



Folleto informativo de tecnología de aguas residuales

Desinfección con ozono

DESCRIPCIÓN

Las actividades de desinfección son consideradas como los mecanismos principales en la desactivación o destrucción de los organismos patógenos para prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua tanto a los usuarios aguas abajo como al ambiente. Es muy importante que las aguas residuales sean tratadas adecuadamente antes de realizarse las actividades de desinfección para que la acción de cualquier desinfectante sea eficaz. La Tabla 1 muestra los microorganismos que comúnmente se encuentran en aguas residuales domésticas y las enfermedades asociadas a ellos.

El ozono se produce cuando las moléculas de oxígeno (O_2) son disociadas por medio de una fuente de energía produciendo átomos de oxígeno que posteriormente chocan con una molécula de oxígeno para formar un gas inestable, el ozono (O_3), que se utiliza para desinfección de las aguas residuales. La mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales generan ozono mediante la aplicación de una corriente alterna de alto voltaje (6 a 20 kilovoltios) a través de una brecha entre placas dieléctricas de descarga en donde se encuentra un gas de alimentación que

contiene el oxígeno. El ozono es generado en la planta debido a que el gas

TABLA 1 AGENTES INFECCIOSOS POTENCIALMENTE PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS NO TRATADAS

| Organismo | Enfermedad Causada |
|---|--|
| Bacterias | |
| <i>Escherichia coli</i> (enterotoxígeno) | Gastroenteritis |
| <i>Leptospira</i> (spp.) | Leptospirosis |
| <i>Salmonella typhi</i> | Fiebre tifoidea |
| <i>Salmonella</i> (2,100 serotipos) | Salmonelosis |
| <i>Shigella</i> (4 spp.) | Shigellosis (disentería bacilar) |
| <i>Vibrio cholerae</i> | Cólera |
| Protozoos | |
| <i>Balantidium coli</i> | Balantidiasis |
| <i>Cryptosporidium parvum</i> | Cryptosporidiasis |
| <i>Entamoeba histolytica</i> | Amebiasis (disentería amoébrica) |
| <i>Giardia lamblia</i> | Giardiasis |
| Helmintos | |
| <i>Ascaris lumbricoides</i> | Ascariasis |
| <i>T. solium</i> | Teniasis |
| <i>Trichuris trichiura</i> | Tricuriasis |
| Viruses | |
| Enterovirus (72 tipos; por ejemplo: virus <i>echo</i> y <i>coxsackie</i> del polio) | Gastroenteritis, anomalías del corazón y meningitis. |
| Hepatitis A | Hepatitis de tipo infeccioso |
| Agente de Norwalk | Gastroenteritis |

| | |
|-----------|-----------------|
| Rotavirus | Gastroenteritis |
|-----------|-----------------|

Fuente: Tabla adaptada de Crites and Tchobanoglous, 1998

es inestable y se descompone en oxígeno elemental en un período corto de tiempo luego de su generación.

El ozono es un oxidante y agente germicida de virus muy fuerte. Los mecanismos de desinfección asociados con el uso del ozono incluyen:

- La oxidación o destrucción directa de la pared de la célula con la salida de componentes celulares fuera de la misma.
- Las reacciones con los subproductos radicales de la descomposición del ozono.
- El daño a los componentes de los ácidos nucleicos (purinas y pirimidinas).
- La ruptura de las uniones de carbono-nitrógeno que conduce a la despolimerización

Cuando el ozono se descompone en agua, los radicales libres del peróxido de hidrógeno (HO_2) y del hidróxido (OH) que se forman tienen gran capacidad de oxidación y desempeñan un papel activo en el proceso de desinfección. En general se cree que las bacterias son destruidas debido a la oxidación protoplasmática, dando como resultado la desintegración de la pared de la célula (fisuramiento o lisis de la célula).

La eficacia de la desinfección depende de la susceptibilidad de los organismos a ser tratados, del tiempo de contacto y de

la concentración de ozono. Un diagrama linear del proceso de desinfección con ozono se muestra en la Figura 1. Los componentes de un sistema de desinfección utilizando ozono incluyen la preparación del gas de alimentación, la generación del ozono, el contacto con el ozono, y la destrucción del ozono.

El aire o el oxígeno puro se utilizan como fuente de oxígeno en el gas de alimentación, el cual es transmitido al generador de ozono a una tasa establecida de flujo. La fuente de energía para la producción es generada mediante una descarga eléctrica en un gas que contenga oxígeno. Los generadores de ozono son comúnmente clasificados de acuerdo a:

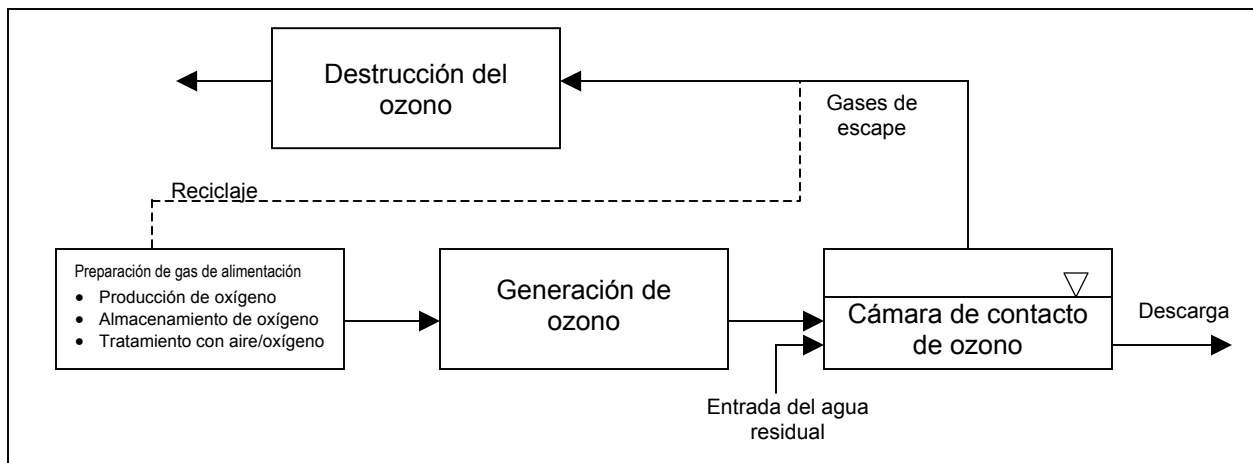
- El mecanismo de control (voltaje o unidad de frecuencia).
- El mecanismo de enfriamiento (agua, aire, o agua más aceite).
- El arreglo físico de las placas dieléctricas (vertical u horizontal).
- El nombre del inventor.

Si bien los generadores de ozono fabricados por diversas compañías tienen características únicas, estos también tienen algunas configuraciones en común.

El método de descarga eléctrica es la fuente de energía más comúnmente utilizada para la producción de ozono. El aire extremadamente seco u oxígeno puro se exponen a una descarga controlada y uniforme de alto voltaje a una frecuencia alta o baja. El punto de condensación del gas de alimentación debe ser igual o menor de $-60\text{ }^\circ\text{C}$ ($-76\text{ }^\circ\text{F}$). La corriente de gas generada del

aire contiene cerca del 0.5 a 3.0% de ozono por peso, mientras que el oxígeno puro genera aproximadamente de 2 a 4 veces esa concentración.

Después de su generación, el ozono es alimentado a una cámara de contacto de flujo vertical de caída que contiene el agua residual a ser desinfectada. El propósito principal de la cámara de contacto es transferir el ozono que se encuentra dentro de la burbuja de gas al



Fuente: U.S. EPA, 1986

FIGURA 1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL PROCESO DE OZONIZACIÓN

cuerpo del líquido mientras que se permite suficiente tiempo de contacto para la desinfección. Los tipos de cámara de contacto de burbujas difusas comúnmente utilizados (bien sea en dirección del flujo o a contracorriente) son los de inyección de presión positiva, de presión negativa (*Venturi*), de agitación mecánica y las torres de lecho fijo. Debido a que el ozono se consume rápidamente, debe proveerse un contacto uniforme en una cámara de flujo en pistón (tubular).

Los gases de escape de la cámara de contacto deben ser tratados para destruir cualquier ozono

restante antes de ser liberados a la atmósfera. Por lo tanto, es esencial mantener una dosificación óptima del ozono para una mejor eficacia. Cuando se utiliza el oxígeno puro como gas de alimentación, los gases de escape de la cámara de contacto pueden ser reciclados para generar el ozono o para la reutilización en el tanque de aereación. Los gases de escape del ozono que no se utilizan se envían a una unidad de destrucción de ozono o se reciclan.

Los parámetros principales de control del proceso son la dosis, la mezcla y el tiempo de contacto. Los sistemas de desinfección por

medio de ozono tienen como objetivo el maximizar la solubilidad del ozono en el agua residual ya que la desinfección depende de la transferencia del ozono al agua residual. La cantidad de ozono que se disuelve en el agua residual a una temperatura constante es una función de la presión parcial del ozono gaseoso sobre el agua o en la corriente del gas de alimentación.

Es crítico que todos los sistemas de desinfección que utilizan ozono sean evaluados a escala piloto y calibrados antes de la instalación para asegurar que se cumplan con los requisitos del permiso de descarga en los sitios específicos de uso.

APLICABILIDAD

La desinfección con ozono se utiliza generalmente en plantas de tamaño mediano o grande una vez que el agua residual haya recibido por lo menos tratamiento secundario. Además de la desinfección, otro uso común del ozono en el tratamiento del agua residual es el control de malos olores.

La desinfección con ozono es el método menos utilizado en los Estados Unidos aún cuando en Europa esta tecnología ha tenido una amplia aceptación por varias décadas. El tratamiento con ozono tiene la capacidad de lograr niveles más altos de desinfección en comparación con el cloro o la luz ultravioleta; sin embargo, los costos de inversión así como los gastos de mantenimiento no son competitivos con las alternativas disponibles. Por lo tanto, el ozono es utilizado con poca frecuencia, principalmente en casos especiales en los cuales otras alternativas no son efectivas.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Ventajas:

- El ozono es más eficaz que la utilización del cloro para la desinfección o destrucción de virus y bacterias.
- El proceso de ozonización utiliza un período corto de contacto (aproximadamente de 10 a 30 minutos).
- No existen residuos peligrosos que necesiten ser removidos después del proceso de ozonización porque el ozono se descompone rápidamente.
- Después del proceso de ozonización, los microorganismos no crecen nuevamente, a excepción de aquellos que están protegidos por las partículas en la corriente de agua residual.
- El ozono es generado dentro de la planta, existiendo así muy pocos problemas de seguridad industrial asociados con el envío y el transporte.
- El proceso de ozonización eleva la concentración de oxígeno disuelto (O.D.) del efluente. El incremento O.D. puede eliminar la necesidad de reaeración y también puede incrementar el nivel de O.D. en la corriente de agua receptora.

Desventajas

- La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas o quistes.
- El proceso de ozonización es una tecnología más compleja que la cloración o la desinfección con luz ultravioleta, por lo cual

se requieren equipos complicados y sistemas de contacto eficientes.

- El ozono es muy reactivo y corrosivo, requiriendo así de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable.
- El proceso de ozonización no es económico para las aguas residuales con altas concentraciones de sólidos suspendidos (SS), demanda bioquímica del oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno, o carbono orgánico total.
- El ozono es extremadamente irritante y posiblemente tóxico, así que los gases de escape que salen de la cámara de contacto deben ser destruidos para evitar que los trabajadores estén expuestos a ellos.
- El costo del tratamiento puede ser relativamente alto en cuanto a la inversión de capital y la demanda de energía eléctrica.

DESEMPEÑO

Plantas de tratamiento de aguas residuales de Belmont y Southport en Indianápolis, Indiana

En 1985, la ciudad de Indianápolis, Indiana, operaba dos plantas de tratamiento avanzado de aguas residuales en Belmont y Southport, cada una con capacidad de 125 millones de galones por día (mgd) en donde se utilizaba el proceso de desinfección con ozono. La capacidad nominal de los generadores de ozono alimentados por oxígeno era de 6,380 libras diarias, lo cual era utilizado para cumplir con los promedios geométricos semanales y mensuales de desinfección de coliformes fecales establecidos en los permisos de descarga (400 y 200 por 100 ml, respectivamente).

La desinfección fue requerida en ambas plantas de tratamiento de Indianápolis desde el 1 de abril hasta el 31 de octubre de 1985. Las características del funcionamiento de los equipos fueron evaluadas durante el período de desinfección llevado a cabo en 1985 y, consecuentemente, el desempeño de la desinfección fue optimizado durante la temporada de 1986. El costo de inversión de ambos sistemas de ozonización representó cerca del 8% del costo total de la construcción de las plantas. La operación y el mantenimiento de los sistemas de ozonización representaron cerca del 1.9 % y del 3.7 % de los costos totales de operación y mantenimiento de las plantas Belmont y Southport, respectivamente.

En 1989 se llevó a cabo un programa detallado de monitoreo y de control del proceso. Los datos indicaron efectos significativos en el desempeño del proceso debido a los cambios en el caudal del agua residual, la concentración de las coliformes fecales que ingresaban a la cámara de contacto y la demanda de ozono.

La información sobre la demanda de ozono no se conocía previamente. Se realizaron diversos estudios para permitir un mejor control del proceso de desinfección con ozono. Estos incluyeron la instalación reciente de una cámara de contacto de ozono a escala piloto para permitir que el personal de la planta midiera diariamente la demanda de ozono. Además, se realizaron las pruebas con rastreadores para medir la posibilidad de flujo de corto circuito en la cámara de contacto. Los resultados indicaron que se lograba una ventaja notable al agregar deflectores adicionales. Los resultados también señalaron estrategias operacionales que podrían lograr una máxima remoción de coliformes fecales, tales como la reducción del número de cámaras de contacto en operación en condiciones de flujo bajo y moderado.

OPERACION Y MANTENIMIENTO

La generación de ozono utiliza una cantidad significativa de energía eléctrica. Por esto se debe dar una atención constante al sistema para asegurar que el uso de la energía es optimizado para un rendimiento controlado de la desinfección.

No deben existir conexiones con fugas dentro o en los alrededores del generador de ozono. El operador debe monitorear regularmente las subunidades apropiadas para asegurar que no estén recalentadas. Por lo tanto el operador debe verificar rutinariamente que no existan escapes puesto que una fuga muy pequeña puede causar concentraciones inaceptables de ozono en el ambiente. El equipo de monitoreo de ozono debe ser probado y calibrado según lo recomendado por el fabricante del equipo.

Tal como el oxígeno, el ozono tiene una solubilidad limitada y se descompone más rápidamente en agua que en el aire. Este factor, junto con la reactividad del ozono, requiere que la cámara de contacto de ozono esté bien cubierta y que el ozono se difunda al agua residual lo más eficazmente posible.

El ozono en forma gaseosa es explosivo una vez que alcanza una concentración de 240 g/m^3 . Puesto que la mayoría de los sistemas del proceso de ozonización nunca exceden una concentración gaseosa de ozono de 50 a 200 g/m^3 , esto no es generalmente un problema. Sin embargo, el ozono en forma gaseosa sigue siendo peligroso durante una cantidad significativa de tiempo, de modo que es necesario tomar medidas extremas de precaución cuando se operan sistemas del gas de ozono.

Es importante que las tuberías del generador de ozono, de distribución, de contacto, del gas de escape y de entrada a la unidad de destrucción

de ozono sean purgadas antes de abrir los diversos sistemas o subsistemas. Al ingresar a la cámara de contacto de ozono, el personal debe estar consciente de que existe un potencial de deficiencia de oxígeno o de gas de ozono atrapado a pesar de que se realicen los mejores esfuerzos de limpieza del sistema. El operador debe estar enterado de todos los procedimientos de operación de emergencia requeridos en caso que surgiese un problema. Los operadores deben tener todo el equipo de seguridad industrial disponible para su utilización en caso de que suceda una emergencia. Los parámetros de operación y mantenimiento importantes incluyen:

- Abastecer al generador de ozono con un gas limpio de alimentación que tenga un punto de condensación igual o menor a $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ ($-76 \text{ }^\circ\text{C}$). Si el gas alimentado tiene humedad, la reacción de ozono y la humedad puede generar una condensación muy corrosiva en el interior del ozonizador. La producción del generador puede ser disminuida por la formación de los óxidos de nitrógeno (tales como ácido nítrico).
- Mantener el flujo requerido del enfriador del generador (aire, agua u otro líquido).
- Lubricar el compresor o el soplador de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Asegurarse que todas las empaquetaduras de sellado del compresor se encuentren en buenas condiciones.
- Operar el generador de ozono dentro de los parámetros de diseño. Examinar y limpiar regularmente el ozonizador, el suministro de aire y los ensamblajes dieléctricos, y monitorear regularmente la temperatura del generador de ozono.
- Hacer monitoreo del sistema de alimentación y distribución de ozono para

asegurar que el volumen necesario tenga suficiente contacto con las aguas residuales.

- Mantener los niveles ambientales de ozono por debajo de los límites de las regulaciones de seguridad aplicables.

COSTOS

El costo de los sistemas de desinfección con ozono depende del fabricante, de la ubicación, de la capacidad de la planta, y de las características del agua residual a ser desinfectada. Los costos del proceso de ozonización son generalmente altos en comparación con otras técnicas de desinfección.

La Tabla 2 muestra una estimación de costos típica (valores bajos a medianos) para el sistema de desinfección con ozono utilizado para desinfectar 1 mgd de agua residual. Los costos se basan en agua residual que ha pasado por los procesos de tratamiento primario y secundario en un sistema correctamente diseñado (el contenido del DBO no debe exceder 30 miligramos por litro [mg/L] y el contenido de los sólidos suspendidos debe ser menor a 30 mg/L). En general, los costos son influenciados en gran parte por factores específicos de la localidad; por esto, las estimaciones que se presentan a continuación son valores típicos que pueden variar de un sitio a otro.

Debido a que la concentración de ozono generada del aire o del oxígeno es tan reducida, la eficacia de transferencia a la fase líquida es una consideración económica crítica. Por esta razón las cámaras de contacto utilizadas son generalmente muy profundas y recubiertas.

El costo total de un sistema de ozonización también es determinado en gran parte por el costo de inversión y los costos de operación y mantenimiento. Los costos anuales de operación para la desinfección con ozono incluyen el consumo de energía, los suministros,

la reparación de equipos misceláneos y las necesidades de personal.

TABLA 2 ESTIMACIÓN DE COSTOS TÍPICOS DE UN SISTEMA DE OZONIZACIÓN

| Componente | Costo del sistema (dólares) |
|---|-----------------------------|
| Costos de inversión de capital | |
| Gas de alimentación y compresor de oxígeno | \$ 245,500 |
| Cámara de contacto (500 gpm) | \$ 4,000 – 5,000 |
| Unidad de destrucción | |
| Pequeña (cerca de 30 pcm) | \$ 800 |
| Grande (cerca de 120 pcm) | \$ 1,000 – 1,200 |
| Costos misceláneos | \$ 35,000 |
| Costos de ingeniería | \$ 12,000 – 15,000 |
| Contingencias | 30% |
| Costo anual de operación y mantenimiento | |
| Mano de obra | \$ 12,000 |
| Energía eléctrica | 90 kW |
| Otros (reemplazo de filtros, aceite del compresor, repuestos dieléctricos, etc) | \$ 6,500 |

gpm: galones por minuto

pcm: pies cúbicos por minuto

Fuente: Champion Technology, 1998

Otra consideración referente al costo es que cada sistema de ozonización es muy específico para cada caso, dependiendo de las limitaciones del efluente de la planta. Se deberán contactar empresas de abastecimiento de sustancias químicas para obtener información específica de costos.

REFERENCIAS

1. Crites, R. and G. Tchobanoglous. 1998. Small and Decentralized Wastewater Management Systems. The McGraw-Hill Companies. New York, New York.
2. Martin, E. J. and E. T. Martin. 1991. Technologies for Small Water and Wastewater Systems. Environmental Engineering Series. Van Nostrand Reinhold (now acquired by John Wiley & Sons, Inc.). New York, New York. pp. 209–213.
3. Metcalf & Eddy, Inc. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse. 3d ed. The McGraw-Hill Companies. New York, New York.
4. Rakness, K. L.; K. M. Corsaro; G. Hale; and B. D. Blank. 1993. "Wastewater Disinfection with Ozone: Process Control and Operating Results." *Ozone: Science and Engineering*. vol. 15. no. 6. pp. 497–514.
5. Rakness, K. L.; R. C. Renner; D. B. Vornehm; and J. R. Thaxton. 1988. "Start-Up and Operation of the Indianapolis Ozone Disinfection Wastewater Systems." *Ozone: Science and Engineering*. vol. 10. no. 3. pp. 215–240.
6. Rudd, T. and L. M. Hopkinson. December 1989. "Comparison of Disinfection Techniques for Sewage and Sewage Effluents." *Journal of International Water and Environmental Management*. vol. 3. pp. 612–618.
7. Task Force on Wastewater Disinfection. 1986. Wastewater Disinfection. Manual of Practice No. FD-10. Water Pollution Control Federation. Alexandria, Virginia.
8. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1986. Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection. EPA Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio. EPA/625/1-86/021.
9. Water Environment Federation (WEF). 1996. Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants. Manual of Practice No. 11. 5th ed. vol. 2. WEF. Alexandria, Virginia.
10. Rasmussen, Karen (Frost & Sullivan). 1998. Pollution Engineering Online. Market Forecast: Wastewater Treatment Equipment Markets." WEFTEC, Orlando, FL.

Roy F. Weston Inc.
Peter J. Lau
1515 Market Street, Suite 1515
Philadelphia, PA 19102-1956

La mención de marcas o productos comerciales no significa que la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos respalda o recomienda su uso.

Para mayor información contactarse con:

Municipal Technology Branch, U.S. EPA, Mail
Code 4204, 401 M St., S.W., Washington, D.C.,
20460