

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA TÉCNICA DE MUESTREO PARA LA  
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PCBs, EN  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA FUERA DE SERVICIO Y SIN ACEITE  
DIELÉCTRICO.**

**ANDREA JULIANA PÉREZ PARRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2010**

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE MUESTREO PARA LA  
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PCBs, EN  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA FUERA DE SERVICIO Y SIN ACEITE  
DIELÉCTRICO.**

**ANDREA JULIANA PÉREZ PARRA**

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al  
Título de  
Ingeniera Química**

**Dra. ELENA STASHENKO, Qca ,Ph.D.  
Directora de Proyecto de Grado**

**Dr. JAIRO RENÉ MARTINEZ, Qco, Ph.D.  
Co-director de Proyecto de Grado**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2010**

*Hoy se cierra otra etapa de mi vida pero se abre la puerta a otras que me esperan. Hoy he logrado una de mis metas y es el motivo para seguir luchando por mis sueños.*

*Doy gracias a DIOS por bendecirme con esta nueva profesión*

*A mi Papa por su apoyo incondicional en todo momento*

*A mi Mama por sus consejos y su atención*

*A mi hermano por alegrarme casi todos los días con su música*

*A Marina por sus frecuentes consejos motivadores*

*A mi grupito de amigas y amigos jey, concha, dianas, aleja, hef, luz, ruben, jois, guille y otros que se me escapan, por compartir tantas experiencias y por hacerme más fácil y alegre el camino a este importante logro.*

*Y nuevamente a mis amigas incondicionales jennifer y concha por todas las aventuras, lagrimas, risas, consejos e inolvidables momentos vividos en esta etapa de mi vida.*

*Gracias a todos*

**ANDREA JULIANA PÉREZ PARRA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Laboratorio de Cromatografía y al Cenivam por el apoyo brindado durante el proyecto y la experiencia de sus profesionales, en especial a William Salgar y Deyanira Caballero.

A la Dra. Elena Stashenko por su valioso aporte y dirección del trabajo investigativo.

A los ingenieros de la ESSA, por los aporte en conocimiento y experiencia.

Al estudiante de Química, Andrés Gonzales por su constante colaboración, ayuda y orientación durante la realización del proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	14
1. MARCO TEÓRICO .....	16
1.1 TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS .....	16
1.2 PARTES PRINCIPALES DEL TRANSFORMADOR .....	17
1.2.1 Núcleo magnético .....	17
1.2.2 Bobinados o devanados.....	18
1.2.3 Parte activa (Caja) .....	18
1.2.4 Cuba o carcasa metálica.....	19
1.3 MATERIALES COMPONENTES DEL TRANSFORMADOR .....	19
1.3.1 Materiales porosos o permeables .....	19
1.3.1.1 Madera.....	20
1.3.1.2 Pape.....	20
1.3.1.3 Cartón presspahn .....	22
1.3.1.4 Tela de hiladillo .....	22
1.3.2 Materiales no porosos e impermeables .....	22
1.3.2.1 Alambre de cobre.....	22
1.3.2.2 Acero al carbono.....	22
1.4 BIFENILOS POLICLORADOS .....	23
1.4.1 Propiedades de los PCBs .....	23
1.4.2 Normatividad de niveles de concentración de PCBs .....	24
1.5 METODOS DE EXTRACCIÓN DE PCBs .....	25
1.5.1 Método de extracción Soxhlet.....	25
1.5.2 Método de extracción <i>Wipe Test</i> .....	25
2. METODOLOGÍA .....	26

2.1 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE PCBs EN MATERIALES POROSOS .....	26
2.1.1 Selección de muestras a recolectar .....	27
2.1.2 Protocolo de recolección de muestras .....	30
2.1.3 Obtención de aceite en las muestras recolectadas.....	30
2.1.3.1 Preparación de la muestra para la extracción Soxhlet.....	30
2.1.3.2 Procedimiento de extracción de aceite mediante método Soxhlet.....	31
2.1.4 Concentración del extracto .....	32
2.1.4.1 Destilación: .....	32
2.1.4.2 Concentración con nitrógeno .....	33
2.1.5 Determinación de la concentración de PCBs en el extracto .....	34
2.2 PARTE EXPERIMENTAL .....	34
2.2.1 Procedimiento experimental.....	35
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	37
3.1 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE PCB EN MATERIALES POROSOS .....	37
3.2 PARTE EXPERIMENTAL .....	40
4. CONCLUSIONES .....	44
BIBLIOGRAFIA.....	46
ANEXOS .....	50

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Identificación de muestras recolectadas para cada material poroso.....	28
Tabla 2. Condiciones empleadas para la extracción Soxhlet.....	31
Tabla 3. Condiciones de solventes para la roto-evaporación. ....	33
Tabla 4. Especificaciones de materiales utilizados.....	35

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ejemplos de núcleos de transformadores. a) Tipo columna ( <i>Core type</i> ), b) Tipo acorazado ( <i>Shell type</i> ).....	17
Figura 2. Parte activa de un transformador tipo columna. ....	18
Figura 3. Soportes de madera en núcleo tipo columna.....	20
Figura 4. Disposición de papel Kraft en bobinas y en cableado interno.....	21
Figura 5. Resistencia a la tracción vs periodo de envejecimiento en papel kraft y papel de manila.....	21
Figura 6. Estructura química básica de los PCBs.....	23
Figura 7. Diagrama de bloques: Procedimiento para determinar la concentración de PCB en materiales porosos. ....	27
Figura 8. Ubicación de las diferentes muestras recolectadas.....	29
Figura 9. Reducción del tamaño de partícula de muestras para la extracción. a).Cartón, b).Papel.....	31
Figura 10. Diagrama de bloques: Extracción y concentración del aceite.....	32
Figura 11. Eliminación del solvente del extracto Soxhlet, a). Destilación simple y b). Concentración con nitrógeno .....	33
Figura 12. Comparación de las concentraciones de PCBs en materiales permeables. ....	38
Figura 13. Perfil cromatográfico obtenido por GC/ $\mu$ -ECD de: A. Blanco del procedimiento; B. Elemento interno del transformador; C. Aceite dieléctrico del interior del transformador; D. Mezcla patrón de Arocloros (1016, 1221, 1232, 1242, 1248, 1254 y 1260). Columna DB-5 (30 m x 0.25 mm x 0.25 $\mu$ m). ....	40



## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A: Ficha Técnica y Congéneres de Pcb's .....	50
Anexo B: Ficha Técnica de Reactivos .....	53
Anexo C: Ficha del Transformador .....	54
Anexo D: Procedimiento para Determinar la Concentración de Pcb's en Materiales Porosos .....	55
Anexo E: Porcentajes de Aceite Extraído .....	76
Anexo F: Procedimiento Experimental .....	77
Anexo G: Perfiles Cromatográficos .....	83
Anexo H: La Prueba T (Student).....	85

## RESUMEN

**TÍTULO:** IMPLEMENTACIÓN DE UNA TÉCNICA DE MUESTREO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PCBs, EN TRANSFORMADORES FUERA DE SERVICIO Y SIN ACEITE DIELECTRICO.\*

**AUTORES:** Andrea Juliana Pérez Parra.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** PCBs, Transformadores, Aceite dieléctrico, Materiales permeables e impermeables, Medio Ambiente.

### DESCRIPCIÓN

Los PCB o bifenilos policlorados son sustancias sintéticas con una estructura básica similar que contienen átomos de carbono, hidrógeno y cloro. Los PCBs son muy estables, lo que explica su persistencia en el medio ambiente. Las personas pueden absorberlos al respirar aire contaminado o por contacto a través de la piel con éstos o con materiales contaminados, produciendo diversos efectos nocivos tales como aumento en el riesgo de padecer cánceres, efectos en la reproducción humana, cambios en la piel, entre otros. Por esta razón, en los últimos años, se ha implementado una normatividad y cuidados especiales para su manejo y tratamiento de los materiales contaminados. Los PCBs, están inmersos en los aceites dieléctricos de los transformadores, causando un aumento relevante en las propiedades aislantes del mismo mejorando notablemente su servicio. Los PCBs inmersos en el aceite, a su vez, se encuentran en contacto con todas las partes del transformador. Cuando el transformador ha cumplido su vida útil el aceite dieléctrico es extraído con el fin de que las partes del equipo puedan ser vendidas. Para ello éstas deben ser primero catalogadas como "libres de PCBs". El objetivo principal de este trabajo es establecer una metodología de muestreo adecuada para cada elemento, debido a la presencia de elementos permeables (papel, cartón, madera, tela) e impermeables (metal, cobre) en el transformador y a la ausencia de aceite dieléctrico en el mismo, para así poder determinar la concentración de PCBs en transformadores fuera de servicio.

---

\*Trabajo de Grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química.

Director: Dra. Elena Stashenko. Co-director: Dr. Jairo René Martínez.

## ABSTRACT

**TITLE:** IMPLEMENTATION OF A SAMPLING TECHNIQUE FOR DETERMINING THE CONCENTRATION OF PCBs IN TRANSFORMER OUT OF SERVICE AND WITHOUT DIELECTRIC OIL.\*

**AUTHORS:** Andrea Juliana Pérez Parra.\*\*

**KEY WORDS:** PCB, Transformers, Dielectric Oil, Permeable and impermeable materials, Environment.

### DESCRIPTION

Polychlorinated biphenyls (PCBs) are synthetic substances with a similar basic structure containing atoms of carbon, hydrogen and chlorine. PCBs are very stable, which explains their persistence in the environment. People can inhale PCBs by breathing contaminated air or absorb them by contact through the skin or with contaminated materials, which can produce a variety of adverse effects such as increased risk of cancer, effects on human reproduction, skin changes, among others. For this reason, in recent years, regulations and special care for management and treatment of contaminated materials have been implemented. PCBs are immersed in dielectric oil from transformers, causing a significant increase of the insulating oil properties and dramatically improving their services. The PCBs immersed in oil, in turn, are in contact with all parts of the transformer. When the transformer has completed its useful life, the dielectric oil is extracted so that the pieces of equipment can be sold. For this, they must firstly be classified as "PCB-free." In order to quantify the PCBs in transformers out of service, the main objective of this work is to establish an appropriate sampling methodology for each element, due to the presence of permeable elements (paper, cardboard, wood, cloth) and impervious (metal, copper, ceramics) in the transformer and the absence of dielectric in the same.

---

\*Degree Project para optar el título de Ingeniero Químico. Modalidad Investigación

\*\*Faculty of Physical-Chemical Engineering. Chemical Engineering Department.

Director: Dr. Elena Stashenko. Co-director: Dr. Jairo René Martínez

## INTRODUCCIÓN

En Colombia el tema de bifenilos policlorados (PCBs) se ha venido desarrollando desde 1997 con el proyecto CERL y en 1999 con el Ministerio del Medio Ambiente, dándose los primeros lineamientos para la identificación de equipos posiblemente contaminados e información relacionada con las características de los PCBs y los problemas ambientales y de salud asociados con su manejo inadecuado. En cuanto al estado de las existencias de PCBs reportadas en el inventario de PCBs nacional se concluye que la mayor cantidad de existencias de PCBs en el sector eléctrico corresponde a material sólido en un 71,3%; esto confirma el supuesto de que la mayor parte de presencia de PCBs en el país se encuentra en los transformadores eléctricos tanto en uso como en desuso. Se observa que la identificación de PCBs se realiza principalmente en los equipos fuera de servicio[1].

Los policlorobifenilos son una familia de hidrocarburos aromáticos clorados, estables químicamente y con buenas propiedades térmicas y eléctricas. Sin embargo, los PCBs son considerados contaminantes orgánicos persistentes (COP), que persisten en el medio ambiente, se bioacumulan en la cadena alimentaria y suponen un riesgo al causar efectos adversos en la salud humana y al medio ambiente [2]. Sus características de toxicidad, bioacumulación y persistencia en el ambiente así como sus efectos en la salud humana han hecho que los PCBs sean sustancias más reguladas a nivel mundial y han generado la necesidad de su eliminación [3]. En el sector eléctrico los transformadores de energía son una de las fuentes más importantes de PCBs. Éstos se rellenan con un fluido dieléctrico especial que generalmente se compone de mezclas de aceite a base de PCBs. Esto permite elevar la constante dieléctrica, bajar el punto de ebullición, por lo que los hacen ideales como fluidos dieléctricos, ya que

aumentan la piroresistencia y las propiedades aislantes y se mejora por ende la eficiencia del transformador [4]. Los transformadores están compuestos generalmente por elementos porosos tales como papel, cartón, madera, tela y no porosos como cuba, cobre *desnudo* y *bujes*. Estas partes se encuentran sumergidas en su totalidad en el aceite dieléctrico y, por tanto, son a su vez contaminados con PCBs, los cuales son absorbidos e impregnados por dichos elementos. Cuando el transformador ha cumplido su vida útil y se encuentra fuera de servicio, el aceite dieléctrico es extraído con el fin de que los equipos y sus elementos puedan ser eliminados o reciclados como "*libres de PCBs*". El logro de una identificación de equipos contaminados da paso a su buena gestión, al determinar su mejor disposición, sea para su reutilización, reclasificación o eliminación [5]. La legislación vigente de aplicación considera contaminada la parte porosa, si su concentración es  $>50 \text{ mg PCB/kg}$  y, la no porosa si su concentración es  $>10 \mu\text{g PCB}/100 \text{ cm}^2$  [1].

Debido a la presencia de elementos permeables e impermeables en el transformador, el objetivo principal de este trabajo fue establecer una metodología de muestreo para la cuantificación de PCBs adecuada para cada elemento, determinando así su concentración en el transformador, lo que permite catalogarlo como libre o no de PCBs.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS

El transformador es un dispositivo electromagnético que transfiere energía de un circuito a otro, bajo el principio de inducción electromagnética. La transferencia de energía la hace, por lo general con cambios en los voltajes; convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de voltaje en energía alterna de otro nivel de voltaje, por medio de la acción del campo magnético asociado con la corriente alterna de entrada [6]. La función de los transformadores es la de cambiar los parámetros de la energía eléctrica (voltaje o corriente), de forma tal que no sea preciso generar, transportar y consumir la energía a una misma tensión, permitiendo así reducir las pérdidas por disipación de calor en la distribución de la energía desde las plantas generadoras de electricidad hasta nuestros hogares [7].

Un transformador se compone de una carcasa que contiene un núcleo sumergido en un líquido. El líquido es un aceite mineral (generalmente con PCB) o Askarel (40 a 80% de PCBs). El núcleo consiste de aluminio o láminas de alambre de cobre recubierto de papel o madera (material poroso) [8].

Existen diversas formas de clasificar los transformadores; entre las de mayor interés se encuentran: *a). Según su tensión:* Se clasifican en transformadores de potencia y distribución, *b). Según el número de fases:* Se clasifican en transformadores monofásicos y trifásicos.

## 1.2 PARTES PRINCIPALES DEL TRANSFORMADOR

### 1.2.1 Núcleo magnético

El núcleo magnético permite transferir energía de un circuito a otro y su función principal es conducir el flujo activo. Se construye por un conjunto de laminaciones acomodadas en la forma y dimensiones requeridas, pueden ser *laminaciones de acero al silicio*, cuyas láminas tienen pequeños porcentajes de silicio (4%), *laminaciones de ferrosilicio* (Fe 73%-Si 24%) o laminaciones de hierro dulce (0.1%carbono) [6]. Los núcleos para transformadores se agrupan básicamente en las siguientes categorías (Figura 1):

a). *Tipo columnas o núcleo (Core type)*: Las bobinas abarcan parte considerable del circuito magnético. Tiene capas sucesivas de laminaciones ensambladas. En los circuitos monofásicos y trifásicos las bobinas se colocan alrededor del núcleo en forma concéntrica, primero, se colocan las bobinas de bajo voltaje (porque requiere menor aislamiento) y después las de alto voltaje. b). *Tipo acorazado (Shell type)*: El circuito magnético abarca una parte considerable de los devanados [9].

**Figura 1. Ejemplos de núcleos de transformadores. a) Tipo columna (Core type), b) Tipo acorazado (Shell type)**



a)



b)

Fuente: Autora

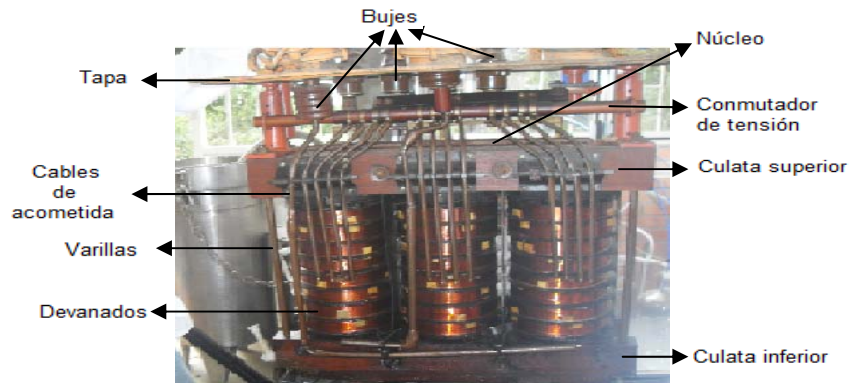
### 1.2.2 Bobinados o devanados

Los bobinados o devanados constituyen los circuitos eléctricos de alimentación y carga, pueden ser de una, dos o tres fases, y por la corriente y número de espiras pueden ser de *alambre de cobre* delgado, grueso o de barra. Si en el secundario hay más espiras que en el primario, el transformador es *elevador*, si la situación es contraria, el transformador es *reductor* y el voltaje secundario será más bajo que el primario. Los bobinados están aislados entre sí con papel de tipo Kraft revestido con resina epóxica termoestable que pega íntegramente el papel al cobre del devanado [10].

### 1.2.3 Parte activa (Caja)

Los devanados y núcleos están unidos en una estructura llamada parte activa (Figura 2). El conjunto se encuentra inmobilizado dentro del tanque del transformador evitando que las vibraciones, debido al transporte, lo afecten. Este conjunto forma la parte a desencubar del transformador, son sus componentes principales, además del núcleo, bobinados, las tapas, los bujes y el conmutador de tensión. La parte activa está fija a la tapa del transformador y se apoya en el fondo del tanque [11].

**Figura 2. Parte activa de un transformador tipo columna.**



Fuente: Autora



#### **1.2.4 Cuba o carcasa metálica**

Cuba o carcasa metálica es el tanque contenedor del núcleo y bobinados, permite el depósito de aceite dieléctrico y está fabricado con chapas lisas de acero laminadas en frío, soldadas entre sí. Cuando la superficie de radiación del tanque no es suficiente para disipar las pérdidas de energía generada, se disponen *radiadores planos* en las caras laterales [12].

### **1.3 MATERIALES COMPONENTES DEL TRANSFORMADOR**

Los materiales o elementos componentes del transformador se pueden clasificar en materiales porosos o permeables y materiales no porosos o impermeables [23]. Además de estas dos clases de materiales se tiene un componente principal, el aislante líquido que puede ser aceite mineral aislante, PCBs , aceite vegetal o silicona. *El aislante líquido* se emplea para aislamiento y refrigeración del transformador, es de baja viscosidad (para una buena transferencia de calor), alta rigidez eléctrica, bajo factor de potencia y es resistente a formación de lodos. El aceite se aloja en el interior de la cuba cubriendo y protegiendo totalmente la parte activa [12].

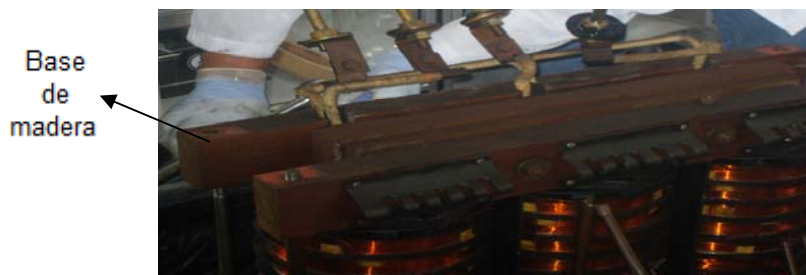
#### **1.3.1 Materiales porosos o permeables**

Los materiales porosos son aquéllos que tienen numerosos huecos o cavidades de aire en su estructura, se forman a partir de otros que tienen grandes cantidades de agua o forman oclusiones de aire durante su fabricación. Absorben o permiten la penetración de ciertas sustancias [13].

**1.3.1.1 Madera:** Es un material compuesto por un 50% de celulosa, polisacárido estructural en las plantas que forma parte de los tejidos de sostén, 25% de lignina, que proporciona dureza y protección, y 25% de hemicelulosa, cuya función es actuar como unión de las fibras. Una vez cortada y secada, proceso en el cual se evapora una gran cantidad de agua dando lugar a poros o tubos capilares de diferentes formas y tamaños, la madera se utiliza para muchas y diferentes aplicaciones; una de ellas es la fabricación de pulpa o pasta, materia prima para hacer papel.

En los transformadores, la madera se usa como apoyo del núcleo en el fondo del estanque (Figura 3), como espaciador entre los enrollados primario y secundario y, algunas veces, como soporte de las conexiones a los aisladores. Se encuentran en el transformador como cuñas de diferentes formas las cuales absorben hasta el 50% de su propio peso [13,14].

**Figura 3. Soportes de madera en núcleo tipo columna**



Fuente: Autora

**1.3.1.2 Pape:** Es el componente más “débil” del transformador y está compuesto por moléculas de celulosa. El papel aislante aporta resistencia mecánica a la tracción, rigidez eléctrica, espacios eléctricos y es buen transferente de calor. El papel aislante se encuentra generalmente enrollando a los conductores de cobre separando y aislando entre sí los bobinados, así como también se encuentra enrollando el cableado interno que transporta la corriente de los bobinados a los bujes (Figura 4).

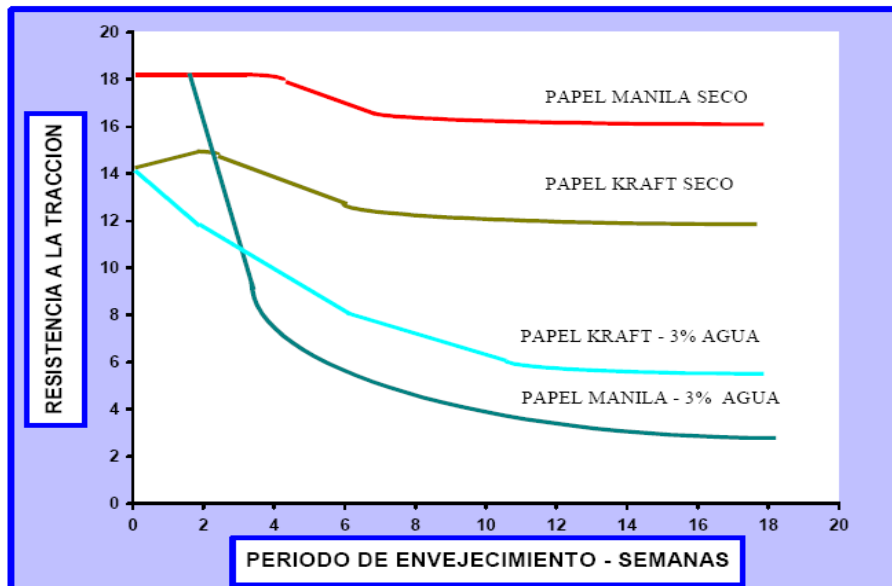
**Figura 4. Disposición de papel Kraft en bobinas y en cableado interno.**



Fuente: Autora

En los transformadores, los tipos de papel aislante más utilizados son *el papel Kraft* y *el papel Crepe o termoestabilizado*, pero el de mayor preferencia para esta función es el papel Kraft fabricado básicamente a partir de pasta o pulpa de madera tratada químicamente con sulfato, ya que éste es más económico y tiene alta afinidad por el agua y resistencia mecánica a la tracción aceptable en el tiempo, propiedad que le otorga larga duración [15].

**Figura 5. Resistencia a la tracción vs periodo de envejecimiento en papel kraft y papel de manila.**



Fuente: [www.sdmyers.com](http://www.sdmyers.com)

**1.3.1.3 Cartón presspahn:** Es un material compacto con características dieléctricas elevadas compuesto por fibras de celulosa, aporta resistencia mecánica y tiene buena capacidad de impregnación con el aceite del transformador. El cartón se encuentra generalmente como separadores verticales o en forma discoidal, aislando entre si el devanado primario del secundario, para un mejor aislamiento de núcleo.

**1.3.1.4 Tela de hiladillo:** Es un hilo que sale de la maraña de seda, se utiliza para aislar las partes mecánicas y evitar cortos circuitos. Esta tela envuelve los tornillos y el cableado interno.

### **1.3.2 Materiales no porosos e impermeables**

Son materiales impermeables, aunque pueden presentar cierta absorción superficial. Éstos se forman partiendo del estado fundido y como resultado muchos tienen estructura cristalina, por ende, son más densos y resistentes [13].

**1.3.2.1 Alambre de cobre:** El cobre es un metal de transición de color rojizo y con brillo metálico, posee alta conductividad eléctrica y ductilidad . El alambre de cobre es el componente principal de los devanados por medio del cual la corriente se transporta, es por esta razón, que está cubierto por un barniz o esmalte resinoso que le da el aislamiento eléctrico. Este esmalte resinoso puede ser poliuretano modificado con poliéster, poliuretano, poliésteramida, poliésteremida-theic Amida-Imida, el cual le atribuye al alambre de cobre una característica permeable [16].

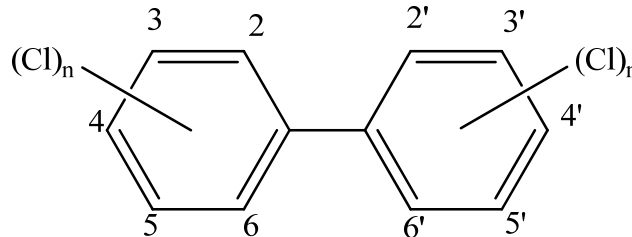
**1.3.2.2 Acero al carbono:** La cubeta o carcasa metálica está constituida por acero al carbono, aleación de composición química compleja que además de hierro, cuyo contenido varía entre 97% y 99.5%, tiene un contenido de carbono desde 0.03% hasta 2.1%; el aumento del contenido de carbono en el acero eleva la resistencia a la tracción. Gracias a la estructura cristalina cúbica centrada en el

cuerpo del hierro, las posiciones intersticiales son más amplias y facilitan que se alojen los átomos de carbono y otros como níquel y manganeso, lo que le imparte varias propiedades al acero [17].

#### 1.4 BIFENILOS POLICLORADOS

Los PCBs son una familia de sustancias químicas orgánicas compuestas de dos anillos de benceno unidos por un enlace carbono-carbono (Figura 6). Los átomos de cloro se sustituyen del uno a diez lugares disponibles restantes. El número y la posición de los átomos de cloro determinan la clasificación y propiedades de las distintas moléculas. Hay 209 posibles congéneres de los PCBs (Ver Anexo A). La volatilidad de las distintas moléculas varía según el grado de cloración.

**Figura 6. Estructura química básica de los PCBs.**



Fuente: Software ChemDraw

##### 1.4.1 Propiedades de los PCBs

Los PCB son algunas de las sustancias químicas orgánicas más estables que se conocen. Su constante dieléctrica alta y su punto de ebullición elevado los hacen ideales como fluidos dieléctricos en condensadores y transformadores eléctricos. En resumen, éstas son las características de los PCBs: a). Constante dieléctrica alta; b). Baja volatilidad; c). Resistentes al fuego; d). Baja solubilidad en agua;

e).Alta solubilidad en solventes orgánicos; f).Alta resistencia al envejecimiento, no se deterioran durante el uso.

Sin embargo, hoy en día las desventajas de los fluidos de PCBs se consideran significativas: a).No son biodegradables; b).Son persistentes en el medio ambiente; c).Pueden acumularse en los tejidos adiposos del cuerpo, d).Son posibles carcinógenos. Los efectos de los PCBs en los seres humanos pueden ser graves:a).Pueden causar insuficiencia renal y de otros órganos humanos; b).Si son inhalados, pueden producir dolor de cabeza y mareo, c).Si se absorben por la piel pueden causar cloracné. Los bifenilos policlorados se catalogaron dentro de los 12 contaminantes orgánicos más tóxicos para los organismos vivos [15,18].

#### **1.4.2 Normatividad de niveles de concentración de PCBs**

Los transformadores están compuestos por una parte metálica (cuba) y una parte activa formada por un núcleo de láminas de ferrosilicio, bobinas de alambre de cobre forrado con papel o esmaltado y otros elementos porosos como cartones y madera. Estos elementos, al estar embebidos en aceite con PCBs, también se contaminan, convirtiéndose en elementos que contienen PCBs. La concentración de PCBs depende de los elementos: los porosos absorben mayor cantidad de aceite y por lo tanto van a contener una concentración mayor de PCBs que las superficies metálicas.

En el Convenio de Estocolmo firmado por Colombia, se establece como límite para las superficies metálicas  $10 \mu\text{g}/100 \text{ cm}^2$ , para que éstas sean consideradas libres de PCB y se puedan comercializar libremente como chatarra. Para los elementos porosos se establece como límite  $< 50 \text{ ppm}$  de PCBs [1].

## **1.5 METODOS DE EXTRACCIÓN DE PCBs**

### **1.5.1 Método de extracción Soxhlet**

La extracción con Soxhlet es una extracción sólido- líquida. Se define como la acción de separar con un líquido una fracción específica de una muestra dejando el resto lo más íntegro posible. Consiste básicamente en el lavado sucesivo de una mezcla sólida con un determinado solvente, que va “lavando o extrayendo” de la mezcla los componentes más solubles en éste. Mediante el lavado sucesivo de una mezcla, se pueden extraer de ésta componentes cuya solubilidad en el solvente extractante es muy baja, debido al efecto acumulado de las múltiples extracciones. Lo que hace el extractor Soxhlet es realizar un sinnúmero de extracciones de manera automática, con el mismo solvente que se evapora y condensa llegando siempre de manera pura al material. Se puede realizar la extracción en continuo según el método EPA 3540C.[19,20]

### **1.5.2 Método de extracción *Wipe Test***

Este método de extracción consiste en una limpieza de la superficie de una muestra que puede ser recogida para recolectar compuestos orgánicos como (PCB, dioxinas, pesticidas) y determinar si la superficie está contaminada o no. Esta prueba de limpieza está estandarizada como se especifica en la norma ASTM D6661, utiliza una plantilla de 10 cm por 10 cm (100 cm<sup>2</sup>), para delinear el área o superficie a muestrear, además se utiliza una almohadilla de gasa o hisopo que ha sido saturado con hexano para limpiar esta área limitada por la plantilla y así recoger y extraer el compuesto orgánico de interés impregnado en dicha superficie. Se debe tener cuidado para asegurar el uso adecuado de la plantilla de toma de muestras, pues los resultados de la muestra se basarán en el área de muestra de 100 cm<sup>2</sup> (es decir, mg por cada 100 cm<sup>2</sup>) [21].

## **2. METODOLOGÍA**

La metodología del trabajo se dividió en dos secciones: en la primera sección, se desarrolló un procedimiento de muestreo para determinar la concentración de PCBs en los materiales porosos o permeables de un transformador en desuso, y en la segunda, se desarrolló un estudio experimental en el que se contaminaron con PCBs dos tipos de materiales internos del transformador y un aceite dieléctrico, con el fin de estudiar el comportamiento de PCBs en dichos elementos con el tiempo.

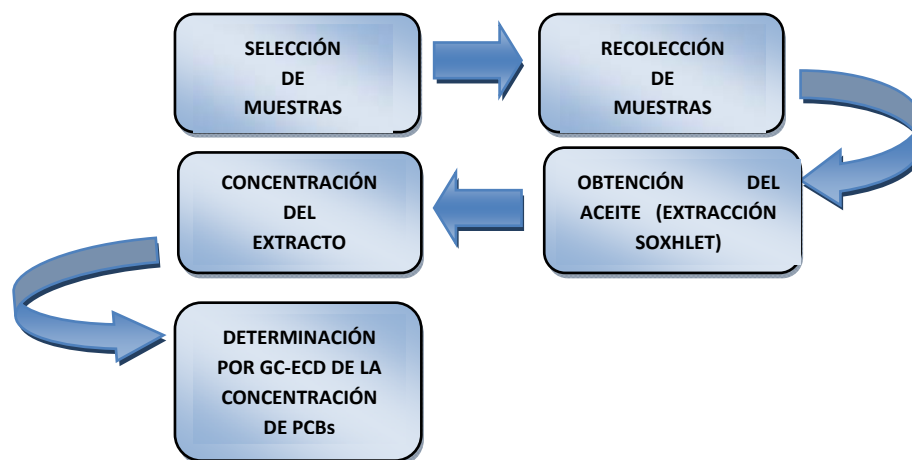
### **2.1 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE PCBs EN MATERIALES POROSOS**

En el presente capítulo se realiza una descripción detallada de la metodología empleada incluyendo los materiales, equipos y etapas necesarias para llevar a cabo el proceso de obtención de aceite de las muestras permeables, y así mismo, para determinar la concentración de PCBs en éstas. Esta metodología se muestra en el diagrama de bloques (Figura 7).

El transformador en el cual se van a recolectar las muestras, es un transformador proporcionado por la ESSA(Bucaramanga) cuyas características principales se especifican en el Anexo 3.



Figura 7. Diagrama de bloques: Procedimiento para determinar la concentración de PCB en materiales porosos.



### 2.1.1 Selección de muestras a recolectar

Para la selección de muestras de los diferentes materiales permeables (madera, papel, cartón o tela), lo primero que se hizo fue una identificación general de las partes más representativas de cada material expuestas o en mayor contacto con el aceite y su ubicación dentro del transformador.

Para poder realizar esta identificación, se hizo un reconocimiento de la parte seleccionada, escogiendo una porción o pieza que asegure una localización fácil de desencajar y que proporcione datos representativos.

En el proceso de identificación de muestras se contó con el apoyo de personal calificado en el tema de la ESSA, quienes con su heurística aportaron información valiosa, que sirvió para tener una mayor certeza de obtener muestras representativas y, realizar un muestreo más eficaz de cada elemento; además de esto, se realizaron varias visitas a subestaciones de energía donde se desencubaron varios transformadores en desuso, con el fin de conocer más a fondo los elementos y la ubicación de éstos dentro los mismos.

A continuación, se muestra la Tabla 1 con los nombres de las diferentes partes seleccionadas y representativas para cada material poroso a recolectar dentro de la parte activa del transformador. Además, se muestra la Figura 8 donde se observa el transformador tipo columna desencubado y la ubicación de las partes que se recolectaron, las cuales se encuentran señaladas por círculos de colores para cada tipo de material. Círculos azules (elementos de papel), círculos rojos (elementos de madera), círculos verdes (elementos de cartón) y círculos naranja (elementos de tela).

**Tabla 1. Identificación de muestras recolectadas para cada material poroso**

<b>CÓDIGO</b>	<b>NOMBRE</b>
<b>6: PAPEL KRAFT 0.18mm</b>	
6A	Papel que recubre cableado de la fase de derivación de neutro
6NI	Papel que recubre sostén izquierdo del núcleo
6ND	Papel que recubre sostén derecho del núcleo
6TC	Papel que recubre tubo de conmutación
6TP	Papel que recubre tornillo pasante
<b>7:MADERA</b>	
7I	Madera de base del núcleo parte inferior
7S	Madera de base del núcleo parte superior
<b>8: CARTÓN PRESPAHN 2mm</b>	
8A	Lámina de cartón dentro de la base del tornillo pasante
8B	Cartón de la base del tornillo pasante
8S	Aro superior del bobinado en galleta(1 columna)
8M	Aro medio del bobinado en galleta (1 columna)
8I	Aro inferior del bobinado en galleta (1 columna)

CÓDIGO	NOMBRE
8E	Cartón separador entre columnas
8C	Lamina de cartón separador de yugos
8F	Lamina de cartón separador de devanados de alta y baja
8T	Sostén de cartón en forma triangular para sostén de núcleo
<b>9: TELA DEL HILADILLO</b>	
9A	Tela de hiladillo que recubre partes metálicas

Se debe tener en cuenta que no necesariamente se tiene que recolectar la muestra en la misma ubicación de los puntos mostrados (Figura 8), sólo se da una idea de los puntos donde se pueden obtener dichas muestras, pero no necesariamente tienen que ser tomadas del mismo lugar que se observa.

**Figura 8. Ubicación de las diferentes muestras recolectadas**



Fuente: Autor

### **2.1.2 Protocolo de recolección de muestras**

Se realizó una recopilación de los pasos a seguir para la recolección de las muestras identificadas en el numeral anterior, incluyendo las herramientas y los elementos de protección personal necesarios. Este protocolo se especifica detalladamente en el *Anexo D*.

### **2.1.3 Obtención de aceite en las muestras recolectadas**

Debido a que los PCBs contenidos en el aceite pueden desplazarse a las superficies porosas, las muestras recolectadas se someten a un proceso de extracción por Soxhlet, con el fin de obtener el aceite impregnado en las diferentes muestras porosas y, con éste, poder determinar la concentración de PCBs y saber si están contaminadas.

Además de las muestras porosas recolectadas, se tomaron 3 muestras adicionales de aceite dieléctrico que se encontró en el fondo de la cuba. Esto con el fin de de comparar la concentración de PCBs en el aceite con la concentración en las muestras porosas recolectadas, y determinar si existe alguna relación relevante entre estas concentraciones.

**2.1.3.1 Preparación de la muestra para la extracción Soxhlet:** En primera instancia, se realiza una preparación de las muestras sólidas recolectadas antes de realizar la extracción. Está consiste en cortar en trozos o pequeños pedazos la muestra compacta original y así reducir su tamaño de partícula hasta uno adecuado para la extracción, como se muestra en la Figura 9. Esto con el fin de obtener un mayor contacto de la muestra sólida con el solvente y, por ende, una mejor extracción. Los materiales y elementos de protección utilizados para efectuar dicha actividad se encuentran en el *Anexo D*.



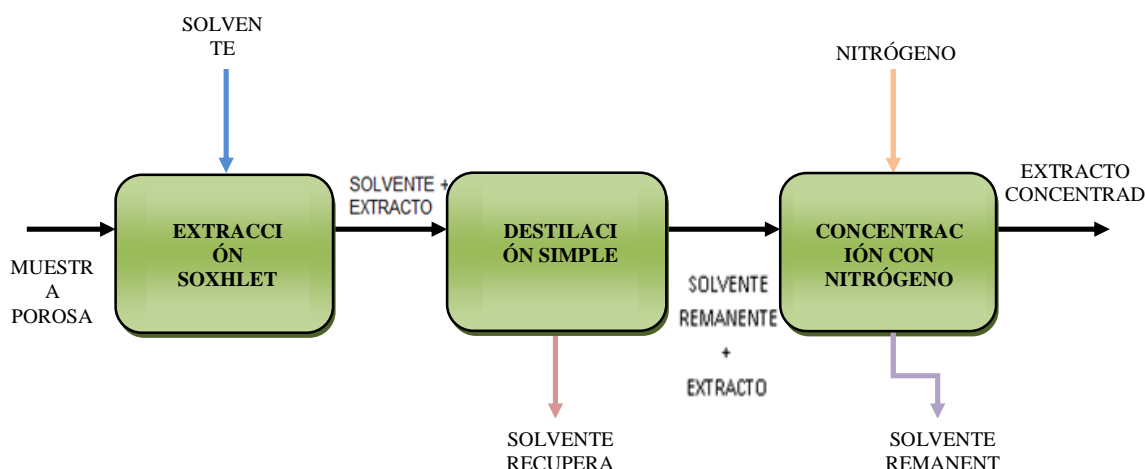
Durante este procedimiento, la cantidad para cada muestra sólida fue de 5 g y la relación muestra sólida/solvente fue de 1:50; estas proporciones se mantuvieron constantes para las 13 extracciones Soxhlet realizadas.

El procedimiento a seguir para el método de extracción Soxhlet en continuo y los materiales utilizados en este procedimiento se especifican en el *Anexo D*.

#### 2.1.4 Concentración del extracto

Después de obtener el extracto del Soxhlet para cada una de las 13 muestras, se realizó una concentración para eliminar el solvente; esta concentración se dividió en dos etapas, primero, se llevó a cabo una destilación simple para evaporar el solvente y luego una concentración con nitrógeno, para eliminar el solvente remanente (Figura 10).

**Figura 10. Diagrama de bloques: Extracción y concentración del aceite.**



**2.1.4.1 Destilación:** La destilación simple se efectuó por medio de una roto-evaporación para separar el extracto de la mezcla de solventes hexano:acetona por ebullición. El tiempo empleado para cada roto-evaporación fue de aproximadamente 45 min a 100 rpm; se tuvo en cuenta la presión de vapor y la temperatura para cada uno de los solventes en la mezcla, controlando así la roto

evaporación y eliminando la mayor cantidad de solvente posible. Ver Anexo D para conocer en detalle el procedimiento.

**Tabla 3. Condiciones de solventes para la roto-evaporación.**

<i>Solvente</i>	<i>Temperatura</i> °C	<i>Presión de vapor</i>
Hexano	32	330 mBar
Acetona	32	515 mBar

**Figura 11. Eliminación del solvente del extracto Soxhlet, a). Destilación simple y b). Concentración con nitrógeno**



a)

b)

Fuente: Autora

**2.1.4.2 Concentración con nitrógeno:** Debido a que en la destilación simple el solvente no se eliminó en su totalidad, se procedió a realizar una concentración con nitrógeno de cada una de los extractos de la muestra. Para esta concentración se aplicó un flujo de nitrógeno constante en un tiempo de aproximadamente 15

min, que varía dependiendo de la cantidad de hexano remanente que contenía el extracto.

Después de obtener el extracto concentrado, se procedió a pesar los tubos de ensayo para calcular el porcentaje de aceite extraído para cada muestra porosa por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Extracto de aceite} = (m \text{ Extracto aceite obtenido} / m \text{ Muestra a extraer}) * 100$$

Ver Anexo D, para observar procedimiento, y Tabla D2. Para ver los porcentajes de extracto de aceite para cada muestra.

### **2.1.5 Determinación de la concentración de PCBs en el extracto**

Los extractos obtenidos en el proceso de extracción y concentración fueron guardados en recipientes herméticamente cerrados para su posterior caracterización por cromatografía de gases con (GC) detector de captura de electrones (ECD) en el Laboratorio de Cromatografía de Gases de la Universidad Industrial de Santander.

La determinación de la concentración de PCBs se realizó por cromatografía de gases en un cromatógrafo *Agilent* 6890 GC/ $\mu$ -ECD, en una columna capilar DB-5 (30 m x 0.25 mm x 0.25  $\mu$ m) [22].

## **2.2 PARTE EXPERIMENTAL**

En el presente capítulo se realiza una descripción de la metodología empleada en el desarrollo experimental, para llevar a cabo el estudio de la variación de la concentración de PCBs en el aceite dieléctrico y dos materiales, la cuba y el bobinado (alambre de cobre) a través del tiempo; ésto, tratando de simular una situación de contacto del aceite contaminado dentro del transformador con sus



partes internas. Para el estudio se contaminó un aceite dieléctrico con 60 ppm de PCBs, del cual se tomaron muestras en un tiempo determinado, y en éste fueron sumergidas las muestras de los materiales respectivos a contaminar, el alambre de cobre y las láminas de acero. En este estudio, se empleó el método *Wipe Test* o de limpieza para realizar el muestreo.

### 2.2.1 Procedimiento experimental

Para este procedimiento se utilizaron dos tipos de materiales internos del transformador: láminas de acero que representan la cuba del transformador y secciones de alambre de cobre que componen los bobinados. Las especificaciones de cada elemento aparecen en la Tabla 4. Estos materiales se sometieron a una contaminación con un aceite dieléctrico contaminado con PCBs (60 ppm) y, luego, a una prueba de limpieza o *Wipe Test* para extraer los PCBs.

**Tabla 4. Especificaciones de materiales utilizados.**

<b>Material no poroso</b>	<b>Cantidad de muestras</b>	<b>Dimensiones</b>
<b>Láminas de acero</b>	5 láminas	10 cm x 10 cm
<b>Alambre de cobre</b>	5 secciones	D=0.1 cm H=318.5 cm

Este procedimiento experimental se ejecutó en una serie de etapas, las cuales se detallan en el *Anexo F*.

Se estipuló un cronograma en el que se determinaron los días en que se realizaron las respectivas pruebas de limpieza o el *Wipe Test* para cada muestra de material (sección de alambre de cobre o láminas de acero) y para cada toma de muestra del aceite dieléctrico. En este cronograma se observa el lapso de tiempo en que se efectuaron dichos muestreos. Ver cronograma en el *Anexo F*.

### **3. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

En este capítulo, se plasma un análisis de las concentraciones de PCBs para cada una de las 13 muestras porosas, determinando cuál es el material con mayor absorción de PCBs y si están o no contaminadas según los niveles ya establecidos. Igualmente, se presentan los resultados de algunos perfiles cromatográficos de algunas de las muestras (Ver Anexo G); se realizó también la prueba t o de Student (Ver Anexo H) entre las medias muestrales de las concentraciones de PCBs de las 13 muestras porosas y las concentraciones obtenidas de las muestras del aceite extraído del transformador, para establecer si existe una diferencia estadísticamente significativa.

En lo que respecta a la Parte Experimental, se muestran los resultados del comportamiento de la concentración de PCBs en el aceite y en los materiales internos, cuba y alambre de cobre, a través del tiempo, además de la cantidad de PCBs extraídos con la prueba de limpieza para cada material. En el *Anexo G* se muestran algunos perfiles cromatográficos obtenidos para la parte experimental.

#### **3.1 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE PCB EN MATERIALES POROSOS**

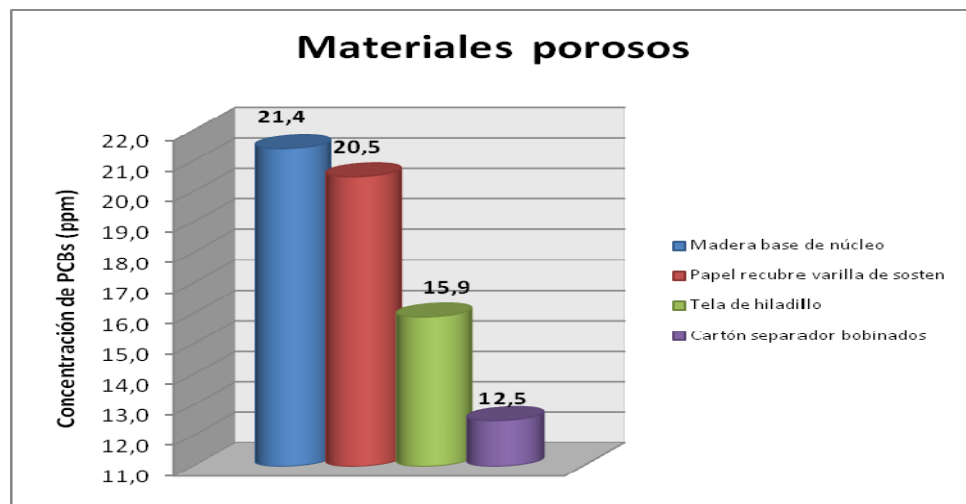
Con los resultados de los cromatogramas obtenidos, se encontró que los materiales permeables con mayor concentración de PCBs fueron la madera que soporta el núcleo del transformador y el papel Kraft que recubre las varillas izquierda y derecha que sostienen el núcleo, con 21.4 y 20.05 ppm respectivamente. Aunque estas concentraciones fueron las más altas en las 13 muestras permeables, se encuentran por debajo del límite para ser consideradas

como materiales contaminados con PCBs (>50 ppm). Por esta razón, estos materiales se consideran “libres de PCBs”. Se puede suponer que en el transformador muestreado se pudo haber realizado un lavado con solvente, por lo cual dichas partes permeables no están contaminadas.

A pesar de esto, estas concentraciones brindan una información valiosa sobre cuáles materiales porosos son más susceptibles a ser contaminados, es decir, sobre cuales puedan absorber más PCBs dentro del transformador.

La madera puede absorber casi un 50% su propio peso debido a la cantidad de cavidades que deja el agua en el proceso de secado y a la eficiencia de los tubos capilares que ésta posee, lo que la hacen un material muy permeable siendo el material poroso con mayor capacidad de absorción que el papel, el cartón y la tela, según los resultados obtenidos (Figura 12).

**Figura 12. Comparación de las concentraciones de PCBs en materiales permeables.**



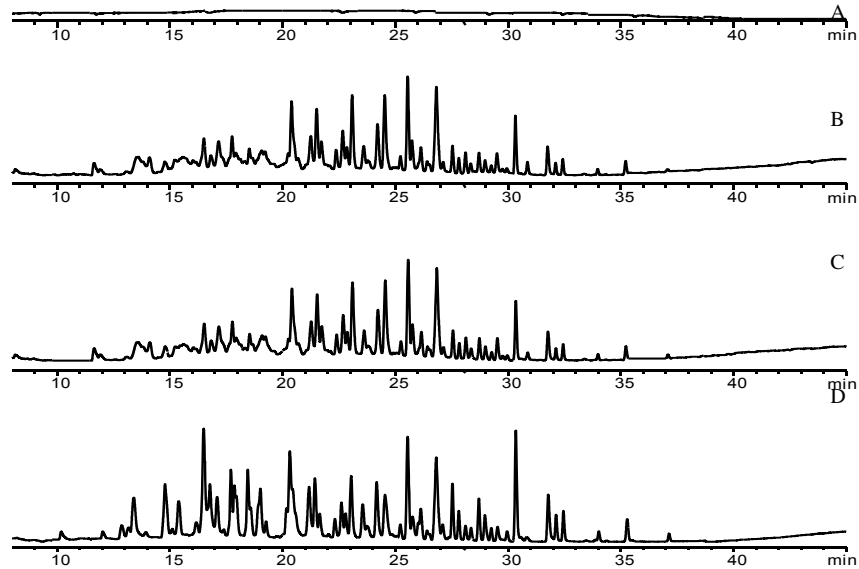
En la Figura 12 se muestra un diagrama de barras en el que aparecen los tres elementos con mayor concentración de PCBs y el material que mostró la menor absorción de PCBs. El material que menos se contaminó con PCBs fue el cartón

separador de bobinados de alta y baja tensión. Esto se pudo haber presentado porque dicho separador se encontraba prácticamente cubierto por los dos bobinados el de alta y baja tensión, por lo que el área de contacto con el aceite dieléctrico fue menor y, por lo tanto, la absorción se limitó respecto a las otras partes permeables. En la Figura 12 también se observa que la madera absorbe casi el doble de los PCBs que el cartón puede absorber, siendo la madera el material permeable con mayor absorción entre este grupo. Los cromatogramas de algunas muestras permeables representativas se pueden ver en el *Anexo G*.

Después de realizar la prueba de significancia, se obtuvo que la media muestral del grupo de las concentraciones de PCBs de las trece muestras fue  $M= 15.8$  ppm y la media muestral de las concentraciones de las tres muestras recogidas de la cuba del transformador fue  $M=14.4$  ppm. La diferencia entre estas dos medias muestrales no es estadísticamente significativa ya que la razón calculada de 0.875 es menor que 1.7613, lo cual demuestra que la diferencia entre los grupos es menor que el valor que se necesita para rechazar la hipótesis de nulidad al nivel de significación 0.05. Es por esta razón que se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ) planteada.

*$H_0$ : No existe diferencia significativa en la concentración de PCBs en el aceite extraído por el método Soxhlet del grupo de muestras porosas y el grupo de muestras de aceite directamente recolectado del transformador.*

**Figura 13. Perfil cromatográfico obtenido por GC/ $\mu$ -ECD de: A. Blanco del procedimiento; B. Elemento interno del transformador; C. Aceite dieléctrico del interior del transformador; D. Mezcla patrón de Arocloros (1016, 1221, 1232, 1242, 1248, 1254 y 1260). Columna DB-5 (30 m x 0.25 mm x 0.25  $\mu$ m).**



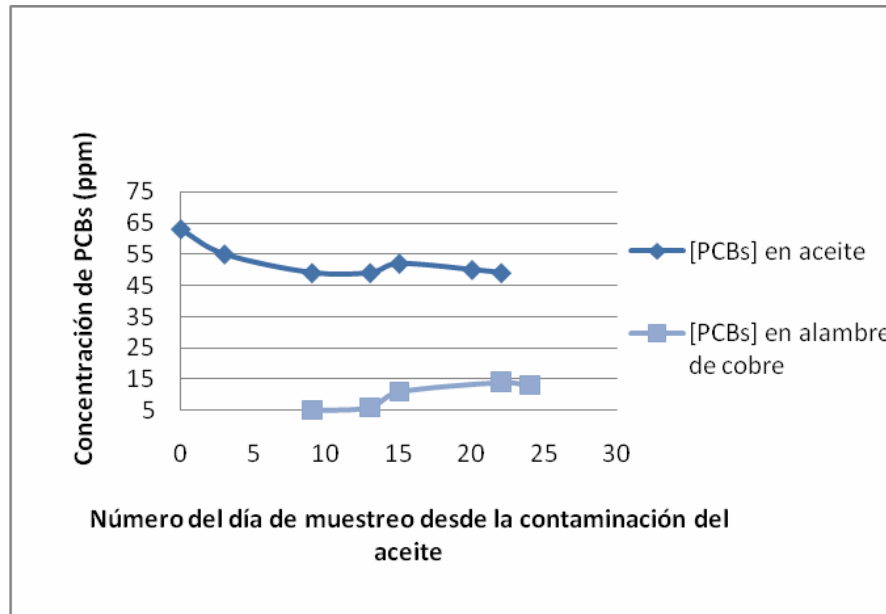
*Fuente: Laboratorio de cromatografía, UIS.*

### 3.2 PARTE EXPERIMENTAL

Después de llevar a cabo el cronograma de muestreo, se analizaron las concentraciones de PCBs obtenidas de los cromatogramas de cada uno de los días establecidos tanto para el muestreo del aceite contaminado como de los respectivos materiales, láminas de acero y alambre de cobre.

En el lapso del día 0 de contaminación hasta el día 10, la concentración disminuyó de una concentración de 60 ppm a 49 ppm, y luego se mantuvo constante hasta el día 25. Se encontró que en aproximadamente un mes de muestreo del aceite dieléctrico su concentración disminuyó un 18.3% respecto a su concentración inicial es decir acerca de 11ppm .

**Figura 14.** Comportamiento de la concentración de PCBs en el aceite y en el alambre de cobre en el tiempo



Se observa que desde el primer muestreo la concentración de PCBs obtenida a través del *Wipe test* es muy baja (5 ppm) respecto a la concentración con la que este alambre se contaminó (60 ppm). Esto es entendible, ya que es un material impermeable y, por ende, no absorbe PCB con la misma eficiencia que lo hacen los materiales porosos. Sin embargo los PCBs se van impregnando en la superficie del alambre de cobre debido a que su superficie está cubierta con un esmalte resinoso (polímero-poliuretano), el cual tiende a comportarse como un material permeable y, por ende, absorbe cierta cantidad de PCBs a través del tiempo, tal como se observa en la Figura 14. Se debe tener en cuenta que todos los bobinados deben estar recubiertos con esta barniz como requisito para aislar la corriente que pasa por ellos.

En la Figura 14 se puede observar que en los 5 muestreos tomados al alambre de cobre la concentración de PCBs aumenta y luego trata de mantenerse constante en un valor de 11 ppm, valor que indica contaminación con PCBs, pues es mayor que el límite establecido por la EPA (>10 ppm) para materiales impermeables. Se

obtuvo en los 5 muestreos un promedio de concentración de PCBs de aproximadamente 11 ppm, lo que indica que si contaminamos el alambre de cobre con un aceite que tenga 60 ppm de PCBs, entonces alrededor de un 18% o 11ppm de esta concentración de PCBs quedará impregnada en el material utilizado en bobinados de transformadores. Es un resultado relevante en transformadores vacíos y fuera de servicio en el momento en que se necesite tener un estimado de la concentración de PCBs del aceite que este transformador tenía.

Por otro lado, si analizamos los resultados de la concentración de PCBs en las láminas de acero encontramos que ésta fue nula a través del tiempo. Esto se pudo haber presentado debido a que la pintura que recubre estas láminas no es lo suficientemente porosa para alcanzar a absorber los PCBs. Esto no significa, que las láminas de acero que conforman la cuba del transformador nunca se vayan a contaminar. Por el contrario, si estas láminas de acero pierden dicha pintura a través del tiempo, el acero empieza a oxidarse en su superficie volviéndose más poroso y frágil y, por ende, se empiezan a acumular los PCBs.

En este orden de ideas, se puede verificar que como la concentración en las láminas de acero fue nula, entonces la variación de la concentración en el aceite y la cantidad de PCBs solo están afectadas por la absorción del barniz que recubre el alambre de cobre. Por esta razón la cantidad de PCBs que se obtuvo en el muestreo de los alambres de cobre debe ser aproximadamente la misma cantidad que disminuyó en el aceite dieléctrico. Para verificarlo, esta situación se realizó el balance de masa respectivo de la cantidad en gramos de PCBs de la siguiente manera: Inicialmente se calculó la cantidad en g de PCBs asociados a los 60 ppm en el aceite:

$$\frac{60 \mu\text{g PCBs}}{\text{g aceite}} * \frac{1\text{L aceite} * 0.8913\text{g aceite}}{1\text{L aceite}} = 53.47\mu\text{g de PCBs}$$



Con este dato, se calculó la cantidad de PCBs asociada a los 11 ppm, (60-49) valor diferencial entre la concentración final e inicial del aceite dieléctrico, obteniendo 9.8 µg de PCBs.

Este valor representa la cantidad de PCBs aproximada que se debe haber absorbido en el esmalte resinoso del alambre de cobre. Realizando entonces el balance de masa, se obtiene:

$$(\sum C_i) mp = 9.8\mu\text{g de PCBs (1)}$$

**C<sub>i</sub>** = Concentraciones obtenidas en los muestreos del alambre [µg de PCB/g].

**mp**= Masa de esmalte resino o poliuretano en unidad muestreada (100 cm<sup>2</sup>) de alambre [g].

Entonces:

$$(C_1+C_2+C_3+C_4+C_5+C_6)*mp = 9.8\mu\text{g de PCBs (1)}$$

$$(55 \mu\text{g de PCBs /g}) * 0.17\text{g} = 9.34\mu\text{g de PCBs (2)}$$

Se observa, que los valores obtenidos en la ecuación (1) y (2) son aproximadamente iguales, con una diferencia de 0.4 µg de PCBs, por lo cual se corrobora que la disminución en la concentración de PCBs con el tiempo de muestreo se atribuye a la absorción del esmalte resinoso del alambre de cobre.

#### 4. CONCLUSIONES

- Según la prueba de Student realizada, se obtuvo que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias muestrales de la concentración de PCBs en el grupo de los elementos porosos internos y el grupo de las tres muestras de aceite tomados directamente del transformador. Por lo que se sugiere que en un transformador vacío se puede emplear el análisis del contenido de PCBs en ciertos elementos internos para estimar la concentración de PCBs en el aceite dieléctrico del transformador.
- Los materiales porosos internos del transformador no están contaminados con PCBs ya que presentan una concentración <50 ppm. Los materiales que más absorbieron PCBs fueron la madera y el papel, con 21.4 ppm y 20.3 ppm, respectivamente. Se propone que cuando sea necesario determinar la concentración de PCBs en los materiales internos de un transformador fuera de servicio y sin aceite dieléctrico, es recomendable tomar como patrón principalmente para el muestreo, la madera de las bases del núcleo o el papel Kraft que recubre las varillas de sostén del núcleo.
- Si al realizar una prueba de limpieza a una sección de alambre de cobre de  $100\text{cm}^2$ , esta presenta una concentración de PCBs de alrededor de 11 ppm, se estima, que el aceite con el que esta muestra fue contaminada al menos tenía una concentración de PCBs de 60 ppm. Concentración que quedará impregnada en la superficie del alambre de cobre (esmalte de poliuretano). Esta información permite para transformadores vacíos y fuera de servicio, estimar la concentración del aceite que el transformador contenía.

- Se corroboró que la cantidad de PCBs que se perdió en el aceite es igual a la cantidad de PCBs que absorbió el esmalte resinoso del alambre de cobre. Por esta razón, se confirma que la disminución de la cantidad de PCBs en el aceite con el tiempo de muestreo solo es afectada por la absorción de PCBs en el barniz del alambre de cobre.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] TEKNIKER. 2007. Análisis de aceite dieléctrico y su significado. [En línea] [http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/lab\\_dielectricos.pdf](http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/lab_dielectricos.pdf). [Consulta: 23 de noviembre de 2009.]
- [2] REDISA. 2009. Recuperación integral de transformadores contaminados con PCB. *Uninorte*. [En línea] [www.uninorte.edu.co/.../Ingenierias/...SIIR/3c-Hidalgo-Argentina-001.pdf](http://www.uninorte.edu.co/.../Ingenierias/...SIIR/3c-Hidalgo-Argentina-001.pdf). [Consulta: 20 de noviembre de 2009.]
- [3] PNUMA. 2002. Transformadores y condensadores con PCB: Desde la gestión hasta la reclasificación y eliminación. [En línea] [http://www.chem.unep.ch/Pops/pdf/PCBTransformers\\_sp.pdf](http://www.chem.unep.ch/Pops/pdf/PCBTransformers_sp.pdf). [Consulta: 25 de enero de 2010.]
- [4] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Ecoacces. 2006. Determining the surface concentration of PCBs. [En línea]. <http://www.derm.qld.gov.au/register/p01337aa.pdf> [Consulta: Enero de 23 de 2008]
- [5] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO TERRITORIAL. 2005. Plan Nacional de Aplicación para PCB en el marco del Convenio de Estocolmo. [En línea] [http://www.minambiente.gov.co/documentos/3028\\_plan\\_accion\\_PCB\\_consulta.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/3028_plan_accion_PCB_consulta.pdf). [Consulta: 20 de noviembre de 2009.] Pág 4,6-7,41-44.
- [6] RAS OLIVA, ENRIQUE. 2009. *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. España. Marcombo, S.A. Pág 1.

- [7] DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS. E.T.S.I. de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. 2008. [En línea]. <http://www.minas.upm.es/dep/Sistemas-Energeticos/Tema2.PDF>. Pág 1. [Consulta: 20 de noviembre de 2009.]
- [8] BRITISH COLUMBIA. 1996. Protocol for Management of PCB Transformers. [En línea] [www.env.gov.bc.ca/epd/hazwaste/issues/pcb\\_trans.htm](http://www.env.gov.bc.ca/epd/hazwaste/issues/pcb_trans.htm). [Consulta: Enero de 2005]
- [9] SCRIBD. *Núcleo de los transformadores*. 2008. [En línea] <http://www.scribd.com/doc/8203264/Nucleos-de-Los-Tranformadores>. pág 1-8. [Consulta: 15 de Febrero de 2010.]
- [10] UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA EXPERIMENTAL LIBERTADOR. 2008. *Guía de estudio de transformadores*. [Documento] Venezuela , pág 1-2.
- [11] ALKARGO CORPORACIÓN. 2009. *Transformador de distribución*. [Documento] España , pág 5.
- [12] PEÑAS, RUFINO J. 2003. *Diseño e implementación de un sistema de señalización para transformadores de potencia (115-34.5 Kv)*. [Tesis de Grado] Bogotá : Universidad de los Andes, págs 27-31.
- [13] ADDLESON, LYALL. 1995. *Materiales para la construcción*. España. Editorial Revert. Pág 83-85.
- [14] CISMADEIRA. PROPIEDADES DE LA MADERA. 2002. [En línea] <http://www.cismadeira.com/especies/downloads/propiedadesdamadeira.pdf>. [Consulta: 5 de Febrero de 2010.]

[15] ENCICLOPEDIA WIKIPEDIA. 2009. Alambre de cobre. *Wapedia*. [En línea] [http://wapedia.mobi/es/Alambre\\_o\\_hilo\\_de\\_cobre\\_esmaltado](http://wapedia.mobi/es/Alambre_o_hilo_de_cobre_esmaltado). [Consulta: 5 de Julio de 2009.]

[16] TRANSEQUIPOS. 2005. *Sistemas de aislamiento*. [Presentación de Seminario] Bogotá , pág 36-38, 57-62,115-123.

[17] UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID. Aceros: Aleaciones Hierro:Carbono. [En línea] <http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/fases%20del%20acero.htm>. [Consulta: 5 de Julio de 2010.]

[18] PROYECTO CERI-ACDI-COLOMBIA, MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE , DOUGLAS WHITE. 1999. *Manual de manejo de PCBs para Colombia*. Bogotá, Pág 22-24.

[19] EPA. Columbia Analytical Services. 1996. *EPA Method 3540C*. [En línea] <http://www.caslab.com/EPA-Methods/PDF/EPA-Method-3540C.pdf>. [Consulta: 3 de Junio de 2010.]

[20] LUQUE DE CASTRO, M y PRIEGO, F. 2010. Soxhlet extraction: Past and present panacea. En: *Journal of Chromatography A*. Vol. 1217 N°16, p. 2383–2389.

[21] ASTM INTERNATIONAL STANDARDS WORLDWIDE. 2006. *ASTM D6661 Standard Practice for Field Collection of Organic Compounds from Surfaces Using Wipe Sampling*. [En línea] <http://www.astm.org/Standards/D6661.htm>. [Consulta: 3 de Marzo de 2010.]

[22] ERICKSON, M. D. 1992. *Analytical Chemistry of PCBs. Estados Unidos*. 1ra. Edición, Lewis Publishers, Boca Raton. 507p.

[23] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE , VIVIENDA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. 2007. *Inventario preliminar de compuestos Bifenilos Policlorados (PCBs) existentes en Colombia*. Bogotá, págs 19,20,51.

## ANEXOS

### ANEXO A: FICHA TÉCNICA Y CONGÉNERES DE PCBs

**Tabla A1: FICHA TÉCNICA DE PCBs**

1	<b>Nombre de la sustancia</b>	<b>Bifenilos policlorados (PCB)</b>
2	<b>Numero de identificación</b>	Nº CAS: 1336-36-3 Policlorobifenilos CAS: 11097-69-1 Nº CE: 215-648-1 Nº 602-039-00-4
3	<b>Nombre genérico y sinónimos</b>	Bifenilo clorado. Difenilo clorado. Clorobifenilo. Bifenilo policlorado. Policlorobifenilo. PCBs La normativa española considera PCB las siguientes sustancias: Nº CAS: 1336-36-3 Policlorobifenilos NºCAS: 61788-33-8 Policloroterfenilos Monometiltetraclorodifenilmetano Monometildiclorodifenilmetano Monometildibromodifenilmetano Cualquier mezcla cuyo contenido total de las sustancias anteriores sea superior a 0,005% en peso (50 ppm). Otros nombres comerciales y sinónimos de mezclas de PCBs: Aceclor (t), Adkarel, ALC, Apirolio (t, c), Aroclor (t, c) (USA), Aroclor 1016 (t, c), Aroclor 1221 (t, c), Aroclor 1232 (t, c), Aroclor 1242 (t, c), Aroclor 1254 (t, c), Aroclor 1260 (t, c), Aroclor 1262 (t, c), Aroclor 1268 (t, c), Areclor (t) Abestol (t, c), Arubren, Asbestol (t, c), ASK, Askarela (t, c) (USA), Bakola, Bakola 131 (t, c), Biclor (c), Chlorextol (t), Chlorinated Diphenyl, Chlorinol (USA), Chlorobiphenyl, Clophen (t, c) (Germany), Clophen-A30, Clophen-A50, Clophen-A60, Clophen Apirorio, Cloresil, Clorphen (t), Delor (Czech Rep.), Diaclor (t, c), Dialor (c), Disconon (c), Dk (t, c), Ducanol, Duconol (c) Dykanol (t, c) (USA), Dyknol, EEC-18, Electrophenyl T-60, Elemex (t, c), Eucarel, Fenchlor (t, c) (Italy), Hexol (Russian Federation), Hivar (c), Hydol (t, c) Hydrol, Hyvol Inclor, Inerteen (t, c), Kanechlor (KC) (t, c) (Japan) Kaneclor, Kaneclor 400, Kaneclor 500, Keneclor, Kennechlor, Leromoll, Magvar, MCS 1489, Montar, Nepolin, Niren, No-Famol, No-Flamol (t, c) (USA), NoFlamol Nonflammable liquid, Pheneclor, Phenoclor (t, c) (France), Phenochlor, Phenochlor DP6, Plastivar, Pydraul (USA), Pyralene (t, c) (France), Pyranol (t, c) (USA), Pyrochlor, Pyroclor (t), (USA), Saf-T-Kuhl (t, c), Saft-Kuhl Santotherm (Japan), Santotherm FR, Santoterm, Santovac, Santovac 1, Santovac2, Siclonyl (c), Solvol (t, c) (Russian Federation), Sovol, Sovtol (Russian Federation), Therminol (USA), Therminol FR. (t): transformador. (c): Condensador



5	<b>Grupo químico</b>	<p>Fórmula estructural:</p>  <p>Los bifenilos policlorados son un grupo de 209 sustancias sintéticas cloradas, de elevada toxicidad para el medio ambiente y la salud. Pueden contener desde uno (1) hasta diez (10) átomos de cloro en diferentes posiciones de los anillos de bifenilo, la ubicación de la sustitución se indica con el nombre de cada compuesto.</p>
		<p>Entre los PCB se presta especial atención en cuanto a toxicidad, a un pequeño grupo de compuestos denominados "PCB similares a dioxinas", que presentan una toxicidad similar a la de las dioxinas. Estos PCB son los que no tienen cloro en las posiciones <i>orto</i> (= PCB coplanares), o los que solo tienen un átomo de cloro en una de las cuatro posiciones <i>orto</i> (= PCB mono-ortoclorados).</p>
6	<b>Valores límites permisibles</b>	<p><u>Valor Límite Permissible Ocupacional para PCB con 42% de Cloro:</u>  TLV(ACGIH), PEL (OSHA) TWA: 1 mg/m<sup>3</sup> (piel) (ACGIH 2005)  REL (NIOSH) TWA: 0.001 mg/m<sup>3</sup> (ACGIH 2005)  MAK(DFG) TWA 0.1 ppm, 1.1 mg/m<sup>3</sup> PEAK II (piel) (ACGIH 2005)</p> <p><u>Valor Límite Permissible Ocupacional para PCB con 54% de Cloro:</u>  TLV(ACGIH), PEL (OSHA) TWA: 0.5 mg/m<sup>3</sup> (piel) (ACGIH 2005)  REL (NIOSH) TWA: 0.001 mg/m<sup>3</sup> (ACGIH 2005)  MAK(DFG) TWA 0.05 ppm, 0.7 mg/m<sup>3</sup> PEAK II (piel) (ACGIH 2005)</p> <p><u>Valor Límite Permissible Ambiental:</u>  Canadá CCME: Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente:  Aire:  Promedio anual permitido 35 ng/m<sup>3</sup>  Promedio diario 150 ng/m<sup>3</sup></p> <p>Agua:  Concentración permitida para la protección de los peces 1 ppt</p>
7	<b>Características físicas y químicas</b>	<p>Fórmula molecular: C<sub>12</sub>Cl<sub>(x+y)</sub>  Peso molecular: 328 (va de 188.7-498.7)</p> <p>Estado físico y aspecto  Entre los PCB figuran líquidos oleosos fluidos y resinas transparentes duras, dependiendo del grado de sustitución.</p> <p>Propiedades físicas</p>

		<p>Son sustancias extraordinariamente estables debido a su inercia química, termorresistencia (T inferiores a 850 °C), no inflamabilidad, baja presión de vapor y elevada constante dieléctrica.          Constante de la ley de Henry: <math>2 \times 10^{-3} \text{ atm}^{-3}/\text{mol}</math> a 25°C          Presión de vapor: <math>7.71 \times 10^{-5} \text{ mm Hg}</math> a 25°C          Solubilidad en agua: 57 mcg/L a 24°C</p> <p>Propiedades químicas          Inertes químicamente, hidrofóbicos.          Kow (coeficiente de partición octanol-agua): 106.5          BAF/BCF: 3000000</p>
8	<b>Acción biocida</b>	No aplica. No es plaguicida
9	<b>Usos</b>	<p>Los PCB se usan como fluidos dieléctricos (aceites aislantes) de transformadores y condensadores.</p> <p><b>En sistemas cerrados:</b>          Transformadores eléctricos(*), condensadores eléctricos, motores eléctricos y electroimanes.</p> <p><b>En sistemas parcialmente cerrados:</b>          Fluidos refrigerantes e hidráulicos, bombas de vacío, interruptores (a), reguladores de voltaje (a), cables eléctricos e interruptores automáticos con rellenos líquidos.</p> <p><b>En sistemas abiertos:</b>          Ceras y aditivos de fundición. Lubricantes: Aceites de inmersión para microscopios, cubiertas de frenos, taladrinas, aceites lubricantes.</p>
10	<b>Sectores económicos en los cuales se utiliza</b>	<p><b>Industrias</b>          Minería, fundición de hierro y acero, industria petroquímica, fabricación de oleoductos y gasoductos, servicios eléctricos (generación y distribución), pulpa y papel.</p> <p><b>Instalaciones</b>          Instalaciones industriales y militares. Edificios comerciales y residenciales. Industria ferroviaria.</p> <p><b>Otras fuentes</b>          Los PCB también se generan como subproductos en varios procesos industriales y durante la incineración de residuos. Existen muchos materiales contaminados con</p>
		<p>PCB accidentalmente durante la manipulación, almacenamiento, transporte o gestión de aparatos que los contienen.</p> <p>Según la UNEP (1999) las principales fuentes de emisión de PCBs al ambiente son:          Disposición de aceites usados que contienen PCBs          Reparación o almacenamiento de aparatos que contienen PCBs          Demolición de antiguas estructuras que contienen PCBs          Operaciones de reciclado de materiales que contienen PCBs          Dragado y movillización de lodos y residuos industriales o urbanos          Emisión de incineradores de residuos industriales o urbanos, no adecuados para destruir PCBs.          Además en vertederos, plantas de reciclaje y la industria química.</p> <p>La principal fuente de PCBs son las importaciones de equipos eléctricos: 10.500 ton (cifras no oficiales) distribuidas en todo el país. El inventario estimado actual es de 6500 toneladas</p> <p><b>Exposición en Colombia:</b> Productos plásticos, carbón, petróleo: 1056, Empleo total, 101739 Producción anual: 5547696000 toneladas. Generación eléctrica: 205 establecimientos, población empleada 23605, producción anual de 627464000 toneladas. Inventario realizado en 1998 solamente obtuvo respuesta del 22% de empresas encuestadas, con base en estos cálculos se estimó una existencia de 2000 toneladas</p>

La información suministrada en la Tabla A1 se obtuvo de USEPA, *Office of research and development*, 2002.

## ANEXO B: FICHA TÉCNICA DE REACTIVOS

**TABLA B1: REACTIVOS QUÍMICOS EMPLEADOS**

	Hexano	Acetona	Aceite Mineral
Fórmula química	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> o	Severely Hydrotreated Insulating Oil
Masa molecular	86,2	58,4	<b>Characteristics</b> Unit Typical data
Pureza (% p/v)	98,5	99,5	<b>1. Physical</b>
Gravedad específica (Agua=1) a 20 °C	0,66	0,793	Appearance complies
Punto de ebullición (°C) a 1 atm	69	56.3	Density, 15°C kg/dm <sup>3</sup> 0.883
Índice de polaridad	0,0	-----	Viscosity, 40°C mm <sup>2</sup> /s 8.7
Punto de fusión (°C)	- 94,3	-94.9	Viscosity, 100°C mm <sup>2</sup> /s 2.2
Presión de vapor (hPa) a 20 °C	160	247	Viscosity, 0°C mm <sup>2</sup> /s 60
Punto de inflamación (°C)	-22	-20	Flash Point, COC °C 150
			Pour Point °C -60
			Aniline Point °C 75
			Colour <0.5
			Interfacial tension at 25°C mN /m 50
			<b>2. Chemical</b>
			Total acid No. mg KOH/g <0.01
			Corrosive sulphur non-corrosive
			Corrosive sulphur non-corrosive
			Antioxidant, phenols Wt % ≤0.3
			Water content ppm <20
			PCB Content ppm not detectable

La información suministrada en la Tabla B1 se obtuvo del catalogo de reactivos y productos del 2008-2010 de MERCK y Product Data Sheet Nynas AB.

## ANEXO C: FICHA DEL TRANSFORMADOR

**Tabla C1: ESPECIFICACIONES DEL TRANSFORMADOR MUESTREADO**

<b>MARCA</b>	SIEMENS
<b>NUCLEO</b>	Tipo columna
<b>ESTADO</b>	Fuera de servicio
<b>POTENCIA</b>	KVA 30
<b>CLASE (Terminales)</b>	P1
<b>No</b>	ICO30623
<b>AÑO</b>	1963
<b>SERIE</b>	10/0.5
<b>TENSIÓN NOMINAL V</b>	
<b>FASE 1</b>	13860
<b>FASE 2</b>	13200
<b>FASE 3</b>	12540
<b>GRUPO DE CONEXIONES</b>	D*4
<b>FRECUENCIA</b>	C/S 60
<b>TENSIÓN DE CORTOCIRCU</b>	4.2

La información suministrada en la tabla C1 se obtuvo de la placa del transformador muestreado, procedente de la ESSA , Bucaramanga.




## ANEXO D: PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA CONCENTRACIÓN DE PCBs EN MATERIALES POROSOS

**Tabla D1:** PRINCIPALES EQUIPOS Y ELEMENTOS EMPLEADOS

Equipo	Especificación
<p>Balanza analítica</p> 	<p>Modelo AG28S, marca Mettler Toledo , máx 220 g e = 0,001 g, mín 0,01 g d = 0,0001 g</p>
<p>Mantas de calentamiento</p> 	<p>Marca Electrothermal, 110/120 V 50/60 Hz, 150 W</p>
<p>Equipo Soxhlet</p> 	<p>Matraz fondo plano capacidad 500 mL con esmerilado 24/40, tubo extractor Soxhlet capacidad 250mL con esmerilado 45/40 – 24/40, y condensador de bolas con esmerilado 45/40</p>
<p>Bolsas de arroz</p> 	<p>Pliegos de bolsas de arroz</p>

<p>Plancha de calentamiento con agitación</p> 	<p>Modelo MSH-20D, marca WISESTIR, 110 V, 1,2 Kw</p>
<p>Mangueras, pinzas, teflón</p> 	<p>Las mangueras de caucho se utilizan para realizarla extracción en continuo, las pinzas nuez como elemento de sostén y la cinta de teflón para asegurar el condensador.</p>
<p>Rotoevaporador</p> 	<p>Buchi Vac V-500 Pump  Buchi Vacuum controller V-8000  Buchi Rotavapor R-205  Buchi Heating bath B-490</p>
<p>Chiller</p> 	<p>Coolflow CFT – Refrigerated Recirculator</p>

Equipo	Especificación
	<p>Cilindro de nitrógeno</p>
<p>Equipo de herramientas</p> 	<p>Juego de llaves mixtas ( llave expansiva , llave 9/16, llave de 3/4), destornilladores.</p>
<p>Diferencial</p> 	<p>Capacidad de carga: 3 toneladas  Longitud de cadena : 8 m  Altura: 3 m</p>
<p>Serrucho y tijeras</p> 	<p>Elementos utilizados para reducción de las muestras extraídas del transformador</p>

Equipo	Especificación
<p data-bbox="358 291 628 323">Respirador ½ cara</p> 	<p data-bbox="712 342 1455 537">Fabricado en silicona, es la serie más confortable de equipos de media máscara para protección respiratoria el equipo 7700 permite al operario completa visión en el área de trabajo.</p>
<p data-bbox="412 667 574 699">Monogafas</p> 	<p data-bbox="721 688 1446 940">Monolente en policarbonato armazón suave en PVC, liviano, transparente, cómodo y adaptable. Protege los ojos del impacto de objetos relativamente grandes como, remaches, fragmentos de metal y madera.</p>
<p data-bbox="456 989 531 1020">Bata</p> 	<p data-bbox="971 1052 1195 1247">Bata laboratorio popelina 80CM de largo bolsillo celular</p>
<p data-bbox="367 1344 618 1375">Guantes de nitrilo</p> 	<p data-bbox="756 1476 1409 1507">Guantes de nitrilo azul con polvo t-p (100 uds)</p>



## PROTOCOLO DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

El procedimiento y los trabajos a realizar para la recolección de las muestras seleccionadas son los siguientes:



1. Ajuste de la tapa del transformador a la diferencial



2. Desencubado de la parte activa del transformador con la diferencial



3. Retiro de tornillería, herrajes y pasatapas



4. Recolección de tela de hiladillo que recubre los tornillos en la zona de conmutación (muestra 9A)



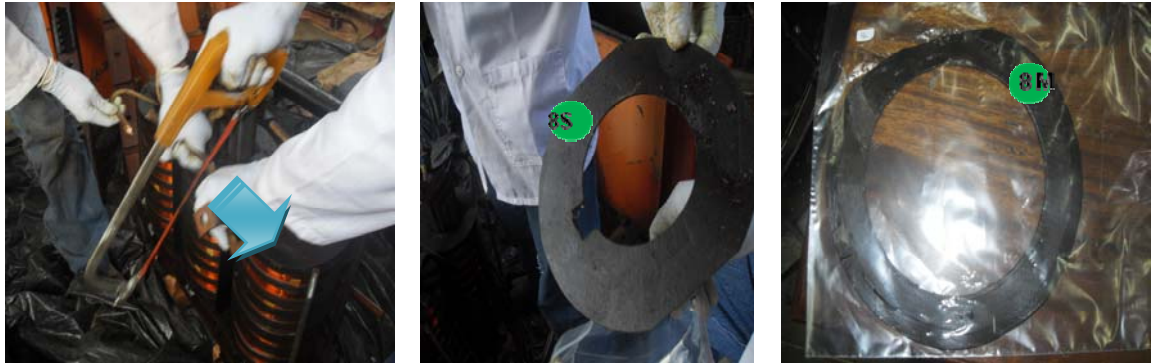
5. Recolección de papel que recubre cableado de fases (muestra 6A)



6. Recolección de papel y cartón del tornillo pasante y su base (muestras 8A, 8B y 6TP).



7. Recolección de papel que recubre los sostenes laterales del núcleo y el tubo de conmutación (muestras 6NI, 6ND y 6TC).



8. Recolección de aros de cartón tipo galleta (muestras 8S, 8M Y 6I).



9. Recolección de cartón separador de devanadas de alta y baja tensión, separador de columnas y separador de yugos (muestras 8F, 8E Y 8C).



10. Recolección de madera y triángulos de cartón, elementos de sostén del núcleo (muestras 7I, 7S Y 8T).

## PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA LA EXTRACCIÓN DEL ACEITE

Con las muestras ya recolectadas en el procedimiento anterior se preparan cada una de estas muestras para su respectiva extracción de aceite; el procedimiento de preparación para las muestras se observa a continuación.

1. Reducción de tamaño de cada una de las muestras, obteniendo trozos o pequeños pedazos de la misma.

- **6TP: Papel que recubre tornillos pasantes**

Especificaciones: 2 tubos de L: 16 cm\*D: 5 mm



- **6NI- 6ND: Papel que recubre varillas de sostén del núcleo**

Especificaciones: 1 tubo de L: 32 cm\* D: 1 cm (muestra compuesta)



- **6TC: *Papel que recubre tubo de conmutación***

Especificaciones: 4 tubos de L: 18cm\*D: 1cm



- **6A: *Papel recubre cableado de fases***

Especificaciones: 1 tubo de L: 63 cm\*D: 1 cm



- **8A – 8B: Láminas de cartón dentro del la base del tornillo pasante y base del tornillo pasante**

Especificaciones: muestra compuesta por 8A y 8B.



8A



8B



8A+8B

- **8S-8I-8M: Aros de cartón superior, medio e inferior separadores del devanado tipo galleta.**

Especificaciones: *Diámetro externo: 20 cm, Diámetro interno: 14 cm.*  
(muestra compuesta)



8S +8M + 8I

- **8E: Cartón separador entre columnas**

Especificaciones: 1 lámina de L: 30 cm\*A: 17 cm.



- **8C: Lámina de cartón separador de yugos**

Especificaciones: 1 lámina de L: 33 cm\*A: 7.5 cm.



- **8F: Lámina de cartón separador de devanados de alta y baja tensión**

Especificaciones: enrollado alrededor de las columnas



- **8T: Sostén de cartón en forma triangular para sostén de núcleo**

Especificaciones: Triángulos de cartón ubicados en la parte superior de columnas



- **7I-7S: Madera base del núcleo parte inferior y superior**

Especificaciones: bloques de madera



- **9A: Tela de hiladillo que recubre varillas cobre**

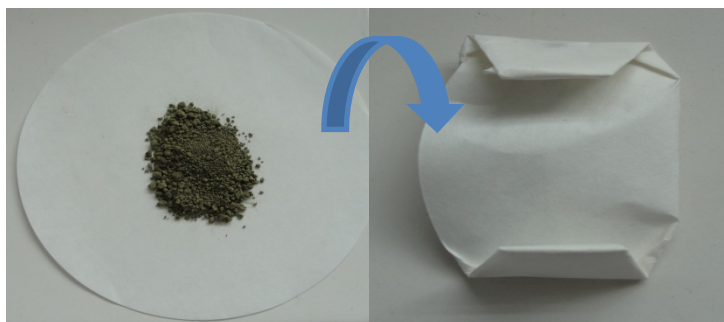
Especificaciones: Tela que recubre los tornillos pasantes



2. Pesar de cada muestra 5g en la balanza y envolverla en las bolsas de papel de arroz.



3. Doblar y sellar el papel de arroz para introducirlo en el equipo extractor.





**Tabla D2. PESOS DE MUESTRAS A REALIZAR EXTRACCIÓN**

NÚMERO DE MUESTRA	NOMBRE	CÓDIGO	PESOS EN BOLSAS DE SOXHLET(g)
982612-23-AH	PAPEL QUE RECUBRE CABLEADO DE FASE	6ª	5.024
982612-24-AH	PAPEL QUE RECUBRE SÓSTEN IZQUIERDO Y DERECHO DEL NÚCLEO	6NI+6ND	5.023
982612-25-AH	PAPEL QUE RECUBRE TUBO DE CONMUTACIÓN	6TC	5.015
982612-26-AH	PAPEL QUE RECUBRE TORNILLO PASANTE	6TP	5.027
982612-27-AH	MADERA BASE INFERIOR DEL NÚCLEO	7I	5.088
982612-28-AH	MADERA BASE SUPERIOR DEL NÚCLEO	7S	5.017
982612-29-AH	LÁMINAS ALARGADAS DE CARTÓN DENTRO DE LA BASE DEL TORNILLO PASANTE + BASE TORNILLO	8A+8B	5.034
982612-30-AH	ARO DE CARTÓN SUPERIOR+MEDIO+INFERIOR DEL BOBINADO GALLETA DE LA COLUMNA 1	8S+8M+8I	5.026
982612-31-AH	CARTÓN SEPARADOR ENTRE COLUMNAS	8E	5.017
982612-32-AH	CARTÓN SEPARADOR DE YUGOS	8C	5.029
982612-33-AH	CARTÓN SEPARADOR DE DEVANADOS DE ALTA Y BAJA TENSIÓN	8F	5.004
982612-34-AH	SOSTÉN DE CARTÓN DE FORMA TRIANGULAR QUE SOSTIENE BASE DEL NÚCLEO	8T	5.028
982612-35-AH	TELA DE HILADILLO QUE RECUBRE EL COBRE	9ª	5.027
982612-36-AH	BLANCO 1 PRIMER SOXHLET	BK-STE1	0
982612-37-AH	CONTROL	CTR-PCB	5.028
982612-38-AH	BLANCO 2 SEGUNDO SOXHLET	BK-STE2	0

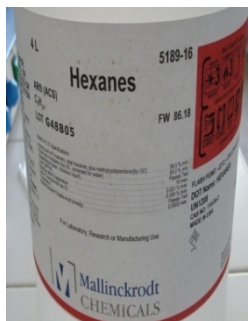
## EXTRACCIÓN DE ACEITE MEDIANTE MÉTODO SOXHLET

**Objetivo:** Extraer el aceite dieléctrico en las muestras de los materiales porosos.

### **Materiales y reactivos:**

- Manta de calentamiento
- Equipo de extracción Soxhlet (matraz, tubo Soxhlet, condensador)
- Papel de arroz
- Soporte universal
- Pinzas nuez y teflón
- Mangueras conectoras
- Probeta 1000 mL
- Gradilla
- *Chiller* (enfriador)
- Balanza analítica
- Hexano - acetona
- Cámara de extracción de vapores

## PROCEDIMIENTO:



1. Lavado con hexano del equipo de extracción Soxhlet.



2. Introducir bolsas de papel de arroz en el tubo Soxhlet.

3. Introducir una mezcla de 500 mL de hexano y 500 mL acetona en la probeta de 1000 mL.



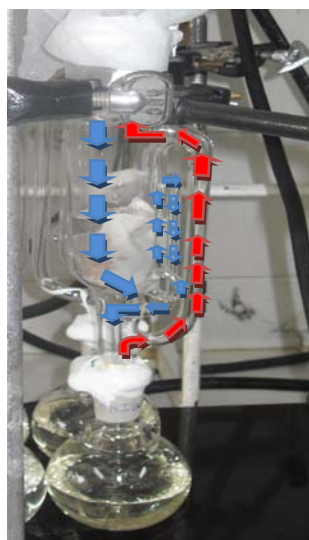
3. Repartir de a 250 mL de la mezcla para cada equipo Soxhlet (cantidad suficiente para que se llene el tubo Soxhlet y, a su vez, que el matraz no se seque durante el proceso debido a pérdidas de solvente) y montar el dispositivo.



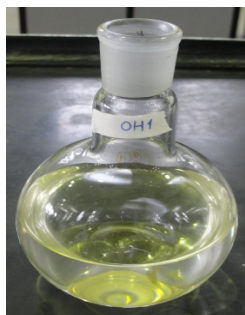
4. Conectar las mangueras para montar la extracción en continuo y encender el *chiller* (refrigerante: propilenglicol ,3C°).



5. Poner en marcha la manta de calentamiento y regular el caudal del condensador. El hexano alcanza la temperatura de ebullición (69 °C), se evapora y llega al refrigerante donde se condensa y cae, gota a gota, sobre el cartucho.



6. Mantener el dispositivo funcionando por 12 horas. En cada ciclo se observa cómo se vacía el compartimiento del tubo Soxhlet sifonando todo el contenido hacia el matraz.



7. En el último ciclo, cuando se haya completado la extracción (12 horas), apagar la manta, deshacer el montaje y retirar el matraz

## DESTILACIÓN SIMPLE (ROTOEVAPORACIÓN)

**Objetivo:** Separar por puntos de ebullición la acetona y el hexano del extracto obtenido.

### Materiales y reactivos:

- Equipo rotoevaporador (bomba, recipiente, condensador, pantalla digital)
- Papel aluminio
- Gradilla
- Agua

### PROCEDIMIENTO:



1. Colocar el matraz que contiene el extracto lipídico y solventes, en un sistema de destilación simple para separarlos.



2. Calentar el agua a 32°C.



3. Establecer las condiciones iniciales de presión, temperatura y rpm, en el rotoevaporador.



4. Poner en marcha la destilación simple por aproximadamente 45 min..



4. Retirar el matraz del rotoevaporador, tapanlo con papel aluminio y ubicar en gradillas.

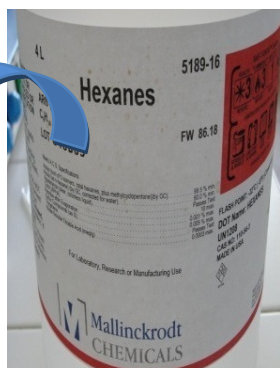
## CONCENTRACIÓN CON NITRÓGENO

**Objetivo:** Concentrar lo máximo posible el extracto obtenido.

### Materiales y reactivos:

- Cilindro de nitrógeno
- Pipetas Pasteur
- Tubos de ensayo de 20 mL
- Vaso precipitado 250 mL
- Plancha de calentamiento
- Pinzas nuez y soporte
- Hexano

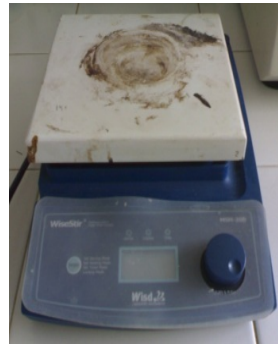
### PROCEDIMIENTO:



1. Se realiza un lavado del matraz con hexano para recuperar extracto impregnado en las paredes. Se lava con dos porciones de 5 mL de hexano

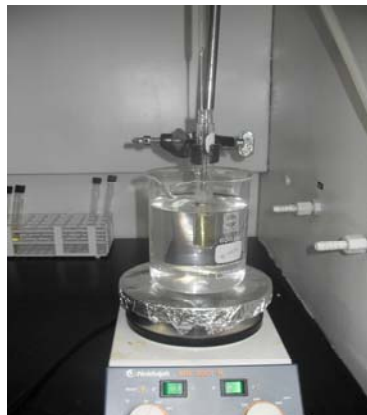
2. Se pesan tubos de ensayo secos de 20mL.





3. Cada muestra lavada se transvasa a tubos de ensayo de 20 ml.

4. Se pone a calentar la plancha de calentamiento a 40c° y a calentar el agua del vaso en el cual se va a sumergir el tubo de ensayo.



5. Se pone en marcha la concentración del extracto en el tubo de ensayo con un flujo moderado de nitrógeno, y se deja aproximadamente de 10 a 15 min, dependiendo de la cantidad de hexano que contenga.



6. Se pesa el tubo de ensayo con el extracto concentrado, para determinar cuántos gramos de extracto se obtuvieron.

## ANEXO E: PORCENTAJES DE ACEITE EXTRAÍDO

Tabla E1: PORCENTAJE DE EXTRACTO DE ACEITE OBTENIDO DE CADA MUESTRA

CÓDIGO	PESO TUBO ENSAYO CON ACEITE, g	PESO TUBO ENSAYO VACIO, g	ACEITE EXTRAIDO, g	CANTIDAD DE MUESTRA EN BOLSAS, g	EXTRACTO DE ACEITE, %
6A	20.423	19.758	0.665	5.024	13.23
6NI+6ND	20.364	19.731	0.638	5.023	12.71
6TC	20.541	19.917	0.623	5.015	12.43
6TP	20.324	19.744	0.579	5.027	11.54
7I	20.605	19.805	0.799	5.089	15.71
7S	20.865	19.789	1.076	5.017	21.45
8A+8B	20.758	19.955	0.803	5.034	15.94
8S+8M+8I	20.596	19.963	0.633	5.026	12.60
8E	20.951	20.332	0.619	5.017	12.34
8C	20.608	20.066	0.542	5.029	10.77
8F	20.781	20.249	0.532	5.004	10.64
8T	20.672	20.371	0.302	5.028	6.00
9A	22.072	20.402	1.670	5.027	33.23
BK-STE1	19.348	19.348	0	0	0
CTR-PCB	20.083	19.952	0.131	5.028	2.6
BK-STE2	19.961	19.961	0	0	0

## ANEXO F: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para este procedimiento se utilizaron dos tipos de materiales internos del transformador: láminas de acero que representan la cuba del transformador y secciones de alambre de cobre que componen los bobinados, con las siguientes especificaciones:

**Tabla F1.** Especificaciones de materiales utilizados.

Material no poroso	Cantidad de muestras	Dimensiones	Área(100cm <sup>2</sup> )
Láminas de acero	5 láminas	10 cm x 10 cm	Área cuadrado: L*L 100cm <sup>2</sup> : 10*10
Alambre de cobre	6 secciones	D=0.1 cm H=318.5 cm	Área cilindro: $2\pi*r *H$ 100cm <sup>2</sup> : $2\pi*(0.05cm)*318.5cm$

### PROCEDIMIENTO:



1. Se preparó una solución de 60 ppm con un litro de aceite libre de PCBs empleando un aceite contaminado con 3700 ppm mediante un proceso de dilución.



2. El litro contaminado con 60 ppm se transvasa a un recipiente rectangular de aluminio donde se contaminarán las respectivas muestras.

3. Se colocan las respectivas muestras en el recipiente por un tiempo determinado



4. Se sacan y se dejan secar las muestras por un tiempo determinado.

Material no poroso	Días de contaminación en recipiente	Días de secado para primer muestreo
Láminas de acero	4	5
Alambre de cobre	3	5

5. Se realiza el método *Wipe Test* o prueba de limpieza según el cronograma establecido.

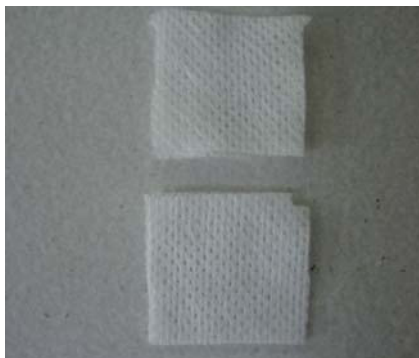
## MÉTODO WIPE TEST O PRUEBA DE LIMPIEZA

**Objetivo:** Extraer compuestos orgánicos (PCBs) en las superficies de los materiales respectivos.

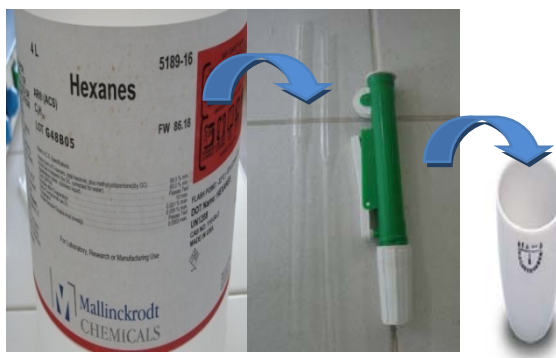
### Materiales y reactivos:

- Gasas estériles para cirugía
- Pipetas Pasteur
- Tubos Cónicos
- Guantes de nitrilo
- Crisol
- Pinza
- Hexano

### PROCEDIMIENTO



1. Se corta la gasa estéril en cuadrados de  $7.6 \text{ cm}^2$



2. Se toman 2 mL de hexano y se transvasan a un crisol.



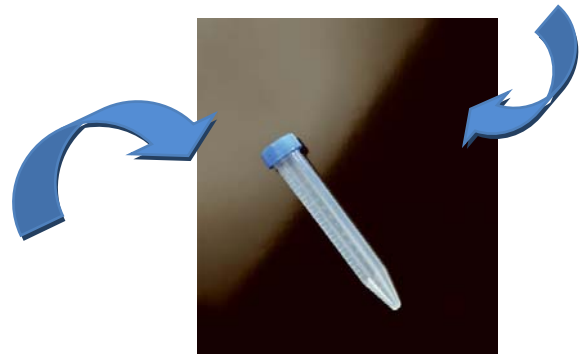
3. Con la pinza coger una gaza limpia y remojarla en los 2mL de hexano en el crisol, hasta que queden saturadas sin gotear.



4. Limpiar la superficie de 100 cm<sup>2</sup> de las láminas con trazos firmes presionando con los dedos. Limpiar vertical y luego horizontalmente, repitiendo 2 veces desde diferente dirección.



5. Limpiar la superficie de 100 cm<sup>2</sup> de cable con la gaza, realizando un "back and forth" un total de 8 veces alrededor de todo el cable. Se abre la gaza y se expone la superficie fresca repitiendo otra vez el muestreo.



6. Doblar la gaza con la cara de la muestra hacia el interior, y llevarlas al cónico, donde se conservaran hasta su respectivo análisis.

La información para realizar esta práctica estándar fue tomada de la Norma ASTM D6661.

Se realizó un cronograma en el que se determinaron los días en que se realizaron las respectivas pruebas de limpieza o el *Wipe Test* para cada muestra de material

(sección de alambre de cobre o láminas de acero) y para cada toma de muestra del aceite contaminado.

**Tabla F1: CRONOGRAMA DE MUESTREO**

<b>Fecha de muestreo</b>	<b>Actividad</b>
Lunes, 3 de mayo	Toma de primer control de la Co de aceite contaminado
	Toma de segundo control de la Co de aceite contaminado
	Toma de Blanco de hisopo de lámina de acero
	Toma de Blanco de aceite mineral
	Se contamina el aceite con 60 ppm y se sumergieron las láminas de acero
Jueves, 6 de mayo	Se sacaron las láminas de acero del aceite contaminado
Martes, 11 de mayo	Toma de Blanco de hisopo de cobre
	Toma de hisopo 1 lado A de la lámina de acero
	Toma de muestra de aceite al día 8 desde la contaminación
	Toma de duplicado de muestra de aceite
Miércoles, 12 de mayo	Toma de hisopo 1 lado B de la lamina
	Toma de muestra de aceite al día 9 desde la contaminación del mismo
	Toma de duplicado de muestra de aceite
	Se sumergieron los alambres de cobre en el aceite contaminado.
Sábado, 15 de mayo	Toma de hisopo 2 lado A de la lámina de acero
	Toma de muestra de aceite al día 11 desde la contaminación del mismo
	Toma de duplicado de muestra de aceite
	Se sacaron los alambre de cobre del aceite contaminado
Martes, 18 de mayo	Toma de hisopo 2 lado B de la lámina de acero
	Toma de muestra de aceite al día 15 desde la contaminación del mismo
	Toma de duplicado de muestra de aceite
Viernes, 21 de mayo	Toma de hisopo 3 lado A de la lámina de acero
	Toma de hisopo 1 de alambre de cobre
	Toma de muestra de aceite al día 15 desde la contaminación del mismo
	Toma de duplicado de muestra de aceite
Martes, 25 de mayo	Toma de hisopo 3 lado B de la lámina de acero
	Toma de hisopo 2 alambre de cobre
	Toma de muestra de aceite al día 19 desde la contaminación del mismo
<b>Fecha de muestreo</b>	<b>Nombre código</b>
	Toma de duplicado de muestra de aceite

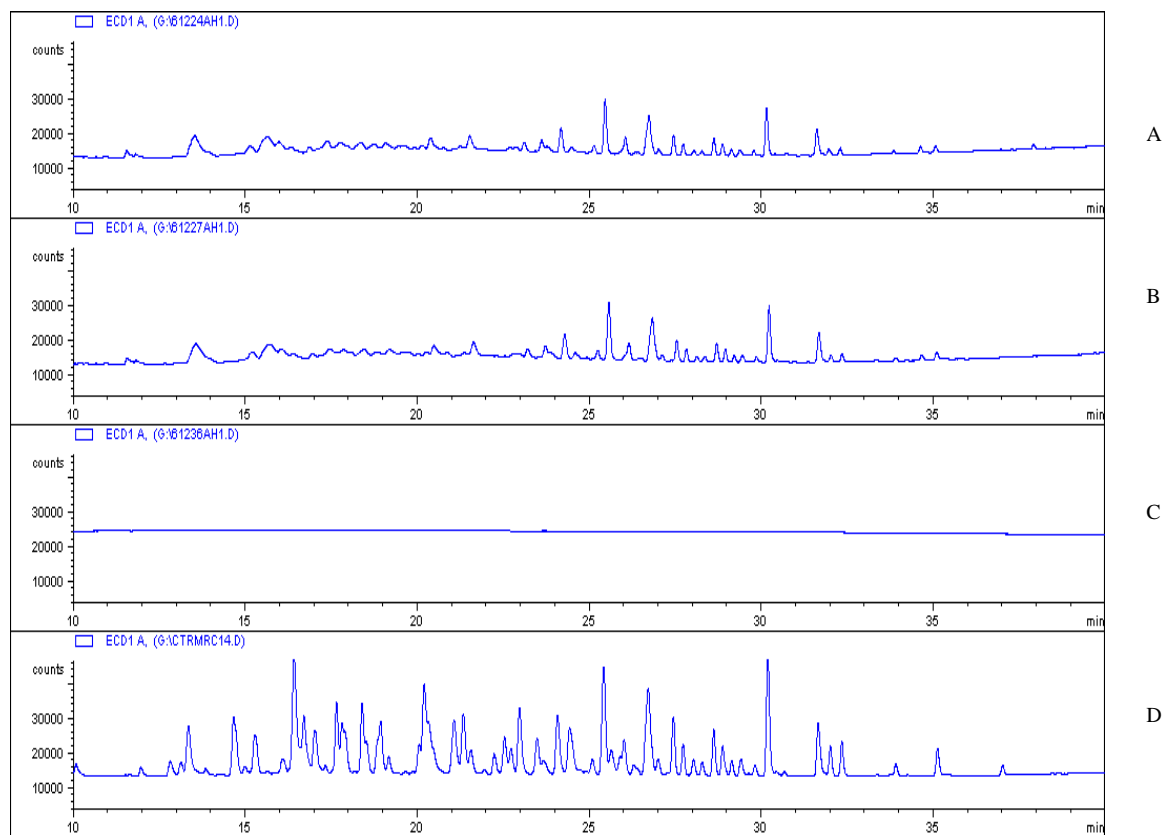
jueves 27 mayo	Toma de Hisopo 4 lado B de la lámina de acero
	Toma de Hisopo 3 de alambre de cobre
	Toma de muestra de aceite al día 24 desde la contaminación del mismo
	Toma de duplicado de muestra de aceite
Martes 1 de junio	Toma de Hisopo 4 lado B de la lámina de acero
	Toma de Hisopo 4 de alambre de cobre
	Toma de muestra de aceite al día 29 desde la contaminación del mismo
	Toma de duplicado de muestra de aceite
jueves 3 de junio	Toma de Hisopo 5 lado A de la lámina de acero
	Toma de Hisopo 5 de cobre
	Toma de muestra de aceite al día 31 desde la contaminación del mismo
	Toma de duplicado de muestra de aceite
Sábado 5 de junio	Toma de Hisopo 5 lado B de la lámina de acero
	Toma de Hisopo 6 de cobre
	Toma de muestra de aceite al día 33 desde la contaminación del mismo
	Toma de duplicado de muestra de aceite
Lunes 21 de junio	Toma de Hisopo 7 lado A de alambre de cobre
	Toma de muestra de aceite al día 49 desde la contaminación del mismo
	Toma de duplicado de muestra de aceite
viernes 25 de junio	Toma de muestra de aceite al día 53 desde la contaminación del mismo
	Toma de duplicado de muestra de aceite

Continuación **TABLA F1.**

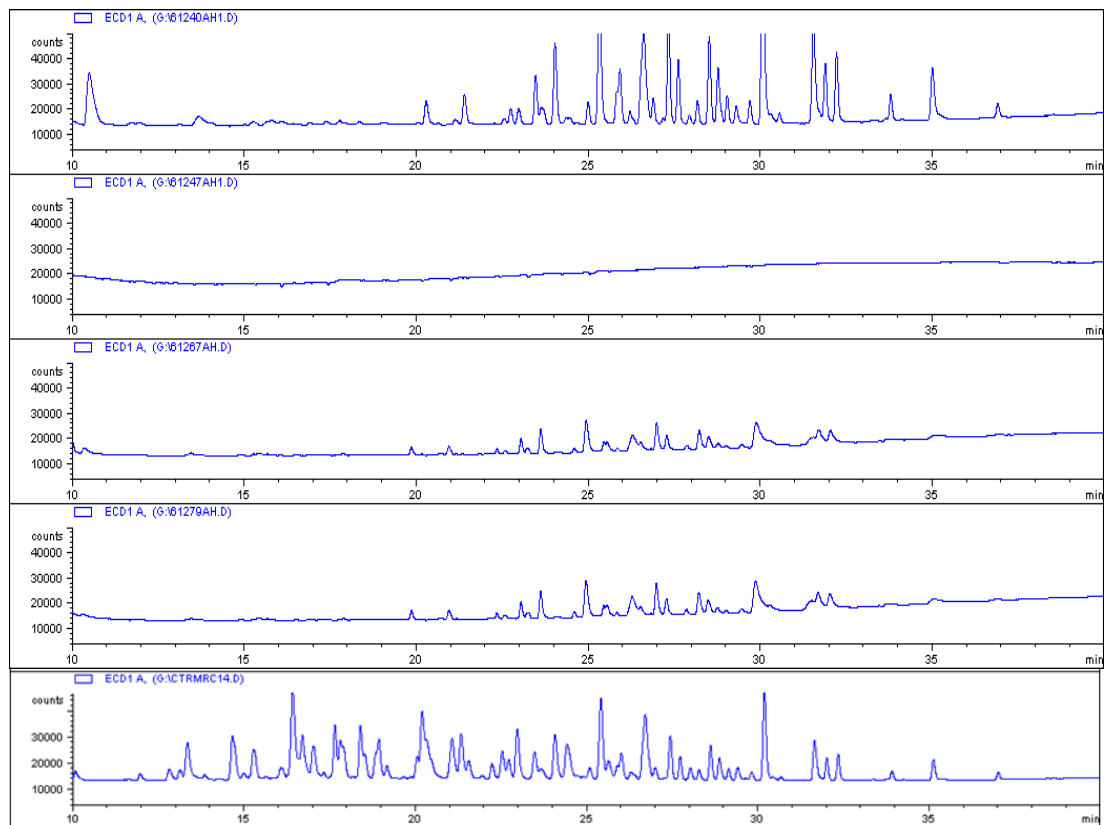


## ANEXO G: PERFILES CROMATOGRÁFICOS

**Figura G1:** Perfiles cromatográficos obtenidos por GC/ $\mu$ -ECD de: A. Papel que recubre ssten izquierdo y derecho del núcleo; b. Madera base inferior del núcleo; c. Blanco del procedimiento; D. Mezcla patrón de Arocloros (1016, 1221, 1232, 1242, 1248, 1254 y 1260). Columna DB-5 (30 m x 0.25 mm x 0.25  $\mu$ m).\*



**Figura G2:** Perfiles cromatográficos obtenidos por GC/ $\mu$ -ECD de: A. Concentración inicial de aceite contaminado; b. Hisopo 1 de lámina de acero; c. Hisopo 1 de alambre de cobre; D. Hisopo 6 de alambre de cobre; E. Mezcla de Arocloros (1016, 1221, 1232, 1242, 1248, 1254 y 1260). Columna DB-5 (30 m x 0.25 mm x 0.25  $\mu$ m).\*



\* Resultados suministrados por el Laboratorio de Cromatografía, Universidad Industrial de Santander.

## ANEXO H: LA PRUEBA t (Student)

### SIGNIFICACIÓN DE LA DIFERENCIA ENTRE DOS MEDIAS

**Tabla H1: CÁLCULO DEL VALOR T PARA LAS MEDIAS DE DOS GRUPOS DE MUESTRAS**

a)

b)

X	x	X <sup>2</sup>
13.1	-2.7	7.29
21.4	5.6	31.36
18.2	2.4	5.76
15.8	0.0	0
14.0	-1.8	3.24
12.8	-3.0	9
15.7	-0.1	0.16
12.5	-3.3	10.89
15.7	-0.1	0.01
15.9	0.1	0.01
13.8	-2.0	4
20.5	4.7	22.09
16.2	0.4	0.16
<b>x</b> <b>prom:15.8</b>		<b>suma:</b> <b>93.97</b>

X	x	X <sup>2</sup>
13.9	-0.5	0.25
15.1	0.7	0.49
14.1	-0.3	0.09
<b>x</b> <b>prom:14.4</b>		<b>suma:</b> <b>0.83</b>

**a)** Grupo de concentraciones de PCBs (ppm) de cada una de las 13 muestras porosas.

**b)** Grupo de concentraciones de PCBs (ppm) de las tres muestras de aceite tomadas directamente del transformador.

**X:** Concentraciones PCB (ppm)    **x:** xi-x prom    **X<sup>2</sup>:** (xi-x prom)<sup>2</sup>

Como se puede observar ,el valor promedio del grupo 1 es de 15.8 y la media del segundo grupo es 14.4 . Evidentemente existe una diferencia entre ambos promedios. Lo que se quiere verificar es si la diferencia de los promedios entre los

grupos es significativa. A tal efecto, se formula una hipótesis nula y una alterna que plantea:

**Ho=** *No existe diferencia significativa en la concentración de PCBs en el aceite extraído por el método Soxhlet del grupo de muestras porosas y el grupo de muestras de aceite directamente recolectado del transformador.*

**Ha=** *Si existe diferencia significativa en la concentración de PCBs en el aceite extraído por el método Soxhlet del grupo de muestras porosas y el grupo de muestras de aceite directamente recolectado del transformador.*

Como un subsiguiente paso se procede a calcular el error estándar de la diferencia entre dos medias, lo cual también se denomina como margen de error de la prueba t.

Fórmula para cálculo del error estándar de la diferencia entre dos medias:

$$S_{x_1-x_2} = \sqrt{\frac{\sum x_1^2 + \sum x_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \right)}$$

Sustituyendo los valores se, obtiene:

$$S_{x_1-x_2} = 1.6$$

Originalmente se observó en la Tabla 1 una diferencia de 1.4 al comparar ambas medias. El cálculo anterior da la diferencia que cabría esperar (margen de error) sólo de la casualidad si la hipótesis de nulidad fuera cierta. En otras palabras, el valor 1.6 es la diferencia esperada entre las puntuaciones del rendimiento medio en ambos grupos si se extraen aleatoriamente de una población común. Para saber si esta diferencia es lo suficiente mayor que la diferencia prevista para así rechazar la hipótesis de nulidad se procede a obtener la razón de ambos números y esto es lo que se denomina como la razón t y su fórmula es:

Sustituyenc  $T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_{x_1-x_2}}$  obtiene:

$$T = 0.875$$

La diferencia observada es 0.875 veces mayor que la esperada según una verdadera hipótesis de nulidad. Para saber si esta diferencia es lo suficientemente grande para rechazar la hipótesis de nulidad al nivel 0.05, se necesita calcular los grados de libertad y consultar con la tabla t.

Los grados de libertad para una prueba t independiente son los números de casos en el primer grupo más los números de casos en el segundo grupo menos 2.

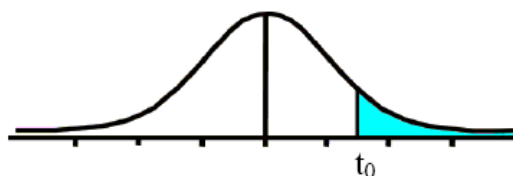
$$gdl = n1 + n2 - 2$$

En esta situación, se tienen  $13 + 3 - 2 = 14$  grados de libertad. Al consultarse con la

tabla t, se encuentra que a un nivel de 0.05 y con 14 grados de libertad encontramos una razón t de 1.7613, lo cual quiere decir que en una verdadera hipótesis de nulidad ocurrirá por casualidad en un 5 por 100 de las veces. La razón calculada de 0.875 es menor que 1.7613, lo cual demuestra que la diferencia entre los grupos es menor que el valor que se necesita para rechazar la hipótesis de nulidad al nivel de significación 0.05. Por lo tanto la probabilidad estimada que la hipótesis sea verdadera es mayor que 5 por 100 ( $p > 0.05$ ). Por esta razón se llega a la conclusión de que la diferencia no es significativa y se acepta la hipótesis de nulidad planteada.

**Tabla H2: TABLA t-STUDENT**

Tabla t-Student



Grados de libertad	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8210	63.6559
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9645	9.9250
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1824	4.5407	5.8408
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7765	3.7469	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0321
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9979	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768

La información para realizar la prueba de significancia Student fue tomada de: MILLER, J.C. (1993). *Estadística para química analítica*. Segunda edición, Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, Delaware. p.p. 40-63.