

Identificación de tecnologías para el manejo responsable de residuos y desechos de bifenilos policlorados (PCB)

J. Loayza¹, M. Silva², E. Cueva³, M. Polo⁴, G. Arce⁵, A. Casafranca⁶

(Recibido 01/03/2016 / Aceptado 20/05/2016)

RESUMEN

Los bifenilos policlorados (o PCB, acrónimo en inglés correspondiente a PolyChlorinatedBiphenyls), al igual que otros compuestos policlorados (como las dioxinas y furanos), son muy persistentes en el ambiente; es decir, resisten la degradación y se bioacumulan en los organismos de los sistemas vivos (humanos y no humanos). Por tal motivo, los residuos industriales que contienen PCB deben ser adecuadamente gestionados. En el presente estudio se describen las etapas del ciclo de vida de los fluidos dieléctricos (o aceites dieléctricos) contaminados con estas sustancias, hasta las etapas de separación, transformación o destrucción de los PCB presentes. También se hace referencia a la disposición final en rellenos de seguridad de los desechos que contienen PCB. Los fluidos dieléctricos contaminados con PCB son residuos peligrosos y proceden, en este caso, de aplicaciones cerradas (transformadores y condensadores). La gestión integral de residuos de PCB se inicia con la determinación de la presencia de PCB en los equipos antiguos (fabricados antes de 1985); la existencia de compuestos clorados en un fluido dieléctrico –aceite– no garantiza que los PCB estén presentes. Los fluidos dieléctricos contaminados deben ser drenados y almacenados, para luego embalarlos y transportarlos adecuadamente a lugares especialmente acondicionados para su descontaminación. Los PCB se pueden separar por métodos físicos, para llevarlos a disposición final o transformarlos en otros componentes (disminuyendo su peligrosidad); para lo cual se usan fundamentalmente métodos destructivos: químicos y térmicos (convencionales y avanzados). Los métodos biológicos se limitan al landfarming. Es importante que los aceites dieléctricos (presentes en los fluidos dieléctricos) puedan ser recuperados para reutilizarlos nuevamente, pero exentos de PCB o conteniendo trazas, que cumplan con la normatividad vigente, tanto a nivel nacional e internacional. Actualmente, a nivel mundial existe una campaña para identificar, retirar y destruir responsablemente los residuos de PCB, lo que implica hacerlo en forma segura y con el mínimo impacto ambiental.

Palabras clave: Transformadores, fluidos dieléctricos, bifenilos policlorados, PCB, dechlorinación, incineración.

Identification of technologies for responsible management of waste and scrap of polychlorinated biphenyls (PCB)

ABSTRACT

Polychlorinated biphenyls (or PCBs) and other polychlorinated compounds, such as dioxins and furans, are very persistent in the environment and bioaccumulate in organisms (human and nonhuman living systems), as such industrial waste containing PCBs must be properly managed. In the present study are described the steps of the life cycle stages of dielectric fluids (or dielectric oils) contaminated until separation steps, processing or destruction of PCBs. Reference to disposal in secure landfills containing PCB waste is

-
- 1 Ingeniero Químico. Profesor del Departamento Académico de Procesos. Grupo de Investigación en Tecnologías Ambientales. FQIQ. UNMSM. Correo electrónico: jloayzap@yahoo.es, jloayzap@unmsm.edu.pe.
 - 2 Ingeniería Química. Profesora del Departamento Académico de Química Inorgánica. Grupo de Investigación en Tecnologías Ambientales. FQIQ. UNMSM. Correo electrónico: vicksm02@yahoo.es.
 - 3 Química. Profesora del Departamento Académico de Química Orgánica. FQIQ-UNMSM.
 - 4 Ingeniera Química. Profesora del Departamento Académico de Química Inorgánica. FQIQ-UNMSM.
 - 5 Estudiante de la E.A.P. Ingeniería Química. FQIQ-UNMSM.
 - 6 Estudiante de la E.A.P. Ingeniería Química. FQIQ-UNMSM.

also made. The PCB, dielectric fluids are hazardous waste and comes in the case of closed applications (transformers and capacitors). The integrated waste management PCB starts with the determination of the presence of PCBs in old equipment (manufactured before 1985); the presence of chlorinated compounds in a dielectric fluid not guarantee that PCBs are present. Contaminated dielectric fluids must be drained and stored, then pack them properly and transport them to places specially designed for decontamination. PCBs can be separated by physical methods for disposal or take them to transform them into other components (reducing their dangerousness), for which are mainly used destructive methods: chemical and thermal (conventional and advanced). Biological methods are limited to landfarming. It is important that the dielectric oils (dielectric fluids) can be recovered for reuse again, but exempt from or containing PCB traces that comply with current regulations. Currently there is a worldwide campaign to identify, remove and destroy responsibly

Keywords: Transformers, dielectric fluids, polychlorinated biphenyls, PCB, dechlorination, incineration.

I. INTRODUCCIÓN

Existe a nivel mundial una gran preocupación por el manejo responsable de las sustancias químicas, que incluyen no solo aquellas en estado puro, sino también productos elaborados con ciertas concentraciones de la sustancia, o mezclas de productos. Es por ello que un objetivo del Programa Inter-Organizacional para el Manejo Responsable de Sustancias Químicas, IOMC (Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals), para el año 2020, es “asegurar que los productos químicos sean elaborados y *utilizados* de manera que se *minimicen* los *impactos negativos significativos* sobre la salud humana y el medio ambiente”. La preocupación aumenta en el caso de los residuos y se magnifica cuando se trata de los desechos. El presente estudio plantea opciones para la separación de los residuos de PCB de fluidos dieléctricos, utilizando métodos físicos, para garantizar luego su destrucción responsable empleando fundamentalmente métodos químicos y térmicos [3] [4] [5]. La degradación natural de PCB presentes en el ambiente se da en la tropósfera [por acción de la luz solar o por acción con los radicales hidroxilo (HO•)], así como en el suelo y sedimentos; ya sea por reducción anaeróbica u oxidación aeróbica [15].

Los bifenilos policlorados (PCB) fueron sintetizados por primera vez en Alemania, en el año 1881 por Schmitt-Schulz. En los Estados Unidos, se inició la producción industrial en el año 1929 y se prohibió en el año 1977. Con el paso de los años, otros

países también se aunaron a esta prohibición: por ejemplo, la OCDE tomó la decisión de recomendar, a sus países miembros, cesar la manufactura, importación, exportación y venta de PCB, para el 1° de enero de 1989. Pero, es importante anotar que a pesar de las prohibiciones y debido a sus características químicas, estas sustancias aún persisten en el aire, agua y suelo, ya que se bioacumulan y se transfieren dentro de la cadena alimenticia (o cadena trófica).

Los PCB son una familia de más de 209 compuestos químicos estructuralmente relacionados (llamados “congéneres”), formados por cloro, carbono e hidrógeno. Su fórmula general es $C_{12}H_{10-n}Cl_n$, cada PCB consta de dos anillos bencénicos y de uno a diez átomos de cloro [1]. Los PCB se forman por cloración electrofílica del bifenilo con gas cloro en alguna de las 10 diferentes posiciones en que este átomo puede ingresar a la molécula. La cantidad y posición de los átomos de cloro determinan sus propiedades químicas y son mayoritarios los PCB que tienen de dos a siete átomos de cloro. Con respecto a su estado físico, los PCB se presentan desde fluidos aceitosos hasta resinas duras y transparentes, o cristales blancos; dependiendo del grado de cloración de la molécula [4] [6] [12].

Los métodos instrumentales, actualmente empleados para detectar trazas, han permitido poner en evidencia que alimentos de consumo humano, como carnes (vacuna, porcina, de aves y peces), leche, huevos de gallina, vegetales, granos, etc., contienen altas concentraciones de PCB que sobrepasan lo establecido por las organizaciones

internacionales. La EPA estableció un límite de 0.0005 mg de PCB por litro de agua para consumo humano ^{[9][11]}.

A nivel nacional el Ministerio de Salud y la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), conjuntamente con la cooperación internacional, están desarrollando el Proyecto “Manejo y Disposición Ambientalmente Racional de PCB en el Perú” – GF/PER/10/001, cuyo objetivo general consiste en establecer las prácticas de gestión ambientalmente racional para los PCB, así como aumentar la cantidad retirada y la eliminación de equipos y residuos que contengan PCB.

II. GENERACIÓN DE RESIDUOS DE PCB PROVENIENTES DE APLICACIONES COMPLETAMENTE CERRADAS

Los PCB han sido utilizados por sus propiedades, tanto en aplicaciones cerradas (o completamente cerradas), semicerradas o abiertas ^[8]. En este estudio se hace referencia a las aplicaciones cerradas en el sector

eléctrico, fundamentalmente transformadores, condensadores (capacitores) y otros equipos, que requieran fluidos aislantes y refrigerantes.

La presencia de PCB en un transformador se puede deber a que:

El fluido dieléctrico tenía en su composición PCB, desde su primera carga.

El fluido dieléctrico se contaminó con PCB, presentes en una carcasa contaminada, luego de su mantenimiento e inadecuada limpieza.

El transformador se recargó con un fluido dieléctrico contaminado con PCB.

III. ETAPAS PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS DE PCB

En el Cuadro 1 se muestran las etapas para la gestión integral de residuos de PCB, provenientes de aplicaciones cerradas, y se toma como referencia el caso de los transformadores ^{[6][8]}.

Cuadro 1. Etapas para la gestión integral de residuos de PCB en aplicaciones cerradas

Etapa	Nombre de la etapa	Breve descripción
1	Muestreo	Es necesario tomar una muestra del fluido dieléctrico en cada uno de los equipos sospechosos y realizar un análisis cualitativo.
2	Análisis de la muestra	Para descartar un falso positivo, es necesario hacer un análisis cuantitativo para determinar la concentración de PCB.
3	Drenaje	Si se comprueba la presencia de PCB en concentraciones mayores de 50 ppm, se procede al drenaje y almacenamiento del fluido dieléctrico.
4	Embalaje	Los aceites contaminados con PCB deben ser adecuadamente embalados, para evitar escapes accidentales (fugas).
5	Etiquetado	Los contenedores deben ser apropiadamente rotulados, según la normatividad internacional.
6	Recolección	Los contenedores deben ser transportados por gestores autorizados para la recolección y transporte de residuos peligrosos.
7	Transporte hacia plantas de tratamiento	Los contenedores deben ser llevados hacia plantas de recuperación física y de tratamiento de PCB.
8	Recuperación	Los PCB se separan de los fluidos dieléctricos contaminados por decantación, ya que se depositan en el fondo de los tanques de almacenamiento.
9	Transformación (Destrucción)	Los residuos de PCB que contienen elevadas concentraciones pueden ingresar a la zona de tratamiento químico o térmico, para su transformación (destrucción).
10	Transporte hacia un relleno de seguridad	Los residuos de PCB que no puedan ser tratados (denominados desechos) se les embala convenientemente para su transporte hacia un relleno de seguridad, donde se efectuará su disposición final.

(*) Fluido dieléctrico = aceite dieléctrico.

Fuente: Loayza J. Editor. (2015) Boletín Electrónico Informativo sobre productos y residuos químicos N° 79 [8].

IV. TECNOLOGÍAS PARA LA SEPARACIÓN Y DESTRUCCIÓN DE LOS RESIDUOS DE PCB

La gestión de aceites dieléctricos con PCB, considerados como residuos, puede seguir diversos caminos, dependiendo de la concentración de los PCB o del objetivo final del tratamiento.

En la Figura 1 se muestra esquemáticamente el caso de aceites dieléctricos contaminados con PCB. Mediante una separación

física, es posible separar el aceite dieléctrico de los PCB para el posterior reuso del aceite dieléctrico, luego de comprobar que la concentración de PCB esté dentro de los límites permisibles para su reutilización. Los PCB con trazas de aceite dieléctrico pueden ser destruidos (transformados responsablemente en otras sustancias menos peligrosas) en instalaciones especialmente diseñadas, o llevados a disposición final en un relleno de seguridad (adecuadamente embalados y rotulados) y colocados en celdas especialmente acondicionadas.

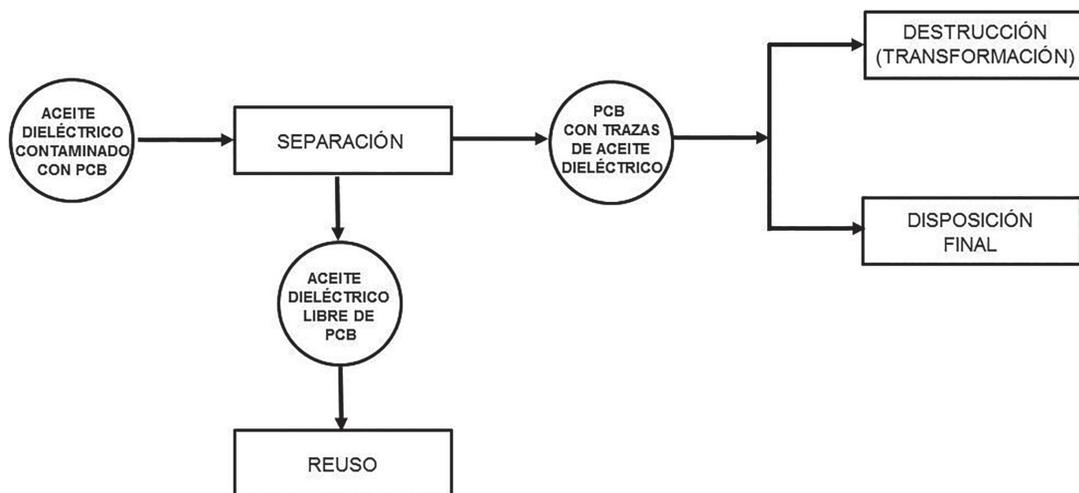


Figura 1. Separación y posterior transformación de los PCB

Fuente: Elaboración propia (2016)

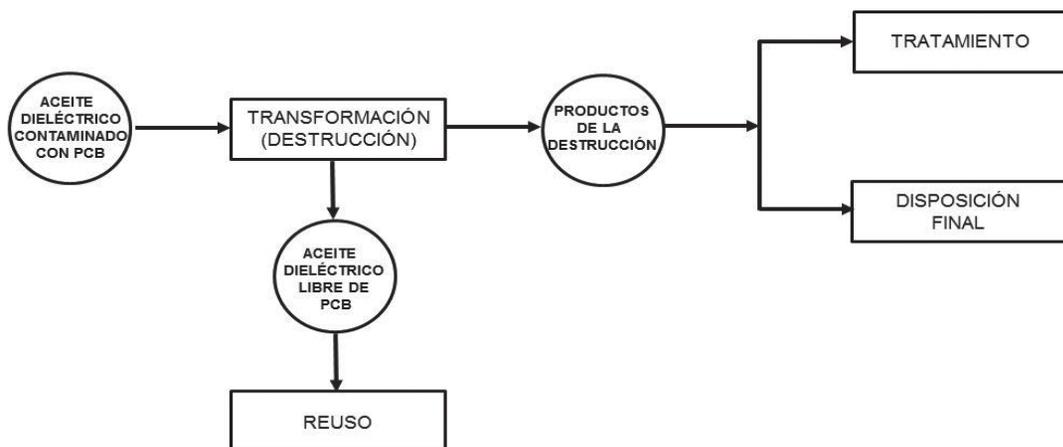


Figura 2 . Transformación de los PCB presentes en aceites dieléctricos contaminados

Fuente: Elaboración propia (2016)

En la Figura 2 se muestra esquemáticamente el caso en que los PCB que contaminan el aceite dieléctrico son transformados (o destruidos), utilizando tecnologías que implican métodos químicos, térmicos o biológicos, y su posterior tratamiento o disposición final.

En la Figura 3 se muestra un diagrama de bloques, desde la identificación de aceites dieléctricos contaminados, su posterior decantación y la transformación (destruc-

ción mediante diversos métodos), hasta la disposición final en rellenos de seguridad, lo cual corresponde detalladamente al caso presentado, en forma esquemática en la Figura 1.

A continuación se describen brevemente las opciones tecnológicas utilizadas para la separación y destrucción responsable de PCB (y sus residuos).

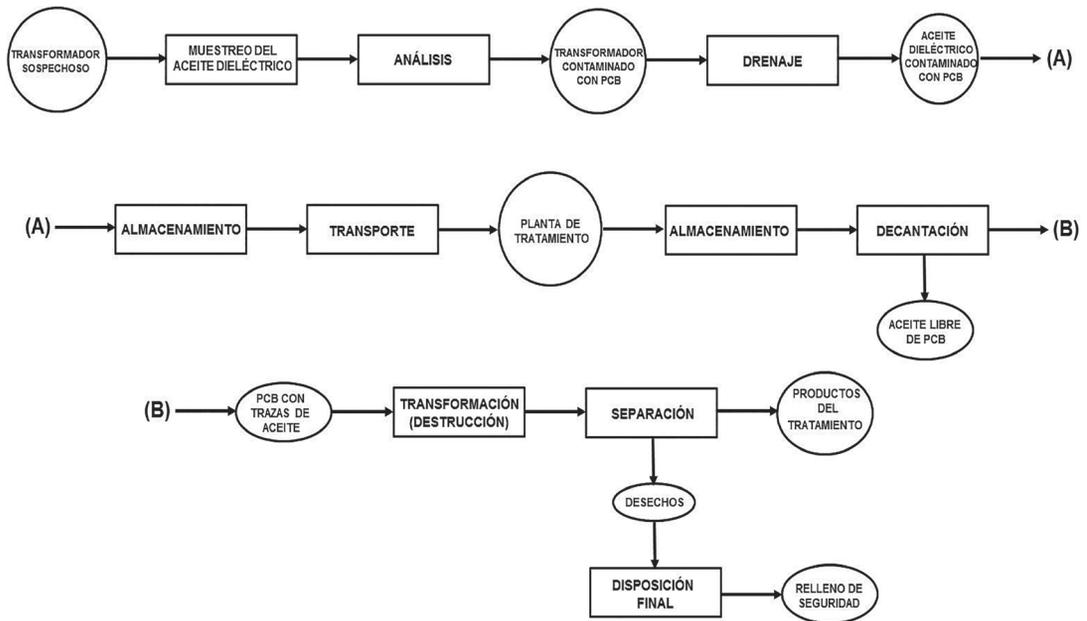


Figura 3. Diagrama de bloques para la transformación de PCB, previa separación del aceite dieléctrico

Fuente: Elaboración propia (2016)

4.1. SEPARACIÓN (TECNOLOGÍAS QUE IMPLICAN EL USO DE MÉTODOS FÍSICOS)

Los métodos físicos no corresponden a opciones destructivas, sino que implican el retiro mecánico de los residuos de PCB desde las carcasas de los transformadores, mediante drenaje (de los PCB y parte del aceite dieléctrico), aprovechando que los hidrocarburos policlorados son más pesados que el aceite dieléctrico, por lo tanto tienden a depositarse en el fondo de los recipientes que los contienen y por ello se les puede separar, previa decantación, desde los tanques o recipientes de almacenamiento. El drenaje es la forma más sencilla de separar los PCB, pero trasladan el problema de un medio a otro.

Una opción más compleja es la destilación, pero requiere de un tratamiento experimental para determinar las mejores condiciones para hacerlo, sobre todo para no alterar el aceite dieléctrico y pueda ser recuperado posteriormente; al igual que los PCB, para su posterior destrucción.

Las opciones indicadas también son incluidas como parte de los métodos físico-químicos ^[10].

4.2. TRANSFORMACIÓN (DESTRUCCIÓN)

4.2.1. TECNOLOGÍAS BASADAS EN MÉTODOS QUÍMICOS

Los compuestos orgánicos halogenados presentan grandes problemas para su descomposición, debido a la naturaleza altamente estable de los enlaces carbono-halógeno que se encuentran en su estructura. Por ejemplo, la *energía de enlace* de un enlace carbono-cloro es del orden de 84 kcal/mol; por tal motivo, muchos com-

puestos orgánicos halogenados no son solo resistentes a la biodegradación, sino que no se pueden degradar de forma práctica y efectiva por ninguno de los métodos de descomposición hasta ahora conocidos. Algunos son clasificados como *refractarios* o *recalcitrantes*, mientras que la mayoría de ellos son considerados como *persistentes*. Los métodos como la clorólisis, dehidrohalogenación catalítica, reacciones con sales fundidas, reacciones con ozono y reducciones con metales alcalinos alcanzan solo una deshalogenación parcial. Por otra parte, estos métodos implican típicamente una o más desventajas, como el uso de reactivos costosos, atmósferas inertes, controles estrictos de temperatura, aparatos complejos y elevado consumo de energía, entre otros.

Los procesos químicos para destruir los PCB se diferencian fundamentalmente de los procesos térmicos, como en el caso de la incineración, en que no necesitan de altas temperaturas para que la reacción ocurra, sino que estos procesos se llevan a cabo gracias al potencial de los compuestos químicos para reaccionar.

Los procesos de declorinación usan reactivos químicos para romper los enlaces en la molécula de PCB (la cual es extremadamente estable), formando otros compuestos químicos con un menor nivel de peligrosidad y ambientalmente más seguros. Estos procesos químicos *no* actúan sobre la estructura del bifenilo en la molécula de PCB (Ver Figura 4), solo son removidos los átomos de cloro, que son los que le dan a la molécula de PCB su estabilidad química y biológica.

Muchos de los procesos de declorinación usan un reactivo de sodio para separar los átomos de cloro de la molécula de PCB. Los residuos generados de este proceso son cloruro de sodio y polifenilos no halogenados. Los polifenilos no halogenados obtenidos, pueden disponerse de forma segura o utilizarse en otras aplicaciones.

La mayoría de los procesos químicos que implican la destrucción de PCB que contaminan el aceite mineral o los fluidos dieléctricos pueden llevarse a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas moderadas, pero lo más relevante es que, aunque destruyen los PCB contenidos en el aceite, no destruyen el aceite dieléctrico en sí.

4.2.1.1. TECNOLOGÍAS BASADAS EN MÉTODOS QUÍMICOS NO CATALÍTICOS

a) Declorinación

Este proceso de tratamiento (transformación) consiste en retirar selectivamente los átomos de cloro de las moléculas de PCB, eliminando de esta manera las características ambientalmente peligrosas de estos compuestos.

La declorinación se basa en la acción de metales alcalinos sobre hidrocarburos orgánicos clorados, en los cuales mediante una reacción [que toma como referencia lo planteado inicialmente por Wurtz (1854) y luego por Fitting (1863)] se sustituyen los átomos de cloro presentes en las moléculas

del PCB, declorinando dicha molécula en diversos grados [2].

Se tienen diferentes métodos de declorinación tomando como referencia los metales alcalinos (en especial sodio) que se citan en diversas patentes [10] y que se pueden resumir en:

- Reacción de los PCB con sodio-naftaleno (Proceso Goodyear).
- Reacción de los PCB con “arena de sodio” (Proceso alternativo Goodyear).
- Reacción de los PCB con un polietilengliconato de potasio o sodio (Proceso KPEG).
- Reacción de los PCB con KOH (o NaOH) – Adsorbente (alúmina activada).

Por ejemplo, el cloro presente en la molécula de un PCB es transformado en el cloruro del metal alcalino del compuesto utilizado para tal fin, por ejemplo KCl o NaCl. La concentración de los PCB se reduce considerablemente, inclusive menos de 2 ppm.

Según lo citado por Lopera y Aguirre[10], la declorinación utilizando KOH se muestra en la Figura 4.

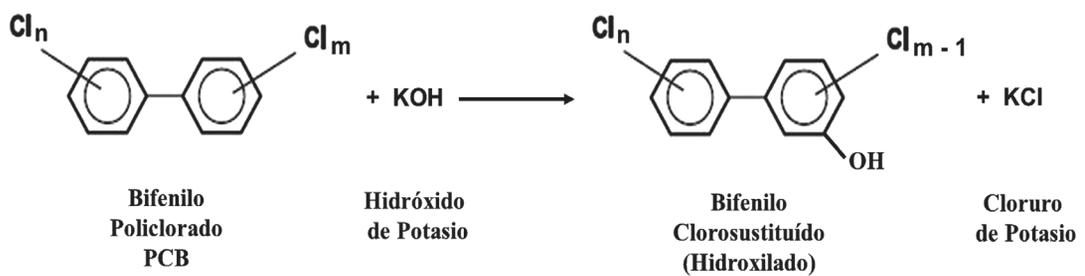


Figura 4. Reacción general de declorinación de PCB

Los productos de la declorinación pueden ser separados y el aceite dieléctrico secado para su posterior reutilización. Es importante anotar que en este método no es necesario separar los PCB para efectuar la declorinación (Ver Figura 5).

b) Reducción química en fase gaseosa (GPCR)

Consiste en hacer reaccionar los residuos de PCB con hidrógeno a 850°C, formándose gas metano y cloruro de hidrógeno, que se recoge en agua. El ácido clorhídrico formado es neutralizado y el CH₄ se recupera para utilizarlo como combustible [11].

4.2.1.2. TECNOLOGÍAS BASADAS EN MÉTODOS QUÍMICOS CATALÍTICOS

Descomposición por catálisis básica (BCD)

Los residuos que contienen PCB se tratan a 300°C, con una mezcla reaccionante formada por un hidrocarburo de alto punto de ebullición, hidróxido de sodio y un catalizador, produciendo hidrógeno, altamente reactivo, que reacciona rompiendo los enlaces de los PCB [11].

4.2.2. TECNOLOGÍAS BASADAS EN MÉTODOS TÉRMICOS

4.2.2. INCINERACIONES CONVENCIONALES

La incineración convencional implica la oxidación a altas temperaturas de los residuos

que contienen PCB, para transformarlos en CO₂, H₂O y compuestos inorgánicos, como el cloruro de hidrógeno (HCl), que deben ser retirados de la corriente de las emisiones antes de ser descargados a la atmósfera, al igual que las cenizas, generadas en el proceso.

La efectividad de la incineración es función de las siguientes variables: tiempo de residencia en la cámara de combustión, temperatura y turbulencia; las cuales corresponden a la “triple T” y el exceso de oxígeno.

La destrucción de los PCB se evalúa por un indicador tecnológico del proceso conocido como DRE (por sus siglas en inglés, o eficiencia de destrucción), que es del orden del 99.99%. Las condiciones de operación mínimas sugeridas para la cámara de combustión principal son:

- Tiempo de residencia: 2 segundos, a 1200°C y un exceso de oxígeno del 3%
- Tiempo de residencia: 1.5 segundos, a 1600°C y un exceso de oxígeno del 2%

La incineración puede realizarse en instalaciones diseñadas específicamente para los PCB y otros residuos clorados, o bien pueden aprovecharse instalaciones previstas para el tratamiento térmico de otros materiales, por ejemplo, en los hornos para la clinkerización de la harina cruda en la industria cementera, los cuales pueden utilizar estos residuos como combustible, pero en una cierta proporción, previa determinación

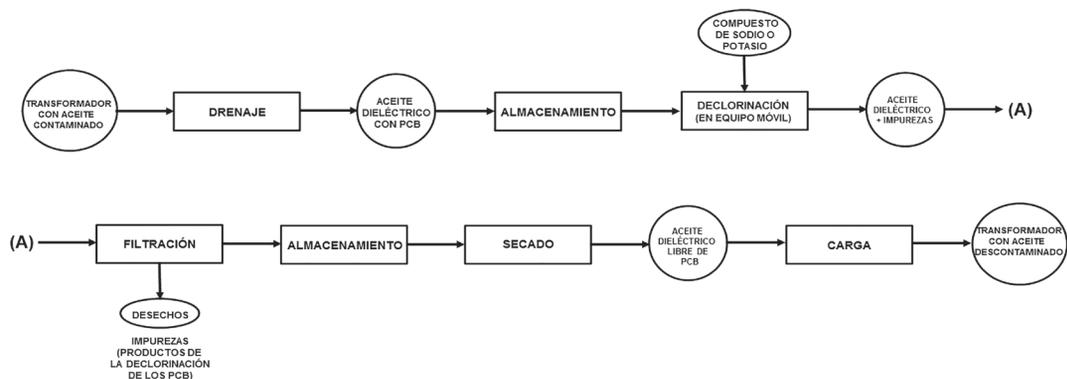


Figura 5. Diagrama del proceso para declorinación in situ de aceites dieléctricos contaminados con PCB
 Fuente: Elaboración propia (2016), tomando como referencia el proceso descrito por la empresa KIOSHI S.A. (www.kioshi.com.ar), utilizando un equipo móvil.

experimental. Los incineradores más utilizados a nivel industrial son:

Incineradores tipo horno rotatorio

Los hornos rotatorios consisten, generalmente, en un cilindro inclinado en 1 o 2 grados sexagesimales, con respecto a la horizontal, de manera que los residuos se desplacen horizontalmente y radialmente a todo lo largo del cilindro. Una rotación lenta de 0,5 a 2 RPM favorece el tiempo de residencia de los materiales dentro de la cámara de combustión. Los desechos se vierten en el extremo más elevado y las cenizas salen por el extremo más bajo. Ver Figura 6.

Existen sistemas de incineración dotados de una cámara de poscombustión, con la finalidad de lograr el DRE global deseado.

Normalmente, tratándose de sustancias halogenadas, la cámara de combustión primaria del horno rotatorio funciona a una temperatura entre 705 y 815 °C y la cámara de combustión secundaria entre 980 y 1200 °C, con un tiempo mínimo de residencia de 2 segundos y un exceso de concentración de oxígeno del 2% (en volumen, como mínimo) [3]. Ver Figura 7.

La función de la cámara de combustión primaria es volatilizar la fracción orgánica del residuo (que en este caso es técnicamente un desecho), mientras que el objetivo de la cámara de combustión secundaria es favorecer la oxidación completa de los productos obtenidos en la cámara de combustión primaria [3].

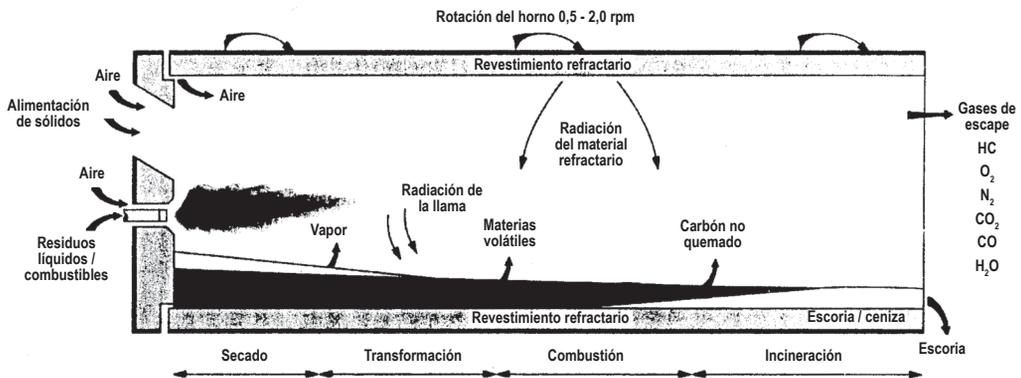


Figura 6. Horno rotatorio convencional
Fuente: LaGrega, Buckingham, Evans (1998) [2]

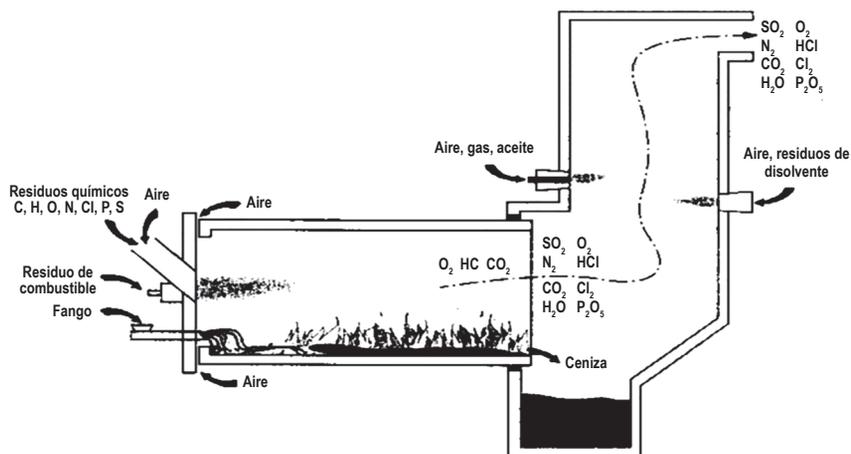


Figura 7. Horno rotatorio con cámara vertical de combustión secundaria
Fuente: LaGrega, Buckingham, Evans (1998) [3]

- **Incineradores de inyección líquida**

Los incineradores de inyección líquida consisten en unos cilindros revestidos de material refractario, que se operan horizontal o verticalmente, y están provistos de un quemador primario para los desechos y de combustible auxiliar para atomizar el desecho en la cámara de combustión. Son adecuados para desechos líquidos de PCB, relativamente fluidos [3].

- **Incineradores de lecho fluidizado**

Los incineradores de lecho fluidizado emplean un lecho de arena en suspensión (no en circulación), en el que se inyectan los desechos como un líquido; parte de las cenizas resultantes permanecen en el lecho, por lo que en un momento dado se ha de limpiar la arena. El calor que sale con los gases de combustión puede aprovecharse para precalentar el aire de combustión [3].

4.2.1.1. INCINERACIONES NO CONVENCIONALES O AVANZADAS

- **Incineración en horno con antorcha de plasma**

Mediante la ionización del gas argón a través de una descarga eléctrica, entre el cátodo y el ánodo del sistema, se forma un arco de plasma de una temperatura superior a 10000°C. El desecho que contiene los PCB es inyectado directamente en el plasma formado, alcanzando rápidamente una temperatura de 3100°C, con lo cual se garantiza completamente su destrucción y la formación del “gas de síntesis” [11].

- **Incineración catalítica**

La incineración catalítica es una combustión controlada sin llama que se realiza a una temperatura mucho menor que las incineraciones convencionales, lo cual minimiza la formación de dioxinas y furanos. Esta es

una opción que requiere ser probada, aunque ya se está utilizando para otro tipo de hidrocarburos, como los solventes [9].

4.3. TECNOLOGÍAS BASADAS EN MÉTODOS BIOLÓGICOS

La biodegradabilidad de un compuesto depende, fundamentalmente, de su estructura molecular. La correlación entre la estructura y la biodegradabilidad se da en la presencia de halógenos, el elevado número de halógenos, la gran cantidad de ramificaciones, la baja solubilidad en agua y la diferente carga atómica [3]. Como se había indicado, existen compuestos que resisten a la biodegradación o refractarios (recalcitrantes) y aquellos cuya biodegradación se da muy lentamente o persistentes. Los PCB están en el grupo de los compuestos orgánicos persistentes (COP). La mayor parte de estos compuestos no se degrada en agua, debido a su escasa solubilidad y a la resistencia de los haluros aromáticos a la hidrólisis. Estos compuestos se fijan fuertemente en suelos y sedimentos en los que pueden permanecer durante años. El uso de la tecnología denominada landfarming ha permitido la degradación de PCB en suelos, mediante dos vías, la reducción anaeróbica y la oxidación aeróbica [15]. El landfarming consiste en agregar los residuos peligrosos a un suelo de cultivo con un adecuado balance de nutrientes, de tal forma que los microorganismos presentes en el suelo se alimenten de las cadenas de hidrocarburos policlorados (PCB), proceso que puede demorar varios meses, dependiendo del tipo de suelo, temperatura y concentración de los PCB, entre otras [3][8].

V. DISPOSICIÓN FINAL (CONFINAMIENTO)

Es importante tener en cuenta la diferencia entre residuo y desecho. Los residuos pueden ser compuestos puros que su poseedor

ya no requiere o mezclas con componentes perfectamente identificados y fáciles de separar. Los residuos son de calidad y pueden ser transformados en subproductos. Los desechos son mezclas complejas, cuyos componentes son difíciles de identificar o separar. Que un material se comporte como residuo o como desecho depende de las buenas o malas prácticas de su generador (o gestor). Estas diferencias tienen muchos matices, pero es conveniente que se tengan en cuenta para la gestión de los desechos que contienen PCB. La disposición final o confinamiento implica llevar el desecho acondicionado (adecuadamente embalado) a un lugar especialmente destinado, con el objetivo de tenerlo almacenado en forma segura.

Entre los principales materiales que pueden ser destinados a confinamiento se tienen:

- Desechos formados por mezclas complejas, que contienen PCB entre sus componentes.

- Suelos contaminados con PCB.
- Chatarra contaminada con PCB.
- Productos resultantes de la incineración convencional de desechos de PCB.
- Otros.

Los desechos deben quedar estabilizados, simplemente embalándolos en recipientes adecuados (tambores o cilindros) o agregando algún aditivo para facilitar su manejo (o prevenir su movilidad). Entre estas opciones se tienen:

- Macroencapsulación.
- Microencapsulación.
- Absorción.
- Adsorción.
- Precipitación.
- Otras ^[3]

La selección de la técnica más adecuada dependerá del tipo de desecho que contiene PCB requiera este tipo de acondicionamiento, previo al confinamiento.

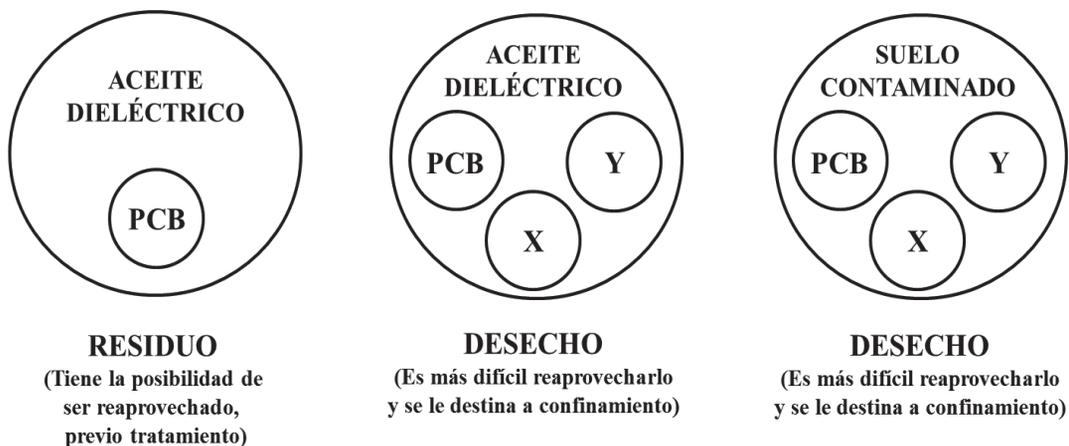


Figura 8. Algunos ejemplos para indicar la diferencia entre residuos y desechos que contienen PCB

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Los depósitos de seguridad son infraestructuras de disposición final especialmente diseñadas para albergar a los residuos y desechos peligrosos. En algunos lugares, debido al costo de oportunidad del espacio y si las condiciones hidrogeomorfológicas lo permiten, los depósitos de seguridad pueden ser subterráneos (Ver Figura 8).

VI. COMENTARIO FINAL

La información proporcionada debe servirle a los generadores de residuos o a las empresas prestadoras de servicios de residuos peligrosos, para que elijan la mejor opción, tanto para el tratamiento como para la disposición final de los PCB, sus residuos o desechos.

La selección de la mejor tecnología de destrucción no necesariamente es la que tiene

los más altos niveles de DRE, sino la que haya sido probada a nivel industrial, la más segura, la más limpia y la más económica.

VII. CONCLUSIONES

1. Las tecnologías para la destrucción responsable de los PCB o sus residuos en aceites dieléctricos implican un manejo seguro no solo para los que trabajan en dichos procesos, sino también para la comunidad. La destrucción responsable considera tecnologías limpias que generan la menor cantidad de residuos. La destrucción responsable es costo-efectiva, es decir, que la eficiencia de destrucción deseada debe ser proporcionada al mínimo costo.
2. Los PCB deben ser adecuadamente gestionados, para prevenir que ingresen

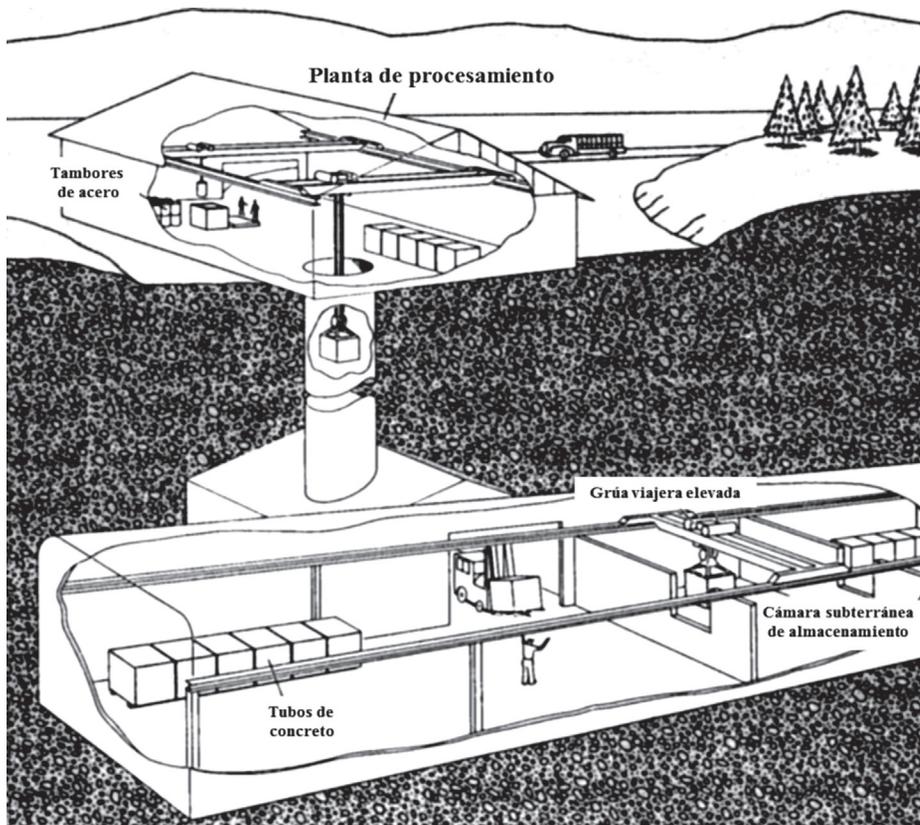


Figura 8. Depósito subterráneo para el confinamiento de desechos peligrosos

Fuente: Miller Tyler G., Jr. (1994) ^[13]

- a alguno de los componentes ambientales, ya que debido a su persistencia pueden llegar a formar parte de las cadenas tróficas de los ecosistemas naturales o quedar como residuos en los alimentos (por su presencia en el ambiente), luego de la poscosecha [8].
- Los PCB presentes en los fluidos dieléctricos tienen tres caminos: el primero consiste en el tratamiento del aceite dieléctrico contaminado con PCB; el segundo, la separación de los PCB para su posterior destrucción; y el tercero, la separación ("recuperación") para ser dispuestos, en forma ambientalmente responsable, en rellenos de seguridad (infraestructura especialmente diseñada para la disposición final de desechos peligrosos).
 - La separación para su posterior destrucción tiene dos objetivos: el primero consiste en la recuperación del fluido o aceite dieléctrico, para su reutilización como fluido dieléctrico o como combustible (debido a su poder calorífico); y el segundo, facilitar la destrucción de los PCB, recuperados, con el consiguiente ahorro en reactivos.
 - El proceso destructivo requiere tener residuos de calidad y no desechos. Los residuos de calidad son aquellos formados solo por PCB y aceites dieléctricos, mientras que los desechos contienen *todo* aquello que el generador de residuos de PCB necesita eliminar, y cuya composición es muy difícil de predecir.
 - Las opciones para la destrucción responsable de los residuos que contienen PCB pueden ser químicas, térmicas y biológicas. Las que requieren menos tiempo son las químicas y térmicas, pero dejan residuos que es necesario gestionar. Las opciones biológicas generalmente no dejan residuos, pero demoran más tiempo.
 - Para los desechos, las opciones más convenientes son la incineración controlada (convencional o avanzada) y la disposición final en rellenos de seguridad.
 - Independientemente de las opciones planteadas, cuando sea posible, es deseable aplicar un método físico para separar los residuos de PCB del aceite dieléctrico "puro".

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baird C., Cann M., Química Ambiental. 2ª Edición. Barcelona: Editorial Reverté; 2012.
- Guevara J., Ching O. Gálvez R.C. (1969). Química de las reacciones orgánicas. Madrid: Editorial Alhambra S.A; 1969.
- La Grega M., Buckingham P., Evans J. (1998). Gestión de Residuos Tóxicos. Traducido de la 1ª. Edición en inglés. **México:** McGraw-Hill Interamericana S.A; 1998.
- Loayza Jorge. Editor. PCB: Transporte global. Boletín Informativo sobre Productos y Residuos Químicos. Agosto 2006 :16. Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima. Perú.
- Loayza J.. Editor. Bifenilos Policlorados (PCB). Boletín Informativo sobre Productos y Residuos Químicos. Julio 2007 : 27. Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima. Perú.
- Loayza J., Silva M. (2014). Los bifenilopoliclorados (PCB). Agenda Química Virtual. Sociedad Química del Perú. [Consultado 31 de mayo 2014]. Disponible en: <http://www.agendaquimica.blogspot.com>.
- Loayza J. Editor. Bifenilos Policlorados (PCB) y Residuos peligrosos conteniendo PCB. Boletín Informativo sobre Productos y Residuos Químicos. Abril 2015;

78. Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima. Perú.
8. Loayza J.. Editor. (2015). Separación y destrucción responsable de residuos conteniendo Bifenilos Policlorados (PCB). Boletín Informativo sobre Productos y Residuos Químicos. Agosto 2015 ; 79. Facultad de Química e Ingeniería Química. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima. Perú.
9. Loayza J., Silva M., Arce G., Casafranca A. **Gestión Integral de residuos de Bifenilos Policlorados – PCB (Aspectos generales y Ciclo de Vida)**. Revista Peruana de Química e Ingeniería Química. 2015 :18 (2).
10. Lopera E., Aguirre J. (2006). Purificación de aceites aislantes contaminados con Bifenilos Policlorados PCB's. Dyna. 2006; 73(150): 75-88.
11. Martínez J. et al. Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Fichas Temáticas. Tomo II. Ficha 5: Bifenilos Policlorados (PCB). 2005: 43-52. Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe. Montevideo. Uruguay.
12. Miller-Pérez C., Sánchez-Islas E., Mucio-Ramírez S., Mendoza-Sotelo J., León-Olea M. (2009) Los contaminantes ambientales bifenilos policlorinados (PCB) y sus efectos sobre el Sistema Nervioso y la salud. Revista Salud Mental. Julio-Agosto 2009; 32(4).
13. Miller Tyler G., Jr. (1994). Ecología y Medio Ambiente, Introducción a la ciencia ambiental, el desarrollo sustentable y la conciencia de conservación del planeta Tierra. México: Grupo Editorial Iberoamérica de C.V.; 1994.
14. Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes. PNUMA. Los nuevos 9 COP. Abril. 2010.
15. Sierra M.A., Gómez Gallego M. (2008) Principios de Química Medioambiental. Madrid: Editorial Síntesis; 2008.