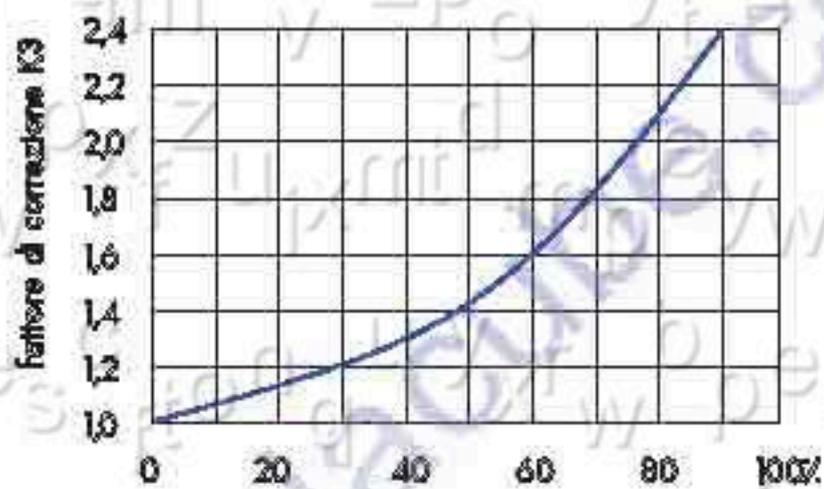


Figura 11. Fattore di correzione  $K_3$  per materiali con riflessione UV maggiore del 20%



Figura 12. Emissione a 254 nm di una tipica lampada UV-C in relazione alla temperatura ambiente ed alla velocità dell'aria circostante. La linea verde corrisponde al rendimento in anaferma; la linea blu mostra il rendimento alla velocità di 0,5 m/sec alle diverse temperature °C

Organismi distrutti %	Dose erogata (J/m <sup>2</sup> )	Organismi distrutti %	Dose erogata (J/m <sup>2</sup> )
10	1,3	95	39
18	2,6	98	51
33	5,2	99	60
50	9,1	99,5	69
63	13,1	99,8	81
80	20,9	99,9	90
86	26,1	99,99	120
90	30,0		

*Tabella 1. Dosi di UV a 254 nm necessarie per le diverse percentuali di inattivazione di Escherichia coli (in aria secca).*

Come si può notare, la relazione tra la dose di irraggiamento e la percentuale di inattivazione è esponenziale: le dosi necessarie per 99, 99,9 e 99,99 % sono rispettivamente il doppio, triplo e quadruplo della dose necessaria per il 90%.

<b>Batteri</b>	dose (J/m <sup>2</sup> )	<b>Fermenti</b>	dose (J/m <sup>2</sup> )
Bacillus anthracis	45	Saccharomyces cerevistiae	60
Bacillus subtilis (spore)	120	Torula sphaerica	23
Clostridium tetani	130	<b>Spore fungine</b>	
Corynebacterium diphtheriae	34	Aspergillus flavus	600
Escherichia coli	30	Aspergillus niger	1320
Mycobacterium tuberculosis	62	Cladosporium herbarum	600
Proteus vulgaris	26	Mucor mucedo	650
Pseudomonas aeruginosa	55	Oospora lactis	50
Serratia marcescens	24	Penicillium chrysogenum	500
Staphilococcus aureus	26	Scopulriopsis brevicaulis	800

*Tabella 2. Dosi di UV a 254 nm necessarie per inattivare il 90% di alcune specie di microrganismi.*

Rispetto alle dosi per Escherichia coli, spesso prese come riferimento per il dimensionamento degli impianti UV, alcune specie di microrganismi richiedono livelli molto superiori, è quindi assolutamente necessario individuare le specie da colpire attraverso esami di laboratorio e dimensionare di conseguenza la potenza di irraggiamento.

<b>Livello di irradiazione UV 254 nm (mW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Massima esposizione giornaliera</b>
2	8 ore
4	4 "
8	2 "
16	1 ora
34	30 minuti
66	15 "
100	10 "
200	5 "
1000	1 "

*Tabella 3. Massima esposizione giornaliera consentita a vari livelli di irradiazione UV-C.*

E' importante considerare che questi limiti devono essere osservati in ogni caso, sia per esposizione ambientale diretta che indiretta: nel caso di esposizione diretta è assolutamente indispensabile ricorrere ad indumenti ed occhiali di protezione.

		Lunghezza stanza	3,0-4,0m			5,5-7,0m			7,0-9,5m			9,5-11,5m			11,5-14,0m			14,0-17,5m														
		Lunghezza stanza	15	30	40	15	30	40	15	30	40	15	30	40	15	30	40	15	30	40												
1- Altezza soffitto 2,7-3m. Possibile esposto per meno di 8 ore al giorno	3,0-4,0 m 4,0-5,5m 5,5-7m 7,0-9,5m 9,5-11,5m	Lampade da UV (assorb.)	2	1	-	3	1	1	4	2	1	8	3	2	10	4	3	12	5	4	14	6	4	16	6	5	18	7	5	20	8	6
2- Altezza soffitto 2,7-3m. Possibile esposto continuamente	3,0-4,0 m 4,0-5,5m 5,5-7m 7,0-9,5m 9,5-11,5m	Lampade da UV (assorb.)	1	-	-	2	1	-	2	1	-	4	2	1	5	2	1	6	2	2	7	3	2	8	3	2	9	4	3	10	4	4
3- Altezza soffitto 3-4m. Possibile esposto continuamente	3,0-4,0 m 4,0-5,5m 5,5-7m 7,0-9,5m 9,5-11,5m	Lampade da UV (assorb.)	2	-	-	3	1	1	3	1	1	6	2	2	7	3	2	9	4	3	11	4	3	12	5	4	14	5	4	14	5	4
4- Altezza soffitto 4-7,5m. Possibile esposto continuamente	3,0-4,0 m 4,0-5,5m 5,5-7m 7,0-9,5m 9,5-11,5m	Lampade da UV (assorb.)	1	-	-	-	-	1	3	1	1	4	2	1	5	2	1	6	2	1	6	2	2	7	3	2	8	3	2	9	4	3

Tabella 4. Tavola sinottica per il dimensionamento del numero di lampade UV-C da utilizzare per l'installazione ad irraggiamento indiretto in ambiente.

I casi 1,3 e 4 si riferiscono ad un grado di disinfezione del 99%. Dividere il numero delle lampade per 2, 4 e 8 rispettivamente per il 90, 70 e 45% di disinfezione. Il caso 2 si riferisce ad un grado di disinfezione del 90%.