



# DESTRUCCIÓN DE SAO/HFC EN HORNOS DE CEMENTO

Protocolo Técnico

Alianza para la protección del clima y la capa de ozono (COPA)  
Noviembre 2024

Implementado por

**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Fomentado por:

 Ministerio Federal  
de Economía  
y Protección del Clima

**IKI**  INTERNATIONAL  
CLIMATE  
INITIATIVE



ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS  
PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL

en virtud de una decisión  
del Bundestag alemán



El creciente sector de la refrigeración y el aire acondicionado contribuye de forma significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero y de sustancias contenidas en equipos obsoletos, espumas u otros productos que aún no se liberan a la atmósfera. Los bancos de SAO deben abordarse de manera integral para tomar medidas climáticas que prevengan el agotamiento de la capa de ozono y el calentamiento global. Por lo tanto, todos los refrigerantes obsoletos o al final de su vida útil, incluidas las espumas, deben gestionarse de forma ambientalmente racional; los países deben evitar la acumulación de los llamados bancos de SAO y HFC, y la comunidad internacional debe implementar infraestructuras resilientes y adaptables para abordar este desafío.

La ONUDI tomó a cargo este protocolo técnico como socio de la iniciativa GIZ en el marco de la "Alianza para la Protección del Clima y el Ozono para la Gestión de Bancos de HFC y SAO (por sus siglas en Inglés COPA)". El protocolo ha sido elaborado por el Sr. Yunrui Zhou, Gerente de Proyecto COPA, y la Sra. Verónica Villacis, consultora internacional de ONUDI, con el apoyo de Mary Najjuma.

Obtenga más información sobre COPA en  
<https://copalliance.org/climate-and-ozone-protection>

# CONTENIDO

PRÓLOGO .....	4
1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. CONCEPTUALIZACIÓN TÉCNICA DE LA TECNOLOGÍA DE DESTRUCCIÓN: HORNOS DE CEMENTO.....	6
3. RECUPERACIÓN DE GASES REFRIGERANTES.....	9
4. ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE GASES RECUPERADOS .....	11
5. INSTALACIONES DE DESTRUCCIÓN DE SAO EN HORNOS DE CEMENTO.....	14
5.1. Evaluación de instalaciones de destrucción de SAO.....	14
5.2. Condiciones de control de operación para la destrucción de SAO.....	20
5.3. Condiciones de dosificación de gas para la destrucción de SAO .....	25
5.4. Protocolo de monitoreo .....	27
6. NOTAS ADICIONALES PARA ESPUMAS .....	34
7. BIBLIOGRAFÍA .....	37



## PRÓLOGO

Esta guía tiene la intención de brindar a las Unidades Nacionales de Ozono (UNO) y Autoridades Ambientales los principales elementos y consideraciones para la implementación de un Protocolo de Quemado para la Destrucción de SAO y HFC, a partir de la identificación de Bancos de SAO provenientes de equipos de refrigeración y aire acondicionado (RAC) obsoletos o dañados, hasta la recolección, transporte y destrucción segura de gas refrigerante en hornos de cemento.

La gestión de residuos eléctricos y electrónicos (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, RAEE) procedentes de equipos de RAC necesitará también de la correcta eliminación de plásticos, metales, baterías y piezas electrónicas; sin embargo, dichos elementos no forman parte del alcance de este protocolo, sino únicamente el protocolo de quema de SAO/HFC y su correspondiente prueba de quemado en procesos de alta temperatura, superiores a 1200°C. La destrucción segura de SAO/HFC considera no sólo eliminar eficazmente las sustancias agotadoras de la capa de ozono, parte de la misión del Protocolo de Montreal, sino también evitar daños en el horno y prevenir la generación de subproductos peligrosos durante los gases de escape como dioxinas y furanos. (contaminantes orgánicos persistentes no intencionales-COPsNIs), controlados según el Convenio de Estocolmo.

La mayoría de los países del mundo son signatarios tanto del Protocolo de Montreal como del Convenio de Estocolmo, y los objetivos de estos dos instrumentos internacionales convergen para observar la gestión ambientalmente racional de los RAEE procedentes de los RAC. Por lo tanto, el objetivo de este protocolo es asegurar el manejo ambientalmente responsable de SAO/HFC y COPsNIs, enfatizando la necesidad urgente de que la comunidad global aborde los bancos de SAO de manera efectiva y establezca pautas sencillas y viables. Estas directrices están también diseñadas para alentar a los productores de cemento a establecer las instalaciones necesarias para la eliminación segura de SAO/HFC, adaptadas específicamente a las demandas operativas únicas de la producción de clinker, incluida su infraestructura asociada, sistemas de monitoreo y capacidades de análisis de laboratorio.

# 1. INTRODUCCIÓN

El Protocolo de Montreal tiene como objetivo proteger la capa de ozono estratosférico regulando la producción y el consumo de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO), como los clorofluorocarbonos y los hidroclorofluorocarbonos (CFC, HCFC), que son considerados sustancias peligrosas por la regulación local de la mayoría de los países y se convierten en bancos de SAO después de que los dispositivos eléctricos de refrigeración y aire acondicionado (RAC) quedan obsoletos o se desechan.

Los refrigeradores y los acondicionadores de aire desempeñan un papel dominante en los países desarrollados y en desarrollo, pero la discrepancia en la gestión entre los países con regulaciones estrictas y los que no las tienen es enorme. Los bancos de SAO deben enfrentar un marco regulatorio sólido aplicable en cada país, la mayoría de ellos referidos a gestores certificados de desechos electrónicos que han recibido capacitación y tienen la capacidad de dismantelar los equipos y recuperar los gases refrigerantes para contribuir a, en última instancia, eliminar las SAO de manera segura. Utilizar a gestores de desechos electrónicos certificados podría garantizar mejores prácticas para abordar los efectos de los elementos peligrosos de los aparatos de refrigeración y aire acondicionado, como CFC, HCFC, HFC, soluciones de amoníaco que contienen cromo-VI, agentes espumantes, mercurio (rara vez se encuentra dentro de los refrigeradores y acondicionadores de aire domésticos, pero a menudo está presente detrás de la lámpara en la cubierta superior de congeladores horizontales o interruptores de equipos viejos), componentes de placas de circuitos impresos (que contienen plomo, cadmio, cromo hexavalente), bifenilo policlorado (PCB) en condensadores y bifenilo polibromado (PBB) y éter de difenilo polibromado (PBDE) en plásticos como retardantes de llama. En este caso, debemos promover no sólo la protección de la capa de ozono sino también la prevención de la liberación de sustancias tóxicas, el fortalecimiento de los beneficios económicos de la reventa de materiales valiosos y la introducción de conceptos de economía circular. Por tanto, la necesidad de gestores

certificados es imperativa; ellos son cruciales para lograr la destrucción segura de los bancos de SAO. Los CFC y los HCFC tienen un potencial de agotamiento de la capa de ozono, pero también un nivel alto o moderado de efecto invernadero. Por lo tanto, se han descrito varias tecnologías como adecuadas para destruir los CFC/HCFC. Una que parece presentar más ventajas debido al uso de procesos e instalaciones de alta temperatura ya instalados es un "horno de cemento". Esta tecnología ha sido reconocida como una de las tecnologías aprobadas para la destrucción de SAO por la Reunión de las Partes en el Protocolo de Montreal en 2023 (Decisión XXXV/5), según lo recomendado por el Comité de Opciones Técnicas Médicas y Químicas del Panel de Evaluación Tecnológica y Económica (TEAP TOC).

Por otro lado, los HFC se han utilizado como sustancias sustitutivas de las SAO. El problema global actual es que, aunque los HFC se han utilizado como productos de reemplazo porque no impactan la capa de ozono, se han identificado como potentes gases de efecto invernadero que contribuyen significativamente al cambio climático. Por esta razón, los países miembros del Protocolo de Montreal en su 28ª Reunión en Kigali, Ruanda, en octubre de 2016, adoptaron la Enmienda de Kigali, que incluyó a los HFC en la lista de sustancias que deben ser reguladas y cuyo consumo debe ser reducido y el HFC contaminado/no recuperable destruido.

En consecuencia, los CFC, los HCFC y los HFC pueden compartir una instalación de destrucción común. Un horno rotatorio de cemento para la producción de clinker reacciona en su zona de combustión, donde el crudo alcanza temperaturas de hasta 1450°C [1], lo que se conoce como temperatura de clinker. Esta alta temperatura asegura la destrucción de los CFC/HCFC/HFC si se toman y controlan algunas consideraciones específicas durante el proceso. El incumplimiento de las normas técnicas para la destrucción de CFC/HCFC/HFC podría generar más impactos ambientales en lugar de prevenirlos.

Las desviaciones durante el proceso de destrucción de CFC/HCFC/HFC también podrían implicar altos costos económicos de mantenimiento porque el sistema recircula polvo y gas que contienen cloro. Además, evitar la formación de dioxinas en los gases de escape es una de las preocupaciones más críticas. Por esta razón, el control operativo en dosificación, monitoreo, muestreo, suministro de oxígeno y control de temperatura es esencial para reconocer las reaccio-

nes internas del cloro dentro del horno y, simultáneamente, evitar la formación de dioxinas [2] [3]. Por ello, en el siguiente apartado se referirá a las consideraciones principales del control técnico del cloro, evaluando las implicaciones de seguridad ambiental esperadas en los hornos de cemento mediante el control de las medidas técnicas internas durante el proceso.

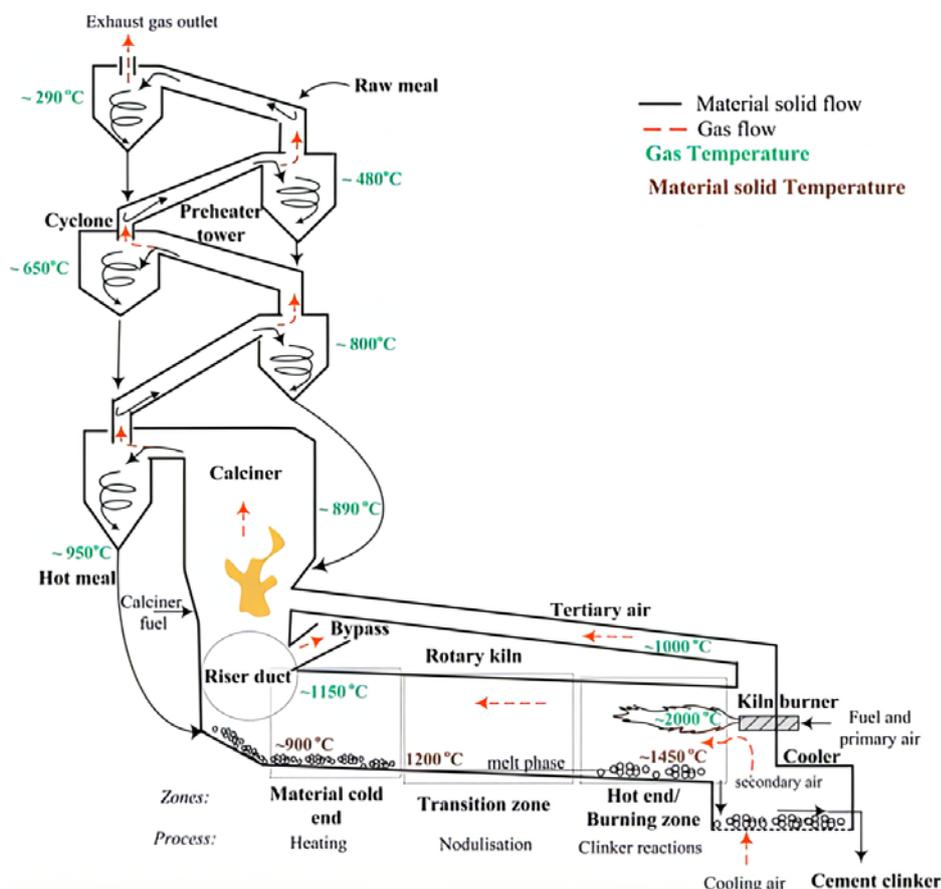
## 2. CONCEPTUALIZACIÓN TÉCNICA DE LA TECNOLOGÍA DE DESTRUCCIÓN: HORNOS DE CEMENTO

Los hornos de cemento tienen muchas características intrínsecas que los hacen ideales para el tratamiento de residuos peligrosos, como altas temperaturas, largo tiempo de residencia, un buen suministro de oxígeno durante y después de la combustión, buenas condiciones de turbulencia y mezcla, inercia térmica, lavado en seco del gas de salida, fijación de las trazas de metales pesados en la estructura del clinker y sin generación de subproductos como escorias, cenizas o residuos líquidos [2].

Como se puede ver en la *Figura 1* [1], la producción de cemento implica calentamiento, calcinación y clinkerización de materias primas molidas y mezcladas [3]. El primer paso es la preparación de las materias primas, seguido del piropcesamiento, que abarca el tratamiento térmico necesario para la obtención del clínker de cemento. Implica el precalentamiento de materias primas, la calcinación, la reacción del clínker y el enfriamiento del Clinker [2] [1]. La región del precalentador de un horno de cemento tiene un gradiente de temperatura que varía de aproximadamente 250 a 850 °C con un alto tiempo de retención de partículas y gas en esta área de aproximadamente 25 segundos [2]. Además, la zona de llama del quemador principal puede alcanzar una temperatura de 1450°C en el clínker y de unos 2000°C en el flujo de gas. [3].



**Figura 1.** Química de las sustancias cloradas dentro de los hornos cementero: esquema de un sistema de horno moderno típico y sus partes, inspirado en FLSmidth [1]



Evitar la formación de dioxinas en los gases de escape del horno está vinculado a dos consideraciones: en primer lugar, las características químicas y físicas de los gases CFC/HCFC/HFC que se consideran para destrucción y, en segundo lugar, el flujo de CFC/HCFC/HFC que se alimenta a través del quemador principal a una llama de  $1200^{\circ}\text{C}$  (nunca durante el arranque, parada o alteración importante del horno) [4]. Algunos compuestos normalmente administrados a través del quemador principal (como combustibles, materia prima o, en este caso, SAO/HFC) que contienen azufre (S), cloro (Cl), sodio (Na) y potasio (K) se evaporan cuando están expuestos a altas temperaturas y posteriormente pueden condensarse en partes más frías de la planta. En estas partes, los compuestos cambian de fase de gas a líquido, de líquido a sólido y de sólido a gas en un patrón cíclico, casi interminable, dependiendo de la concentración. La condensación causada especialmente por la recirculación de S y Cl

genera dificultades en la operación del horno porque forma acumulaciones de material, anillos de material y, en el futuro, corrosión de la carcasa, afectando la estabilidad y operación del proceso [1].

El cloro dentro del horno reacciona principalmente con metales alcalinos, formando cloruro de potasio (KCl) o cloruro de sodio (NaCl), generalmente en fase gaseosa. El cloro se evapora con un rango de factor de 0,900-0,996 (99,6%) en la zona de combustión del horno y se condensa (en un rango de factor de 0,004%) en las partes más frías del sistema. El cloro residual en el sistema forma clorellestadita (líquido). Por el contrario, el contacto del cloro residual con el calcio forma cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) (sólido/líquido), lo que provoca el depósito de acumulaciones y la formación de revestimientos en las partes no móviles del horno. Por lo tanto, la formación de acumulaciones en las paredes del ciclón, la obstrucción de las tuberías,

la disminución de la producción de clinker y la demanda de eliminación de las acumulaciones son consecuencias de la alta circulación interna de elementos inorgánicos, que pueden reducir la producción del horno, provocar un mayor consumo de calor y generar costosas paradas del horno/planta. [1].

La presencia de cloro en el sistema también puede provocar la formación de dioxinas, que es una sustancia cancerígena relacionada con los efectos de la contaminación del aire. La mayoría de las dioxinas se destruirían en el horno de cemento a temperaturas superiores a 1200 °C. Aún así, la exposición de sustancias cloradas a diferentes temperaturas en todo el sistema de producción de cemento puede provocar la formación de dioxinas y la liberación de gases que superen el límite legal de emisiones de gases de escape (0,1 ng EQT- $l/m^3$ ). [2]. En otras palabras, las dibenzodioxinas policloradas (PCDD) y los dibenzofuranos policlorados (PCDF), todos conocidos como dioxinas y furanos, pueden formarse y liberarse involuntariamente de los hornos de cemento si los CFC/HCFC/HFC se exponen a temperaturas más bajas en el rango de 250-400°C y mezclado con el polvo de escape sin degradación oxidativa previa de estructuras macromoleculares a 1200°C [2]. Idealmente, la eficiencia de destrucción de las dioxinas puede ser superior al 99,0% a más de 850°C; por esta razón, el polvo del horno de cemento (CKD) generalmente se reintroduce en el sistema y se alimenta nuevamente con materia prima.

Por lo tanto, se puede instalar una solución de control de cloro y dioxinas en un sistema de derivación en el punto de extracción de gas en el lado del horno del conducto ascendente. El sistema de derivación implica extraer una parte de los gases de escape del horno, enfriar los gases de escape extraídos y separar el polvo [1]. En esta posición, los gases del horno tienen una baja concentración de polvo y una alta concentración gaseosa de Cl, que se enfría con aire para iniciar la condensación de los cloruros y facilitar la posterior separación de los cloruros del gas, en un precipitador electrostático o un filtro de mangas. Aproximadamente el 90% del cloro se puede eliminar

extrayendo el 5% de los gases de escape del horno, aunque no se puede eliminar más del 15% del álcali o azufre [1]. La instalación de bypass requiere gastos adicionales y aumenta las pérdidas de calor y material, lo que infiere un mayor consumo de calor específico por tonelada de clinker de gas de entrada al horno extraído.

En resumen, comprender la química de las sustancias cloradas dentro de los hornos es una cuestión de importancia crítica. La destrucción de CFC/HCFC/HFC en hornos de cemento requiere no sólo información sobre las propiedades físicas y químicas de los CFC/HCFC/HFC, sino también un control estricto de

- 1) el flujo apropiado alimentado a través del quemador principal,
- 2) las reacciones químicas dentro del horno,
- 3) balance de masa de S, Cl, F, KCl, NaCl,  $CaCl_2$  y clorellestadita en el sistema,
- 4) monitoreo de temperatura y
- 5) control de polvo y gases de escape.

Además, el ingreso de sustancias cloradas en la producción de cemento debe controlarse cuidadosamente para cumplir con la calidad del producto, evitar problemas operativos y evitar aumentos de costos. La instalación de un sistema de bypass de extracción de gases podría ser una buena solución para evitar las emisiones de gases de escape que contienen dioxinas. En consecuencia, controlar las acciones técnicas y las reacciones químicas durante la destrucción de las reservas existentes de (CFC/HCFC/HCF) en los hornos de cemento evitará la generación de pasivos ambientales, previniendo al mismo tiempo el agotamiento de la capa de ozono y el cambio climático simultáneamente.

Como consecuencia de las exposiciones técnicas precedentes de la tecnología, estas directrices proporcionarán recomendaciones generales para la recuperación de gases refrigerantes, el análisis de las instalaciones de destrucción y la prueba de quemado de CFC/HCFC/HFC en hornos de cemento, desarrolladas bajo las consideraciones que se presentan a continuación.

### 3. RECUPERACIÓN DE GASES REFRIGERANTES

Con el tiempo, los CFC/HCFC/HFC se han liberado a la atmósfera a través de fugas y venteos, a menos que se recuperen y se traten adecuadamente. Si bien el Protocolo de Montreal no controla las emisiones de los bancos de SAO, muchos países tienen requisitos voluntarios o reglamentarios para reducir las emisiones de SAO al final de la vida útil del equipo RAC. Por lo tanto, la recuperación o destrucción es crucial después de recuperar y recolectar el equipo que contiene SAO. Sin embargo, existen otros problemas relacionados con la ausencia de un marco de políticas adecuado para los bancos de SAO/HFC. Obtener permisos/licencias para operar y manipular estas sustancias peligrosas suele ser un desafío, porque en muchos países la recuperación de SAO/HFC no es una actividad regulada o es una tarea muy nueva para la autoridad. En cambio, estos proyectos de recuperación son actividades completamente nuevas en algunos países, lo que provoca retrasos en la respuesta de las autoridades ambientales y en la adquisición de permisos y autorizaciones [20].

Dado que las SAO son ampliamente reemplazadas por HFC con alto potencial de calentamiento global (PCG), se prevé que los bancos de SAO disminuyan con el tiempo, pero los bancos de HFC aumenten, exigiendo la destrucción segura no sólo de las SAO sino también de los HFC que no se pudieron regenerar. Las SAO y los HFC deben ser recuperadas del equipo por un técnico debidamente capacitado utilizando el equipo apropiado para minimizar la pérdida de refrigerante durante la evacuación. En algunos países, los equipos de recuperación utilizados para evacuar pequeños electrodomésticos también deben estar certificados..

Una vez que se recogen los equipos RAC obsoletos, es importante considerar que los intercambiadores de calor del refrigerador deben orientarse en la misma dirección y los electrodomésticos deben estar en posición vertical, sin descansar sobre sus serpentines de enfriamiento durante el transporte. Los refrigeradores y aires acondicionados deben manipularse con cuidado al cargar o descargar

vehículos para evitar que se caigan, lo que puede provocar daños y fugas. Cuando los dispositivos lleguen a las empresas gestoras de RAEE o técnicos certificados para su desmontaje, los dispositivos deberán clasificarse preferentemente según el tipo de refrigerante que contengan, lo que facilitará el procesamiento posterior, especialmente en países donde se dispone de recuperación de refrigerante. Además, el seguimiento del tipo de refrigerante será un dato de gran valor, no sólo para promover el proceso de recuperación sino también para dosificar el refrigerante en sistemas de destrucción a alta temperatura y a la hora de evaluar las emisiones de CO<sub>2</sub>e evitadas por la destrucción de cada tipo de refrigerante. debido a su valor indistinto de potencial de calentamiento global.

Hay muchas pautas disponibles para desmontar refrigeradores y aires acondicionados; por lo tanto, el siguiente detalle resume los principales elementos y consideraciones aplicables a las mejores prácticas en equipos RAC.

#### **Principales equipos, herramientas y materiales:**

- Máquina recuperadora de gas refrigerante y elementos de punción, mangueras, válvulas y manómetros.
- Balanza
- Identificador de gases
- Cilindros de recuperación
- Equipo de protección personal

#### **Técnicos involucrados:**

- Técnico en refrigeración y aire acondicionado con conocimientos en recuperación de gases.
  - Conocimientos técnicos básicos, es decir, conexión y desconexión de mangueras y válvulas hacia y desde el equipo de medición de presión de la máquina recuperadora.
  - Agregue o retire refrigerante.
- Compresión mecánica de vapor, compresores de accionamiento abierto, operación de sistemas de refrigeración y aire acondicionado.
- Identificación de gases refrigerantes.

#### Procesos paralelos:

- Almacenamiento y manejo de gases recuperados y transporte de cilindros a encargados calificados (según corresponda según la legislación de cada país).

#### Medidas en el proceso:

- Identificación de gases.
- Instalación de elementos y conexiones de máquinas recuperadoras de gas.
- Garantía de requisitos de vacío del cilindro.
- El equipo de recuperación debe recuperar el 90% del refrigerante cuando el compresor está funcionando y el 80% cuando el compresor no está funcionando.
- Para evitar pérdidas, se debe bombear el refrigerante residual ("talón") del cilindro que se está vaciando y todas las mangueras se deben evacuar completamente después de la transferencia.
- Utilice equipo de protección personal como gafas con protección lateral, guantes, calzado de seguridad y cascos.
- Uso de pinzas perforadores para identificación de gas y conexión de recuperación. Apertura de llaves de paso, purgas, control de presión y control de peso del gas extraído.
- Todas las mangueras deben tener dispositivos de cierre ubicados a menos de 30 cm del punto de conexión y del sistema en servicio para minimizar la introducción de gases no condensables al equipo de recuperación durante la conexión y la liberación de refrigerante durante la desconexión [6].
- El equipo debe separar el lubricante del refrigerante recuperado e indicar con precisión la cantidad de refrigerante eliminado del sistema durante el procesamiento de unidades de 30 ml. [6].
- Se debe bombear el refrigerante y evacuar completamente todas las mangueras después de la transferencia para evitar pérdidas de refrigerante residual al vaciar el cilindro.
- El equipo de transferencia debe recibir buen mantenimiento y se debe utilizar acoplamientos de rotura en seco para las conexiones de las mangueras.

#### Requisitos específicos

- Certificado de calibración del identificador de gas refrigerante
- Certificado de calibración de báscula
- Certificación de técnicos operativos.
- Certificación de Titulares de equipos de recuperación y reciclaje de gases
- Etiquetado de bombonas recargables y no recargables.

#### Reglamentos/Lineamientos Particulares o certificaciones para revisión:

- Los equipos de recuperación y reciclaje para uso en aplicaciones pequeñas deben probarse según el Apéndice C de la EPA o según los requisitos basados en el protocolo de prueba ARI 740 (es decir, los Apéndices B y B1 del 40 CFR 82 subparte F).
- Certificaciones nacionales de técnicos de RAC (según corresponda en la legislación de cada país) – Referencia: Organización de certificación aprobada por la EPA - Técnicos de la Sección 608 de la Ley de Aire Limpio.
- AHRI GUIDELINE Q Edición 2010, 1 de enero de 2010. Recuperación y reciclaje adecuado de cilindros de refrigerante. Publicado por: Instituto de Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración (AHRI)
- AHRI GUIDELINE Q 2016. Directriz para la recuperación de contenido y el reciclaje adecuado de cilindros de refrigerante. Publicado por: Instituto de Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración (AHRI)
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Gestión y destrucción de bancos existentes de sustancias que agotan la capa de ozono: Directrices sobre el desmantelamiento manual de refrigeradores y acondicionadores de aire.

## 4. ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE GASES RECUPERADOS

Cuando sea posible, se deben utilizar recipientes a presión y tanques ISO en lugar de cilindros, para evitar el envío de muchos contenedores más pequeños de SAO, lo que genera complicaciones en el inventario y el mantenimiento de registros, daños o pérdidas durante el envío y gastos de transporte adicionales. Por lo tanto, las SAO recuperadas de los aparatos a menudo se transfieren a cilindros de recuperación de aproximadamente 14 a 22 litros (L) (aproximadamente 14 a 23 kilogramos (kg)). Las SAO recuperadas de existencias industriales y a granel, recuperadas en cantidades mayores, generalmente se almacenan en contenedores grandes, como recipientes a presión

de tamaño entre 950 y 1.890 L (con capacidad para entre 1.000 y 2.000 kg de refrigerante). Se estima que normalmente entre el 1 y el 3 por ciento del gas se pierde durante la transferencia desde cilindros pequeños al almacenamiento a granel [15].

El almacenamiento temporal debe mantenerse al mínimo y todos los cilindros deben almacenarse en un área interior segura con procedimientos de monitoreo de fugas, utilizando equipos de detección de fugas automatizados instalados o procedimientos manuales de monitoreo de fugas.

### Materiales/Equipos

- Balanza
- Identificador de gases
- Equipo de protección personal
- Cilindros de recuperación de SAO

### Procesos paralelos

- Certificación de recuperación adecuada y condiciones para su disposición final.

### Medidas en el proceso

- Utilice equipo de protección personal como gafas con protección lateral, guantes, calzado de seguridad y cascos al levantar y manipular cilindros.
- Evite y prevenga el contacto del refrigerante con la piel.
- Tenga en cuenta que la inhalación de altas concentraciones de vapor de gas refrigerante puede ser perjudicial y provocar irregularidades cardíacas, pérdida del conocimiento o la muerte. Por tanto, estos procesos no deben realizarse en zonas bajas y sin ventilación.
- El calor del fuego puede generar presión en el cilindro y provocar su ruptura. Ninguna parte de un cilindro debe someterse a una temperatura superior a 52°C (125°F).
- Utilice únicamente cilindros diseñados y marcados para el servicio de recuperación de refrigerante. No reutilice los cilindros utilizados para servicios de refrigerante virgen.

- Asegúrese de que el cilindro esté cargado únicamente con el refrigerante para el que está diseñado.
- No mezcle diferentes gases refrigerantes en el mismo cilindro a menos que se haya seleccionado la destrucción como opción de eliminación final.

### Requisitos específicos

- Identifique el gas que está manipulando y sus posibles reacciones.
- Evaluar propiedades del gas como peso molecular, fase gaseosa, fase líquida, fase sólida, punto de fusión, calor latente de fusión/vaporización, densidad, punto de ebullición, punto crítico de temperatura, presión y densidad, punto triple de temperatura y presión, factor de compresibilidad, capacidad calorífica a presión constante y volumen constante, viscosidad y conductividad térmica.
- La mayoría de las hojas de datos de SAO describen riesgos mayores, como un peligro significativo si las SAO se descomponen cuando se calientan, liberando toxicidad, inflamabilidad potencial, olor ligeramente etéreo y otros riesgos que dependen de la sustancia.
- Etiquetado de cilindros, la identificación de seguridad debe ubicarse en un lugar visible.
- La válvula del cilindro debe cumplir con los estándares para válvulas del cilindro.

- El dispositivo de alivio de presión debe cumplir con el estándar apropiado.
- Se deberá marcar la fecha de ensayo del cilindro, que preferentemente no deberá ser superior a cinco años desde la fecha de fabricación del cilindro.
- Los cilindros deben almacenarse en posición vertical; Si los cilindros se han colocado acostados, al menos coloque el cilindro en posición vertical y espere 30 minutos antes de usarlo. Los cilindros se pueden fijar a la pared con la ayuda de una cadena o cable que no dañe ni raye las marcas o etiquetas del cilindro. Por seguridad, los lugares de almacenamiento de gas deben estar al aire libre y protegidos de la luz solar. El almacenamiento interior se puede realizar si el lugar cuenta con la ventilación adecuada. [7].
- Asegúrese de que las válvulas estén completamente cerradas y mantenga los dispositivos de protección de las válvulas, como tapas, cuando el cilindro no esté en uso. El lugar de almacenamiento debe estar seco, sin exposición a daños mecánicos o físicos, calor o circuitos eléctricos, y alejado de áreas de tránsito peatonal frecuente. Los tanques vacíos y llenos deberán almacenarse en áreas identificadas para cada uno de ellos. No se deben almacenar objetos encima de los tanques, ni los cilindros deben bloquear escaleras, salidas o pasos peatonales o vehiculares. [7].
- Asegúrese de que el inventario se actualice cada vez que un cilindro entre o salga.
- Cualquier persona que manipule los cilindros debe recibir capacitación inicial en almacenamiento y transporte de gas utilizando calzado de protección personal, gafas y guantes adecuados.
- Al mover los cilindros, evitar rodarlos o arrastrarlos, y asegurar el mecanismo de manipulación adecuado, como un carro de cilindros o un montacargas manual diseñado para este fin. Los cilindros de gran tamaño deben manipularse con asistencia mecánica (como se ve en la siguiente figura) [7].

**Figura 2.** Dispositivos mecánicos de manipulación de cilindros.



- No utilice e informe de cilindros que muestren daños o corrosión. No utilice ni transporte el gas si no se puede identificar la etiqueta del gas.
- Los cilindros recuperadores de gas requerirán el uso de vehículos adecuados, que cuenten con los permisos respectivos siguiendo los requisitos de las autoridades ambientales locales.
- En el caso de transporte de cilindros, sólo se deben utilizar vehículos con caja abierta o dispositivo de capota trasera separada de la carrocería del vehículo. Lo ideal es transportar

- las botellas de pie y firmemente aseguradas. Si los cilindros se transportan tumbados, se deben prever dispositivos de soporte adecuados para evitar que rueden (como se muestra en la siguiente figura). [7].
- Una vez que lleguen a su destino, los cilindros deben descargarse inmediatamente y colocarse en un lugar seguro siguiendo las normas de almacenamiento seguro.
- Las bombonas no deben transportarse en ningún habitáculo [8].

**Figura 3.** Requisitos de transporte correctos para el transporte de cilindros de gas en la parte trasera de un vehículo utilitario



- Los camiones semirremolque o acoplados deben considerar: la caja de estos vehículos automotores estará preferentemente recubierta de madera (el piso y los costados) y abierta para que los cilindros reciban buena ventilación, las caras laterales de la caja deben tener una altura que permita los cilindros deberán estar cubiertos hasta al menos dos tercios de su altura total. La caja debe estar equipada con cuerdas para asegurar los cilindros y reducir la fricción, las sacudidas y cualquier otro efecto nocivo. Las instalaciones eléctricas adosadas a la caja o los elementos sobre los que ésta se apoye deberán estar perfectamente aisladas. El vehículo deberá estar provisto de dos espejos retrovisores exteriores y una señal retrovisora sonora. Adicionalmente deberá estar provisto de una carretilla para transportar el cilindro y un cojín de goma para que el cilindro caiga sobre él al momento de ser retirado del vehículo. Los carros de mano deben utilizar ruedas de goma u otro material amortiguador.
- Todo vehículo deberá disponer de los dispositivos de seguridad adecuados y estar en perfecto estado mecánico.

#### Certificaciones asociadas

- Permiso de transporte de gas refrigerante otorgado por las autoridades ambientales locales (según corresponda).
- Tenga en cuenta que las SAO usadas deben clasificarse con el código de residuos adecuado y los envíos deben estar claramente etiquetados. Si se hace correctamente, las emisiones fugitivas del transporte de SAO pueden considerarse insignificantes. Al transferir SAO de un almacenamiento presurizado a un contenedor de envío no presurizado, existe el riesgo de pérdida a través de los orificios de ventilación, que se utilizan para igualar la presión a medida que se llena el contenedor de envío. Por lo tanto, en su lugar se debe utilizar un sistema de transferencia de circuito cerrado con acoplamientos de rotura en seco. El uso de estas dos tecnologías puede suponer una pérdida de entre el 0,0004 por ciento y el 0,05 por ciento [15]. Esta tasa de fuga es una reducción sustancial de la pérdida del 5 por ciento experimentada sin utilizar un sistema de circuito cerrado o acoplamientos de rotura en seco [15]. Cada país tendrá códigos de desechos específicos que se utilizarán para clasificar los desechos peligrosos, incluidas las SAO.

## 5. INSTALACIONES DE DESTRUCCIÓN DE SAO EN HORNOS DE CEMENTO

### 5.1. EVALUACIÓN DE INSTALACIONES DE DESTRUCCIÓN DE SAO

Una eficiencia de destrucción y eliminación (DRE) del 99,99 por ciento para fuentes concentradas de SAO y del 95 por ciento para fuentes diluidas de SAO (es decir, espumas<sup>1</sup>) es recomendado por el Panel de Evaluación Tecnológica y Económica (TEAP), junto con otros límites de emisiones (principalmente regulaciones nacionales) y el uso de una tecnología de destrucción aprobada por el Protocolo de Montreal. DRE es una medida de la eficiencia de destruir, degradar o eliminar una sustancia química en un dispositivo de tratamiento (incluido su sistema de control de la contaminación del aire) antes de ser emitida a la atmósfera a través de la chimenea. El DRE se calcula alimentando una masa química medida al sistema y dividiéndola por la masa de esa sustancia química que se escapa en la corriente de escape; el porcentaje que no se ha emitido es el DRE. El DRE se puede utilizar para estimar las SAO emitidas

a través de los gases de escape. Por ejemplo, una tecnología de destrucción de SAO con un DRE del 99,99 por ciento produce un 0,01 por ciento de emisiones de SAO.

Debido a la naturaleza relativamente volátil de las SAO y, a excepción de las espumas, generalmente se introducen como fluidos relativamente limpios. Por lo tanto, no se esperaría una diferencia muy significativa entre DRE y DE (eficiencia de destrucción). Por estas razones, esta actualización de las tecnologías de destrucción de SAO utiliza DRE como medida de la eficiencia de la destrucción. A los efectos de examinar las tecnologías de destrucción, la DRE mínima aceptable es [16]:

- 95% para espumas; y,
- 99,99% para fuentes concentradas

$$\text{Eficiencia de Destrucción y Remoción (\%)} = \frac{\text{SAO alimentado en el sistema} - \text{SAO en el gas de emisiones}}{\text{SAO alimentado en el sistema}} \times 100$$

Dado que diferentes SAO tienen diferente potencial de agotamiento de ozono (PAO), se debe considerar la posibilidad de tener en cuenta el PAO de cada tipo de SAO presente en el gas de la chimenea al calcular el DRE. Una definición adecuada que tiene en cuenta las diferencias en PAO es: El DRE de una SAO se determina restando del número de moles de SAO alimentados a un sistema de destrucción durante un período de tiempo específico, el número total de moles de todos los tipos de SAO que se liberan en los gases de chimenea, ponderadas por su PAO en relación con el de las SAO de alimentación, y expresando esa diferencia como porcentaje del número de moles de SAO alimentadas al sistema [16].

1 Desde 2002, solo se han utilizado pequeñas cantidades de HFC en la producción de espumas (FTOC, 2015). Estos aparatos recién ahora están llegando al flujo de desechos. Se recuperan y tratan de la misma manera que los (H)CFC [18].

La cantidad destruida (DRE/DE) debe medirse, calcularse y documentarse [18]. Así, las instalaciones de destrucción como los hornos de cemento donde se lleva a cabo la destrucción de SAO cuentan con

una tecnología aprobada por las Partes en el Protocolo de Montreal y deben observar las siguientes condiciones:

### Materiales/Equipos

- Sistema de monitorización continua de gases de combustión. Medidor de partículas totales en gases de combustión de hornos rotativos, enfriamiento de clinker y molienda de clinker, medidor de óxidos de nitrógeno en gases de combustión de hornos rotativos, medidor de dióxido de azufre en gases de combustión de hornos rotativos.
- Sistema de registro de datos<sup>2</sup>.
- Cámara termográfica.
- Medidor de temperatura en el quemador principal y precalcinador.
- Equipos de protección personal (casco, guantes, calzado alto con punta de acero, gafas protectoras, protección auditiva), incluidos los dispositivos para trabajos en altura (arnés de seguridad, dispositivos de anclaje de líneas salvavidas).
- Detector de gas.

### Técnicos involucrados

- Personal técnico de producción de cemento.
- Personal técnico con experiencia en gestión de refrigerantes.
- Personal mecánico cualificado en el manejo de sistemas a presión. Con formación práctica y técnica en el manejo de cilindros y llenado de gases a alta presión (el perfil podría incluir técnicos/tecnólogos en mecánica o mantenimiento industrial o electromecánica, con formación en ensayos dimensionales, físicos y no destructivos)

### Procesos Paralelos/Condiciones de Planta

- Las condiciones adecuadas del área de almacenamiento de recepción de gas refrigerante deben cumplir con las condiciones del apartado anterior. Además, los cilindros deben ubicarse lo más cerca posible de las instalaciones de destrucción de la planta. El área de recepción deberá considerar suficiente capacidad de alma-

cenamiento temporal y manejo de al menos dos veces la capacidad diaria de coprocesamiento.

- Generar un análisis de compatibilidad química de los cilindros de SAO y los relacionados con otros gases que pudieran almacenarse en la misma instalación.
- En el lugar de almacenamiento, el gerente de planta deberá mantener un registro del inventario de gas, capacidad de almacenamiento, tasa de ingreso, capacidad máxima de ocupación, tipo de cilindros y capacidades, identificación del tipo de gas y registro de movimientos de entrada y salida del área de almacenamiento. .
- Se consideran los siguientes lineamientos en el manejo y almacenamiento de cilindros de gas refrigerante:
  - Asegure el cilindro en posición vertical.
  - Nunca almacene cilindros donde puedan estar en contacto con agua o cerca de fuentes de calor directas, radiadores o refrigeradores.
  - No coloque obstáculos delante de los cilindros ni objetos sobre ellos.
  - Asegure los cilindros en posición vertical con un candado o cadena.
  - Conecte siempre la válvula de regulación primaria directamente o mediante una manguera de alta presión.
  - Mantenga siempre los cilindros alejados de fuentes de calor.
  - Siempre revise la etiqueta del cilindro antes de usarlo y asegúrese de que se destruya la mezcla de gas correcta (sustancia correcta).
  - Nunca toque un cilindro congelado; la congelación suele indicar una rápida liberación de gas.
  - Nunca intente desenroscar los accesorios de la válvula del cilindro.
  - Usar una carretilla elevadora para mover los cilindros reducirá el riesgo de accidentes y ahorrará tiempo.

2 Considere que los datos de mediciones en fuente fija deben registrarse en mg/Nm<sup>3</sup> (miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales), presión de 760 mmHg y temperatura de cero grados centígrados (0°C), en base seca y sal corregida 10 % oxígeno (O<sub>2</sub>) [11].

- Se deben adoptar medidas adecuadas de gestión de la señalización y comunicación de los equipos de carga y elevación para prevenir riesgos.
- Las operaciones de elevación son complejas y peligrosas, por lo que deben controlarse y planificarse. La planificación implica una evaluación de riesgos, generalmente basada en una matriz de riesgos y un análisis de riesgos laborales que incluye el diseño del ascensor, la identificación de riesgos y áreas de restricción, la selección de personal competente, la especificación del número mínimo de personas necesarias para conducir la operación de elevación, la selección del equipos de carga y levantamiento a utilizar, comunicar los requisitos y peligros del levantamiento, aplicar procedimientos para cambio de plan de levantamiento, emergencias, contingencias y recuperación.
- Las condiciones específicas de trabajo deberán incluir parámetros de evaluación de clima, visibilidad, ruido, comunicadores, estabilidad del terreno, inclinaciones, alturas, instalaciones involucradas y accesos. Establecer controles incluye comunicar las operaciones con todo el personal relevante.
- Hay que recordar que los cargos se controlan según la complejidad del riesgo. El director de planta debe aprobar cargas y elevaciones rutinarias y no rutinarias y debe probar al menos diez cuestiones específicas:
  1. Todos conocen y entienden la carga y elevación a realizar.
  2. Tuvieron una rápida charla de seguridad antes de comenzar las tareas.
  3. Se ha realizado una inspección previa del equipo de carga (inspección registrada).
  4. Todos los dispositivos de seguridad están funcionando.
  5. Todas las personas están calificadas y competentes para sus actividades.
  6. Todo el mundo conoce al líder y al gestor de transporte.
  7. Todos han comprendido el plan de carga, incluidas las precauciones.
  8. Conocen todos los límites de carga y velocidad y las condiciones ambientales máximas, como el viento asociado a la carga.
  9. La zona de carga/elevación está despejada para evitar daños por caídas o balanceo de cargas. No se debe permitir que haya personal debajo de la carga.
  10. Las señales y métodos de señalización y comunicación son claros y acordados por todos.
- El gerente de planta únicamente recibirá gases refrigerantes para destrucción de transportistas que cuenten con licencia ambiental o registro nacional para el ingreso de residuos peligrosos.
- La empresa cementera debe alinear las recomendaciones con su propio procedimiento para cargar, descargar y almacenar las SAO/HFC a procesar, y además de las consideraciones anteriores para la carga/elevación y manipulación de cilindros, podrá tener en cuenta los siguientes lineamientos para inspección visual externa **[10]**:
  - Verificación del funcionamiento de la válvula: observar si la tapa es fija o removible (retírela con cuidado), e identificar y registrar el contenido del cilindro: leyenda en el cilindro, tipo de válvula, color del cilindro y etiqueta de identificación. La etiqueta de identificación debe indicar el gas contenido en el cilindro, la indicación de riesgos, precauciones de uso y el nombre del gas refrigerante.
  - Se debe vaciar el gas de manera segura, verificar que la válvula esté limpia y libre de grasa o aceite, abrir la válvula lentamente, conectar un manómetro medidor de presión y un medidor de flujo, y verificar el caudal máximo a evacuación en el sistema de prealmacenamiento o alimentación. en instalaciones de destrucción.
  - Si no se detecta presión al abrir la válvula, se debe revisar para ver si está obstruida. En ningún caso se deberá permitir el escape de gases refrigerantes a destruir a menos que sea absolutamente imprescindible, para lo cual se deberá aflojar lentamente la válvula hasta obtener pequeñas fugas por su rosca, y verificar la forma de captura o transferencia.
  - Los cilindros deben ser sometidos a pruebas de fugas, inspección y colocación de etiquetas si no existe ninguna durante la inspección.

- Los cilindros, al recibirlos, deben estar libres de abolladuras y protuberancias en la pared del cilindro, hendiduras, cortes y marcas causadas por objetos punzantes o cortantes, deformaciones del cilindro, corrosión, marcas de soldadura eléctrica o soplete y contaminación como suciedad, grasa, aceites. Si algún cilindro presenta estas fallas será devuelto para inspección especial.
- En caso de que un cilindro sea rechazado, se deberá recuperar el gas refrigerante, y posteriormente se deberá inutilizar el cilindro hasta dejarlo inoperable y que sea imposible su reutilización.
- Una vez realizada la descarga y recepción de cilindros, así como el correcto transporte manual interno, se debe considerar que el área de ubicación de cilindros debe estar en un solo nivel, con piso horizontal liso, sin obstruir la comunicación con desagües o alcantarillas. La zona de maniobra del cilindro deberá tener al menos 6 m de ancho. El área deberá estar señalizada y permitir la operación únicamente al personal calificado para la actividad. La ventilación debe ser amplia y permanente para que la acumulación de gases sea imposible. Los cilindros deben almacenarse bajo techo (no traslúcido) para evitar que sufran aumentos excesivos de temperatura, daños físicos o la acción del medio ambiente.

#### Medidas en el proceso

- Para la estimación de evaluación de instalaciones, es importante realizar un relevamiento y verificación de lo siguiente:
  - A1. Existencia de Precalentador de Suspensión tipo incinerador.**
  - A2. Sistema de tratamiento de salida de gases para cenizas y polvo.**
    - A2.1. Dispositivo/filtro o recolector de polvo anti-cenizas o polvo
    - A2.2. Dispositivos de tratamiento de gases ácidos como torre de limpieza
    - A2.3. Un sistema de enfriamiento de gas
  - A3. Comprobar si las instalaciones de paso de gases implican agua (según la tecnología de cada cementera). De ser el caso, identificar que los efluentes hayan removido sólidos**

**en suspensión, lo que también podría implicar la remoción de dioxinas del efluente acuoso.**

A3.1. Existencia de un sistema de tratamiento de vertidos de efluentes para cumplir con las normas de concentración de iones de fluoruro e hidrógeno.

**A4. El sistema debe contar con estándares nacionales de concentración de material particulado y sustancias tóxicas (HCl, HF) (emisiones de gases y agua si corresponde). Legislación del ambiente laboral para la salud ocupacional y la seguridad industrial por emisiones.**

**A5. Cantidad de cloro en materias primas y combustible. Detalle de la calidad actual del cloro en clinker y límites de tolerancia al cloro con factor de seguridad.**

**A6. Las instalaciones cuentan con un colector de polvo eléctrico y un sistema de retroalimentación del polvo recogido en el proceso de calcinación.**

Con los puntos A1 a A6 se generará un plano global del área de tratamiento, incluyendo los equipos de proceso, diagrama de temperaturas, flujo de operaciones y puntos donde se realizan emisiones a la atmósfera, descargas de agua contaminada (si las hubiere), subproductos residuales o se generan contaminantes.

El plano general estará acompañado de una descripción del proceso de fabricación de Clinker, descripción del horno de la planta seleccionada, dimensiones, tipo de horno, tipo de quemador, equipos existentes, gradiente de temperatura, tipo de materiales de coprocesamiento, tipo de combustible, y reconocimiento de bloqueos/acumulaciones anteriores debido al contenido de humedad en los residuos o el combustible, contenido de cenizas y estimación del caudal de gases de escape.

**Nota:** El coprocesamiento en hornos de cemento es una buena opción para la gestión de residuos. Utiliza la combinación óptima de

materiales usados como plásticos, madera, neumáticos, líquidos, lodos de proceso y embalajes para crear un combustible alternativo. Sin embargo, el coprocesamiento se confunde frecuentemente con la incineración de residuos, pero el coprocesamiento recupera el 100% del poder calorífico de los residuos y recicla los minerales que contienen generando una integración ambientalmente segura de los residuos generados por una industria o fuente conocida como insumo para otro proceso de producción.

En el coprocesamiento, el combustible residual alternativo proporciona la energía necesaria para el proceso de fabricación del clinker (materia prima del cemento). Algunos de los minerales contenidos en los residuos, como calcio, aluminio y óxidos de hierro, también se reciclan o se reincorporan al producto final. El coprocesamiento en los hornos de cemento se produce a una temperatura más alta, un tiempo de residencia más prolongado y no deja cenizas adicionales.

El coprocesamiento para la gestión de residuos fue aprobado y recomendado por el Programa de las Naciones Unidas (PNUMA) en el Convenio de Basilea. El Acuerdo Multilateral sobre el Medio Ambiente (AAM), adoptado el 22 de marzo de 1989. El objetivo es proteger el medio ambiente y la salud humana de los efectos nocivos causados por la generación, manipulación y eliminación de residuos peligrosos.

#### **A7. Se realizarán seguimientos de dioxinas y furanos.**

La base de seguimiento se realizará según:

- MÉTODO 23 DE LA EPA DE EE. UU.: DETERMINACIÓN DE DIBENZO-P-DIOXINAS POLICLORADAS Y DIBENZOFURANOS POLICLORADOS DE FUENTES ESTACIONARIAS

- MÉTODO 26 DE LA EPA DE EE. UU.: DETERMINACIÓN DE HALURO DE HIDRÓGENO Y EMISIONES DE HALÓGENO DE FUENTES ESTACIONARIAS MÉTODO NO ISOCINÉTICO
- BS EN 1948-1:2006. EMISIONES DE FUENTES ESTACIONARIAS. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MASA DE PCDDS/PCDFS Y PCBS SIMILARES A LAS DIOXINAS. MUESTREO DE PCDDS/PCDFS
- BS EN 1948-2:2006. BS EN 1948-2:2006. EMISIONES DE FUENTES ESTACIONARIAS. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MASA DE PCDDS/PCDFS Y PCBS SIMILARES A LAS DIOXINAS. EXTRACCIÓN Y LIMPIEZA DE PCDDS/PCDFS

#### **A8. Ubicación de temperaturas de 200 a 400°C en el sistema con especial énfasis en ubicar 300°C**

Para este detalle se pueden utilizar sensores internos o cámaras termográficas. Se deben generar perfiles de temperatura del sistema.

#### **Requisitos específicos**

- Registros de seguimiento pasados. Análisis histórico de CO, partículas, O<sub>2</sub> y flujo de salida.
- Cálculo del caudal de emisiones dentro del sistema.
- Verificación del sistema de bypass del proceso de gas, instalado para reducir la concentración de cloro en el horno; el sistema bypass consiste en extraer una parte de los gases que salen del horno, enfriarlos y separar el polvo. El bypass comienza en el punto de extracción de gas que se encuentra en el lado del horno del conducto más alto. En esta posición, los gases del horno tienen una baja concentración de polvo y altas concentraciones de cloro gaseoso. Los gases extraídos del horno que contienen Cl y polvo se inactivan con aire para iniciar la condensación de cloruro y facilitar la posterior separación de los cloruros del gas. Esta separación se produce en un precipitador electrostático o filtro de mangas;

la tasa de derivación típica es de hasta el 15 % para el cloro. La instalación de un bypass requiere una inversión de capital adicional y aumenta las pérdidas de calor y materiales. La eliminación del gas caliente a través del bypass genera un mayor consumo de calor específico de entre 6 y 12 MJ/tonelada de clinker por porcentaje de eliminación de gas que ingresa al horno [1].

- Para fines de detección de tecnologías de destrucción, la concentración máxima de dioxinas y furanos en el gas de chimenea procedente de tecnologías de destrucción es de 0,5 ng-ITEQ/Nm<sup>3</sup> para espumas y 0,2 ng-ITEQ/Nm<sup>3</sup> para fuentes concentradas. Se determinó que estos criterios representaban un compromiso razonable

entre normas más estrictas que ya existen en algunos países industrializados [por ejemplo, la norma para todo Canadá de 0,08 ng/m<sup>3</sup> (ITEQ)] y la situación en los países en desarrollo donde las normas pueden ser menos estrictas o inexistentes. Aunque en el informe del PNUMA de 1992 se había sugerido un estándar anterior de 1,0 ng/m<sup>3</sup> (ITEQ), los avances tecnológicos de los últimos años y el nivel de preocupación por las emisiones de estas sustancias altamente tóxicas justificaron un nivel significativamente más estricto [16].

- La siguiente tabla presenta el DRE y los límites de emisión recomendados por el TEAP para SAO concentradas y diluidas [16].

**Tabla 1.** Cualificaciones de desempeño técnico para la destrucción de SAO

Cualificaciones de desempeño técnico para la destrucción de SAO <sup>3</sup>			
Eficiencia/Emisión	Fuentes diluidas	Fuentes concentradas	Estándares de la UE [18]
DRE (%)	95	99.99	
PCDD + PCDFs (ng/m <sup>3</sup> )	0.5	0.2	0.1
HCl/Cl <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	100	100	10
HF(mg/m <sup>3</sup> )	5	5	1
HBr/Br <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	5	5	
Particulate Matter(mg/m <sup>3</sup> )	50	50	10
CO (mg/m <sup>3</sup> )	100	100	50

Los límites de emisión son coherentes con las normas de rendimiento técnico seleccionadas (concentraciones

de emisión: seco, 0 °C, 101.3 kPa) del Parlamento Europeo y el Consejo, 2000 [18].

#### Certificaciones asociadas

- MÉTODO 26 DE LA EPA DE EE. UU.: DETERMINACIÓN DE HALURO DE HIDRÓGENO Y EMISIONES DE HALÓGENO DE FUENTES ESTACIONARIAS MÉTODO NO ISOCINÉTICO
- MÉTODO 23 DE LA EPA DE EE. UU.: DETERMINACIÓN DE DIBENZO-P-DIOXINAS POLICLORADAS Y DIBENZOFURANOS POLICLORADOS DE FUENTES ESTACIONARIAS

3 Los límites de emisión se expresan como masa por metro cúbico seco de gas de escape a 0°C y 101,3 kPa corregido al 11 por ciento de O<sub>2</sub>.

## 5.2. CONDICIONES DE CONTROL DE OPERACIÓN PARA LA DESTRUCCIÓN DE SAO

Dado que la mayoría de las SAO tienen un valor de combustible insignificante y un alto contenido de halógenos (asociado con la corrosión y las emisiones al aire), la mezcla de combustibles para el coprocesamiento en hornos de cemento normalmente no acepta grandes cantidades de SAO para mezclarlas con otros combustibles derivados de desechos. Por lo tanto, en el proceso de clínquerización es importante tener pleno conocimiento de las fuentes de cloro y azufre. En todo el mundo, después de las primeras metodologías y ensayos en hornos de cemento, el potencial de destrucción ha ido aumentando hasta convertirse en dosificaciones factibles y grandes de SAO en los hornos de cemento. Algunas referencias de dosificación de CFC/HCFC/HFC varían desde 10 kg/hora hasta 200 kg/hora, dependiendo

del tipo de gas refrigerante. Estas condiciones dependerán del tamaño del horno, el equilibrio operativo, el tipo de combustible, la asignación de coprocesamiento, el mantenimiento y las condiciones operativas normales. Sin embargo, la recuperación de SAO/HFC requiere mucho esfuerzo en los países en desarrollo, por lo que tomar más tiempo para destruir de manera segura los gases en los hornos de cemento a bajas tasas de dosificación tiene más beneficios ambientales y operativos que arriesgarse a altas tasas de destrucción y de dosificación en el horno. Para las autoridades ambientales, cuanto menor sea la tasa de dosificación, menor será el riesgo ambiental que representa el proceso de destrucción de SAO.

### Materiales

- Sistema de monitorización continua de gases de combustión.
- Medidor de partículas totales en gases de combustión de hornos rotativos, enfriamiento de clínker y molienda/molienda de clínker, medidor de óxidos de nitrógeno en gases de combustión de hornos rotativos, medidor de dióxido de azufre en gases de combustión de hornos rotativos.
- Sistema de registro de datos<sup>4</sup>.
- Sistema de inyección de gas refrigerante.
- Medidor de temperatura en el quemador principal y precalcinador.
- Equipos de protección personal (casco, guantes, calzado alto con punta de acero, gafas protectoras, protección auditiva), incluidos los dispositivos para trabajos en altura (arnés de seguridad, dispositivos de anclaje de líneas salvavidas).
- Cámara fotográfica.

### Técnicos involucrados

- Personal técnico de producción de cemento.
- Personal técnico con experiencia en gestión de refrigerantes.
- Personal mecánico cualificado en el manejo de sistemas a presión. Con formación práctica y

técnica en el manejo de cilindros y llenado de gases a alta presión (el perfil podría incluir técnicos/tecnólogos en mecánica o mantenimiento industrial o electromecánica, con formación en ensayos dimensionales, físicos y no destructivos)

### Procesos paralelos

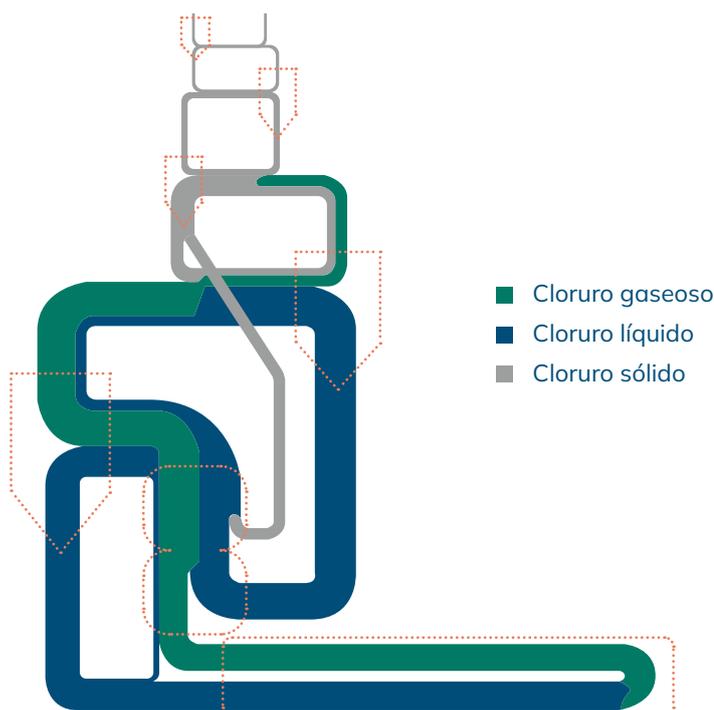
- Control de la homogeneidad del combustible, especialmente cuando se coprocesan en paralelo otros materiales o sustancias/combustibles residuales alternativos.
- El cálculo de la alimentación de CFC/HCFC/HFC considera la capacidad de recepción del producto (especialmente clínker) y el tratamiento de haluros en el sistema de emisiones de gases. También se debe considerar el cloro existente en el sistema y el posible aporte de combustibles. Considere un aumento en la concentración de 10 ppm o menos en clínker.
- Cálculo de la influencia de las dosis en la calidad, emisiones e instalaciones del Clíner.
- Cálculo de la concentración de HCl y HF en las emisiones de salida. Las mediciones estimadas de la concentración de CFC/HCFC/HFC en los gases de escape finales deben ser de 1 ppm o menos.

4 Considere que los datos de mediciones en fuente fija deben registrarse en mg/Nm<sup>3</sup> (miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales, presión de 760 mmHg y temperatura de cero grados centígrados (0°C), en base seca y sal corregida 10 % oxígeno (O<sub>2</sub>)) [11]

### Medidas en el proceso

- La temperatura en el quemador principal será superior a 1450°C en el material y superior a 1800°C de temperatura de llama.
  - El tiempo de retención en el quemador principal debe ser superior a 12-15 segundos a una temperatura superior a 1200°C y superior a 5 o 6 segundos a una temperatura superior a 1800°C.
  - El tiempo de retención y temperatura en el precalcinador será de más de 2 a 6 segundos a más de 800°C. Si los residuos peligrosos alimentados al horno contienen más del 1 por ciento de sustancias orgánicas halogenadas (expresadas como cloro), la temperatura debe mantenerse a 1100 °C durante al menos dos segundos [12].
  - Describir la gestión de los residuos hasta su destrucción, incluyendo el desarrollo del proceso mediante cinética de reacción y balance de materiales, indicando los subproductos obtenidos como resultado del tratamiento y el aporte de clinker.
  - Para esto es importante tomar muestras de la materia prima de producción de cemento, las cuales deben ser analizadas [13]: Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, Cl.
- En este punto, se debe considerar la afinidad de reacción entre materiales volátiles:
    - 1) el cloro reacciona principalmente con metales alcalinos, formando KCl o NaCl típicamente en la fase gaseosa; el cloro residual se combina con el calcio, formando  $\text{CaCl}_2$  (s/l). Sin embargo, el aporte de cloro rara vez es mayor que el aporte de álcali
    - 2) el exceso de álcali reacciona con azufre, formando  $\text{K}_2\text{SO}_4$  y/o  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; el álcali residual se combina con  $\text{CO}_2$ , formando  $\text{K}_2\text{CO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , o con la humedad, formando NaOH y KOH, el álcali también puede incrustarse en los minerales de Clinker
    - 3) el exceso de azufre, presente como  $\text{SO}_2$  y/o  $\text{SO}_3$  en el gas, reaccionará con CaO(s) formando  $\text{CaSO}_4$ (s).
  - La volatilidad de los materiales se describe utilizando el factor de evaporación para cada componente que varía de 1 a 0, donde 1 significa que todos los materiales volátiles se evaporan a alta temperatura (pero sin necesariamente escapar a la atmósfera) y 0 significa que ningún material se evapora.

**Figura 4.** Diagrama de Sankey para la circulación de cloro en un horno calcinador moderno, que muestra los flujos de cloruro gaseoso, líquido y sólido. (Adaptado de Jons et al. [1])

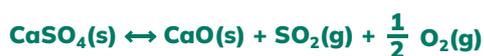


- Las siguientes reacciones y cálculos se refieren específicamente a los CFC ya que esta molécula tiene una mayor concentración de cloro que los HCFC (los HFC no tienen cloro en su composición pero sí flúor), considerando explícitamente la diferencia entre el poder destructor de la capa de ozono que tienen las sustancias al compararlas,

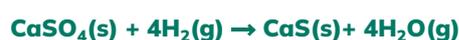
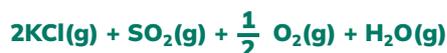
Reacciones de estabilización [1]:



or



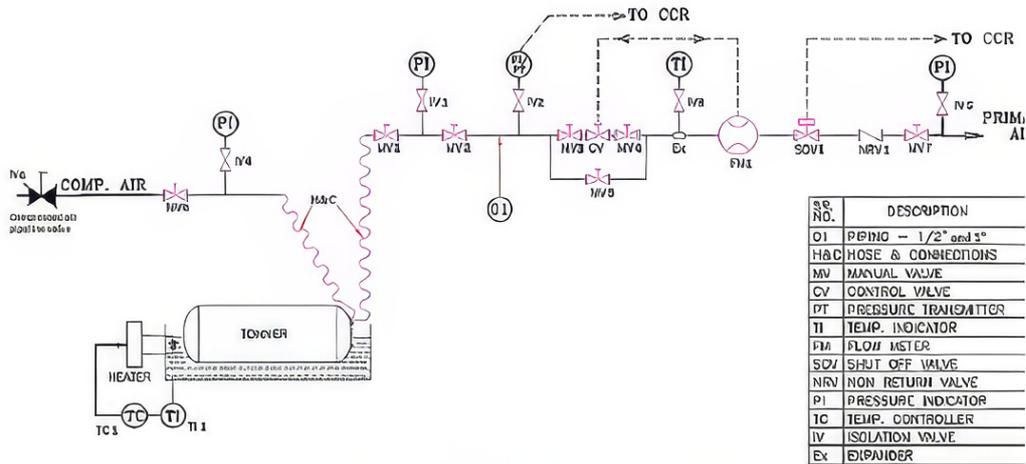
es decir, la destrucción segura de los CFC definitivamente destruirá también los HCFC/HFC de manera segura. Sin embargo, tanto el F como el Cl forman ácidos fuertes en contacto con el agua y requieren medidas de control de emisiones [18].



- Además de comprender la química del proceso involucrado, se debe presentar la relación y especificaciones técnicas de los equipos, instrumentos y maquinaria utilizados para destruir gases contaminantes. El punto de alimentación en el horno debe estar apoyado y despejado [3],

en el caso específico de la empresa cementera, y validado con el personal técnico correspondiente. En la referencia bibliográfica encontrada se ha comprobado que el punto de entrada a través del aire primario es viable, como lo demuestra la experiencia en India y Ecuador.

Figura 5. Sistema de alimentación de CFC - India [3]



CFC feeding system (tonner is the steel cylinder with CFCs).

- El CFC-12 no requiere calor ni baño térmico ya que el punto de ebullición es  $-29,8^{\circ}\text{C}$ ; sin embargo, todo dependerá de la presión de salida del gas y de los constantes controles de dosificación del sistema; se deben analizar las condiciones específicas del punto de ebullición para los HCFC/HFC. El gas debe bombearse desde el cilindro al tren de válvulas, manómetros de presión y temperatura con válvula y control de flujo de gas, válvulas de cierre y finalmente a una válvula de retención. Sin embargo, se pueden utilizar camisas térmicas para cilindros si el sistema de presión varía.
- Una manguera flexible puede conectar los cilindros con gas que fluye a través de conductos conectados al conector de entrada al soplador de aire primario hacia el quemador principal. Las líneas eléctricas estarán provistas de revestimiento térmico y aislamiento para evitar la condensación. Se puede utilizar aire comprimido para evacuar el sistema, asegurando que no queden CFC/HCFC/HFC. El sistema de alimentación debe calibrarse adecuadamente.
- Detallar todos los sistemas de operación y mantenimiento de los equipos, las medidas de

seguridad implementadas y prevención de contaminación en el aire, agua y suelo. Para ello se aplicarán las siguientes medidas mínimas de seguridad [3]:

- Los CFC/HCFC/HFC sólo deben introducirse en la llama del quemador principal durante condiciones de operación normal, no durante el arranque del horno, paradas o interrupciones importantes.
- El proceso debe ejecutarse en modo de operación compuesto; el gas de salida se dirige a través del molino de crudo y en condiciones de proceso idénticas todos los días.
- Todo el personal involucrado debe estar capacitado antes de la prueba.
- Se deben controlar las interrupciones del flujo de aire de combustión.
- Control de presión en la zona de combustión.
- Control de la formación de costras/incrustaciones.
- Criterios físico-químicos (valores límite de dioxinas y furanos) que deben cumplirse para la alimentación con CFC/HCFC/HFC [2].
- En las campañas de destrucción a aplicar se gestionará el seguimiento y control de las

siguientes condiciones de operación:

- Harina cruda (ton/h)
- Combustible (ton/hora)
- AFR (material de desecho con potencial de combustión) como combustible secundario (ton/h)
- Producción de clinker (ton/h)
- Polvo de horno de cemento (ton/h)
- Tasa de reintroducción de polvo (%)
- Caudal de gas de chimenea (m<sup>3</sup>/h)
- Temperaturas de combustión (°C)
- Temperatura de salida de gas (°C)
- Para verificar las ubicaciones de los sensores, se deben proporcionar los gradientes de temperatura que se monitorearán para los sistemas de precalentador, el flujo de gas y las etapas del sistema.
- Una vez disponibles los resultados del monitoreo de dioxinas y furanos, se debe realizar un balance de masa del sistema de producción de cemento, considerando como insumos materias primas, harina cruda, material de coprocesamiento, emisiones totales, emisiones netas con factores de difusión y como salidas a flujos de gases de escape, polvo acumulado y clinker.
- Se deben estimar la turbulencia y los factores de influencia del aire primario y secundario en la formación de la llama y área de combustión del gas a la temperatura adecuada con el tiempo de retención adecuado.
- Cabe señalar que el sistema ciclónico de precalentador (de 4 a 6 etapas), con o sin precalcinador pero sin extracción de polvo ni bypass, sería posible tolerar un aporte de cloro de 300 g por tonelada de clinker. Si el polvo de los filtros no se recicla de nuevo en el proceso sino que se extrae, la tolerancia al cloro podría aumentar a 300 o 400 gramos por tonelada de clinker si el horno está equipado con un bypass, que extrae parte de los gases calientes del horno en el entrada del horno, esto permitiría una entrada adicional de cloro de 100 gramos por tonelada de clinker por cada porcentaje de tasa de derivación, por ejemplo, 8% de derivación, 800 gramos por tonelada de clinker sería el límite (aplicable para una tasa de derivación del 5-10%).). La cantidad máxima de cloro permitida en las normas de

calidad del cemento es de 1000 gramos de cloro por tonelada de cemento; este límite también es idéntico para todos los tipos de hornos. [3]

- Se deberán realizar protocolos de prueba (Trial burn) para demostrar un 99,9999% de eficiencia de destrucción y eliminación de CFC/HCFC/HFC y se realizarán con laboratorios acreditados a nivel nacional o internacional.
- Las empresas cementeras deberán presentar anualmente a la Autoridad Ambiental competente un informe sobre el seguimiento de los parámetros mínimos para la destrucción de CFC/HCFC/HFC como CO, partículas, HCL, HF, Dioxinas y Furanos, así como presentar la declaración correspondiente al proceso de eliminación de residuos llevado a cabo.

#### Requisitos específicos

- Es necesario operar el sistema de tal manera que garantice la destrucción exitosa de CFC/HCFC/HFC y el control seguro de las emisiones atmosféricas. Para ello, las condiciones de combustión deberán gestionarse de la siguiente manera:
  - Temperatura de combustión: 850°C – 1200°C o superior.
  - Tiempo de retención del gas refrigerante en el rango de temperatura de combustión: 2 segundos o más.
  - Concentraciones de monóxido de carbono (CO) en la salida de los gases de escape (correspondiente a un valor de concentración de óxido del 12%): 100 ppm o menos
- Es necesario operar la instalación de la misma manera que la producción ordinaria de cemento para garantizar la destrucción exitosa de SAO/HFC y el control seguro de las emisiones atmosféricas.
- Teniendo en cuenta que los requisitos de temperatura de calcinación y tiempo de retención de gas en el funcionamiento ordinario de los hornos de cemento son generalmente más favorables para la destrucción de SAO/HFC que en los hornos rotatorios para la incineración de desechos, se considera que las SAO/HFC se destruyen con certeza.

- El tratamiento manual de compuestos de cloro requiere condiciones de control operativo tales como:
  - Mantenga la temperatura del horno a la salida de la cámara de combustión a 800°C o más.
  - Mantener la concentración de óxidos en la salida de gas al 6% o más.
  - o Mantener la concentración de CO a la salida de gases, que se calcula como un valor correspondiente al 12% de la concentración de óxido a 100 ppm o menos.
- Esta interpretación proporciona recomendaciones para las temperaturas de combustión en la cámara de combustión, el tiempo de retención de gas en el siguiente rango de temperatura y las condiciones de combustión:
  - Es preferible obtener una eficiencia de eliminación del 99,99 % o superior instalando una sala de poscombustión que garantice un tiempo de retención de gas de 2 segundos o más a 900 °C o superior para descomponer y oxidar suficientemente los compuestos de cloro carbono en el gas.
  - Mantener la concentración de oxígeno en los gases de escape de combustión al 6% o más y mantener la concentración de monóxido de carbono en los gases de escape, que se calcula como un valor promedio de 4 horas de los valores de concentración correspondientes del 12% de óxidos a 100 pm o menos para descomponer y oxidar suficientemente los compuestos de cloro en el gas.
  - En general, alcanzar 850°C o más, durante 2 segundos o más, durante la incineración controlaría la generación de dioxinas.

### 5.3. CONDICIONES DE DOSIFICACIÓN DE GAS PARA LA DESTRUCCIÓN DE SAO

La dosificación se realizará siguiendo la legislación vigente en cada país y en función de las condiciones operativas de cada horno. En caso de dudas o incertidumbre sobre la dosificación, una dosis de 10 – 15 kg/hora puede garantizar la correcta destrucción y el impacto no operativo de un horno de cemento. Una tasa de destrucción de 10 kg/hora equivale aproximadamente al gas refrigerante de alrededor de 50<sup>5</sup> refrigeradores domésticos, aunque las tasas de recuperación de gas en algunos países en desarrollo no pasan de 50 equipos por día por instalación de recuperación.

#### Materials

- Cilindros de CFC/HCFC/HFC
- Tuberías
- Mangueras y conexiones
- Válvulas manuales
- Control de válvula
- Transmisor de presión
- Indicador de temperatura
- Medidor de flujo de masa
- La válvula de cierre
- Válvula de retención
- Indicador de presión
- Válvula de aislamiento
- Expansor

#### Técnicos implicados

- Técnico en refrigeración y aire acondicionado con conocimientos en recuperación de gases y sistemas de presión de gases.

5 Este valor puede variar dependiendo de la antigüedad del aparato, el estado del motor, la contaminación interna del evaporador, la contaminación de todo el sistema, el tamaño y modelo del aparato.

- Conocimientos básicos del técnico [5]:
  - Conectar y desconectar mangueras y válvulas de equipos a presión.
  - Compresión mecánica de vapor, compresores de accionamiento abierto, operación de sistemas de refrigeración y aire acondicionado.
  - Identificación de gases refrigerantes.
- Conocimiento del sistema de inyección en condiciones normales de operación de la planta cementera.

#### Procesos paralelos

- Medición de gases de escape, análisis de clinker y concentraciones de cloro y flúor en el sistema.
- Identificar las características de la materia prima.
- Identificar los combustibles alternativos utilizados y sus reacciones.
- Sistemas de control de energía en operación y alineados a los sistemas de control de operación.
- Infraestructura física adecuada y estable y estándares de seguridad.

#### Medidas en el proceso

- Definición de dosificación segura en el sistema y equipo de control de condición de cloro.
- Ubicación del punto de dosificación de CFC/HCFC/HFC más cercano al quemador, en condiciones normales de funcionamiento, y asegurando una temperatura de combustión y tiempo de retención suficientes.
- Equipos de alimentación con filtro de aceite, medidor de flujo másico y otros dispositivos para una adecuada alimentación. Aseguramiento del suministro de presión para igualar el calor latente del gas CFC/HCFC/HFC.
- Tipo de cilindros de entrega de CFC/HCFC/HFC. Tipo de calor latente del gas.
- Secuencia de alimentación futura para la destrucción de CFC/HCFC/HFC en el horno.
- Identificación de conexiones eléctricas y prevención de fugas de gases CFC/HCFC/HFC del sistema.

- Identificación de límites de detección de equipos de monitoreo de gas y Clinker.
- Contraste los límites de detección con los límites permisibles.

#### Requisitos específicos

- Generación de diseño de inyección, caudales y dosificación controlada.
- Medición en laboratorio de emisiones gaseosas para identificación de HCl, HF, Dioxinas y furanos, fluoruros, partículas y CO. Adicional al monitoreo de iones de hidrógeno en el agua efluente (si aplica).
- Demostrar una eficiencia de destrucción y eliminación del 99,9999 %. [12].

#### Certificaciones asociadas

- Calibración de equipos de monitoreo en línea. Calibración de equipos de monitoreo de laboratorio y certificación de acreditación de laboratorio.

#### Reglamentos Particulares

Se consideran regulaciones particulares las normas establecidas y recomendadas por el Comité Asesor Técnico Ad-hoc del PNUMA sobre emisiones de gases en tecnologías de destrucción de SAO.

**Tabla 2.** Normas sobre gases de escape recomendadas por el Comité Asesor Técnico Especial del PNUMA sobre Tecnologías de Destrucción de SAO

PCDD/PCDF	<1.0 mg-TEQ / Nm <sup>3</sup>
HCl	<100 mg / Nm <sup>3</sup>
HF	<5 mg / Nm <sup>3</sup>
HBr / Br <sup>2</sup>	<5 mg / Nm <sup>3</sup>
Partículas	<50 mg / Nm <sup>3</sup>
CO	<100 mg / Nm <sup>3</sup>

Fuente: <https://digitallibrary.un.org/search?f1=author&as=1&sf=title&so=a&rm=&m1=e&p1=UNEP.+Ad+Hoc+Technical+Advisory+Committee+on+ODS+Destruction+Technologies&ln=es> [17]

## 5.4. PROTOCOLO DE MONITOREO

El protocolo de monitoreo de destrucción de CFC/ HCFC/HFC seguirá los lineamientos y protocolos nacionales existentes específicamente para el control de Dioxinas, Furanos, CO, Partículas, Ácido Clorhídrico y Ácido Fluorhídrico (si no están disponibles, se pueden considerar referencias internacionales), además de las siguientes consideraciones:

- La dosificación se realiza únicamente en condiciones operativas normales de producción, carga y consumo de combustible.
- Evaluación en blanco (que corresponde al funcionamiento del sistema sin carga de CFC/HCFC/ HFC pero en condiciones normales de coprocesamiento).
- Evaluación con carga de coprocesamiento del 100 % y carga de 10-15 kg/hora de CFC/HCFC/ HFC.
- Análisis de chimenea en tres corridas por elemento y en condiciones isocinéticas corregidas. Las pruebas de muestreo se definirán con la capacidad de captura de los equipos disponibles del laboratorio en las condiciones del ensayo.
- Uso de principales métodos de seguimiento:
  - MÉTODO 23 DE LA EPA DE EE. UU.: DETERMINACIÓN DE DIBENZO-P-DIOXINAS POLICLORADAS Y DIBENZOFURANOS POLICLORADOS DE FUENTES ESTACIONARIAS
  - BS EN 1948-1:2006. EMISIONES DE FUENTES ESTACIONARIAS. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MASA DE PCDDS/ PCDFS Y PCBS SIMILARES A LAS DIOXINAS. MUESTREO DE PCDDS/PCDFS
  - BS EN 1948-2:2006. BS EN 1948-2:2006. EMISIONES DE FUENTES ESTACIONARIAS. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MASA DE PCDDS/PCDFS Y PCBS SIMILARES A LAS DIOXINAS. EXTRACCIÓN Y LIMPIEZA DE PCDDS/PCDFS
  - MÉTODO 26 A – DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE HALOGENOS Y HALÓGENOS DE FUENTES ESTACIONARIAS MÉTODO ISOCINÉTICO. HCL (n.º CAS 7647-01-0), HF (n.º CAS 7664-39-3), CL2 (7882-50-5)
  - MÉTODO 23 DE LA EPA DE EE. UU.: DETERMINACIÓN DE DIBENZO-P-DIOXINAS POLICLORADAS Y DIBENZOFURANOS POLICLORADOS DE FUENTES ESTACIONARIAS
- Utilice el verificador de gases para asegurar la correlación con la descripción físico-química de SAO y % de pureza identificada.
- La dosis, de acuerdo con la guía japonesa (1999) [19] para la destrucción de CFC, así como para los factores de seguridad, no debe exceder los 10 kg/hora de alimentación de CFC-12 al sistema para una destrucción segura. Las experiencias

- en Ecuador (2015) demostraron una dosis de destrucción segura de 15 kg/hora de CFC/HCFC, y en los últimos años se han probado dosis aún más altas en México.
- No aplica la consideración de sustitutos ni agua ya que el sistema de alimentación cuenta con filtros de humedad, y el % de oxígeno se evalúa con el % de oxígeno para una combustión adecuada que permita alcanzar las condiciones de 1500°C en el quemador principal para la destrucción de SAO/HFC.
  - El parámetro HF será evaluado bajo el mismo método EPA 26 A, por lo que se acepta compatibilidad para soportar el monitoreo bajo el mismo protocolo.
  - El tipo de emisiones esperadas según las normas del PNUMA corresponden a:

**Tabla 3.** Límites recomendados para las emisiones de gases en los hornos de cemento

Parámetro	Límite recomendado
PCDD/PCDF	< 1 ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>
HCL	< 100 mg/Nm <sup>3</sup>
HF	< 5 mg/Nm <sup>3</sup>
Partículas	< 50 mg/Nm <sup>3</sup>
CO	< 100 mg/Nm <sup>3</sup>

- Como se muestra en las reacciones de estabilización anteriores, en el caso de la destrucción de CFC (también aplicable para HCFC/HFC), el cloro reacciona principalmente con metales alcalinos, formando KCl o NaCl típicamente en la fase gaseosa; el cloro residual se combina con el calcio formando CaCl<sub>2</sub> (s/l); sin embargo, el aporte de cloro rara vez es mayor que el aporte de álcali. El exceso de álcali reacciona con el azufre, formando K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y/o Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; el álcali residual se combina con CO<sub>2</sub>, formando K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, o con la humedad, formando NaOH y KOH, el álcali también puede incrustarse en los minerales de Clinker. El exceso de azufre, presente como SO<sub>2</sub> y/o SO<sub>3</sub> en el gas, reaccionará con CaO(s), formando CaSO<sub>4</sub>(s). En el caso del CFC-12, el tratamiento no produce efluentes (se evita una situación similar para los HCFC/HFC).
- Las concentraciones afectadas se verificarán según los estándares de calidad del Clinker, por lo que ningún efluente o subproducto sólido o líquido requerirá tratamiento posterior. El sistema de emisiones se controla con los mismos controles de polvo y concentración en el efluente de gases de salida.
- Para realizar la prueba de destrucción se debe tomar una muestra en blanco y se podrán cargar los residuos peligrosos a una dosis de hasta 15 kg/hora.
- Dadas las particularidades de los sistemas de destrucción de CFC/HCFC/HFC, el objetivo corresponde a condiciones normales de coprocesamiento de la planta cementera y la cantidad de carga se diseña al 100% de la dosis máxima establecida en el ensayo de 15kg/hora, y con una dosis en condiciones normales de 10-15 kg/hora.
- El cronograma de destrucción de SAO se aplicará bajo los controles de concentración de cloro registrados por la cementera, operando en condiciones de coprocesamiento o con carga sin coprocesamiento.
- Una de las consideraciones más importantes es el cálculo del tiempo de retención para lo cual, según la guía japonesa [19], se utilizará la siguiente fórmula:

$$\text{Tiempo de retención del gas (seg)} = \frac{\text{Volumen del horno [m}^3\text{]} \times 3,600}{\text{Cantidad de gases de escape húmedos [Nm}^3\text{/hr]} \times (273.15 + \text{temperatura del horno [}^\circ\text{C)})/273.15}$$

- Los informes de pruebas serán elaborados por un laboratorio acreditado local o internacionalmente, o al menos con las correspondientes validaciones de métodos.
- El informe de resultados de pruebas y protocolos de seguimiento considerará:
  - Un resumen ejecutivo del protocolo de pruebas realizado en el que se indicarán los tiempos reales de cada una de las actividades realizadas, incluyendo la descripción de aquellas paralizaciones y eventualidades que se hayan podido producir durante las mismas, así como las acciones implementadas para restablecerlas.
  - Presentar documentos que acrediten los parámetros y métodos.
  - Presentar el resumen ejecutivo del laboratorio de pruebas que realizó el muestreo y análisis que incluya:
    - Copia de los métodos utilizados para el muestreo y análisis de los componentes del protocolo.
- Hojas de cadena de custodia
- Resultados de la caracterización de residuos peligrosos antes del tratamiento, incluida la interpretación de cromatogramas.
- Resultados de la caracterización de los efluentes resultantes del tratamiento térmico, incluida la interpretación de los cromatogramas.
- Resultados del muestreo de gases para cada una de las corridas, incluyendo la interpretación de los cromatogramas.
- Presentar el desarrollo del cálculo de la eficiencia de destrucción del sistema en base a los resultados obtenidos (por el laboratorio).
- Presentar el resumen de los valores de emisiones detectadas para cada una de las corridas.
- Se presentará el balance de materiales aplicable para la destrucción de SAO. En el caso del balance energético no aplica porque el gas no tiene poder calorífico.

**Tabla 4.** Balance de materiales aplicable al formulario de registro de destrucción de SAO

Balance de materiales							
Parámetro/Número de flujos del sistema	←	↑	→	↓	°	±	"
W (kg o tonelada)							
Q (lo m <sup>3</sup> )							
Presión (atm or kg/cm <sup>2</sup> )							
Temperatura (°C)							
% HCL							
% CaCl <sub>2</sub>							
% Cl <sub>2</sub>							
% NaCl							
Estado físico S/L/G							
% exceso de O <sub>2</sub>							

Este formulario es sólo una plantilla que puede utilizarse para el registro del balance de materiales.

La siguiente lista de verificación en el sitio desarrollada utilizando los criterios de la EPA podría usarse para el protocolo de monitoreo, para garantizar que las pruebas se realicen según pautas estandarizadas. El objetivo es que el operador y/u observador tenga un conocimiento general práctico de la prueba aplicable a los métodos: EPA 1, 2, 3, 4, 5, 23, 26A y Métodos Instrumentales 3A-O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>, 6C-SO<sub>2</sub>, 7E-NO<sub>x</sub> y 10-CO;

Antes del muestreo, se deben considerar las siguientes actividades:

- Revisar internamente el listado de actividades de aseguramiento de calidad, previo a la Prueba.
- Revisar los estándares aplicables a la fuente (permiso, NSPS, NESHAP, etc.).
- Lea y familiarícese con el protocolo de la EPA.
- Revise los informes de pruebas anteriores.
- Lea los estándares de rendimiento/métodos de prueba enumerados en el protocolo de prueba.
- Revisar listas de verificación. Si tiene preguntas, revise la información adicional en el sitio web de EMC (<https://www.epa.gov/emc>).
- El coordinador del ensayo debe tener pleno conocimiento del desempeño del personal y de la prueba)

El laboratorio de muestreo deberá contar al menos con la siguiente documentación:

- Certificados de calibración de equipos e instrumentos de medida.
- Hojas de control diario.
- Certificado de Análisis de cilindros de gas.
- Hojas de datos de campo.
- Hojas de datos de recuperación, y
- Cadenas de custodia (cuando corresponda).

**Tabla 5.** Verificación previa al Muestreo de Emisiones Atmosféricas de Dioxinas, Furanos y Bromo procedentes de la Combustión de la Destrucción de Residuos Electrónicos

VERIFICACIÓN DE PRUEBAS	ERROR MÁXIMO EMITIDO (emp)	Método Referencia y artículo
Prueba de fuga a 76 mm H <sub>2</sub> O antes de probar en el tubo pitot - mangueras-manómetro	±2.5 mm H <sub>2</sub> O	EPA 2 Nº 8.1
Verificación geométrica de las especificaciones de alineación de Pitot en los planos X,Y,Z	$\delta: \leq 10^\circ$ $\beta: \leq 5^\circ$ $Z: \leq 3.2$ $W: \leq 0.8$ $Pa/Da: 1.05 \text{ to } 1.5$	EPA 2 Número: 10.1 Número: 6.1
Distancia entre pitot y punta del sensor de temperatura	5cm	EPA 2 Número: 10.1
Verificación del coeficiente Yc Respecto a Y (Coeficiente de calibración del contador de gas)	0.97Y < Yc < 1.03 años basado en AH@)	EPA5 Número: 9.2.1.2

<b>Prueba de fugas entre 130 a 180 mm H<sub>2</sub>O) en la sección entre la bomba de succión y el contador de volumen</b>	0.57 lpm cualquiera 4% de la tasa de muestreo promedio, lo que sea menor. (antes y después de la prueba)	EPA 5 Número: 16.2.2.1.2 Número: 8.4.1
<b>Comprobación de fugas en el tren de muestreo 15 in Hg al portafiltro 1 en Hg Tren completo incluyendo sonda</b>	-	EPA 5 Número: 8.4.1
<b>Controles de temperatura de los termopares del tren de muestreo: (filtro sonda, temperatura de los gases de la chimenea, temperatura del contador de gas, temperatura de los gases de salida del condensador, trampa XAD2</b>	≤ 1°C + 0,5% medición	EPA 5 Número: 10,5  EPA 2 Número: 10,3
<b>Comprobaciones de temperatura de salida del condensador</b>	≤ 20°C	EPA 5 Número: 8.5.6
<b>Verificaciones a escala de campo con un peso estándar</b>	Resolución ≤ 0,5 g Valor ≤ escala emp	EPA 5 Número: 10.7
<b>Verificación del diámetro y la integridad de la boquilla</b>	La diferencia entre los valores: mínimo y máximo ≤ 0,1 mm	EPA 5 Número: 10.1
<b>REQUISITOS DE MUESTREO</b>	<b>CRITERIO</b>	<b>Método de referencia</b>
<b>Verificación de flujo ciclónico</b>	Ángulo de compensación ∂ rotación ≤ 20°	EPA 1 NÚMERO: 11.4.2
<b>Nivel y encere los manómetros antes, entre y después de completar el muestreo</b>	Respecto al plano horizontal Respecto al cero	EPA 2 N° 8.2 Número: 10.1.3.3  EPA 1 Número: 11.5.3.2.1
<b>Calibración de medidor de gas seco, termopares, boquilla, dispositivos de orificio crítico, básculas, termopares, barómetro, medidor de longitud, clinómetro</b>	Parámetros y emp, según el fabricante o los criterios y objetivos de validación	EPA 5 Número: 10,3 a 10,8
<b>Constitución de los materiales del tren isocinético (boquilla, sonda calentada, filtro de partículas, Impactadores)</b>	Cuarzo, Borosilicato, pyrex o vidrio, Titanio	EPA 23: Número: 6.1.1a 6.1.10
<b>Filtros de partículas Características Inspección visual</b>	Fibra de vidrio  Integral y sin perforaciones	EPA 5 N° 7.1.1 N° 8.1.2
<b>Inspección de: boquillas</b>	Borde de ataque cónico con ángulo ≤ 30°	EPA 5 Número: 6.1.1.1

<b>Tenga la cantidad necesaria de: Gel de sílice, acetona, hielo, agua destilada y materiales</b>	Según las cantidades recomendadas en el método	EPA 5 Número: 7.1  EPA 23 7.1.1 a 7.1.6
<b>Características del agua</b>	Desionizado o destilado	EPA 5 Número: 7.1.3 Ç
<b>Condiciones climáticas adversas: Lluvia, radiación solar extrema</b>	Asegurar la correcta realización del muestreo con la protección de todo el tren	IMPLÍCITO EN LOS MÉTODOS
<b>Ubicación de los puertos de muestreo</b>	0,5 diámetros antes de la última perturbación  ≥ 2 diámetros después de la penúltima alteración	EPA 1 Número: 11.1.1
<b>Determinación del número de puntos (centroides)</b>	Según la ubicación de los puertos de muestreo	EPA 1 Número: 11.2
<b>Ubicación de los puntos de muestreo</b>	Según la geometría y diámetro de la chimenea	EPA 1 Número: 11.3
<b>Longitud de la sonda</b>	≥ 50% del diámetro del conducto (para complementar el muestreo en el lado opuesto)	EPA 5 Número: 8.2.3
<b>Marque los puntos de muestreo del centroide en la sonda</b>	Basado en el método EPA 1 Núm.: 11.3 Dependiendo del diámetro de la chimenea	EPA 1 Número: 6.1.1
<b>Los filtros están codificados y preponderados.</b>	Codificación interna y uso de balanza analítica	EPA 5 Número: 8.7.6.1
<b>Evite la contaminación del filtro durante el almacenamiento y el muestreo</b>	Apoyado sobre vidrio o teflón	EPA 5 Número: 6.1.1.5  EPA 23 6.1.3
<b>Uso de grasa selladora en las conexiones entre boquilla y último burbujeador</b>	No utilice	EPA 23 Número: 6.1
<b>Selección del tamaño de la boquilla</b>	Debe cubrir los rangos operativos de presión diferencial y temperatura de la chimenea para garantizar el isocinético  Succión de muestra ≥55 lpm	EPA 5 Número: 8.2.2
<b>Posición de Pitot y sonda de muestreo en la chimenea</b>	Se fija perpendicularmente al conducto para viajar a través de los puntos centroides	EPA 5 Número: 6.1.1.3
<b>Isocinetismo (IC)</b>	90% ≥ IC ≤ 110% del verdadero valor	EPA 5 Número: 12.11.3 8.5

<b>El espacio anular entre la sonda y el puerto de muestreo se sella durante el muestreo</b>	Con rosca u otro mecanismo que impida la entrada de aire pirata	IMPLÍCITO EN LOS MÉTODOS
<b>Temperatura del filtro durante el muestreo</b>	120±14°C	EPA 23 Número: 8.1.5.1
<b>Trampa de recirculación</b>	Ejecución durante todo el muestreo	EPA 23 Número: 8.1.35
<b>Temperatura del gas a la entrada de la resina XAD2</b>	≤ 20°C	EPA 5 Número: 8.1.5.2
<b>Temperatura de la sonda durante el muestreo</b>	120±14°C	EPA 5 Número: 6.1.1.2
<b>Temperatura a la salida de los burbujeadores</b>	≤ 20°C	EPA 5 Número: 6.1.1.8
<b>Temperatura de almacenamiento del Filtro con la muestra recuperada y otros contenedores</b>	En refrigerador ≤ 20 °C Protegido de la luz solar con papel de aluminio	EPA 23 Número: 8.2.4
<b>Si se requiere un cambio de filtro y portafiltro durante el muestreo debido a una caída excesiva de presión</b>	Realizar prueba de fugas	EPA 5 Número: 8.5.7 8.4.3
<b>Volumen total y Tiempo de muestreo</b>	≥ 2,5 m <sup>3</sup> de gas ≥ 2 min / punto centroide	EPA 23 Número: 8.1.2.1 8.1.2.2
<b>Inspección de la boquilla y Pitot antes y después de la prueba</b>	Entera y libre de roturas o fisuras	EPA 2 Número: 10.1 Número: 6.1
<b>Determinación del peso molecular seco</b>		EPA 2 Número: 8,6
<b>Análisis de oxígeno (O<sub>2</sub>)</b>	Análisis de gases Equipo contrastado con gases estándar trazables al NIST	EPA 3 EPA 3A EPA 7E, NÚMERO 6.2.4 Marca comunitaria 34
<b>Selle la boquilla y las secciones expuestas del tren de muestreo</b>	Con: tapas de vidrio selladas con papel de aluminio y cinta de teflón	
<b>Inmediatamente después del muestreo Sellar y cubrir la trampa de resina</b>	Con: tapas de vidrio, Cinta de teflón y papel de aluminio (para proteger de la luz y evitar la destrucción de dioxinas)	EPA 23 Número: 6.2.1
<b>Después de terminar el muestreo proceder con la prueba de fugas</b>	-	Números ya indicados

Fuente: Proyecto PREAL Costa Rica, con la colaboración de Ambigest, ONUDI 2024.

## 6. NOTAS ADICIONALES PARA ESPUMAS

Las espumas pueden utilizar CFC/HCFC/HFC/HFO como agentes espumantes durante su fabricación. Las sustancias mencionadas también contienen cloro y flúor en su composición, pero además las espumas, como grupo de plásticos termoestables, son materiales poliméricos multifunción con una amplia gama de aplicaciones en espumas rígidas, espumas flexibles, revestimientos y elastómeros. Así, con respecto a la aplicación de la espuma, las espumas también podrían estar relacionadas con retardantes de llama (por sus siglas en inglés FR) aplicados principalmente a espumas rígidas como aditivos para reducir su nivel de inflamabilidad, aunque también se pueden utilizar retardantes de llama reactivos. El uso de retardantes de llama y el tipo de retardantes de llama utilizados dependen en gran medida de la región y el país [21].

Los principales FR que se informa que se utilizan en espumas de poliuretano podrían ser FR que contienen halógenos, organofosforados no halógenos u otros FR no halógenos. En la UE, según el Reglamento COP No. 2019/2021 modificado, ya no se permitirá el vertido de estos residuos de poliuretano rígido (PUR) si los residuos presentan contenidos superiores al 0,1% de PBDE. Por lo tanto, todas las instalaciones que se ocupan del final de la vida útil de la espuma de PUR deben observar las consideraciones generales de MTD/MPA, donde los hornos de cemento se utilizan cada vez más en los sistemas de gestión de residuos tanto en los países industriales como en los países en desarrollo [21].

Las espumas no son el mejor combustible alternativo, dado su alto volumen y baja masa; no obstante, si poseen un determinado poder calorífico que se puede aprovechar, para garantizar su destrucción segura en altas temperaturas y coprocesamiento en hornos cementeros. Los combustibles alternativos de coprocesamiento siempre son alimentados en las zonas de combustión de alta temperatura del sistema de

producción de Clinker. Los estudios experimentales, de destrucción de resinas plásticas en hornos de cemento, han abordado la descomposición térmica de FR bromados (BFR) puros y/o polímeros cargados de BFR en ambientes oxidativos y pirolíticos, generalmente en el rango de temperatura de 280 a 900°C [22]. A más de los FR, En el caso de las espumas, las celdas de su termoformado contienen encapsulado al agente soplante (potencialmente SAOs/HFC), por lo que triturar el material podría liberar el gas contenido en las celdas. Por esta razón, se prevé que las espumas puedan ser alimentadas en el horno cementero en piezas más grandes, por el precalcinador, siempre y cuando, se evalúe con el personal técnico de la cementera el punto de alimentación de acuerdo con las características físicas y químicas del material a destruir, y por lo general, dentro del flujo de AFR que se inyecta para coprocesamiento regular.

Bajo estándares de prueba, que aún están en desarrollo, en el Proyecto PREAL de ONUDI respecto a la gestión ambientalmente adecuada de plásticos provenientes de equipos eléctricos y electrónicos, se ha considerado la alimentación de 75 kg/hora de plásticos (incluyendo espumas) con concentraciones de PBDE del orden de 1,200 ppm para pruebas de destrucción en hornos de cemento, estimando que la prueba a 75 kg/hora validará la tasa de alimentación para procesos regulares de 45 kg/hora, considerando igualmente que el límite máximo de Br en la alimentación del horno respecto al AFR total debe ser menor al 0.015%.

Así, si alimentamos algún compuesto bromado contenido dentro de las espumas (PBDE u otro), se deberá analizar este mismo parámetro químico en las emisiones atmosféricas liberadas por la chimenea. La siguiente tabla explica los principales parámetros a monitorear en el caso de alimentación de residuos plásticos con presencia de Bromo en un horno cementero.

**Tabla 6.** Monitoreo de Sustancias en Emisiones de Chimenea, en el caso de alimentación de residuos plásticos con retardantes de llama bromados [24] [27]

Sustancia/Grupo	Razón	Muestreo	método de medida
PBDE/BFR	Principal contaminante	Convenio de Estocolmo método de muestreo	técnicas cromatográficas acopladas con un espectrómetro de masas/ detector de captura de electrones (ECD)
PXDD/F	Producto potencialmente peligroso formado	Método de muestreo del Convenio de Estocolmo	técnicas cromatográficas acopladas con un espectrómetro de masas
HBr/Br <sub>2</sub>	Las emisiones podrían aparecer	Norma Internacional IEC 62321 Ed.1	cromatografía de gases
Compuestos orgánicos volátiles bromados (Br-VOCs, metanobromuro)	Los Br-COV son potentes sustancias que agotan la capa de ozono		
Sb (antimonio)	Los plásticos Br contienen cantidades significativas de antimonio	Método de muestreo del Convenio de Estocolmo	espectroscopia de masas

**Tabla 7.** Monitoreo de Sustancias en Clinker & harina Caliente [25] [26]

Sustancia/Grupo	Razón	Muestreo	método de medida
PBDE	Contaminante principal	Método de muestreo del Convenio de Estocolmo	técnicas cromatográficas acopladas con un espectrómetro de masas/ detector de captura de electrones (ECD)
PXDD/F	Producto potencialmente peligroso formado	Método de muestreo del Convenio de Estocolmo	técnicas cromatográficas acopladas con un espectrómetro de masas
Br total (3)	Balance de masa de Br	Norma Internacional IEC 62321 Ed.1	técnicas cromatográficas acopladas con un espectrómetro de masas
Sb (antimonio)	El antimonio puede ser beneficioso o puede necesitar un manejo cuidadoso para tener una calidad de cemento constante	Método de muestreo del Convenio de Estocolmo	espectroscopia de masas

**Tabla 8.** Monitoreo de sustancias en la alimentación de harina cruda [23]

Sustancia/Grupo	Razón	Muestreo	método de medida
Bromo total (3)	Balance de masa de Br	Norma Internacional IEC 62321 Ed.1	Técnicas cromatográficas acopladas con un espectrómetro de masas

De esta forma, si se realiza una destrucción en conjunto de SAOs y de espumas que poseen un SAO/HFC como agente espumante a más de compuestos bromados como retardante de llama, se deberá medir siempre en las emisiones atmosféricas a las dioxinas y furanos cloradas y bromadas, así como el ácido clorhídrico, ácido bromhídrico, y las respectivas sustancias a destruir como en este caso SAOs/HFC/PBDEs u otro compuesto específico a

determinar en las características de la espuma a alimentar en el horno (e.g., PBDEs).

Para calcular la eficiencia de destrucción y remoción se puede utilizar la misma fórmula establecida anteriormente para el cálculo de DRE de SAO/HFC, sustituyendo el SAO por el compuesto bromado particular alimentado en el horno dentro de los residuos plásticos de espumas.

$$\text{Eficiencia de destrucción y remoción (\%)} = \frac{\text{BFR alimentado en el sistema} - \text{BFR en la salida del gas}}{\text{BFR alimentado en el sistema}} \times 100$$

El método analítico para medir las dioxinas y furanos bromados es el mismo que para medir las de tipo cloradas. En el caso de incluir residuos plásticos en coprocesamiento de forma paralela a la destrucción de SAOs/HFC, es necesario reportar la información que se recolecta previo y durante la prueba, al menos lo siguiente:

- Características de las espumas de poliuretano y las mezclas de AFR usualmente utilizados para coprocesamiento
- Resultado de análisis por cromatografía de gases acoplado a masas sobre el tipo de sustancia aplicada en las espumas como retardante de llama.
- Análisis físico y químico de combustibles, materia prima, y clinker.
- Registros de los parámetros del proceso monitoreados durante el ensayo
- Cantidad de residuos consumidos, cemento producido y utilización de combustible convencional y alternativo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] MDM Cortada Mut, LK Nørskov, FJ Frandsen, P. Glarborg y K. Dam-Johansen, "Revisión: circulación de elementos inorgánicos en la combustión de combustibles alternativos en plantas de cemento". *Energía y combustibles*, vol. 29, núm. 7, págs. 4076–4099, 2015.
- [2] Y. Li, T. Chen, J. Zhang, W. Meng, M. Yan, H. Wang y X. Li, "Balance de masa de dioxinas en un horno de cemento en China". *Gestión de residuos.*, vol. 36, págs. 130–135, 2015.
- [3] k.h. Karstensen, UV Parlikar, D. Ahuja, S. Sharma, M. a. Chakraborty, HP Maurya, M. Mallik, PK Gupta, JS Kamyotra, SS Bala y BV Kapadia, "La destrucción de clorofluorocarbonos concentrados en la India demuestra una opción eficaz para frenar simultáneamente el cambio climático y el agotamiento del ozono", *Environ. Ciencia. Política*, vol. 38, págs. 237–244, 2014.
- [4] k.h. Karstensen, "Formación, liberación y control de dioxinas en hornos de cemento", *Chemosphere*, vol. 70, núm. 4, págs. 543–560, 2008.
- [5] OSPD EPA de EE. UU., "Cumplimiento de la regla de reciclaje de refrigerantes de la Sección 608 | Protección de la capa de ozono - Programas regulatorios | EPA de EE. UU."
- [6] OSPD US EPA, "Estándar para equipos de recuperación únicamente | Protección de la capa de ozono - Programas regulatorios | US EPA".
- [7] C. Válvulas, gases SI y documentos R., "ALMACENAMIENTO Y MANIPULACIÓN DE CILINDROS DE GAS", págs. 1 a 15, 2012.
- [8] Transporte de culínderes de gas de forma segura. [https://www.boc-gas.com.au/en/images/Transporting%20gas%20cylinders%20safely%20brochure\\_tcm351-496578.pdf](https://www.boc-gas.com.au/en/images/Transporting%20gas%20cylinders%20safely%20brochure_tcm351-496578.pdf). Página web revisada en diciembre de 2023.
- [9] Acuerdo Ministerial 026. Ecuador: Ministerio del Ambiente, 2008.
- [10] C. Párr., GDE Alta, P. Revisión y P. Edición, "NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2049: 2013 Primera revisión", 2013.
- [11] Acuerdo Ministerial 028. Ecuador: Ministerio del Ambiente, 2015.
- [12] Acuerdo Ministerial 048. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente, 2011.
- [13] S. Sidhu, N. Kasti, P. Edwards y B. Dellinger, "Formación de contaminantes atmosféricos peligrosos a partir de reacciones de harinas orgánicas crudas en hornos de cemento". *Quimiosfera*, vol. 42, núm. 5–7, págs. 499–506, 2001.
- [14] Destrucción de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO) en los EE. UU..S. &AbroadCurso No: C04-059Crédito: 4PDHGilbert Gedeon, PEContinuing Education and Development, Inc.
- [15] EPA 430-R-18-001 Destrucción de SAO en los Estados Unidos y el extranjero. Preparado para la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. por ICF en febrero de 2018.
- [16] Energy Changes Projekt Entwicklung GmbH, USG Umweltservice GmbH, metodología VCS aprobada VM0016 versión 1.0. Alcance Sectorial 11. Recuperación y Destrucción de Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (SAO) a partir de Productos. [www.cambios-de-energia.com](http://www.cambios-de-energia.com)
- [17] PNUMA(02)/A24, Comité Asesor Técnico Especial sobre Tecnologías de Destrucción de SAO. PNUMA, mayo de 1992.
- [18] Oficina de Política de Control de Fluorocarbonos, Oficina de Medio Ambiente Mundial, Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Japón. Gobierno de Japón (1999). Directrices sobre la destrucción de CFC en Japón.
- [19] GIZ,ProClima. 2020. Destrucción térmica de (hidro)clorofluorocarbonos e hidrofurocarbonos. Gestión y destrucción de los bancos existentes de sustancias que agotan la capa de ozono.
- [20] Alianza para la Protección del Clima y el Ozono (COPA), TECNOLOGÍAS DE RECUPERACIÓN Y DESTRUCCIÓN DE SAO/HFC: una revisión para los países del Artículo 5. Septiembre 2023

- [21] **Guidance on best available techniques and best environmental practices relevant to the polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants.**  
Stockholm Convention BAT/BEP Group of Experts, March 2021.
- [22] **Web page,** <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128518301035>.  
Reviewed in February, 2024.
- [23] **Sustainable Recycling Industries (SRI) India, n.d., November 2016.** <https://www.sustainable-recycling.org/reports/co-processing-of-non-recyclable-hazardous-plastic-waste-in-cement-kiln/>.
- [24] **Altarawneh, M. (2022).** Temperature-dependent profiles of dioxin-like toxicants from combustion of brominated flame retardants. *Journal of Hazardous Materials*, 422. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126879>
- [25] **Guía para el Co-Procesamiento de Residuos en la Producción de Cemento. (2006).**  
[www.gtz.de](http://www.gtz.de) [www.fhnw.ch](http://www.fhnw.ch)
- [26] **Li, Y., Li, J., & Wang, L. (2013).** Recycling of PBDEs containing plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review. *Proceedings - 2013 IEEE 10th International Conference on e-Business Engineering, ICEBE 2013*, 407–412. <https://doi.org/10.1109/ICEBE.2013.62>
- [27] **M. Wagner, C.P. Baldé, v. Luda, R. Kuehr, I. C. Nnorom, & G. Iattoni. (2022).** Monitoreo regional de los residuos electrónicos para América Latina: resultados de los trece países participantes en el proyecto UNIDO-GEF 5554, Bonn (Alemania), 2022. [https://residuoselectronicosal.org/wp-content/uploads/2022/01/REM\\_LATAM\\_2022\\_ESP\\_Final.pdf](https://residuoselectronicosal.org/wp-content/uploads/2022/01/REM_LATAM_2022_ESP_Final.pdf)

**Otras fuentes de Información (sólo en inglés):**

General BAT BEP guidance relevant to recovery processes in cement kilns is available in:

- Basel Convention technical guidelines on the environmentally sound co-processing of hazardous wastes in cement kilns [<http://www.basel.int/Implementation/TechnicalMatters/DevelopmentofTechnicalGuidelines/TechnicalGuidelines/tabid/8025/Default.aspx>]
- Stockholm Convention BAT/BEP guidelines: V.B Cement kilns firing hazardous waste [<http://chm.pops.int/Implementation/BATBEP/BATBEPGuidelinesArticle5/tabid/187/Default.aspx>]
- EU CLM BREF [[https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM\\_Published\\_def\\_0.pdf](https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM_Published_def_0.pdf)]



Implementado por  
Implemented by:



In cooperation with:



Fomentado por:



en virtud de una decisión  
del Bundestag alemán

## Pie de imprenta

### Publicado por

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)  
GmbH

### Oficinas registradas

Bonn and Eschborn

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5  
65760 Eschborn, Germany  
T +49 6196 79-0  
F +49 6196 79-11 15  
E [info@giz.de](mailto:info@giz.de), [proklima@giz.de](mailto:proklima@giz.de)  
I [www.giz.de/proklima](http://www.giz.de/proklima), [www.copalliance.org](http://www.copalliance.org)

### Proyecto

Climate and Ozone Protection Alliance

### Responsable

Yunrui Zhou

### Autor

Veronica Villacis

### Coordinación

Lara Teutsch, Malin Emmerich, Anja Werntges

### Créditos de las fotos

© shutterstock (pages 1, 4, 6)  
A free source of Canva

### Diseño

creative republic || Thomas Maxeiner Communications  
Frankfurt a. M. / Germany

### En nombre de

The German Federal Ministry for Economic Affairs  
and Climate Action (BMWK)

### Publicado

Noviembre 2024



**GO TO WEBSITE**

Para más información sobre COPA y futuros eventos, puede  
visitar nuestro sitio web a través del código QR, o por el link:  
<https://www.copalliance.org>

### Contacto

Email: [contact@copalliance.org](mailto:contact@copalliance.org)