

Il miglioramento
dei processi di
trattamento
dell'acqua con
**l'ossidazione
avanzata con
luce UV**

Sommario

Introduzione	3
Cosa sono i microinquinanti?	4
Il processo di ossidazione avanzata con luce UV	4
Apparecchiatura fornita con un sistema UV AOP	9
Applicazioni del trattamento UV AOP	12
La scelta di un ossidante per UV AOP: perossido di idrogeno o cloro libero	15
I fattori che influiscono sul trattamento UV AOP	16
Confronti tra le tecnologie di trattamento dei microinquinanti	20
Il vantaggio di Trojan Technologies con UV AOP	22
Domande frequenti	25

Introduzione

Il processo di ossidazione avanzata con luce UV (UV AOP) è un metodo di trattamento delle acque frequentemente impiegato per il trattamento delle fonti meno pure di acqua potabile, come le acque reflue trattate in caso di riutilizzo potabile o le falde acquifere contaminate in caso di bonifica delle acque sotterranee. A prescindere dall'applicazione, la caratteristica comune degli impianti di trattamento UV AOP è il trattamento dei microinquinanti.

Quando la tecnologia UV viene usata per altri scopi, come il trattamento degli agenti patogeni, l'apparecchiatura UV installata richiede spesso quantità meno intense di luce ultravioletta. Con le applicazioni UV AOP, i livelli di intensità della luce UV sono significativamente più elevati. Inoltre, molti altri fattori possono influenzare le prestazioni delle apparecchiature UV e la somministrazione di intensità e dose UV. Di conseguenza, la corretta implementazione di UV AOP per il trattamento avanzato delle acque richiede una conoscenza approfondita sia delle basi scientifiche del trattamento che dell'ingegneria dell'apparecchiatura utilizzata per erogare il trattamento.

Da quasi mezzo secolo, Trojan Technologies fornisce apparecchiature UV per sistemi di trattamento delle acque su scala municipale con il marchio TrojanUV. Grazie ai propri team di ricerca e ingegneria di livello mondiale, Trojan Technologies è leader mondiale nella progettazione e nell'esecuzione di sistemi UV AOP per diverse applicazioni di trattamento dei contaminanti.

I soggetti interessati al trattamento delle acque, tra cui consulenti e ingegneri di processo, operatori e proprietari di apparecchiature e agenzie di autorizzazione e normative, possono utilizzare questo e-Book per comprendere le basi scientifiche del trattamento UV AOP. Questa risorsa fornisce informazioni rapide e accurate sul trattamento UV AOP per assistere le parti interessate e agevolare le decisioni progettuali e le transizioni dello sviluppo. Verranno esaminati a livello generale i seguenti argomenti:

- Definizioni
- Requisiti dell'apparecchiatura
- Raccomandazioni per lo sviluppo dei progetti
- Linee guida situazionali specifiche per l'impianto
- Confronti con le tecnologie concorrenti

Per ulteriori informazioni sulla tecnologia UV AOP e sui sistemi TrojanUV, contattate un esperto di Trojan Technologies sul nostro [sito Web](#).



Cosa sono i microinquinanti?

I microinquinanti (chiamati anche contaminanti ambientali, sostanze organiche in tracce e contaminanti emergenti) possono comprendere sostanze chimiche presenti nel suolo, nell'aria e nell'acqua. **Questo e-Book si concentra sui microinquinanti che possono interessare le fonti d'acqua.**

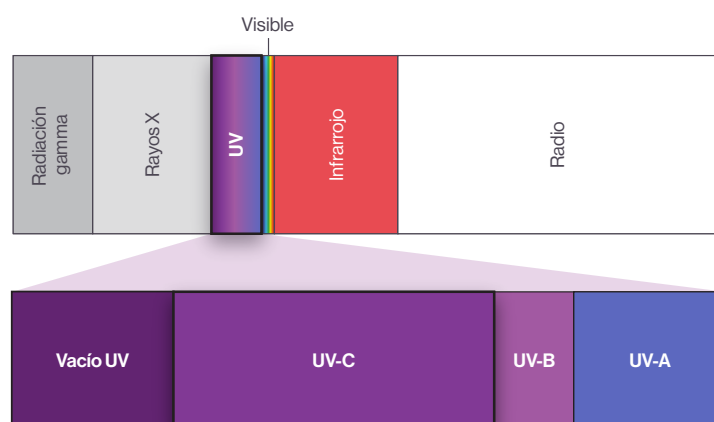
Diversi microinquinanti, tra cui solventi e sottoprodotti industriali, pesticidi e prodotti farmaceutici, sono presenti in concentrazioni in tracce nei ruscelli, nei laghi, nei fiumi e nelle acque sotterranee. I microinquinanti possono entrare nell'acqua direttamente attraverso le attività umane, come la produzione industriale, l'agricoltura e lo scarico delle acque reflue. Possono inoltre provenire da fonti naturali, come la fioritura algale, che rilascia tossine e molecole che alterano il sapore e l'odore. Molti microinquinanti possono avere proprietà cancerogene, interferenti endocrine o altre proprietà dannose. Inoltre, la rimozione dei microinquinanti può essere difficile con i processi di trattamento dell'acqua convenzionali, come la filtrazione. Alcuni microinquinanti sono difficili da rimuovere anche con tecnologie a membrana avanzate, come la microfiltrazione (MF) e l'osmosi inversa (RO).

Il processo di ossidazione avanzata con luce UV

Da oltre un secolo, la tecnologia UV viene applicata con successo per il trattamento di diversi patogeni nell'acqua potabile municipale e nelle acque reflue. Negli ultimi decenni, le applicazioni di trattamento UV si sono espanse, e ora includono il trattamento dei microinquinanti, indipendentemente o in combinazione con il trattamento degli agenti patogeni. Alcuni microinquinanti possono essere trattati usando solo energia UV, ma la maggior parte di essi viene scomposta più facilmente con l'aggiunta di un ossidante. Questo trattamento è il processo di ossidazione avanzata con luce UV (UV AOP). Il trattamento UV AOP offre vantaggi significativi rispetto ad altre tecnologie, come l'AOP a base di ozono, per il trattamento dei microinquinanti. Ma come funziona il trattamento UV AOP?

Luce ultravioletta

Tutta la luce esiste sotto forma di fotoni. I fotoni sono "pacchetti" di energia che hanno sia le proprietà delle onde, sia quelle delle particelle. L'occhio umano può rilevare le lunghezze d'onda della luce comprese tra 400 nanometri (nm) e 700 nm, indicate come intervallo di luce visibile. "Luce ultravioletta" è il termine che si riferisce alla luce non visibile ad alta energia, con lunghezze d'onda comprese tra 10 e 400 nm (**Figura 1**).



La radiación UV germicida se encuentra en el rango UV-C

Figura 1: l'insero rappresenta lo spettro elettromagnetico con l'intervallo UV.

L'intervallo delle lunghezze d'onda della luce UV presenta quattro sotto-intervalli: UV da vuoto, UV-A, UV-B e UV-C. La maggior parte delle lampade UV Commerciali emette luce nell'intervallo UV-C, con lunghezze d'onda comprese tra 200 e 280 nm. La luce emessa nell'intervallo UV-C è comunemente chiamata "luce germicida", in quanto viene assorbita e di conseguenza danneggia il materiale genetico (ad esempio il DNA), determinando l'inattivazione dell'organismo (incapacità di riprodursi) (**Figura 2**). Queste stesse lunghezze d'onda sono efficaci anche per distruggere i microinquinanti attraverso la fotolisi UV e l'ossidazione UV.

Fotolisi UV

La fotolisi UV è un "attacco UV diretto". È una reazione fotochimica che richiede solo la luce ultravioletta (**Figura 3**) ed è innescata dall'assorbimento della luce ultravioletta da parte dei microinquinanti, con conseguente rottura dei loro legami molecolari. La degradazione di un microinquinante mediante fotolisi UV è una funzione delle seguenti caratteristiche:

- **Coefficiente di assorbimento molare (ϵ):** la quantità di luce assorbita da una soluzione 1 molare (M; mol/litro) del microinquinante a una specifica lunghezza d'onda della luce su una lunghezza di 1 cm di acqua. Maggiore è il numero, più fotoni vengono assorbiti dal microinquinante a quella lunghezza d'onda.
- **Resa quantica (Φ):** il rapporto delle molecole risultanti che vengono prodotte rispetto al numero di molecole che assorbono la luce. Per esempio, se la resa quantica è 1, allora viene prodotta 1 molecola di prodotto per ogni molecola di microinquinante che assorbe la luce.

Alcuni microinquinanti potrebbero assorbire meno luce ultravioletta (vale a dire, avere una bassa assorbanza molare). Tuttavia, se hanno un'elevata resa quantica, possono comunque essere trattati efficacemente attraverso la fotolisi UV e viceversa.

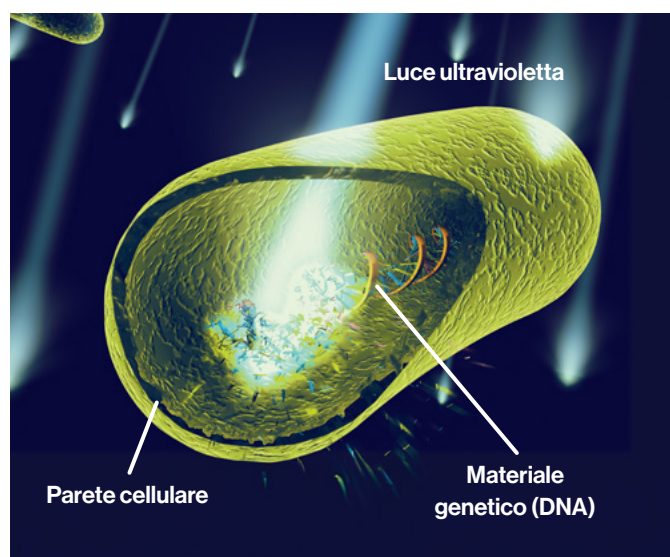


Figura 2: la luce UV è un processo consolidato di trattamento dell'acqua in cui la luce ultravioletta viene assorbita dai microrganismi, determinando la loro inattivazione.

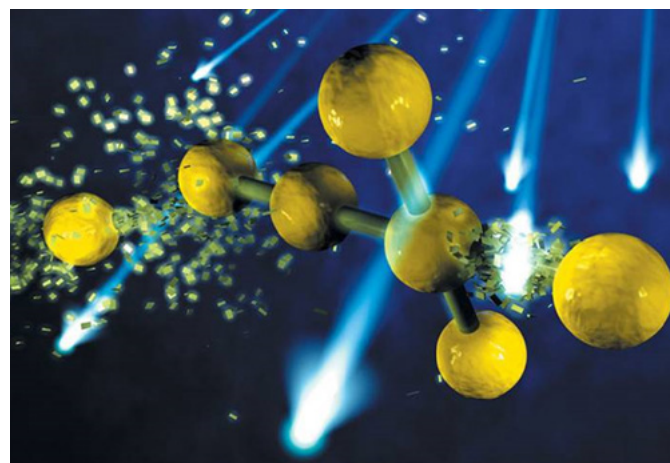


Figura 3: la fotolisi UV è un processo in cui i legami chimici dei microinquinanti vengono degradati dall'assorbimento diretto della luce ultravioletta.

Ossidazione UV

L'ossidazione si riferisce alla perdita di elettroni di una molecola, che vengono presi da un'altra molecola durante una reazione chimica. La reazione di ossidazione UV è un potente tipo di reazione di ossidazione che si verifica combinando la luce ultravioletta con un agente ossidante, come il perossido di idrogeno.

La reazione di ossidazione UV è illustrata nella **Figura 4**. Un ossidante, come il perossido di idrogeno (H_2O_2), viene aggiunto all'acqua contaminata prima (a monte) di una camera UV. Una volta che l'acqua entra nella camera UV, l'ossidante assorbe la luce ultravioletta. Il processo di fotolisi UV converte l'ossidante in ossidanti più potenti chiamati radicali liberi (ad esempio, se esposta a luce ultravioletta, una molecola di perossido di idrogeno può diventare due radicali ossidrilici). Al posto del perossido di idrogeno, è possibile utilizzare altri ossidanti, tra cui il cloro libero, per produrre ulteriori specie di radicali liberi. I radicali sono specie chimiche altamente reattive che "attaccano" e rubano immediatamente gli elettroni dalle molecole vicine, determinando la loro ossidazione e destabilizzando e degradando infine la loro struttura molecolare.

I radicali, compresi i radicali ossidrilici, sono alcuni degli agenti ossidanti più efficaci noti (**Tabella 1**). I radicali liberi generati attraverso l'ossidazione UV reagiscono immediatamente e non selettivamente con i microinquinanti e altre molecole indesiderabili nell'acqua. La velocità con cui si verificano queste reazioni è descritta da una costante di velocità di secondo ordine specifica per ciascun microinquinante e radicale libero:

- **Costante di velocità di reazione (k):** misura della rapidità con cui avviene una reazione chimica. Nei sistemi UV AOP, le reazioni con radicali ossidrilici ($\cdot OH$) in genere seguono la cinetica di secondo ordine, quindi le unità sono espresse come $M^{-1}s^{-1}$. Ad esempio, il valore di k_{OH} rappresenta la velocità alla quale un composto reagisce con i radicali ossidrilici, in termini di concentrazione molecolare al secondo.

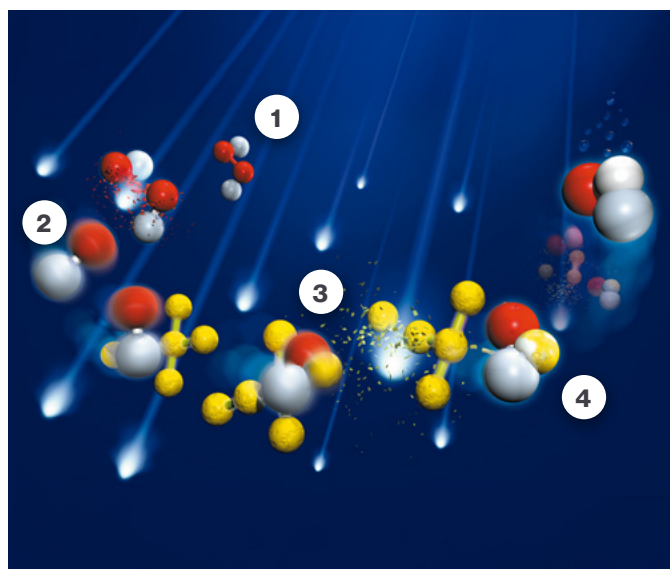


Figura 4: l'ossidazione UV è un processo in cui un ossidante, come il perossido di idrogeno (1), viene convertito in specie di radicali liberi (2) che interagiscono con i microinquinanti (3), con conseguente ossidazione e rottura dei loro legami chimici (4).

Ossidante	Potenziale di ossidazione (volt)
Fluoro	3,0
Radicale ossidrilico	2,8
Radicale cloro	2,1
Ozono	2,1
Perossido di idrogeno	1,8
Cloro	1,4

Tabella 1: potenziale di ossidazione di vari agenti ossidanti comuni

Il trattamento UV AOP unisce la fotolisi UV e l'ossidazione UV

Il processo di ossidazione UV migliora ma non sostituisce del tutto il trattamento fornito dalla fotolisi UV diretta di un microinquinante. I microinquinanti sono trattati in modo diverso mediante una combinazione di questi processi. Per esempio, la *N*-nitrosodimetilammina (NDMA) è un microinquinante trattato quasi esclusivamente attraverso fotolisi UV. Altri microinquinanti, invece, come 1,4-diossano, sono trattati quasi esclusivamente mediante ossidazione UV radicalica attraverso l'ossidazione UV.

Per la maggior parte dei microinquinanti, tra cui i composti che alterano il sapore e l'odore (ad esempio, 2-metilisoborneolo e geosmina), le tossine algali (ad esempio, le microcistine), i pesticidi (ad esempio, l'atrazina) e altri, fornire il trattamento desiderato attraverso UV AOP richiede un equilibrio ottimale tra la fotolisi UV e l'ossidazione UV. Questo equilibrio è gestito dal controllore a logica programmabile (PLC) UV AOP ed è fortemente influenzato dalle caratteristiche naturali dell'acqua trattata (consultare [I fattori che influiscono sul trattamento UV AOP](#)). La **Figura 5** illustra il contributo relativo di ciascun processo fotochimico per alcuni microinquinanti.

È da notare che la fotolisi UV e l'ossidazione UV si verificano simultaneamente e quasi immediatamente quando l'acqua entra nella camera UV durante il trattamento AOP. Non sono necessari grandi serbatoi di contatto dopo la camera UV per completare il trattamento.

Quali microinquinanti possono essere trattati mediante UV AOP?

Tutti i microinquinanti la cui struttura molecolare può essere compromessa attraverso la fotolisi UV o le reazioni di ossidazione possono potenzialmente essere trattati mediante un sistema UV AOP (**Tabella 2**). Trojan Technologies utilizza i valori pubblicati o determinati attraverso la ricerca interna dei coefficienti di assorbimento molare (Φ), delle rese quantiche (ϵ) e

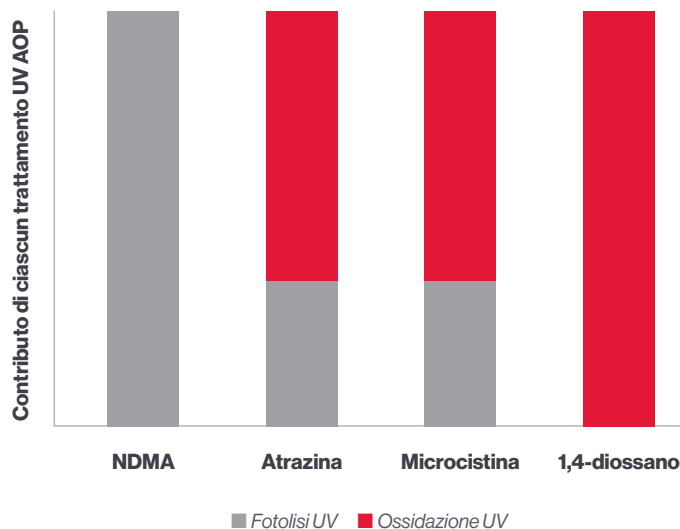


Figura 5: contributo della fotolisi UV e dell'ossidazione UV Al trattamento di alcuni microinquinanti durante il trattamento UV AOP

Desiderate maggiori informazioni su un sistema UV AOP per un microinquinante in particolare? Contattate un rappresentante Trojan Technologies.

delle costanti di velocità dei radicali (k) per determinare la quantità appropriata di dose UV e ossidante (se necessario) necessaria per erogare il trattamento desiderato di uno o più microinquinanti target.

Utilizzo di UV AOP per il trattamento degli agenti patogeni

Prima di essere usata in applicazioni come UV AOP, la luce ultravioletta per decenni è stata, e continua ad essere, riconosciuta come una soluzione per il trattamento degli agenti patogeni, inclusi vari tipi di batteri (ad esempio, *E. coli*), protozoi (ad esempio, *Cryptosporidium*) e virus (ad esempio, *adenovirus*). Una differenza significativa tra queste due applicazioni UV è che la quantità (intensità) di luce ultravioletta necessaria per eseguire il trattamento con UV AOP è significativamente superiore alla quantità di luce ultravioletta necessaria per il trattamento dei patogeni. Ciò significa che le installazioni UV AOP correttamente progettate per il trattamento dei microinquinanti possono fornire una

potenza luminosa ultravioletta sufficiente a ottenere contemporaneamente il trattamento dei patogeni.

I requisiti per il trattamento degli agenti patogeni possono variare significativamente da un'applicazione di UV AOP all'altra. Gli impianti di trattamento delle acque superficiali o sotterranee considerati sotto l'influenza diretta delle acque superficiali (GUDI) possono beneficiare dell'uso del trattamento UV per ottenere l'accREDITAMENTO obbligatorio della riduzione 4 log dei virus al posto del trattamento con cloro, che, sebbene comune, può portare alla formazione di sottoprodotti della disinfezione (DBP) regolamentati. *Cryptosporidium parvum* è un patogeno comune resistente al trattamento con cloro che può essere facilmente inattivato con luce ultravioletta negli impianti che rilevano questo patogeno nella fonte d'acqua. Infine, le applicazioni UV AOP per il trattamento avanzato delle acque reflue e il riutilizzo potabile hanno requisiti di trattamento degli agenti patogeni rigorosi, e, in queste applicazioni, la luce ultravioletta può raggiungere l'accREDITAMENTO del trattamento con riduzione 6 log per virus, *Cryptosporidium* e *Giardia*.

Tipo di microinquinante	Esempi
Stabilizzatori di composti organici volatili industriali (VOC)	1,4-diossano
VOC industriali	Tricloroetilene (TCE), tetracloroetilene (PCE)
Sottoprodotti della disinfezione e ossidazione	N-nitrosodimetilammina (NDMA)
Prodotti farmaceutici	Vari antibiotici
Idrocarburi aromatici policiclici	DDT
Pesticidi, erbicidi, fungicidi	Atrazina, metaldeide, clorotalonil
Tossine algali	Microcistina-LR, anatoxina
Composti che alterano sapore e odore	Metilisoborneolo (MIB), geosmina
Cianuro	Cianuro libero
Munizioni	RDX
Interferenti endocrini	Bisfenolo A, nonilfenolo, carbamazepina, estradiolo
Contaminanti industriali	MTBE, TBA, idrazina

Tabella 2: esempi di microinquinanti trattati dai sistemi UV AOP di TrojanUV. Ciascun sistema presentava una specifica miscela di contaminanti e una quantità di trattamento desiderata. Trojan Technologies utilizza modelli cinetici consolidati per garantire la rimozione dei microinquinanti di interesse.

Apparecchiatura fornita con un sistema UV AOP

Camera UV

Le reazioni del trattamento UV AOP si verificano nella camera UV (**Figura 6**). La camera contiene le lampade a luce ultravioletta, racchiuse in manicotti di quarzo che le proteggono dall'acqua. La dimensione appropriata di una camera UV è determinata da diversi fattori, tra cui la quantità di acqua da trattare, la sua qualità e caratteristiche, i microinquinanti target e la quantità desiderata di rimozione dei microinquinanti (spesso espressa come riduzione $\log_{10}$ del microinquinante).

Tipi di lampade UV utilizzate nelle camere UV

I sistemi UV Commerciali utilizzano in genere uno dei seguenti due tipi di lampada: lampade a bassa pressione (LP) e a media pressione (MP). Una differenza fondamentale tra questi due tipi di lampade è la loro emissione UV. Le lampade LP emettono luce ultravioletta a una singola lunghezza d'onda (254 nm), ideale per il trattamento dei microrganismi (il DNA assorbe la luce principalmente a 260 nm). Le lampade MP emettono luce UV in un intervallo di lunghezze d'onda (**Figura 7**) e sono chiamate policromatiche.



Figura 6: Camera AOP TrojanUVFlex® 200 con 144 lampade

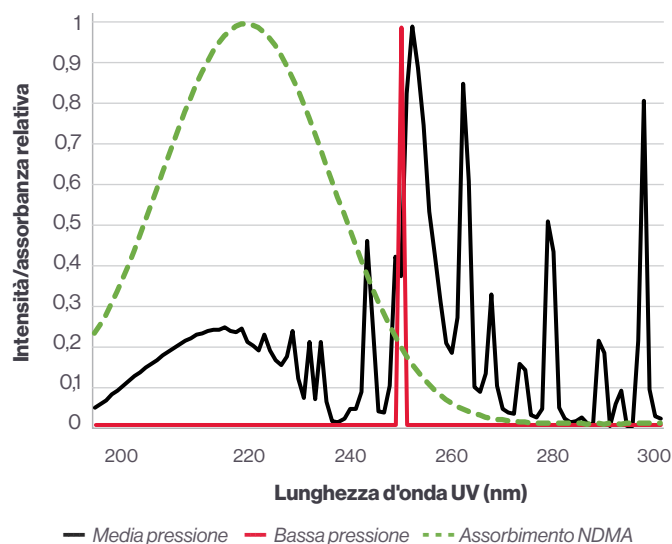


Figura 7: emissioni relative delle lampade UV MP e LP nell'intero intervallo pertinente. È anche mostrato l'assorbimento relativo di UV del microinquinante *N*-nitrosodimetilammina (NDMA).

Nella valutazione delle diverse tecnologie delle lampade, diversi fattori influiscono sull'efficienza complessiva del trattamento e devono essere presi in attenta considerazione. Per alcuni microinquinanti, la fotolisi UV di picco (coefficiente di assorbimento molare più elevato) potrebbe verificarsi a lunghezze d'onda diverse da 254 nm; per questo, le lampade MP potrebbero avere una maggiore capacità di degradare i contaminanti attraverso la fotolisi UV. Le lampade MP hanno inoltre una maggiore emissione di energia rispetto alle lampade LP, consentendo così l'utilizzo di un minor numero di lampade e di una camera UV con ingombro minore. Queste caratteristiche possono ridurre i costi dell'impianto.

Tuttavia, nonostante la maggiore emissione di energia, le lampade MP sono meno efficienti, il che significa che viene prodotta meno energia UV per ciascun watt di potenza di cui la lampada ha bisogno. I sistemi UV AOP che utilizzano lampade MP richiedono più potenza rispetto ai sistemi UV AOP equivalenti che utilizzano lampade LP, e possono comportare costi dell'energia oltre 3 volte superiori.

Ossidanti, conservazione degli ossidanti e apparecchiatura di dosaggio

Dopo l'esposizione alla luce ultravioletta, le molecole ossidanti sono una fonte di radicali liberi ossidanti ancora più potenti. Nelle applicazioni UV AOP vengono comunemente utilizzati due ossidanti: il perossido di idrogeno (H_2O_2) e il cloro libero. La scelta del miglior ossidante dipende in modo significativo dalle caratteristiche dell'acqua e dall'applicazione UV AOP (consultare [La scelta di un ossidante](#)).

Le soluzioni madre di ossidante vengono conservate in serbatoi in polietilene ad alta densità (HDPE) o metallo fino a quando il sistema non segnala all'apparecchiatura di dosaggio di iniettare la quantità corretta nel flusso di trattamento dell'acqua. Per garantire una miscelazione accurata prima che l'acqua entri nella camera UV, vengono in genere installati dei miscelatori statici subito prima o dopo il punto di iniezione.

Controllore a logica programmabile

Il controllore a logica programmabile (PLC) è un computer industriale che controlla il processo UV AOP e, soprattutto, l'equilibrio tra la dose di luce ultravioletta e la dose di ossidante necessario per trattare i microinquinanti desiderati. Il PLC può inoltre raccogliere e analizzare misurazioni da strumenti online che monitorano le caratteristiche critiche dell'acqua (consultare [I fattori che influiscono sul trattamento UV AOP](#)) per determinare la quantità di luce ultravioletta e ossidante necessaria in un determinato momento. A seconda del programma di controllo utilizzato e dei valori misurati di queste caratteristiche, come la portata o la variazione del pH, il PLC può modificare la quantità di luce ultravioletta o ossidante erogato per mantenere il trattamento del microinquinante target.

PLC di trattamento con setpoint di controllo critico

Il programma CCS (Critical Control Setpoint, setpoint di controllo critico) o programma a "dose fissa" utilizza target predeterminati per le dosi di luce UV

e ossidante programmati nel PLC. Per garantire che i target di trattamento vengano sempre raggiunti, questi target predeterminati vengono spesso valutati in base alle condizioni di trattamento previste nei casi peggiori. Nel tempo, un impianto di trattamento potrebbe incontrare situazioni che causano condizioni di trattamento ancora peggiori, che richiedono dosi mirate aumentate di luce ultravioletta o ossidante. La filosofia CCS non esegue automaticamente queste regolazioni e richiede l'intervento manuale dell'operatore; questo potrebbe aumentare il rischio di ottenere un'acqua non conforme alle specifiche.

PLC di trattamento a controllo attivo

Il controllo attivo utilizza modelli fotocinetici consolidati programmati nel PLC per regolare i target delle dosi di luce UV e ossidante in risposta alle variazioni dei fattori che influiscono sul trattamento UV AOP (**Figura 8**). La strumentazione online, ad esempio i monitor installati per pH, cloro libero, cloro totale e altri, è in grado di rilevare rapidamente il peggioramento delle condizioni, consentendo al PLC di rispondere immediatamente aumentando di conseguenza la dose di luce UV o ossidante senza l'intervento dell'operatore.

Gli approcci di controllo attivo possono inoltre regolare le dosi se le condizioni di trattamento diventano più favorevoli. In questo caso, i target delle dosi di luce UV e ossidante vengono abbassati per consentire all'intero sistema UV AOP di funzionare in modo più economico.

Agente di inattivazione dell'ossidante residuo

Una parte dell'ossidante aggiunto al sistema può passare attraverso la camera UV senza essere convertita in radicali liberi. Per garantire la sicurezza e la qualità dell'acqua, potrebbe essere necessario rimuovere questo ossidante residuo attraverso l'inattivazione. L'inattivazione può essere ottenuta usando un filtro a carbone attivo granulare (GAC) o aggiungendo una dose idonea di cloro libero. Trojan Technologies può consigliare l'approccio di inattivazione più efficace per un'applicazione specifica.

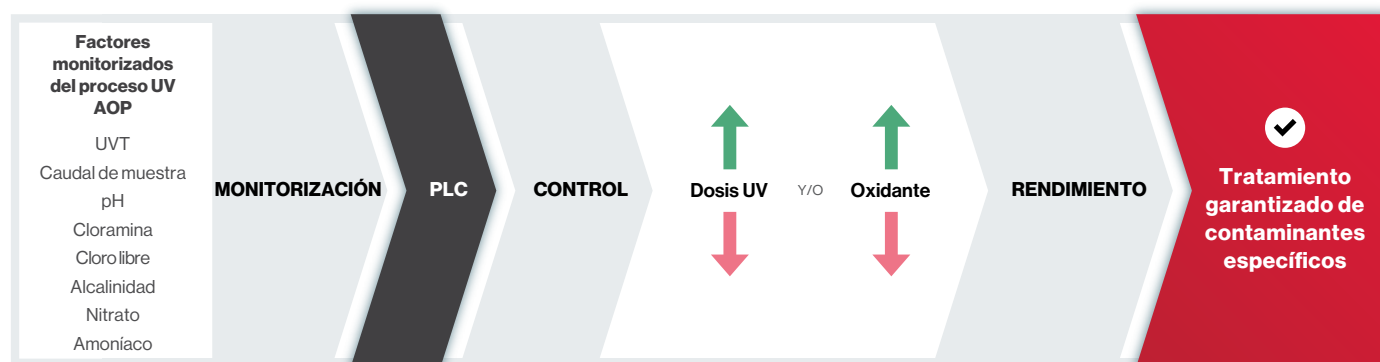


Figura 8: il programma di controllo attivo di Trojan Technologies per i sistemi UV AOP, integrato nel PLC del sistema, monitora le caratteristiche critiche dell'acqua. Stabilisce in tempo reale i target di dose opportuni per la luce ultravioletta e l'ossidante. Il risultato è una prestazione UV AOP continua in cui si ottiene sempre la rimozione desiderata dei microinquinanti.

Applicazioni del trattamento UV AOP

Bonifica delle acque sotterranee

Le acque sotterranee sono in genere una fonte molto pulita di acqua potabile. Il suolo agisce come un filtro naturale e rimuove la maggior parte dei microinquinanti e patogeni. Le acque sotterranee estratte sono in genere pronte da bere con un trattamento minimo o nullo. Tuttavia, la contaminazione industriale, il percolato delle discariche, le fosse biologiche e altre fonti di inquinamento potrebbero contaminare con microinquinanti le acque sotterranee pulite.

Man mano che cresce la comprensione dei rischi per la salute pubblica posti dai microinquinanti nelle acque sotterranee contaminate, le normative si stanno evolvendo e i fornitori di acqua stanno diventando più motivati ad affrontare questi composti emergenti nei propri processi di trattamento. Nel 2020, ad esempio, lo Stato di New York ha implementato un livello massimo di contaminante (MCL) applicabile per il microinquinante 1,4-diossano, un probabile carcinogeno umano spesso rilevato nelle acque sotterranee nelle aree storicamente contraddistinte da attività industriali (**Figura 9**). 1,4-diossano è particolarmente difficile da rimuovere dalle acque sotterranee, per via della sua capacità di eludere le tecnologie a membrana avanzate e i metodi di strippaggio ad aria. L'ossidazione avanzata è considerata il miglior trattamento disponibile per il microinquinante 1,4-diossano.

Anche altri microinquinanti riconosciuti delle acque sotterranee, compresi i composti organici volatili (COV) quali il tricloroetilene (TCE) e il tetracloroetilene (PCE), possono essere eliminati mediante il trattamento UV AOP.

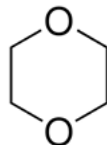
Proprietà di 1,4-diossano	
Formula	C ₄ H ₈ O ₂
Peso molecolare	88,15
Struttura	
	

Figura 9: un microinquinante spesso presente nelle acque sotterranee, 1,4-diossano, viene trattato in modo molto efficace con il trattamento UV AOP.

Bonifica delle acque superficiali

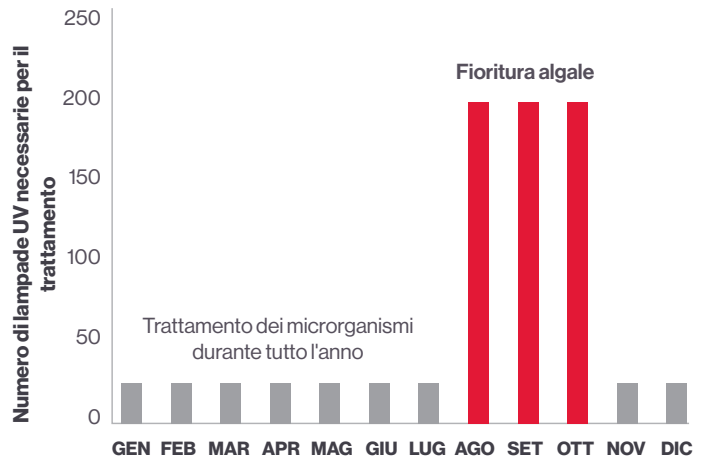
A differenza delle acque sotterranee, le acque superficiali sono più direttamente esposte alle influenze umane e ambientali e, pertanto, più suscettibili alla contaminazione da parte di microinquinanti e patogeni. L'agricoltura può contribuire in modo significativo alla contaminazione delle acque superficiali; un fenomeno comune è la fuoriuscita di fertilizzanti e pesticidi nei laghi e nei fiumi durante le precipitazioni.

Molte regioni applicano normative rigorose in materia di pesticidi nell'acqua potabile. In Europa, per esempio, i singoli pesticidi devono avere una concentrazione non superiore a 0,1 microgrammi per litro ($\mu\text{g/L}$) di acqua, mentre il limite dei pesticidi totali è pari a 0,5 $\mu\text{g/L}$. Inoltre, quando i fertilizzanti entrano nelle acque superficiali attraverso le fuoriuscite, possono fornire i nutrienti necessari per la crescita dei cianobatteri (alghe verdi-azzurre). Queste fioriture algali possono produrre cianotossine di comprovata nocività, come la microcistina. Le alghe possono produrre inoltre altri composti, tra cui MIB e geosmina, che possono avere un impatto negativo sulle qualità estetiche dell'acqua potabile, principalmente sul sapore e sull'odore, spesso con conseguenti lamentele da parte dei consumatori.

Molte applicazioni di bonifica delle acque superficiali sono stagionali. Ad esempio, le cianotossine e i composti che alterano il sapore e l'odore generati dalla fioritura algale diventano spesso un problema durante la fine dell'estate e l'autunno. Se un impianto di trattamento riscontra questi problemi e necessita inoltre di un trattamento degli agenti patogeni per *Cryptosporidium* o virus, questi requisiti di trattamento per agenti patogeni ad intensità UV più bassa sono spesso necessari durante tutto l'anno. Per molti sistemi UV AOP, il PLC può ridurre l'intensità UV erogata nei periodi dell'anno in cui il trattamento UV AOP non è necessario. Questo comodo approccio di controllo può far risparmiare costi operativi significativi ai proprietari dell'impianto (**Figura 10**).

Riutilizzo potabile

L'elevata densità di popolazione e la crescente scarsità di acqua hanno causato la diminuzione delle fonti di acqua potabile (acque superficiali e sotterranee) in diverse regioni, soprattutto in quelle più esposte a condizioni



Trattamento	Tipo	Mesi	Lampade UV	Ossidante	Risparmio energetico/anno
1 log metilisoborneolo e 1 log geosmina	UV AOP	Ago-Ott	192	Necessario	–
4 log virus	UV	Gen-Lug; Nov-Dic	96	Non necessario	\$130.680
3 log <i>Cryptosporidium</i>	UV	Gen-Lug; Nov-Dic	24	Non necessario	\$174.960

Figura 10: rappresentazione mensile del numero di lampade UV necessarie per trattare 1 log (90%) di metilisoborneolo e geosmina prodotti da una fioritura algale stagionale e 3 log (99,9%) di *Cryptosporidium* per i mesi restanti, in cui le alghe non sono presenti. La tabella mostra il risparmio energetico possibile spegnendo le lampade non necessarie nei momenti dell'anno in cui non è necessario il trattamento UV AOP.

di siccità. Per garantire un approvvigionamento sostenibile di acqua potabile, molte di queste regioni stanno cercando di trasformare le acque reflue domestiche in una fonte di acqua potabile. Per garantire che le acque reflue vengano trattate a un livello di purezza avanzato per la reintroduzione nella fornitura di acqua potabile, vengono costruiti impianti specializzati per il trattamento delle acque reflue, chiamati impianti di trattamento avanzato delle acque reflue (AWTF). Gli AWTF sono spesso tenuti a includere il trattamento UV AOP come parte del processo di trattamento avanzato delle acque reflue, per via della sua capacità di trattare i microinquinanti chimici presenti nelle fonti di acque reflue (**Figura 11**) e fornire un trattamento aggiuntivo per gli agenti patogeni.

L'acqua viene naturalmente riutilizzata attraverso il ciclo idrologico globale. Il riutilizzo potabile utilizza i sistemi di trattamento per accelerare questo processo naturale. Gli AWTF possono inviare le acque reflue trattate con trattamento avanzato a un tampone ambientale, come un bacino di acqua superficiale o una falda acquifera, prima che l'acqua venga inviata a un impianto di trattamento dell'acqua potabile. Si tratta di un riutilizzo potabile indiretto (aumento delle acque superficiali e aumento delle acque sotterranee). Se l'acqua proveniente dagli AWTF bypassa il tampone ambientale e viene inviata direttamente a un impianto di trattamento dell'acqua potabile, si tratta di un riutilizzo potabile diretto (aumento dell'acqua non trattata).

Gli AWTF in genere utilizzano una tecnologia a membrana avanzata, come MF e RO, per rimuovere i

piccoli solidi, alcuni microinquinanti e alcuni patogeni. Tuttavia, neppure le tecnologie a membrana più avanzate, compresa la RO, sono in grado di eliminare tutti i microinquinanti di interesse. La tecnologia di ossidazione avanzata è considerata una fase di trattamento necessaria negli AWTF per trattare i microinquinanti che non possono essere facilmente rimossi dall'acqua attraverso la filtrazione. Ad esempio, la California, leader consolidato nell'implementazione del riutilizzo potabile e nella costruzione di AWTF, richiede un trattamento UV AOP mirato per 1,4-diossano. Anche la NDMA, un sottoprodotto riconosciuto del trattamento delle acque reflue, è un microinquinante target comune trattato con sistemi UV AOP presso gli AWTF.

Applicazioni a doppio trattamento con UV AOP

In molti scenari di trattamento avanzato, i fornitori di utenze e acqua devono affrontare più obiettivi di trattamento. Un requisito comune, ad esempio, è il trattamento degli agenti patogeni, tra cui batteri e virus. Poiché la tecnologia UV è un metodo consolidato e convalidato per l'inattivazione degli agenti patogeni, questa funzione può essere ottenuta simultaneamente con la stessa apparecchiatura del processo UV AOP. In questo modo, i fornitori di utenze possono raggiungere obiettivi di trattamento dei microinquinanti e dei patogeni in un'unica fase, semplificando i processi di trattamento e riducendo la necessità di apparecchiature aggiuntive.

A. Tratamiento completo avanzado que se utiliza normalmente en las EDAR avanzadas de California



B. Tratamiento avanzado a base de carbono

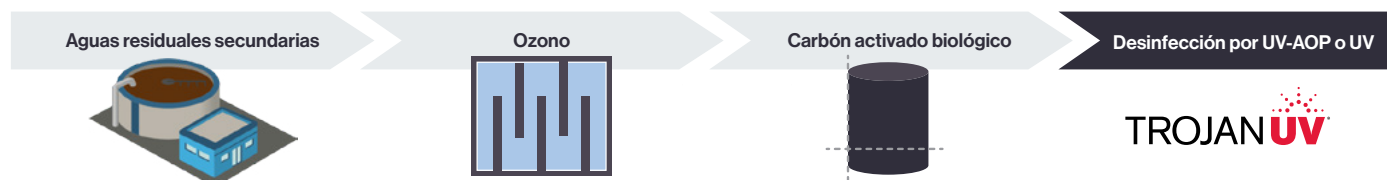


Figura 11: esempi di processi del trattamento AWTF: il trattamento FAT (A) e un'alternativa CBAT per i casi in cui le opzioni per lo scarico dell'acqua ricca di sali derivata dalla RO sono limitate (B).

La scelta di un ossidante per UV AOP: perossido di idrogeno o cloro libero

Perossido di idrogeno

Il perossido di idrogeno (H_2O_2) da solo è un forte agente ossidante, ma quando le molecole di perossido di idrogeno assorbono la luce ultravioletta, il risultato è la formazione di due radicali ossidrilici. Questi radicali ossidano più rapidamente i microinquinanti target di interesse.

✓ Vantaggi

Il perossido di idrogeno è stabile nella maggior parte delle acque. Ad esempio, le proprietà dell'acqua, come il pH, possono influenzare la struttura di alcune molecole, ma hanno un impatto inferiore sulla struttura complessiva del perossido di idrogeno; questo lo rende più facile da usare in diversi ambienti di trattamento. Inoltre, la soluzione madre di perossido di idrogeno viene conservata in forma liquida anziché come gas compresso, consentendo uno stoccaggio più sicuro dei prodotti chimici.

⚠ Rischi e inconvenienti

La manipolazione del perossido di idrogeno richiede dispositivi di protezione individuale di base, soprattutto se viene conservato in soluzioni madre altamente concentrate (27%, 35%, 50% p/p). La fotolisi del perossido di idrogeno in radicali ossidrilici non è efficiente al 100%. La maggior parte del perossido di idrogeno non viene convertita in radicali ossidrilici e rimane nell'acqua dopo la camera UV. Questo perossido di idrogeno residuo deve in genere essere rimosso prima che l'acqua possa essere sicura per l'uso potabile.

Cloro libero

Il cloro libero viene prodotto quando all'acqua vengono aggiunte soluzioni madre di cloro (ipoclorito di sodio o gas di cloro). Le molecole di cloro libero possono avere due forme: acido ipocloroso ($HOCl$) o ione ipocloroso (OCl^-). Entrambe le molecole di cloro libero possono assorbire la luce ultravioletta e produrre radicali liberi.

✓ Vantaggi

Le molecole di cloro libero hanno un coefficiente di assorbimento molare superiore (se esposte alla maggior parte delle lunghezze d'onda UV) rispetto al perossido di idrogeno, il che significa che è possibile produrre più radicali liberi utilizzando il cloro libero rispetto a quantità equivalenti (moli) di perossido di idrogeno. Inoltre, possono essere generate diverse specie di radicali: questo consente di aggiungere un ulteriore meccanismo di ossidazione durante il processo UV AOP. Il cloro è inoltre una sostanza chimica ampiamente utilizzata nel trattamento delle acque, e viene spesso utilizzato dai fornitori di acqua per altri scopi, come il trattamento secondario (residuo) nelle infrastrutture di distribuzione. Ciò significa che il cloro libero residuo non convertito in radicali può spesso rimanere nella soluzione senza che sia necessaria l'inattivazione.

⚠ Rischi e inconvenienti

I vantaggi dell'uso del cloro libero anziché del perossido di idrogeno dipendono dalla situazione. Più specificamente, il pH dell'acqua deve rientrare in un intervallo (consultare **I fattori che influiscono sul trattamento UV AOP**) che viene principalmente raggiunto solo dopo il passaggio dell'acqua attraverso membrane RO. Pertanto, i vantaggi del cloro libero si ottengono al meglio nelle applicazioni di riutilizzo potabile con trattamento UV AOP; il suo utilizzo non è consigliato in altre applicazioni, quali la bonifica delle acque sotterranee o superficiali.

I fattori che influiscono sul trattamento UV AOP

Le prestazioni complessive del trattamento UV AOP con perossido di idrogeno o cloro libero dipendono dalle apparecchiature UV utilizzate e, cosa più importante, dalle caratteristiche dell'acqua trattata. In questa sezione viene descritto in che modo i fattori legati all'acqua che influiscono sul trattamento possono influire sul perossido di idrogeno e sul cloro libero nei sistemi UV AOP.

Trasmittanza UV

La trasmittanza UV (UVT) misura la facilità con cui la luce ultravioletta attraversa l'acqua (**Figura 12**). Se il valore di UVT, spesso misurato come trasmittanza percentuale attraverso 1 cm di acqua, diminuisce, ciò significa che più costituenti dell'acqua assorbono o bloccano la luce ultravioletta, impedendo alla luce UV di raggiungere i microinquinanti target e l'ossidante.

Come influisce l'UVT sul trattamento UV AOP con perossido di idrogeno?

Quando l'UVT dell'acqua trattata aumenta, una maggiore quantità di luce ultravioletta può penetrare nell'acqua ed effettuare la fotolisi delle molecole di perossido di idrogeno, producendo più radicali ossidrilici. La diminuzione dei valori di UVT ha l'effetto opposto e riduce l'efficienza del sistema UV AOP.

Come influisce l'UVT sul trattamento UV AOP con cloro libero?

Quando l'UVT dell'acqua trattata aumenta, una maggiore quantità di luce ultravioletta può penetrare nell'acqua ed effettuare la fotolisi delle molecole di cloro libero, producendo più specie di radicali liberi. La diminuzione dei valori di UVT ha l'effetto opposto e riduce l'efficienza del sistema UV AOP. Altri fattori legati all'acqua, come **l'ammoniaca e le clorammine**, possono influenzare direttamente l'UVT dell'acqua quando viene utilizzato il cloro libero e avere invece un impatto inferiore quando viene utilizzato il perossido di idrogeno.

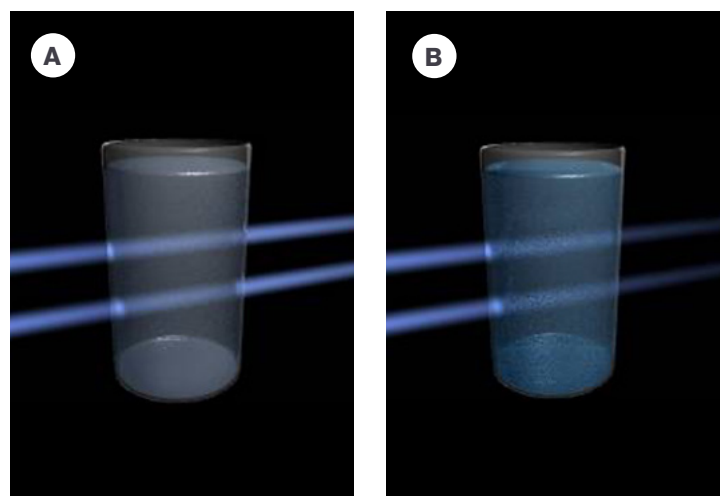


Figura 12: acqua con UVT elevata (A) e acqua con UVT bassa (B)

pH

Il pH dell'acqua può influenzare significativamente la struttura delle molecole, compresa quella degli ossidanti aggiunti al sistema UV AOP, influenzando potenzialmente sulla loro capacità di generare radicali liberi. Anche la struttura di altre molecole può essere alterata, influenzando sull'efficienza del trattamento UV AOP.

Come influisce il pH sul trattamento UV AOP con perossido di idrogeno?

Il pH non influisce direttamente sulla struttura del perossido di idrogeno; questo rende il perossido di idrogeno un ossidante più adatto per il trattamento UV AOP in un ampio intervallo di valori di pH. Tuttavia, esiste una correlazione piccola, ma evidente, tra l'aumento del pH e la riduzione delle prestazioni del trattamento AOP. Questo perché il pH influisce sulla forma di altre molecole, in particolare su quella delle specie di carbonato comunemente presenti nelle acque superficiali e nelle sorgenti sotterranee. Il bicarbonato (HCO_3^-) ha una costante di velocità di reazione più elevata con i radicali ossidrilici rispetto al suo acido coniugato, l'acido carbonico (H_2CO_3), e compete per i radicali liberi che vengono prodotti. Questa competizione indesiderata, in genere chiamata "scavenging", inibisce il processo del trattamento UV AOP. Con il superamento del livello di pH neutro ($\text{pH} > 7$), le concentrazioni di bicarbonato aumentano e le concentrazioni di acido carbonico diminuiscono. Pertanto, all'aumentare del pH, spesso vi sono più molecole che rimuovono i radicali liberi e inibiscono il sistema UV AOP.

Come influisce il pH sul trattamento UV AOP con cloro libero?

Il pH influisce significativamente sulla forma molecolare del cloro libero nell'acqua. Anche se entrambe le forme di cloro libero (acido ipocloroso [HOCl] o ione ipocloroso [OCl^-]) possono assorbire la luce ultravioletta, l'acido ipocloroso produce più radicali liberi rispetto allo ione ipocloroso. Lo ione ipocloroso ha un'affinità oltre 10 volte superiore per i radicali liberi rispetto all'acido ipocloroso; pertanto, compete per i radicali liberi prodotti, agendo come scavenger dei radicali liberi.

Quando l'acqua diventa più acida ($\text{pH} < 7$), l'acido ipocloroso è presente in concentrazioni più elevate rispetto allo ione ipocloroso. Affinché il cloro libero sia un ossidante adatto per un sistema UV AOP, quasi tutto il cloro libero deve essere sotto forma di acido ipocloroso; questa condizione si verifica quando il pH scende al di sotto di 5,5 (**Figura 13**). Il pH delle acque sotterranee naturali e delle acque superficiali è spesso più elevato; tuttavia, come già detto, questi valori di pH acido sono in genere misurati nelle acque effluenti con trattamento RO nelle applicazioni di riutilizzo potabile.

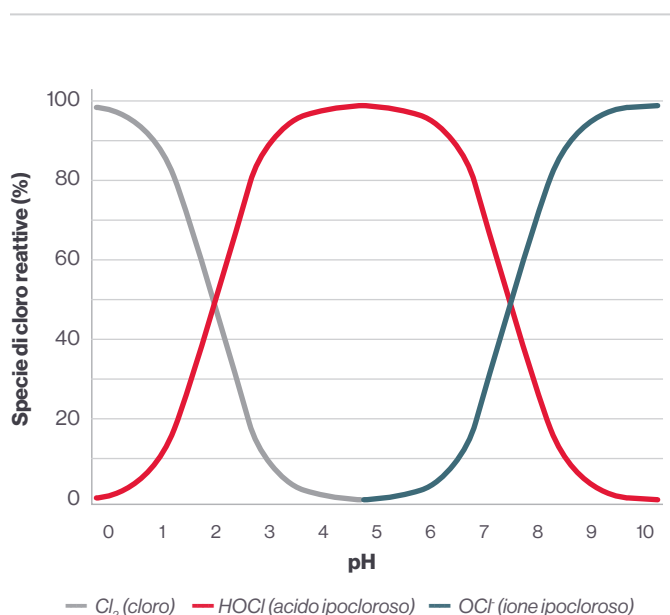


Figura 13: grafico che mostra la speciazione del cloro libero nei diversi valori di pH. Con un pH compreso tra 5 e 5,5, la speciazione del cloro libero è prossima al 100% di HOCl (acido ipocloroso), cioè la specie di cloro libero ideale per la produzione di radicali liberi per il trattamento UV AOP.

Alcalinità

L'alcalinità è la capacità tamponante dell'acqua e, più in generale, una misura della resistenza dell'acqua alle variazioni del pH. È spesso misurata in termini di concentrazioni di carbonato.

Come influisce l'alcalinità sul trattamento UV AOP con perossido di idrogeno?

All'aumentare dei livelli di alcalinità (carbonato), spesso si verifica una riduzione del trattamento AOP. Questo avviene perché determinate specie di carbonato, in particolare il bicarbonato, agiscono come scavenger dei radicali ossidrilici e competono per i radicali ossidrilici. Come già detto, questo effetto può essere esacerbato quando il pH aumenta oltre il livello neutro.

Come influisce l'alcalinità sul trattamento UV AOP con cloro libero?

Per il cloro libero, gli effetti dell'alcalinità sono gli stessi, ma, come detto sopra, il cloro libero è più spesso usato per il trattamento UV AOP negli impianti per il riutilizzo potabile che trattano il permeato della membrana RO. L'acqua del permeato RO è molto pulita e generalmente presenta bassi livelli di specie di carbonato. Inoltre, il pH acido causerebbe una maggiore concentrazione di acido carbonico rispetto al bicarbonato, che ha un'affinità inferiore per i radicali e presenta un rischio di scavenging inferiore.

Nitrato

Il nitrato (NO_3^-), naturalmente presente in molte acque, assorbe lunghezze d'onda specifiche della luce ultravioletta (**Figura 14**) e può ridurre il numero di fotoni UV disponibili per la fotolisi UV e la produzione di radicali liberi. Le lunghezze d'onda inferiori o uguali a 240 nm vengono principalmente assorbite dal nitrato. Poiché le lampade UV LP (consultare **Tipi di lampade UV**) emettono luce principalmente a 254 nm, sono meno influenzate dal nitrato. Circa il 20% delle emissioni UV delle lampade MP sono influenzate dall'assorbimento del nitrato e sono maggiormente influenzate dalle concentrazioni elevate di nitrato.

"Scavenging" è un termine usato per descrivere la competizione indesiderata per i radicali liberi prodotti nel sistema UV AOP. Il potenziale di scavenging varia significativamente a seconda del tipo di acqua. Il personale qualificato di Trojan Technologies può determinare il rischio di fondo di scavenging delle acque di un impianto, garantendo così una progettazione completa di successo supportata dalla garanzia sulle prestazioni di Trojan Technologies.

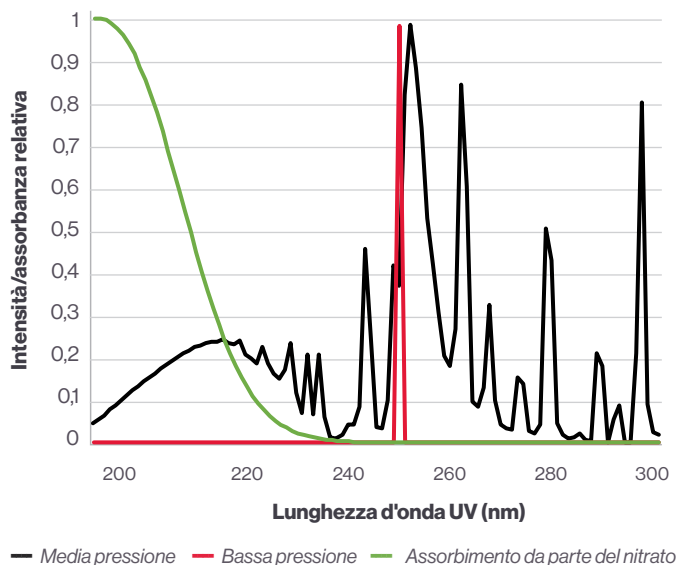


Figura 14: emissioni relative delle lampade UV MP e LP nell'intero intervallo pertinente. Viene inoltre mostrato l'assorbimento relativo della luce UV del nitrato.

Come influisce il nitrato sul trattamento UV AOP con perossido di idrogeno?

Quando il nitrato assorbe la luce ultravioletta, viene parzialmente fotolizzato in un'altra molecola chiamata nitrito (NO_2^-). La molecola di nitrito ha una costante di velocità di reazione elevata con i radicali ossidrilici, il che la rende un forte scavenger di radicali ossidrilici che compete per i radicali liberi prodotti, riducendo così l'efficienza complessiva del sistema UV AOP.

Come influisce il nitrato sul trattamento UV AOP con cloro libero?

Quando il nitrato assorbe la luce ultravioletta, viene parzialmente fotolizzato in un'altra molecola chiamata nitrito (NO_2^-). La molecola di nitrito ha una costante di velocità di reazione elevata con i radicali liberi, il che la rende un forte scavenger di radicali ossidrilici che compete per i radicali liberi prodotti, riducendo così l'efficienza complessiva del sistema UV AOP. Poiché il cloro libero viene utilizzato più frequentemente come ossidante per il trattamento UV AOP per le applicazioni di riutilizzo potabile dopo il trattamento con membrane RO, il trattamento RO deve rimuovere molte molecole di nitrato, riducendone così la capacità di influire sul sistema UV AOP.

Ammoniaca e clorammine

Anche se l'ammoniaca (NH_3) si trova naturalmente nell'acqua, tende a influenzare il trattamento UV AOP quando viene intenzionalmente aggiunta insieme al cloro libero prima delle membrane (comprese le membrane RO) per produrre clorammine per il pretrattamento della membrana e la prevenzione della crescita biologica. Le clorammine sono utilizzate anche per il trattamento degli agenti patogeni nelle applicazioni di trattamento delle acque reflue e dell'acqua potabile.

Come influiscono l'ammoniaca e le clorammine sul trattamento UV AOP con perossido di idrogeno?

Le concentrazioni crescenti di monoclorammina (NH_2Cl) possono avere un impatto di inibizione sul trattamento UV AOP poiché, se presenti, abbassano l'UVT dell'acqua, influenzando negativamente sulla quantità

di fotolisi UV e sulla generazione di radicali liberi. Tuttavia, la monoclorammina non si trova naturalmente nella maggior parte delle acque sotterranee o superficiali, e il rischio che essa influisca sul trattamento UV AOP con perossido di idrogeno è basso.

Come influiscono l'ammoniaca e le clorammine sul trattamento UV AOP con cloro libero?

La monoclorammina costituisce un problema per il trattamento UV AOP con cloro libero nelle applicazioni di riutilizzo potabile, per via del suo uso frequente come pretrattamento della membrana RO a monte. La monoclorammina residua nel permeato RO può abbassare l'UVT e inibire il sistema UV AOP a valle. Inoltre, il cloro libero aggiuntivo aggiunto per il processo di trattamento UV AOP può reagire con l'ammoniaca residua e produrre più monoclorammina, aggravando ulteriormente l'interferenza con il processo di trattamento.

Tuttavia, il cloro libero aggiuntivo converte la monoclorammina in diclorammina (NHCl_2), una molecola che non ha le stesse caratteristiche inibenti. La comprensione della cinetica della cosiddetta "clorazione al break point", che tiene conto delle diverse reazioni che coinvolgono le specie di cloro e monoclorammina, è fondamentale quando si progetta un sistema UV AOP che utilizza il cloro libero. La comprensione di questi principi cinetici e la loro programmazione in un PLC a controllo attivo (consultare [Apparecchiatura fornita con un sistema UV AOP](#)) aiuta a determinare con precisione i valori di UVT e le concentrazioni delle specie di cloro necessarie per un trattamento dei microinquinanti conforme.

Confronti tra le tecnologie di trattamento dei microinquinanti

Strippaggio ad aria

Lo strippaggio ad aria è una tecnica preziosa nelle applicazioni di trattamento in cui i microinquinanti target possono essere facilmente "volatilizzati", cioè estratti dall'acqua e trasferiti nell'aria.

- Lo strippaggio ad aria fa passare il microinquinante alla fase gassosa e non lo rimuove dall'ambiente. Lo scarico dell'aria contaminata risultante può richiedere permessi e trattamento dei gas di scarico (ad esempio con filtri al carbonio o biofiltri).
- Lo strippaggio ad aria è inefficace nel trattamento di NDMA, 1,4-diossano, cloruro di vinile e altri microinquinanti che non possono essere facilmente volatilizzati.
- I sistemi di strippaggio ad aria potrebbero non essere adatti agli impianti con limiti di altezza o rumore, poiché richiedono tipicamente torri alte e producono un rumore significativo per via dei soffiatori ad alta potenza.
- Lo strippaggio ad aria non consente di ottenere il trattamento degli agenti patogeni.

Ozono

Il trattamento con ozono, come il trattamento UV AOP, è un esempio di trattamento di ossidazione in cui i microinquinanti vengono scomposti attraverso l'ossidazione e la degradazione dei legami chimici. A differenza del trattamento UV AOP, per erogare il trattamento con ozono non è necessaria la luce ultravioletta; questo rende l'ozono più pratico per il trattamento di acque con limpidezza ridotta.

- L'ozono è un agente ossidante più debole rispetto ai radicali liberi prodotti dai sistemi UV AOP. Prima che il trattamento possa essere considerato completo, è necessario un tempo di contatto (TC) di diversi minuti nell'acqua. I radicali liberi ad azione rapida prodotti con il trattamento UV AOP forniscono un trattamento immediato con un TC trascurabile.
- A causa del requisito di TC, per il trattamento con ozono sono necessari bacini di contatto, generatori di ozono, unità di distruzione dell'ozono, compressori e serbatoi di stoccaggio dell'ossigeno liquido; pertanto, può essere necessario un investimento iniziale maggiore rispetto a un sistema UV AOP.
- Molte acque contengono bromuri naturali che possono reagire con l'ozono formando bromato, un sottoprodotto del trattamento regolamentato e noto cancerogeno.
- L'ozono è inefficace contro la NDMA, un sottoprodotto del trattamento delle acque reflue e un target comune dei sistemi UV AOP nelle applicazioni per il riutilizzo potabile.
- La NDMA può essere prodotta come sottoprodotto del trattamento con ozono nelle applicazioni per il riutilizzo potabile se i suoi precursori sono presenti nelle acque reflue.

Carbone attivo (in polvere e granulare)

Il carbone attivo è una tecnologia di filtrazione in cui una sostanza organica, come il carbone, viene sottoposta a calore estremo che rende il materiale poroso. Questi pori o siti di adsorbimento possono intrappolare piccole molecole, tra cui i microinquinanti. L'uso del carbone attivo è un metodo ben consolidato per rimuovere diversi microinquinanti in diverse applicazioni.

- Il carbone attivo filtra i microinquinanti, rimuovendoli dall'acqua, ma non dall'ambiente. Per lo smaltimento del carbone "esaurito" saturo, sono necessari la spedizione e lo smaltimento in discarica o la rigenerazione diretta del carbone esaurito attraverso la riattivazione. Entrambi i processi possono avere impatti ambientali negativi.
- La sostituzione dei contenitori dei filtri a carbone attivo può essere costosa.
- Lavorare con il carbone in polvere è particolarmente scomodo.
- La capacità del carbone attivo di rimuovere la NDMA, 1,4-diossano, molti pesticidi, il cloruro di vinile e altri microinquinanti con una bassa affinità per il carbonio è limitata. Il rilevamento dei guasti dei filtri può essere rapido e causare frequenti cambi dei filtri, a spese considerevoli.
- Il carbone attivo ha un impatto inferiore su patogeni come *Cryptosporidium*, *Giardia* e virus.

Membrane

La tecnologia a membrana include diversi tipi di filtri realizzati con fibre sintetiche in grado di rimuovere molecole e ioni estremamente piccoli. Alcuni esempi sono la microfiltrazione (MF), la nanofiltrazione (NF) e l'osmosi inversa (RO).

- Determinate molecole trattate dal sistema UV AOP, ovvero 1,4-diossano e NDMA, possono passare attraverso le membrane, incluse le membrane RO, la tecnologia a membrana con il più alto rigetto e la migliore capacità di filtrare i contaminanti.
- Il filtrato (denominato "salamoia" nelle applicazioni RO) raccolto dalle membrane deve essere sottoposto a lavaggio in controflusso e smaltito. Questa fase di gestione dei prodotti di scarto aggiunge complessità alla progettazione e al funzionamento dell'impianto di trattamento. La salamoia RO deve spesso essere smaltita in una condotta sottomarina o in uno stagno di evaporazione. Il trattamento UV AOP non genera alcun flusso di prodotti di scarto e non richiede lo smaltimento di salamoia.
- Il consumo di elettricità e i costi energetici sono molto più elevati per le tecnologie a membrana, poiché vengono utilizzate pompe per produrre una pressione sufficientemente elevata da costringere l'acqua a passare attraverso le membrane.

Ossidazione chimica in situ (ISCO)

La tecnica ISCO utilizza pozzi di iniezione per erogare sostanze chimiche ossidanti (ad esempio, perossido di idrogeno) direttamente nel terreno e nelle acque sotterranee per ridurre i microinquinanti chimici. È necessaria un'infrastruttura di superficie minima, consentendo la creazione di una soluzione di bonifica a costi inferiori.

- Il successo della tecnica ISCO dipende da un'accurata mappa di rilievo del pennacchio di contaminazione e della sua direzione di flusso.
- La tecnica ISCO non è sempre efficace al 100% e sono necessarie diverse settimane o mesi prima che i pozzi di monitoraggio possano raccogliere campioni e testare l'efficacia. Con il trattamento UV AOP, è possibile prelevare e analizzare immediatamente i campioni di affluenti ed effluenti per verificare che i microinquinanti vengano rimossi in modo appropriato.

Il vantaggio di Trojan Technologies con UV AOP

Esperienza



Installazioni

Trojan Technologies è impegnata nella ricerca, nello sviluppo e nella fornitura di sistemi UV AOP da oltre 20 anni e vanta 250 installazioni UV AOP TrojanUV in cinque continenti. L'aspetto più impressionante di queste installazioni è la loro varietà. Con una capacità di flusso che varia da meno di 100 galloni al minuto a oltre 130 milioni di galloni di acqua al giorno, questi impianti rappresentano l'intero spettro delle applicazioni UV AOP. La gamma di installazioni TrojanUV Comprende impianti dedicati alla bonifica delle acque sotterranee, alla bonifica delle acque superficiali e al riutilizzo potabile, con diversi microinquinanti target.

Oggi, le installazioni UV AOP TrojanUV Aiutano a fornire acqua più pulita a più di 6 milioni di persone, eliminando ogni anno circa 2 tonnellate di contaminazione dall'ambiente.



Ricerca

Il successo di Trojan Technologies con le soluzioni UV AOP si basa sulla competenza di livello mondiale del suo team di ricerca e sviluppo, che comprende leader riconosciuti a livello mondiale nel campo della fotochimica e della cinetica molecolare. I membri del team, dottori di ricerca e ricercatori esperti, hanno dedicato le proprie carriere al progresso della scienza alla base dei sistemi UV AOP all'avanguardia di TrojanUV.

Questo team è stato il pioniere del programma di controllo attivo, che continua ad essere lo standard per garantire un controllo del sistema UV AOP conforme ed efficiente in termini di costi e sta migliorando l'applicabilità e l'attrattiva di questa tecnologia.

Servizi



Analisi di laboratorio e dell'acqua

Le caratteristiche dell'acqua, tra cui il pH, l'alcalinità, l'UVT, la concentrazione di nitrati e il potenziale di scavenging dei radicali ossidrilici influiscono sulla progettazione di un sistema UV AOP di successo. Per garantire il successo di un'installazione UV AOP, è fondamentale avere una conoscenza approfondita delle caratteristiche dell'acqua. Il laboratorio Trojan Technologies è dotato di tecnici e scienziati esperti che analizzano gratuitamente l'acqua dei clienti per stabilire le caratteristiche essenziali di base dell'acqua per una corretta progettazione del sistema UV AOP.



Servizi di test e dimostrazione

In molte applicazioni, è necessario determinare se il sistema UV AOP sia una soluzione adatta prima di procedere alla progettazione e all'installazione completa. Trojan Technologies gestisce una flotta di apparecchiature UV AOP mobili su scala pilota (**Figura 15**), tra cui il primo sistema dimostrativo UV AOP del settore, che espande i test tradizionali consentendo test delle prestazioni e ricerca, formazione degli operatori e sensibilizzazione pubblica.

Il personale di assistenza esperto di Trojan Technologies può installare sistemi pilota in loco e, se necessario, il team di ricerca è disponibile per progettare ed eseguire protocolli di test pilota personalizzati. È inoltre disponibile assistenza per la preparazione dei report finali e per il coinvolgimento delle autorità normative per garantire l'approvazione della tecnologia UV AOP e una transizione fluida verso l'implementazione completa.



Figura 15: un sistema mobile UV AOP utilizzato per test pilota e delle prestazioni in loco.

Prodotti

I sistemi TrojanUV per UV AOP includono alcune delle camere UV più avanzate al mondo, tra cui i vari modelli della linea di prodotti TrojanUVFlex AOP. Grazie alla tecnologia Solo Lamp®, una lampada LP che mantiene un'uscita UV più elevata, TrojanUVFlex AOP richiede un numero di lampade complessivo inferiore rispetto alle lampade UV LP della generazione precedente. Il numero di lampade inferiore riduce al minimo le dimensioni della camera UV, come le lampade MP, ma mantiene i costi energetici e di proprietà inferiori delle lampade LP. Queste camere UV Compatte hanno un ingombro ridotto, che riduce al minimo l'infrastruttura necessaria per l'alloggiamento dei sistemi.

Le camere UV TrojanUVFlex AOP possono essere progettate per contenere da un minimo di 16 lampade, che richiedono circa 8 kW di potenza, fino a un massimo di 384 lampade, che richiedono circa 384 kW. Durante il funzionamento, è possibile spegnere singole sezioni di lampade (**Figura 16**) quando le condizioni di trattamento diventano più favorevoli. Ad esempio, quando l'UVT aumenta o le concentrazioni di clorammine sono inferiori, il programma di controllo attivo di Trojan Technologies riduce la dose UV erogata dal sistema e spegne le lampade UV Considerate superflue o ridondanti. Inoltre, è possibile attenuare le lampade in funzione per ridurre i livelli di potenza, riducendo ulteriormente i costi di esercizio.

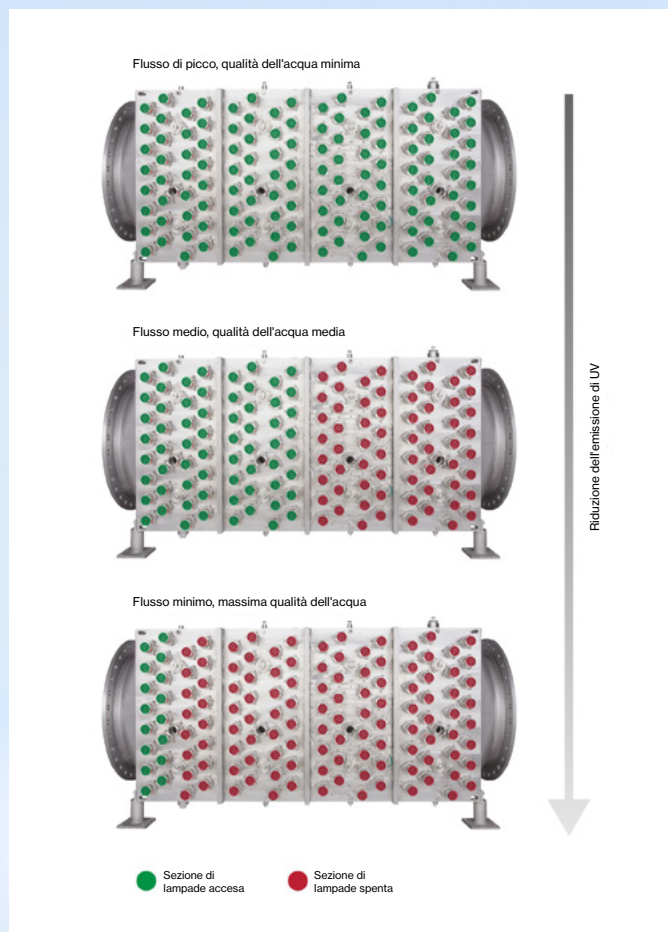


Figura 16: la camera UV TrojanUVFlex100 AOP mostra il funzionamento di solo alcune sezioni di lampade. Il programma di controllo attivo di Trojan Technologies spegne automaticamente le lampade non necessarie in risposta al miglioramento delle condizioni di trattamento.



La garanzia sulle prestazioni di Trojan Technologies

Trojan Technologies è fiduciosa nella sua esperienza e nei suoi prodotti UV AOP. Pertanto, l'impegno di Trojan Technologies nei confronti dei clienti consiste nell'offrire una garanzia sulle prestazioni che garantisca il raggiungimento costante degli obiettivi di trattamento dei microinquinanti desiderati. Tale garanzia si aggiunge alle garanzie standard di Trojan Technologies che garantiscono l'integrità meccanica dell'apparecchiatura.

Domande frequenti

1. Che cos'è UV AOP?

Il processo di ossidazione avanzata UV (UV AOP) è una forma di ossidazione avanzata in cui la luce ultravioletta tratta i microinquinanti direttamente e indirettamente generando potenti radicali liberi, che rimuovono i microinquinanti attraverso reazioni chimiche ossidative.

2. Che cos'è la fotolisi UV?

La fotolisi UV, parte del processo di trattamento UV AOP, si verifica quando i microinquinanti vengono trattati direttamente con luce ultravioletta. In molti casi, i microinquinanti trattati attraverso la fotolisi non richiedono un ossidante. La fotolisi UV è inoltre necessaria per produrre radicali liberi quando l'ossidante assorbe la luce UV.

3. Che cos'è l'ossidazione UV?

L'ossidazione UV, parte del processo di trattamento UV AOP, si verifica quando specie di radicali liberi con alto potenziale di ossidazione vengono prodotte attraverso l'interazione di un ossidante (ad esempio, perossido di idrogeno o cloro libero) con la luce ultravioletta. Questi radicali ossidano (rimuovono elettroni) dai microinquinanti presenti nell'acqua, degradandoli in costituenti più piccoli. In un sistema UV AOP, la fotolisi UV e l'ossidazione si verificano contemporaneamente per degradare i microinquinanti.

4. Quali microinquinanti vengono trattati mediante la fotolisi UV e l'ossidazione UV?

Con il trattamento UV AOP è possibile trattare molti microinquinanti, tra cui *N*-nitrosodimetilammina (NDMA); 1,4-diossano; tricloroetilene (TCE) e solventi clorurati diversi dagli alcani; composti che alterano il sapore e l'odore, come MIB e geosmina; pesticidi; metil-t-butil etere (MTBE) e diversi prodotti farmaceutici, nonché molti altri. **Contattare i rappresentanti di Trojan Technologies** per domande specifiche sui microinquinanti di interesse.

5. Quali sono i vantaggi dei sistemi UV AOP?

Il sistema UV AOP tratta i microinquinanti rimuovendoli dall'ambiente, anziché trasferirli in un altro mezzo (ad esempio, l'aria nello strippaggio ad aria o i solidi nella filtrazione con carbone attivo) e far passare il microinquinante a una fase diversa prima di rilasciarlo nell'ambiente, con la frequente necessità di un ulteriore trattamento (fuori dall'impianto).

Il trattamento UV AOP viene posizionato in linea con altre tecnologie di trattamento. Non vi sono flussi di rifiuti, come la salamoia o l'acqua di lavaggio in controflusso; pertanto, non è necessario prendere in considerazione i flussi di rifiuti nella progettazione dell'impianto.

Il trattamento dei patogeni, inclusi batteri, protozoi e virus, si ottiene contemporaneamente al trattamento con luce ultravioletta. Tale trattamento è comunemente necessario in aggiunta al trattamento dei microinquinanti nel riutilizzo potabile e in alcune applicazioni di bonifica delle acque superficiali e delle acque sotterranee.

6. Quali sono i vantaggi dei sistemi UV AOP TrojanUV?

Trojan Technologies vanta decenni di esperienza nella scienza e nell'applicazione della tecnologia UV per applicazioni UV AOP e dispone della più grande base di installazione di sistemi UV AOP in tutto il mondo.

I sistemi TrojanUV per UV AOP funzionano con un programma di controllo attivo, dove le dosi mirate di luce UV e ossidante vengono regolate immediatamente in risposta alle variazioni dei fattori legati all'acqua in grado di influenzare il trattamento. Questo garantisce un trattamento efficiente in termini di costi, conforme e coerente, con un minimo sforzo da parte degli operatori.

Una flotta di unità pilota e dimostrative consente ai clienti di eseguire test di proof of concept o migliorare la familiarità degli operatori. Queste iniziative offrono inoltre il sostegno del personale esperto di Trojan Technologies. Le camere UV sono progettate per erogare una dose di luce UV ad alta intensità con un ingombro complessivo ridotto, riducendo lo spazio degli edifici e le spese in conto capitale.

7. Dove deve essere installato un sistema UV AOP in un impianto di trattamento?

I sistemi UV AOP sono versatili, in quanto possono essere installati in molti punti diversi in un impianto di trattamento delle acque. La posizione preferita dipende dall'applicazione, ma in generale, la posizione migliore è dove l'acqua è più pulita e presenta la più alta trasmittanza UV (UVT) e la più bassa concentrazione di solidi. **Contattate gli esperti di Trojan Technologies o i consulenti tecnici** per scoprire come integrare il sistema UV AOP in un impianto nuovo o esistente.

8. Trojan Technologies analizzerà la nostra acqua?

Sì, i laboratori di Trojan Technologies effettueranno analisi di routine dei fattori legati all'acqua critici per il trattamento, quali UVT, pH, nitrati, alcalinità, e altri, per progettare un sistema UV AOP completo, affidabile, specifico per il cliente e supportato dalla garanzia sulle prestazioni di Trojan Technologies. Le analisi per i nuovi sistemi vengono condotte senza costi per i clienti.

9. Quali parametri di qualità dell'acqua influiscono sulle prestazioni dei sistemi UV AOP?

I parametri di qualità dell'acqua più importanti sono quelli che influiscono sulla trasmittanza UV (UVT). Altri parametri possono promuovere lo scavenging dei radicali liberi e la competizione indesiderata per i radicali liberi generati, rendendoli meno disponibili per il trattamento dei microinquinanti di interesse.

Gli scienziati di Trojan Technologies valutano gli impatti di ciascun parametro attraverso l'analisi dell'acqua dell'impianto.

10. Trojan Technologies fornirà sistemi UV AOP con prestazioni garantite?

Sì. Se Trojan Technologies riceve un campione rappresentativo dell'acqua da sottoporre a test nella fase di progettazione, Trojan Technologies garantisce le proprie raccomandazioni relative alle dimensioni del sistema UV AOP e le prestazioni del trattamento presso tale impianto.

11. Sono necessari test pilota?

Sebbene i test pilota possano dimostrare l'efficacia della tecnologia, non sono necessari per la progettazione di un sistema UV AOP. Le condizioni idrauliche e ottiche dei sistemi su scala pilota possono cambiare quando si passa a sistemi UV AOP completi, il che significa che vengono spesso utilizzate diverse dosi di luce UV e ossidante.

12. Ci sono sottoprodotti delle reazioni UV AOP?

Nella maggior parte dei casi, la formazione di sottoprodotti in un sistema UV AOP è trascurabile. Il potenziale di formazione di sottoprodotti è valutato caso per caso e, se vi è un potenziale significativo, è possibile adottare misure per eliminare gli eventuali impatti potenziali. I sottoprodotti di reazione tipici sono aldeidi a basso peso molecolare e acido carbossilico. In genere, questi composti non costituiscono un problema dal punto di vista sanitario o normativo. In genere, quando si usa il perossido di idrogeno come ossidante, non viene prodotto bromato.

13. È possibile trattare i microrganismi con UV AOP?

Sì. Le dosi di luce ultravioletta generalmente necessarie per ridurre i microinquinanti attraverso il processo UV AOP sono spesso significativamente più elevate di quelle necessarie per il trattamento dei microrganismi. Pertanto, il trattamento dei microrganismi, se necessario, viene ottenuto simultaneamente nelle applicazioni tipiche del sistema AOP.

14. Come è possibile conoscere le quantità di luce ultravioletta e precursore di ossidante necessarie?

Trojan Technologies vanta decenni di esperienza nella progettazione e nell'utilizzo dei sistemi UV AOP. Gli esperti di Trojan Technologies utilizzano modelli e algoritmi specializzati che considerano tutte le reazioni chimiche pertinenti, le caratteristiche dell'acqua, la quantità di trattamento dei microinquinanti necessaria e l'efficienza della camera UV per trovare il giusto equilibrio tra luce ultravioletta e ossidante. Poiché quantità eccessive dell'uno o dell'altro possono causare un funzionamento poco economico, il programma di controllo attivo di Trojan Technologies garantisce un adeguato equilibrio del trattamento.

Per ulteriori informazioni sui marchi e sulle affiliate di Trojan Technologies, visitate il sito
www.trojantechnologies.com



© 2026 Trojan Technologies Group ULC. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta, memorizzata in un sistema di recupero o trasmessa in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo senza l'autorizzazione scritta di Trojan Technologies Group ULC. I prodotti descritti in questa pubblicazione possono essere protetti da uno o più brevetti negli Stati Uniti d'America, in Canada e/o in altri Paesi. TrojanUVFlex e Trojan Solo Lamp sono marchi commerciali di Trojan Technologies Group ULC. (0426)