

LES TECHNIQUES DE NON-COMBUSTION POUR LA DESTRUCTION DES DÉCHETS CONTENANT DES POPs : UN BRIEFING DE L'IPEN SUR LA GESTION ÉCOLOGIQUEMENT RATIONNELLE DES POPs

Este documento describe técnicas demostradas y disponibles comercialmente que no requieren combustión para la destrucción de Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs) mismas que han sido evaluadas por expertos de la ONU como adecuadas para los países en desarrollo, también describe los problemas en la utilización de métodos de combustión tales como la incineración para intentar destruir los COPs. La aplicación de técnicas sin combustión para la destrucción de COPs nunca ha sido más importante que en la actualidad. A pesar de que el Convenio de Estocolmo exige la destrucción o transformación irreversible de los COP para que dejen de presentar las características que los distinguen, aún no se han destruido vastas cantidades almacenadas de los 12 COP originales, particularmente aceites PCB y equipos.¹

La adición de 16 nuevos COPs desde la entrada en vigor del Convenio ha dado lugar a cantidades masivas de COPs almacenados que requieren destrucción. En el futuro, se espera que más de estos productos químicos peligrosos sean incluidos en la lista para ser destruidos y con ello, la existencia de mayores volúmenes que necesitarán ser gestionados. Los residuos almacenados actualmente incluyen grandes volúmenes de plásticos tratados con retardadores de fuego bromados y PCCC, productos hacia el final de su vida útil con altos niveles de PFAS, y poliestireno impactado con HBCD.

Muchos gobiernos están investigando cómo destruir estos materiales. Las técnicas disponibles se pueden dividir en dos grupos: *Combustión* y *No Combustión*. La diferencia más importante es que los procesos de combustión generan COPs involuntariamente al quemar ese mismo tipo de residuos socavando así el objetivo del convenio. Por otro lado, **las instalaciones sin combustión operan por medios químicos o mecánicos y NO GENERAN MÁS COP.**

Deben evitarse las tecnologías de combustión. Entre ellas se incluyen:

- **Incineradores (combustión masiva, pirólisis, gasificación, arco de plasma)**
- **Hornos de cemento**
- **Plantas metalúrgicas**

Los principales problemas de las tecnologías de combustión son la generación involuntaria de COPs como dioxinas cloradas y furanos que pueden ser emitidos al aire y liberados en los residuos de limpieza de las tuberías de escape de las plantas de combustión. Los incineradores también liberan dioxinas a través de las cenizas que producen como residuos lo que conduce a la contaminación de la cadena alimenticia.² Los hornos de cemento están equipados con filtros para emisiones muy básicos comparados con los incineradores y experimentan variaciones en las temperaturas además de exceso de oxígeno, aumentando así el riesgo de formación no intencional de POPs así como la liberación de estos compuestos. Los hornos de cemento no cuentan con un sistema de enfriamiento rápido para enfriar los gases de combustión y reducir la síntesis de novo de dioxinas.³ Los enfriadores se utilizan como requisito básico en los incineradores de residuos peligrosos para este fin; recientemente, un moderno horno de cemento en Austria que quemaba residuos de HCB contaminó el valle de Görtschitztal en Kärnten, lo que provocó que se encontrara HCB en forrajes, ganado, leche y seres humanos, cientos de cabezas de ganado lechero fueron sacrificadas para evitar la producción de leche contaminada y se perdieron 800 toneladas de productos lácteos.⁴ Las plantas metalúrgicas son también una fuente conocida de

1 El 83% de todos los PCB aún no han sido destruidos a pesar del plazo de destrucción establecido en 2028. PNUMA (2017) La JCP, ¿un legado olvidado? 2028: Final Elimination of PCB. <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-PCB-TOR-PEN-2017.English.pdf>

2 <https://ipen.org/documents/toxic-ash-poisons-our-food-chain>

3 Ming-Xiu Zhan, Shuping Pan, Ivan Deviatkin, Tong Chen and Xiao-Dong Lid Thermal reaction characteristics of dioxins on cement kiln dust. (Características de la reacción térmica de las dioxinas en el polvo del horno de cemento) *RSC Adv.*, 2018, 8, 3582-3591

4 Weber, R., Schlumpf, M., Nakano, T. et al. *Environ Sci Pollut Res* (2015) 22: 14385. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5162-7> & <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-015-5162-7>

COPs producidos de manera no intencional (especialmente dioxinas)⁵ y deben evitarse para la quema de COPs ya que sus limitaciones son similares a las de los hornos de cemento en términos de control de la contaminación. Los incineradores de residuos, los hornos de cemento y las plantas metalúrgicas figuran en Instrumental de Mejores Técnicas Disponibles y Mejores Prácticas Ambientales (MTD/MPA) del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes⁶ como fuentes conocidas de emisiones y descargas de dioxinas.

Para evitar la perpetuación de la generación de COPs, es fundamental que los países adopten tecnologías libres de combustión para destruir los desechos contaminados con los mismos. A continuación se describen algunas de las técnicas libres combustión mejor desarrolladas y disponibles comercialmente. Esta lista no es exhaustiva, pero representa las tecnologías que han sido ampliamente utilizadas y probadas comercialmente.

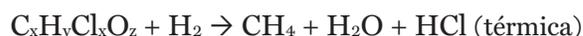
REDUCCIÓN QUÍMICA EN FASE GASEOSA (GPCR)

La GPCR fue desarrollada inicialmente en la década de 1980 en Canadá y funcionó a escala de laboratorio antes de ser comercializada y operada a nivel comercial en la década de 1990. Una instalación a gran escala en Kwinana, Australia Occidental, operó con éxito durante 5 años durante la década de 1990, destruyendo todas las existencias de PCB de ese estado y gran parte de los COPs almacenados Australia. La misma tecnología se desarrolló más y más tarde se estableció a escala piloto y comercial en Canadá, EE.UU. y Japón y tiene la capacidad demostrada de destruir todos los COP a niveles considerados de alta eficiencia de destrucción (DE).

La tecnología GPCR se basa en el uso de hidrógeno a temperaturas elevadas (aprox. 875°C) y baja presión para lograr la reducción termoquímica de los compuestos orgánicos. El material sólido a granel contaminado se coloca en una cámara sellada llamada Procesador de Reducción Térmica por Lotes (TRPB), donde los COPs son desorbidos térmicamente y transportados al reactor por el gas hidrógeno calentado. Los COP líquidos se precalientan y se inyectan directamente al TRBP. Los suelos y sedimentos

contaminados a granel se procesan en un sistema de reactor TORBED, una versión modificada del TRPB que permite un mayor rendimiento. Es necesario dar un tratamiento térmico previo a algunos residuos y el sistema requiere electricidad, hidrógeno, agua y sosa cáustica para la limpieza. La tercera generación de la tecnología (desarrollada por Hallett Environmental & Technology Group Inc. de Ontario, Canadá) también puede generar energía a partir del exceso de gas metano rico en hidrógeno proveniente del proceso que excede significativamente los requisitos del proceso⁷ y permite la exportación de energía. Las reacciones que ocurren generan metano y posteriormente el metano se convierte en gas hidrógeno en un sistema de gas de proceso recirculante y auto-regenerable.

En general, el proceso químico de la conversión de una estructura de hidrocarburos con contenido de cloro y posiblemente oxígeno se puede expresar de la siguiente manera:



El metano se convierte a hidrógeno mediante las reacciones de reformado con vapor y de desplazamiento por agua que se expresan de la siguiente manera:



Los residuos del proceso incluyen el licor de lavado y agua apta para vertidos industriales, así como materiales sólidos (bidones metálicos, etc.) descontaminados y aptos para vertederos. Las emisiones son principalmente de cloruro de hidrógeno, metano y otros hidrocarburos, incluido el benceno. Un espectrómetro de masas en línea puede analizar todos los gases de salida del reactor para asegurar una decloración completa, y los gases, después del lavado del cloruro de hidrógeno, pueden ser recirculados completamente o divididos entre el reactor y la alimentación de combustible de la caldera. El sistema puede operar de manera modular, transportable y fija, incluyendo TRBPs transportables para realizar descontaminación *in situ* de los sitios afectados por los COPs.

Un sistema doble de TRBP puede procesar alrededor de 75 toneladas de sólidos por mes. Los líquidos se pueden procesar a razón de 2 a 4 litros por minuto. Un reactor TORBED semimóvil puede procesar alrededor de 300 a 600 toneladas por mes. Las principales ventajas son la destrucción completa de todos

5 Buekens, A., Stieglitz, L., Hell, K., Huang, H. and Segers, P. (2001) Dioxins from thermal and metallurgical processes: recent studies for the iron and steel industry. *Chemosphere* Volume 42, Issues 5-7, February 2001, Pages 729-735 [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00247-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00247-2)

6 Instrumental para la identificación y cuantificación de descargas de dioxinas, furanos y otros COP no intencionales en virtud del artículo 5 del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. http://toolkit.pops.int/Publish/Main/II_01_Waste.html

7 Se refiere a la energía necesaria para el funcionamiento de la tecnología.

los COP, la autoregeneración del gas de proceso del hidrógeno, la movilidad y el pequeño espacio (1000 m²) necesario para los sistemas con una capacidad de producción de 70 toneladas al mes para las menores cantidades o emplazamientos contaminados, además de las bajas cantidades de residuos sólidos del proceso y un largo historial de utilización comercial con éxito. Los cálculos recientes del costo de la instalación de una planta GPCR son de alrededor de 50 millones de dólares para construir y 1 millón de dólares para capacitar al personal.⁸ Esto representa alrededor del 10% del costo de un incinerador de residuos moderno.

OXIDACIÓN CON AGUA SUPERCRÍTICA (SCWO)

En los últimos 30 años, varias empresas han desarrollado sistemas de oxidación con agua supercrítica y subcrítica, y algunas tienen una experiencia comercial considerable en la destrucción de COPs como los PCBs. Las tecnologías comparten principios similares para la destrucción de productos orgánicos utilizando un agente oxidante como el peróxido de hidrógeno, el oxígeno o el nitrito. El término “supercrítico” se refiere al estado del agua justo antes de su cambio de fase de líquido a gas bajo calor y presión (por ejemplo, 374°C y 218 atmósferas). Por agua subcrítica se entiende el estado del agua justo por debajo de su nivel crítico (por ejemplo, 370°C y 262 atmósferas). En este estado, los materiales orgánicos pueden oxidarse y descomponerse rápidamente. Para la destrucción de los PCBs, las condiciones típicas de reacción son: temperatura de 400 a 500°C, presión de 25MPa, con un tiempo de reacción de 1 a 5 minutos.

Los sistemas supercríticos generalmente se inyectan con los residuos junto con agua y oxígeno en una columna, se mezclan, calientan y comprimen hasta llevarlos a un estado supercrítico. El sistema es totalmente cerrado. Las propiedades del agua en esta fase tienen una elevada energía molecular cinemática que es altamente reactiva y, combinada con el oxígeno, puede oxidar y destruir los residuos orgánicos. Los resultados de la reacción son nitrógeno, agua y dióxido de carbono. La destrucción de los COP clorados da lugar a una producción de ácido clorhídrico elevada. El ambiente altamente ácido que esto genera requiere que el equipo estructural de los recipientes de proceso sea resistente a la corrosión, como las aleaciones de titanio en combinación con aditivos anticorrosivos como el carbonato de sodio. El proceso no es adecuado para sólidos a granel, pero puede tratar residuos acuosos, aceites, disolventes, lodos y sólidos con un diámetro inferior a 200 µm. Las primeras versiones

de la tecnología eran propensas a la corrosión, pero esta situación se ha resuelto con el uso de materiales más resistentes.

En 2013 había 3 plantas en pleno funcionamiento, 5 construidas y 9 planificadas para la construcción. Mientras tanto, muchas de estas plantas habrán entrado en funcionamiento. La planta más antigua establecida en Japón es operada por la Japan Environmental Safety Corporation (JESCO) para la destrucción de PCBs, con una capacidad de 2000 kg de PCB por día (Marrone *et al.* 2013). Si bien los costos pueden variar significativamente debido a la capacidad y el tipo de SCWO desarrollado, un estudio de Aki *et al.* (1998) encontró que la destrucción de residuos peligrosos de la industria petroquímica podría lograrse a costos significativamente más bajos mediante la implementación de SCWO en lugar de utilizar la incineración. Los costes de instalación eran un 15% más baratos y los costes de funcionamiento para el SCWO eran sólo alrededor del 10% de los costes de incineración de líquidos peligrosos. Actualmente, el SCWO es utilizado ampliamente por el ejército de los Estados Unidos para la destrucción de desechos peligrosos y armas químicas, incluidas las unidades móviles basadas en buques. Marrone, al resumir una revisión exhaustiva del estado global de la SCWO, señala que “la comercialización de la tecnología SCWO sigue siendo un área de gran interés y actividad”. Las principales ventajas del SCWO son sus muy bajas emisiones, bajos costos, alta ED y bajos recursos asociados (catalizadores) para su operación en lugares remotos.

HYDRODEC

El sistema Hydrodec era una tecnología desarrollada por la Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO, por sus siglas en inglés) en Australia para la renovación del aceite para transformadores y la destrucción simultánea de PCBs, y originalmente se conocía como hidrogenación catalítica. La empresa “Hydrodec” se fundó en 2004 y comenzó a operar en Australia. La planta australiana procesa actualmente 6,5 millones de litros de aceite al año y la estadounidense 45 millones de litros al año. Un proceso similar en Japón puede tratar 2 toneladas de PCBs puros al día con una DE de 99,9996-99,9999%. (Vijgen 2008).

Según los desarrolladores australianos de esta tecnología,⁹ el proceso Hydrodec se basa en la hidroge-

9 Duffy, G.J. and C.J.R. Fookes, 1997. Development of a Catalytic Process for the Regeneration of Transformer Oils and the Destruction of Chlorinated Hydrocarbons. Presented at the I&EC Special Symposium, American Chemical Society, Pittsburgh, Pennsylvania, September 15-17, 1997.

nación suave del aceite usado empleando un reactor catalítico de lecho compacto (gas hidrógeno y catalizador de paladio sobre carbono (Pd/C) dispersado en el aceite de parafina), que funciona a temperaturas y presiones moderadas. En condiciones de proceso, el hidrógeno reacciona con heteroátomos en el aceite mismo, y también con cualquier organocloro presente. Los catalizadores de metales nobles son eficaces, pero se sabe que se intoxican fácilmente con contaminantes como el azufre en el aceite. Los desarrolladores de Hydrodec superaron este problema utilizando un aditivo patentado que elimina el cloruro de hidrógeno y asegura que el ácido clorhídrico producido no conduzca a la degradación del catalizador, y que reduce las reacciones de craqueo de los hidrocarburos en la superficie del catalizador. Después de un programa de optimización de catalizadores y procesos, fue posible mantener esencialmente inalterada la estructura de hidrocarburos del aceite para transformadores, mientras se lograba una destrucción de PCBs superior al 99.999% (Duffy y Fookes 1997). Si bien la aplicación comercial del proceso es la destrucción de PCBs y el rejuvenecimiento del aceite de transformadores sin los mismos, se ha puesto a prueba en una serie de COPs (véase el cuadro a continuación) produciendo una elevada DE y considerado aplicable a la mayoría de los COP en forma líquida.

Composé	Intrant Concentration (mg/kg)	Produit Concentration (mg/kg)	Efficiencia de la Destrucción (%)
PCB	40.000	< 0,027	> 99,99993
DDT	40.000	< 0,004	> 99,99999
PCP	30.000	< 0,003	> 99,99999
HCB	1.340	< 0,005	> 99,99996
1,2,3,4-TCDD	46	< 0,000004	> 99,99999

Las emisiones del proceso Hydrodec consisten en gases de purga que se someten a dos etapas de depuración cáustica para eliminar gases ácidos como el H₂S y HCl. El gas de purga es entonces pasado a través de una cámara de combustión catalítica para quemar hidrógeno residual y cualquier hidrocarburo no condensable (metano, etano) formado en el proceso (Duffy y Fookes, 1997). Los efluentes contaminados con cloro se lavan con una solución cáustica. Por lo tanto, otra corriente de proceso son los residuos acuosos que contienen cloruros metálicos (como resultado de la neutralización del HCl formado). Estas aguas residuales del proceso se recogen y eliminan, pero en un futuro inmediato se propone que las aguas residuales se traten dentro de una planta de tratamiento de aguas residuales in situ mediante ozomólisis e inter-

cambio iónico, lo que permitirá que el agua tratada se recicle en el proceso (UNIDO 2007).

DECLORACIÓN CATALIZADA POR BASES (BCD)

El proceso BCD fue desarrollado conjuntamente por la Marina de los Estados Unidos y la Autoridad de Protección Ambiental del mismo país (US EPA) para descontaminar líquidos, suelos, lodos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos clorados, especialmente PCB, dioxinas y furanos. El proceso de BCD ha recibido la aprobación de la Oficina de Sustancias Tóxicas de la EPA en el marco de la TSCA¹⁰ para el tratamiento de PCB (UNIDO 2007). La patente de la tecnología fue transferida a los desarrolladores y mantenida por BCD Group USA y licenciada para operar en los Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda, México, Japón, España y la República Checa.

La tecnología de decloración catalizada base es un proceso de dos pasos. El primer paso es utilizar la desorción térmica indirecta (la desorción térmica directa conduce a un exceso de gas contaminado que es caro de tratar) para extraer los COPs de la matriz que contamina, tales como escombros de construcción, suelo o sedimentos, mediante un proceso continuo. El segundo paso es tomar los COPs concentrados o puros desorbidos en el primer paso y tratarlos en un proceso por lotes, destruyendo los COPs en un recipiente de reacción líquido calentado y agitado. Este paso implica una reacción de transferencia de hidrógeno. Un aceite portador actúa como un donante de hidrógeno y medio de suspensión para el hidróxido de sodio. El aceite se calienta a 326°C (punto de fusión del NaOH) y se añade el NaOH, un reactivo y el concentrado de COPs proveniente de la desorción. En condiciones exotérmicas, el hidrógeno se separa del aceite del donante e hidrogeniza el cloro enlazado de los COP (suponiendo que se trate de COPs clorados). En combinación con un reactivo patentado, la reacción produce vapor de agua y cloruro de sodio. Tras la evaluación de la reacción, el aceite y los lodos se vierten del reactor y el aceite se puede reciclar en el siguiente lote de proceso. Los lodos pueden neutralizarse para disposición en un relleno sanitario o utilizarse para el tratamiento de aguas residuales ácidas (UNIDO 2007).

Se han construido plantas BCD modulares, transportables y fijas. La capacidad de rendimiento para la etapa de desorción difiere según la aplicación y oscila entre 100 kg/hora y 20 toneladas/hora (STAP GEF

¹⁰ The Toxic Substances Control Act is a United States law, passed by the United States Congress in 1976 and administered by the United States Environmental Protection Agency, that regulates the introduction of new or already existing chemicals.

2004). Los reactores de BCD están limitados por el contenido de sólidos en los residuos del reactor y normalmente tratan de 1 a 3 toneladas por lote y de 2 a 4 lotes por día. Se ha demostrado una alta eficiencia de destrucción (4 a 6 nueves o 99,9999%) para DDT, PCB, PCP, HCB, HCH y dioxinas (PCDD/F). Las emisiones son muy bajas, como en la mayoría de los reactores por lotes y unidades de desorción indirecta. La masa total de gases de escape emitidos es de órdenes de magnitud inferiores a las de los incineradores o unidades de desorción similares de combustión directa (STAP GEF 2004). Se ha demostrado que esta tecnología trata tanto los COP de alta resistencia así como grandes volúmenes de suelo contaminado, incluidos los suelos muy contaminados afectados por dioxinas en Spolana (República Checa).¹¹ Los costes relativamente bajos de los aditivos (el hidróxido de sodio es el principal coste de los insumos) hacen que esta tecnología sea adecuada para su aplicación en la mayoría de los países en desarrollo.

MOLINO DE BOLAS

Esta tecnología es una aplicación mecanoquímica que combina el impacto mecánico con reactivos químicos para crear una reacción de reducción de sustratos clorados como PCB o plaguicidas. El objetivo es lograr la deshalogenación reductora de los residuos contaminados con COP. Éstos se colocan en el molino de bolas con un compuesto alcalino metálico que actúa como donante de hidrógeno y se le hace vibrar vigorosamente para permitir la agitación de las bolas de acero, el reactivo y la mezcla de residuos. El proceso se lleva a cabo a temperatura ambiente, en recipientes cerrados, sin necesidad de calentamiento. No hay que manejar ningún gas de proceso, lo que evita la liberación de compuestos orgánicos peligrosos. El cloro de los residuos de COP se convierte en compuestos inorgánicos llamados CaCl_2 o $\text{Ca}(\text{ClOH})$.

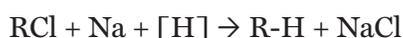
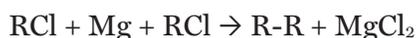
Los reactivos pueden incluir óxido de calcio (CaO), magnesio (Mg), sodio y otros metales, incluyendo sus óxidos. El material contaminado se coloca en el molino de bolas, que es esencialmente un recipiente metálico que puede funcionar como reactor discontinuo o incluso como reactor continuos con el reactivo y los rodamientos de bolas. Además de los PCB y los plaguicidas, también se ha aplicado con éxito en suelos contaminados con dioxinas. Tres aplicaciones comerciales están bien desarrolladas y se basan en los mismos principios: Deshalogenación de Tribochem por reacción mecanoquímica (DMCR), Destrucción

Mecanoquímica (MCD) de EDL y Radicalplanet (Research Institute Pty Ltd). Los experimentos realizados en laboratorio que utilizan la molienda con bolas también han demostrado ser eficaces para destruir el hexabromociclododecano (Zhang *et al.* 2014a) y los éteres de difenilo polibromado (Zhang *et al.* 2014b).

Un proveedor de tecnología (EDL Europe) describe su proceso de Destrucción Mecano-Química (MCD):

“... los puntos de colisión bola a bola y bola a superficie son las principales regiones de fractura e iniciación de la reacción química. Las reacciones inducidas en el punto de fractura incluyen la formación de radicales y la transferencia de electrones, lo que resulta en la destrucción de los enlaces químicos. EDL aprovecha este fenómeno químico para destruir incluso los contaminantes más persistentes que representan una amenaza para la salud humana y ambiental.”

EDL utiliza una versión patentada de esta tecnología conocida como Destrucción Mecano-Química (MCD) para remediar suelos y plaguicidas. En su versión de la tecnología, se incluye un eje central giratorio adicional equipado con rotores incluido en el contenedor reactor principal. A medida que el eje gira, agita los rodamientos de bolas a alta velocidad, lo que lleva a una velocidad mucho mayor de impactos entre bola a bola y entre bola a bola y superficie. La química es muy compleja y se basa en transformaciones radicales que involucran especies radicales metal-orgánicas. A continuación se presentan versiones simplificadas de las reacciones (ONUDI, 2007).



Más recientemente, EDL Europe llevó a cabo una prueba conjunta financiada por el PNUD y el FMAM para remediar una antigua base aérea estadounidense en Bien Hoa, Vietnam, tratando 150 toneladas de suelo contaminado con dioxinas y PCBs similares a las dioxinas. La tecnología logró una alta DE para las dioxinas, reduciendo sus niveles en el suelo a tan sólo 1000 ppt (1 ppb). En el sitio de Bien Hoa se pusieron a prueba otras tecnologías para evaluar su idoneidad para la remediación a gran escala del sitio. El MCD ha sido preseleccionado entre los criterios de selección y las estimaciones de costos en comparación con la incineración de los residuos de dioxinas puesto que el costo del proceso de MCD resulta hasta 60 millones

¹¹ http://www.recetox.muni.cz/coe/sources/workshop_1_rba_pts/V11-Fairweather.pdf

de dólares menor, mismo que tampoco genera que no genera POPs no intencionales. También han completado proyectos de tratamiento de plaguicidas, PCB y dioxinas para el ejército estadounidense en Alaska y California, y para el gobierno japonés además de múltiples proyectos privados. La primera remediación importante se realizó en Mapua (Nueva Zelanda), sitio altamente contaminado con lindano, DDT, dieldrina y aldrina. El sitio es ahora de uso residencial y recreativo mixto.

REDUCCIÓN DE SODIO (SR)

Este proceso implica la reducción de PCB utilizando sodio metálico disperso en aceite mineral portador. Su principal aplicación ha sido la eliminación in situ de PCBs en transformadores activos, permitiendo que los transformadores continúen operando en un estado descontaminado sin pérdida de capacidad dieléctrica del aceite mineral. Los productos de este proceso incluyen cloruro de sodio, aceites de petróleo, agua alcalina y polibifenilos deshalogenados. Existen unidades estacionarias y móviles disponibles. Las unidades móviles son capaces de tratar 15.000 litros por día de aceite para transformadores. Hay muchos proveedores que operan sistemas de SR y la mayoría de los aceites de PCBs con niveles superiores a 50 ppm (el límite reglamentario para los COPs de PCB) en América del Norte, Francia y Alemania han sido tratados con esta tecnología.

En la mayoría de los procesos de RS, el líquido orgánico que contiene aceite PCB se mezcla con una fina dispersión de sodio en aceite de hidrocarburo. Generalmente, la reacción se realiza en un recipiente de reacción agitado estándar por lotes, a menos que se aplique un tratamiento in situ (normalmente en transformadores eléctricos). La tecnología funciona bajo condiciones atmosféricas de presión y temperaturas moderadas, normalmente entre 80 y 180°C. Los productos básicos de reacción incluyen principalmente varios hidrocarburos deshalogenados con mayor peso molecular (polifenilos), halogenuros de sodio y pequeñas cantidades de hidrógeno (UNIDO 2007). Los productos del petróleo pueden ser reutilizados y los lodos inorgánicos eliminados. En algunos casos, la extracción por solvente puede utilizarse como pretratamiento para eliminar los PCB de las carcassas porosas de los transformadores y otras matrices adsorbentes antes del tratamiento de TS. Los PCBs en estado sólido deben disolverse y eliminarse de los sólidos antes del tratamiento con SR y deben deshidratarse. La eliminación del agua es crítica debido a la alta reactividad del sodio disperso con el agua, la subsiguiente generación de hidrógeno y el riesgo de explosión. SR es una tecnología relativamente simple, de baja emisión y bajo costo, con un alto contenido de DE cuando se aplica a PCB líquidos diluidos. La disponibilidad y comercialización son altas y el aceite de PCB tratado puede ser reutilizado con un importante ahorro de costos para los operadores de servicios públicos y otros propietarios de transformadores.

REFERENCIAS

- Aki, S.N.V.K, (1998) An Economic Evaluation of Catalytic Supercritical Water Oxidation: Comparison with Alternative Waste Treatment. *Technologies Environmental Progress* (Vo1.17, No.4)
- Marrone, P.A. (2013) Supercritical water oxidation—Current status of full-scale commercial activity for waste destruction. *J. of Supercritical Fluids* 79 (2013) 283–288
- Ming-Xiu Zhan, Shuping Pan, Ivan Deviatkin, Tong Chen and Xiao-Dong Lid Thermal reaction characteristics of dioxins on cement kiln dust. *RSC Adv.*, 2018, 8, 3582–3591
- Buekens, A., Stieglitz, L., Hell, K., Huang, H. and Segers, P. (2001) Dioxins from thermal and metallurgical processes: recent studies for the iron and steel industry. *Chemosphere* Volume 42, Issues 5–7, February 2001, Pages 729–735 [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00247-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00247-2)
- Duffy, G.J. and C.J.R. Fookes, 1997. Development of a Catalytic Process for the Regeneration of Transformer Oils and the Destruction of Chlorinated Hydrocarbons. *Presented at the I&EC Special Symposium, American Chemical Society, Pittsburgh, Pennsylvania, September 15-17, 1997.*
- STAP GEF (2004) Review of emerging, innovative technologies for the destruction and decontamination of POPs and the identification of promising technologies for use in developing countries. *The Scientific and Technical Advisory Panel of the GEF United Nations Environment Programme*. Final – GF/8000-02-02-2205
- Vijgen, J. and McDowall R, (2008) Catalytic Hydro-Dechlorination Method (CHD). *Basel Convention technical fact sheet* http://www.ihpa.info/docs/library/reports/pops/june2009/sbc_chdfactsheet_111108_prov_sbclogo.pdf
- UNIDO (2007) Non-combustion Technologies for POPs Destruction Review and Evaluation. *United Nations Industrial Development Organization* (eds Sergey Zinoviev, Paolo Fornasiero, Andrea Lodolo, Stanislav Miertus)
- Zhang K, Huang J, Wang H, Liu K, Yu G, Deng S, Wang B. (2014a) Mechanochemical degradation of hexabromocyclododecane and approaches for the remediation of its contaminated soil. *Chemosphere*. 2014 Dec;116 40–45. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.02.006. PMID: 24613442.
- Zhang K, Huang J, Wang H, Yu G, Wang B, Deng S, Kanoband J, Zhang Q. (2014b) Mechanochemical destruction of decabromodiphenylether into visible light photocatalyst BiOBr. *RSC Advances* 4(28):14719–1472 DOI: 10.1039/c3ra47738j



un futuro sin tóxicos

www.ipen.org • ipen@ipen.org • [@ToxicsFree](https://twitter.com/ToxicsFree)