

## **Gestión integral de residuos de bifenilos policlorados - PCB (Aspectos generales y ciclo de vida)**

**J. Loayza<sup>1</sup>, M. Silva<sup>2</sup>, G. Arce<sup>3</sup>, A. Casafranca<sup>3</sup>**

(Recibido 31/08/2015 / Aceptado 19/10/2015)

### **RESUMEN**

En la actualidad existe una gran preocupación sobre la gestión integral de residuos químicos peligrosos, la cual incluye aspectos administrativos y aspectos operativos. En el presente artículo se trata de los bifenilos policlorados (PCB, por sus siglas en inglés) y sus residuos. Se presenta una fórmula genérica, su estructura, propiedades, aplicaciones, diversos efectos sobre la salud humana y no humana; así como la generación de residuos, para el caso específico de aplicaciones cerradas, describiéndose el Ciclo de Vida de los residuos de PCB en transformadores.

**Palabras clave:** Bifenilos policlorados, PCB, aplicaciones cerradas, transformadores, residuos, ciclo de vida.

### **Integrated waste management of polychlorinated biphenyls - PCB (General aspects and life cycle)**

### **ABSTRACT**

At present there is great concern about the management of hazardous chemical waste, which includes administrative and operational aspects. In this article it is study polychlorinated biphenyls (PCBs, for its acronym in English) and their residues. A generic formula, structure, properties, applications, different effects on human health and nonhuman is presented; and waste generation to the specific case of closed applications, describing the life cycle of waste PCB in transformers.

**Keywords:** Polychlorinated biphenyls, PCBs, closed applications, transformers, waste, life cycle.

---

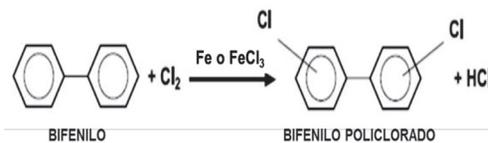
1 Ingeniero Químico. Profesor del Departamento Académico de Procesos. Grupo de Investigación en Tecnologías Ambientales. FQIQ. UNMSM. Correos electrónicos: jloayzap@yahoo.es, jloayzap@unmsm.edu.pe

2 Ingeniera Química. Profesora del Departamento Académico de Química Inorgánica. Grupo de Investigación en Tecnologías Ambientales. FQIQ. UNMSM. Correo electrónico: vickysm02@yahoo.es

3 Estudiantes de la E.A.P. Ingeniería Química. FQIQ. UNMSM.

## 1. LOS BIFENILOS POLICLORADOS

Los bifenilos policlorados PCB (por sus siglas en inglés de **PolyChlorinatedBiphenyls**) son una familia de compuestos orgánicos (hidrocarburos policlorados) que se sintetizan por cloración catalítica del bifenilo y está constituida por una mezcla de productos clorados en distinto grado, en las que se han identificado hasta 209 miembros denominados congéneres.



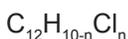
**Figura 1.** Cloración de un bifenilo para obtener un bifenilo policlorado (representación general).

(<https://karry1986.files.wordpress.com/2009/10/imagen2.jpg>)

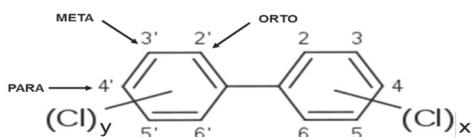
Debido a su toxicidad los PCB presentes en el medio ambiente han sido causa de preocupación internacional; así como sus residuos, por su impacto potencial sobre la salud humana y no humana.

## 2. ESTRUCTURA DE LOS PCB

Los PCB están constituidos por un núcleo de bifenilo en el que existen hasta 10 posiciones susceptibles de ser cloradas. Su fórmula general es:



Donde "n" varía entre 1 y 10, y  $n = x + y$ .



**Figura 2.** Estructura de un PCB (Loayza J., 2013).

Los congéneres con el mismo grado de cloración, se denominan homólogos y los homólogos con los átomos de halógeno en distintas posiciones del anillo de bifenilo se denominan isómeros [9] [5].

## 3. PROPIEDADES DE LOS PCB

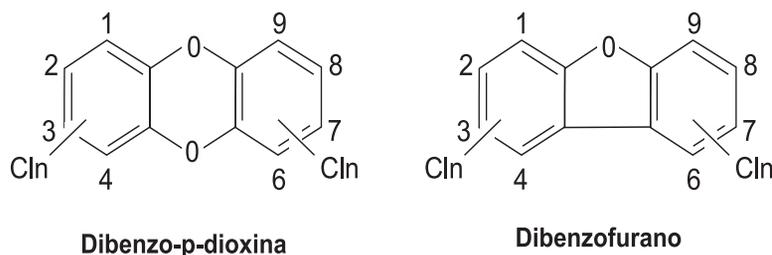
Las propiedades de los PCB dependen del grado de cloración de los anillos del bifenilo. Los bifenilos mono-, di-, tri-, tetra-clorados son líquidos incoloros, mientras que los bifenilos pentaclorados son fluidos densos y de color miel. También se conocen PCB que forman resinas de color amarillo a marrón oscuro o negro.

Los PCB comerciales son mezclas, por lo tanto las características del producto final dependen del contenido promedio de cloro de sus componentes, que a la vez depende de las condiciones en las que se haya realizado la reacción de cloración (por ejemplo, proporciones de cloro y bifenilos empleadas, temperatura y tiempo de reacción, entre otras).

La estructura química de los PCB, les confieren características que permiten usarlos en innumerables aplicaciones industriales. Entre sus principales propiedades se tienen [1,4,10]:

- Son compuestos estables (ya que poseen inercia química).
- Resisten la acción de ácidos y bases.
- Son difícilmente oxidables.
- Son hidrofóbicos.
- Son lipofílicos.
- Se bioacumulan.
- Se biomagnifican.
- No son corrosivos.
- No son volátiles.
- Resisten la acción del calor y las elevadas temperaturas (\*).
- Son buenos conductores de calor, por ello es posible usarlos como fluidos térmicos.
- Son buenos aislantes eléctricos, ya que tienen altas constantes dieléctricas.

(\*) Son estables hasta los 200°C, pero se empiezan a descomponer entre 200°C y 450°C, a temperaturas entre 450°C y 1000°C, es posible la combustión con la producción de dioxinas y furanos.



**Figura 3.** Dioxinas y furanos generados a partir de PCB a temperaturas entre 450 y 1000 °C.

(Fuente: <http://www.labocal.com/modulos/usuariosFtp/conexion/imagenes682a.jpg>)

#### 4. TRANSPORTE DE LOS PCB

Los PCB pertenecen a la familia de Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), esto significa que son estables, resisten cambios de presión y temperatura; así como, la acción de diversas sustancias químicas. Los PCB, como son difíciles de degradar, son transportados a grandes distancias en los diversos componentes ambientales, mediante diversos mecanismos. Por ejemplo, se transportan en la grasa de los mamíferos y de las aves migratorias; también se desplazan por el aire y por los cauces de ríos, utilizando en este caso el agua como fluido de arrastre. Además, muchos de ellos se adsorben sobre las partículas de polvo y son transportados sobre ellas, por el viento.

Si el PCB posee una elevada presión de vapor, sus moléculas se volatilizan por calentamiento debido a la radiación solar, y si las condiciones lo permiten se condensarán nuevamente, en algunos casos muy lejos de su fuente de generación [1, 2,3].

#### 5. EXPOSICIÓN LABORAL Y ACCIDENTAL A LOS PCB

Como ocurre con las dioxinas, el efecto de los PCB sobre la salud es difícil de establecer. La exposición a nivel laboral produce principalmente casos de acné clórico (o cloroacné). Otros efectos se relacionan con la exposición accidental, se han reportado eventos no deseados, pero con el mismo origen, ocurridos uno en Japón (1968) y otro en Taiwán (1971); donde el aceite para cocinar se había contaminado con PCB (y con PCDF). El consumo de este producto

afectó a miles de personas, que desarrollaron una serie de enfermedades como el cloroacné, la decoloración de la piel, además del nacimiento de bebés con bajo peso y elevado índice de mortalidad entre bebés de madres expuestas [7,9].

#### 6. EXPOSICIÓN AMBIENTAL A LOS PCB

La población humana y no humana (animales) del Ártico presentan un elevado riesgo de exposición a los PCB, debido al alto contenido graso de sus dietas. Los contaminantes que alcanzan estas regiones del norte se bioacumulan en la cadena alimenticia, almacenándose en los tejidos blandos. En estudios realizados en la grasa de los osos polares, se ha encontrado niveles de PCB hasta de 90 ppm. El contenido de PCB en la leche materna de las poblaciones del norte (Inuit) es muy superior a los niveles detectados en climas templados [9,10].

#### 7. APLICACIONES DE LOS PCB

Debido a sus propiedades químicas, los PCB se utilizaron en diversas aplicaciones industriales y en productos de consumo. La Organización Mundial de la Salud calificó esos usos de completamente cerrados, nominalmente cerrados y abiertos (IPCS 1992). Los PCB se utilizaron en una muy amplia variedad de aplicaciones industriales y de consumo. Esos usos abarcan:

- (1) Sistemas completamente cerrados:
  - Son unidades selladas o cerradas, donde los PCB se mantienen dentro del equipo. En condiciones normales de estos sistemas, los usuarios o el medio ambiente

no se encuentran expuestos a los PCB. Las emisiones de PCB pueden ocurrir en actividades de mantenimiento y reparación o como resultado de un daño del equipo (incendio). Entre los sistemas completamente cerrados, se tienen a los condensadores, transformadores, motores eléctricos, balastos de equipos de iluminación, electroimanes, otros.



Figura 4. Transformador conteniendo PCB (Corresponde a un sistema completamente cerrado)

### (2) Sistemas nominalmente o parcialmente cerrados

Son sistemas en los cuales los PCB no están expuestos directamente al medio ambiente; sin embargo, pueden llegar a liberarse periódicamente por el uso del equipo. Por ejemplo, en intercambiadores de calor, sistemas hidráulicos, bombas de vacío, otros.

### (3) Sistemas abiertos

En este caso, los PCB son constituyentes de otros productos que se encuentran fácilmente en contacto con el medio ambiente y el ser humano. Por ejemplo, tintas, materiales aislantes, lubricantes, adhesivos, retardantes de llama, pinturas, plaguicidas, plastificantes, otros.

## 8. IDENTIFICACIÓN DE ACEITES CON PCB

Es importante identificar correctamente los líquidos con PCB; por ejemplo, en condensadores y transformadores. Una vez obtenidas las muestras del aceite de un transformador, sería importante poderlas someter rápidamente a una prueba sencilla. No existen pruebas rápidas para identificar los PCB. El análisis de estas sustancias

se suele hacer en laboratorios, utilizando diversos tipos de cromatografía (de gas con columna empacada, líquida en capa delgada o líquida de alta resolución).

Estos tipos de análisis son indispensables si se requieren concentraciones precisas de PCB. Sin embargo, los análisis cuantitativos no suelen ser necesarios en la primera fase de identificación del contenido de un transformador. Afortunadamente, existen dos tipos de métodos rápidos, aunque no necesariamente certeros, que pueden señalar la presencia o no de PCB:

**a) Prueba de densidad.** Como contienen cloro, que es un átomo bastante pesado, los aceites con PCB suelen tener una densidad alta. Ello permite distinguirlos sobre todo de los aceites minerales, que por lo regular son más ligeros que el agua. Por otro lado, la gravedad específica de los aceites de PCB puede llegar a 1.5. Por ejemplo, un aceite con PCB siempre se irá al fondo de una mezcla con agua, mientras que un aceite mineral tenderá a flotar en la superficie.

**b) Prueba del cloro.** La presencia de cloro puede detectarse mediante un sencillo análisis químico. Existen "tiras reactivas" sensibles a la presencia del cloro. Además, si se enciende un compuesto que contiene cloro en presencia de cobre se producirá una llama verde, ya que el cloro forma pequeñas cantidades de cloruro de cobre en la superficie del cobre y esta sustancia, al volatilizarse, produce una característica llama verde.

**c) Prueba colorimétrica.** La prueba trabaja por el principio de detección de cloro. Por lo tanto, la contaminación con sal (cloruro de sodio), agua de mar, sudor (transpiración), etc., podría dar como resultado un falso positivo y serán necesarias pruebas de laboratorio adicionales.

Después de realizar estas sencillas pruebas, convendría verificar si el cloro existente se debe a la presencia de PCB y no a alguna otra sustancia que contenga cloro. Esta verificación puede hacerse mediante alguna de las pruebas cromatográficas antes mencionadas.

Estas dos pruebas indicarán, la presencia de cloro, tal como se presenta en los PCB. La prueba arrojará los mismos resultados con aceites minerales clorados; éstos también se utilizan en transformadores pero no representan el mismo peligro que los PCB. Actualmente los PCB se han eliminado de equipos eléctricos. Los aceites para transformador que no contengan

cloro no darán positivo en las pruebas antes descritas <sup>[6]</sup>.

## 9. NOMBRES COMERCIALES DE LOS PCB

Los PCB se han comercializado con diversos nombres y corresponden a mezclas complejas, algunos se muestran en el Cuadro 1, donde se incluye el país de fabricación.

**Cuadro 1.** Nombres comerciales de los PCB.

Sinónimos y nombres comerciales	País de fabricación
Abestol, Aceclor, Adkarel, ALC, Apirolio	Italia
Apirorio, Areclor, Arochlor, Arochlors, Aroclor/Arochlor(s)	Estados Unidos
Ask/Askarel/Askael, Auxol	Alemania
Bakola, Blacol, Biclor	Alemania
Clofen	Alemania
Cloresil, Chlophen, Chlorextol, Cloretol	Estados Unidos
Clorinal/Clorinol, Clorofeno, Clorofina	Polonia
Chorextol, Chorinol, Clofen/Clophenharz, Cloresil, Clorinal,	Alemania
Delofet O-2, Delor, Delor/Del, Delorene, Delorit, Delotherm DK/DH	Checoslovaquia
Diarol, Dicolor, Diconal, Disconon, DK	Italia
Ducanol, Duconal, Duconol, Dykanol	Estados Unidos
Dyknol	Alemania
Educarel, EEC-18, Elaol	Alemania
Electrophenyl, Elemex	Estados Unidos
Elinol, Eucarel, Euracel	Italia
Fenchlor, Fenclor	Italia
Fenoclor	Francia
Fenocloro	Estados Unidos
Gilotherm	Estados Unidos
Hexol, Hivar, Hydeler, Hydol, Hydrol, Hyrol, Hyvol	Estados Unidos
Inclor, Inerteen	Estados Unidos
Inertenn	Japón
Kanechlor, Kaneclor, Kennechlor	Japón
Kenneclor	Estados Unidos
Leromoll	Estados Unidos
Magvar, MCS 1489, Montar, Monter	Estados Unidos
Nepoli, Nepolin, Niren, NoFlamol, No-Flamol	Estados Unidos
Non-Flamol	Francia
Olex-sf-d, Orophene	Francia
Pheaoclor, Pheneclor, Phenochlor	Francia
Plastivar, Prodelec, Pydraul, Pyraclor, Pyralene	Francia
Pyranol, Pyroclor, Pyrochlor, Pyronol	Estados Unidos
Safe-T-Kuhl, Saf-T-Kohl, Saft-Khuhl, Saf-T-Kuhl	Estados Unidos
Santosol, Santotherm	Japón
Santotherm, Santovac, Sat-T-America, Siclonyl, Solvol, Sorol, Soval	URSS
Sovtol, Tarnol	Polonia
Terphenylchlore	Francia
Therminol	Estados Unidos

Fuente: Lopera y Aguirre (2006), PNUMA (2002), [6]

## 10. CONCENTRACIONES LÍMITE DE PCB EN ALIMENTOS

Aunque la producción de PCB se prohibió en Estados Unidos y en otros países desde 1979, estas sustancias químicas aún persisten en el aire, agua y suelo, debido a que se bioacumulan y se transfieren dentro de la cadena alimenticia. Los métodos instrumentales actualmente empleados para detectar trazas ha permitido poner en evidencia que alimentos de consumo humano, como carnes (porcina, vacuna, peces y aves), leche, huevos de gallina, vegetales, granos, etc., contienen altas concentraciones de PCB que sobrepasan lo establecido por las organizaciones internacionales [4] [7].

La EPA estableció un límite de 0,0005 ppm (mg de PCB por litro de agua para consumo humano). La Food and Drug Administration (FDA) obliga a que los alimentos para niños (huevos, leche y otros productos de consumo diario) contenga no más de 0.2–3 partes por millón (ppm) de PCB (Ver Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Límite máximo de la concentración de PCB en diversos alimentos.

Alimento	Límite de PCB(ppm)
Leche	1,5
Aves para consumo	3,0
Huevos de gallina	0,3
Alimentos para animales	2,0
Peces marinos y mariscos	2,0
Alimentos para infantes y lactantes	0,2
Agua para consumo humano	0,0005

Fuente: Datos obtenidos de las Normas Estadounidenses para PCB de 1996 (1 ppm = 1 µg/g; 1 mg/Kg, 1 mg/L). Citado por Miller-Pérez et al. (2009).

## 11. RESIDUOS DE PCB Y SU CICLO DE VIDA EN TRANSFORMADORES

La incorporación de los PCB en el medio ambiente se ha producido durante su manufactura, uso, retiro de los equipos que los contenían, por derrames durante el transporte, u otro tipo de episodios accidentales, como incendios. También por derrames desde equipos en lugares destinados a la disposición final (vertederos). Se estima que al menos un 15% del total de los PCB producidos, a nivel mundial, ha llegado al ambiente, por alguna de las vías anteriores [9].

El Ciclo de Vida de los residuos de PCB, para el caso de los transformadores con aceites dieléctricos, se inicia con el muestreo para el análisis, con la finalidad de mostrar la presencia de PCB. En caso de obtenerse un resultado positivo, se debe drenar el aceite contaminado, para luego envasarlo y embalarlo adecuadamente, esto implica un etiquetado y rotulado, que permita su fácil identificación, durante la recolección y el transporte a lugares destinados al almacenamiento, previo al tratamiento para su destrucción o para su disposición final en rellenos de seguridad. Ver Figura 5.

Los aceites dieléctricos contaminados con PCB, pueden ser tratados y los PCB destruidos, de esta forma los aceites dieléctricos libres de PCB, pueden ser nuevamente utilizados.

La destrucción responsable de los PCB, puede realizarse por diversos métodos, que requieren un análisis completo, con la finalidad de seleccionar la mejor opción. Los métodos se muestran esquemáticamente en la Figura 6.

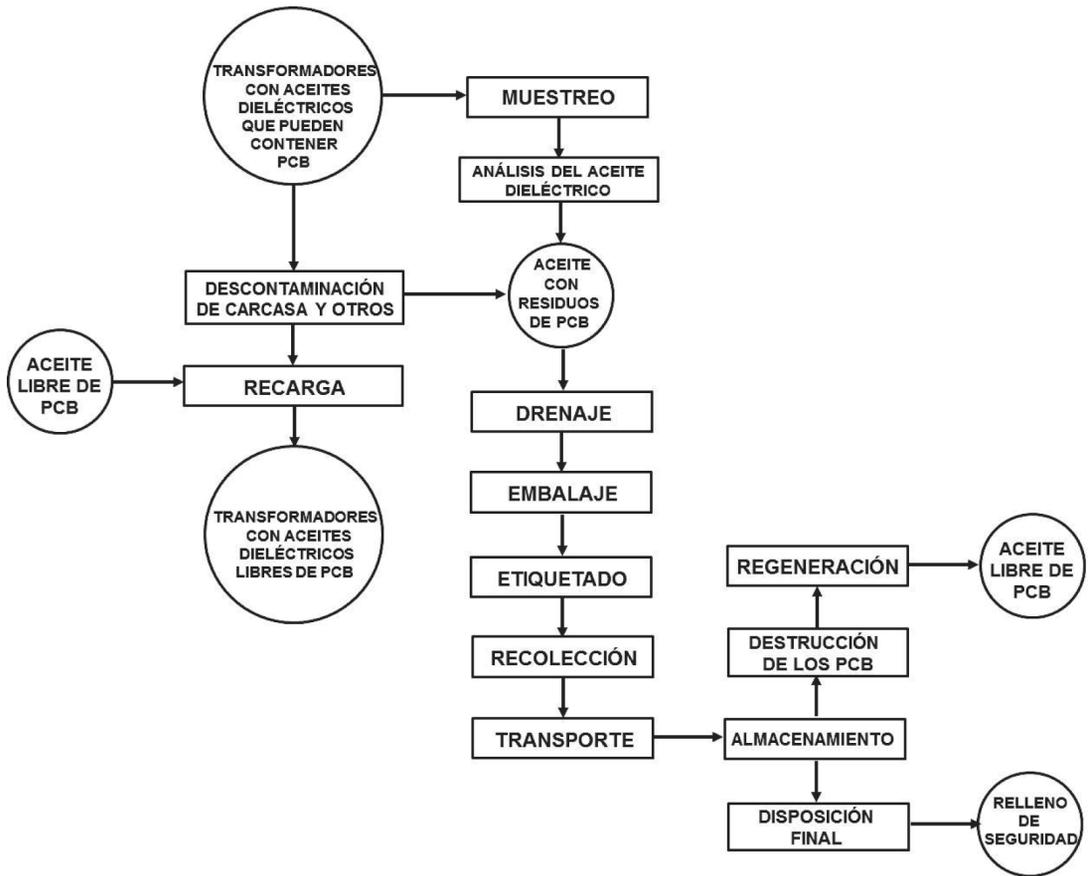


Figura 5. Ciclo de Vida de los residuos de PCB usados en transformadores (aplicaciones completamente cerradas).  
Fuente: Elaboración propia (2015).

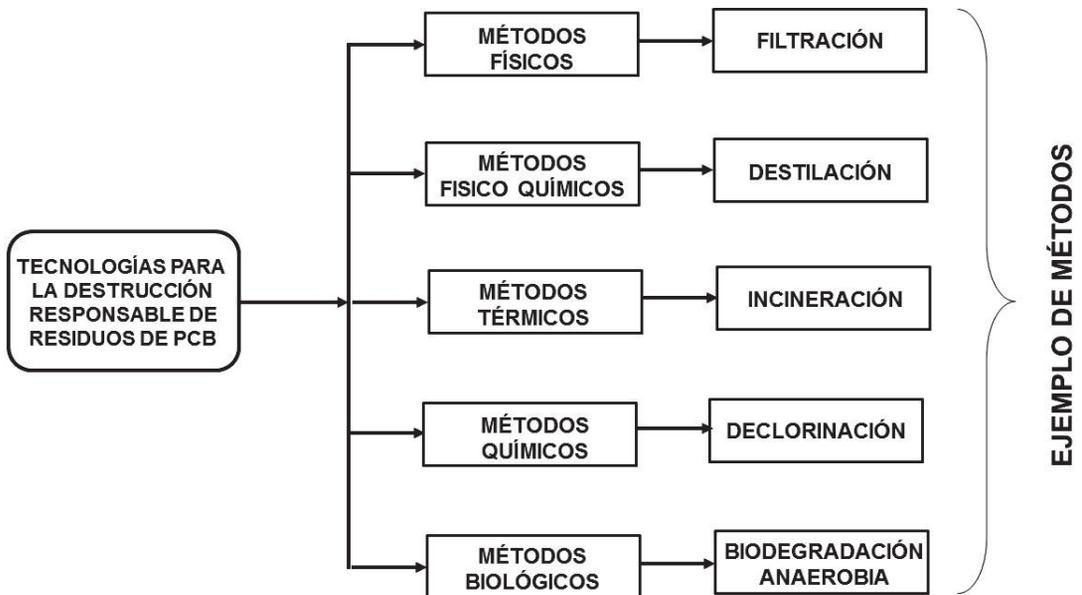


Figura 6. Tecnologías para la destrucción responsable de PCB.  
Fuente: Elaboración propia (2015).

## 12. NORMATIVIDAD INTERNACIONAL APLICABLE A LOS PCB

### 12.1. Antecedentes

Fue en el año 1966 cuando por primera vez el Dr. Soren Jensen en el Laboratorio Arrhenius de la Universidad de Estocolmo, Suecia, puso en evidencia que los PCB producidos masivamente por años, principalmente para uso en transformadores eléctricos y capacitores, tenían la capacidad de bioacumularse en tejidos grasos. A partir de esa fecha se han recopilado datos que advierten del riesgo de exposición a estas sustancias representan para la salud humana y el medio ambiente, lo que llevó que durante las décadas de los años 70 y 80, las mayores empresas cesaran su producción mundial.

Durante la década de los 90, la comunidad internacional logró establecer una base científica, que permitió al PNUMA, iniciar un acuerdo internacional que resultó en un instrumento legal, bajo el nombre de “Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)” que establece la eliminación gradual y definitiva de estas sustancias.



Figura 7. Verificando la presencia de PCB  
(Fuente; [www.vereadorgoulart.com.br](http://www.vereadorgoulart.com.br))

### 12.2. Convenios aplicables para el caso de los PCB

Los PCB, así como algunos plaguicidas como el DDT, y las dioxinas y furanos, subproductos de la incineración industrial, están incluidos en el *Convenio de Estocolmo*

sobre *Contaminantes Orgánicos Persistentes* (COP).

El Convenio trata de la producción, uso, importación, exportación, liberación de subproductos, gestión de existencias y eliminación de una primera lista de doce COP. Según lo estipulado en el Convenio, las *Partes* prohibirán y/o adoptarán las medidas jurídicas y administrativas necesarias para eliminar la producción y uso de PCB.

Como aún son necesarios los equipos que contienen PCB, sobre todo ciertos transformadores y condensadores eléctricos, se ha establecido una excepción que permite seguir utilizando estos equipos hasta el año 2025, dentro del marco de política establecido en el Convenio. Se espera que las *Partes* realicen esfuerzos decididos para identificar y etiquetar el equipo y eliminar su uso. El primer problema que enfrentan los países que siguen utilizando transformadores y condensadores con PBC es cómo *localizar e identificar* este equipo, para luego tomar una decisión respecto a cómo y cuándo habrá que *gestionar, reclasificar* y, por último, *eliminar* el equipo contaminado. En las etapas finales del proceso de descontaminación se pueden generar residuos peligrosos de diversos tipos.

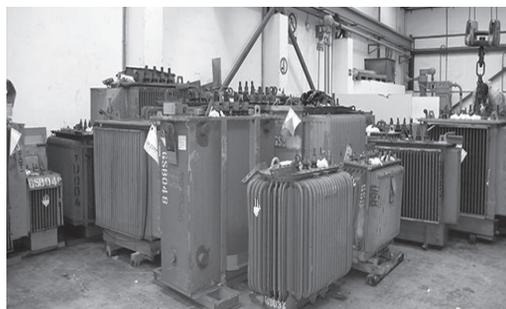


Figura 8. Transformadores en los cuales se ha identificado la presencia de PCB y requieren el drenaje, para su posterior embalado y transporte a lugares para el tratamiento (destrucción) o disposición final.

Es importante recordar que todos estos materiales tendrán que manejarse estricta-

mente según la normativa sobre movimientos transfronterizos de desechos peligrosos especificado en el Convenio de Basilea<sup>1</sup>, así como a las restricciones de importación/exportación estipuladas en los Convenios de Estocolmo y de Rotterdam<sup>2</sup>.

Notas:

1. El Convenio de Basilea sobre Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación fue adoptado en 1989 y entró en vigor en 1992.
2. El Convenio de Rotterdam sobre Consentimiento Fundamentado Previo para Ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos objeto de Comercio Internacional fue adoptado en 1998 y entró en vigor al registrarse la 50ª ratificación.

## CONCLUSIONES

Los PCB son sustancias químicas que pertenecen a la familia de los COP (Contaminantes Orgánicos Persistentes) y que debido a sus propiedades, tuvieron muchas aplicaciones, pero actualmente han sido retiradas del mercado, y ya no se les produce ni comercializa; por tal motivo los residuos de PCB deben ser adecuadamente gestionados, de acuerdo con lo que estipula el Convenio de Estocolmo, que es vinculante para los países que lo han ratificado, como el Perú.

Los equipos que están contaminados con PCB, se pueden drenar, limpiar y recargar con mezclas dieléctricas que no los contengan.

Las mezclas que contenían PCB, como los fluidos dieléctricos, forman parte de los inventarios que es necesario gestionar ambientalmente, ya sea mediante su destrucción responsable o su internamiento en rellenos de seguridad. El tratamiento con fines de destrucción puede ser de natura-

leza física, térmica, química, físico-química o biológica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Baird C., Cann M. Química Ambiental. 2ª. Edición. Barcelona Editorial Reverté; 2012.
2. Loayza J. PCB: Transporte global. Boletín Informativo sobre Productos y Residuos Químicos N° 16. Agosto 2006.
3. Loayza J. Bifenilos Policlorados (PCB). Boletín Informativo sobre Productos y Residuos Químicos N° 27. Julio 2007.
4. Loayza J., Silva M. Los bifenilos policlorados (PCB). Agenda Química Virtual. 2014. [Consultado el 31 de mayo del 2014].
5. Loayza J., Silva M., Arce G., Casafranca A. Bifenilos Policlorados (PCB). Boletín Informativo sobre Productos y Residuos Químicos N° 78. Abril 2015.
6. Lopera E., Aguirre J. Purificación de aceites aislantes contaminados con Bifenilos Policlorados PCB's. 2006.
7. Miller C., Sánchez E., Mucio S., Mendoza J., León M. Los contaminantes ambientales bifenilos policlorinados (PCB) y sus efectos sobre el Sistema Nervioso y la salud. Revista Salud Mental. Julio-Agosto 2009; 32(4).
8. PNUMA. Transformadores y condensadores con PCB: desde la gestión hasta la reclasificación y eliminación. Primera edición. Mayo de 2002.
9. Sierra M.A., Gómez Gallego M. Principios de Química Medioambiental. Madrid: Editorial Síntesis; 2008.
10. Spiro G., Stigliani W. Química Medioambiental. Madrid: Pearson Educación S. A.; 2004.