



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

Instituto de Investigaciones en Materiales

**“SEPARACIÓN Y EXTRACCIÓN DE
SOLDADURA BASE PLOMO DE TABLEROS
DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS EN:

Ciencia e Ingeniería de los Materiales

PRESENTA:

I.Q. María Alejandra Morales Ayala

Tutor Principal:

Dr. Ignacio Alejandro Figueroa Vargas
IIM UNAM

Miembros del Comité Tutor:

Dr. Gabriel Ángel Lara Rodríguez
IIM UNAM

Dr. Roberto Mendoza Serna
FES Zaragoza UNAM

MÉXICO, D.F. ABRIL 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

Debido a la problemática de la gran cantidad de residuos electrónicos generados en las últimas décadas. El presente trabajo, realiza un estudio de separación, extracción y recuperación de soldadura base plomo en los tableros de circuitos electrónicos de monitores de PC. La soldadura obtenida se analiza con las técnicas de caracterización de rayos X, para la identificación de fases; microscopía electrónica de barrido, para la determinación de la microestructura, composición; y por último calorimetría diferencial de barrido, para la determinación del punto de fusión. Con estos análisis se comprobó que las soldaduras investigadas presentaron altos contenidos de plomo (Pb). En base a los resultados obtenidos en la caracterización, se plantea un prototipo de proceso industrial, para trabajo en serie de la separación, extracción y recuperación de las soldaduras.

AGRADECIMIENTOS

A Dr. Ignacio A. Figueroa Vargas, por creer en mí y aceptar ser mi tutor, así como su apoyo y guía

A Dr. Gabriel A. Lara Rodríguez, por su apoyo y guía en el proceso de separación, extracción y preparación de muestras.

A Dr. Roberto Mendoza Serna, por impulsarme y apoyarme a lo largo de toda mi vida académica.

A Dr. Omar Novelo Peralta por su apoyo en el microscopio diferencial de barrido, por sus valiosos comentarios y aportaciones a la realización de este trabajo.

Al IIM por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría en sus instalaciones.

A los técnicos del IIM-UNAM que me brindaron su ayuda durante la parte experimental de mi trabajo, sin algún orden en particular los menciono a continuación: M. en C. A. Tejeda Cruz, Ing. J. J. Camacho, Ing. G. Arámburo, Sr. E. A. Caballero, Fis. R. Reyes, C. Flores, E. Sánchez, J. Morales, C. González y M.J. Arellano por su apoyo y colaboración técnica.

Al proyecto PAPIIT-UNAM "IB100712" por el financiamiento para la realización del proyecto.

A la UNAM por ser mi casa Mater y darme la oportunidad de ser alguien en la vida.

Al CONACyT por el apoyo económico para la realización de este trabajo.

A mi país México, por brindarme la maravillosa oportunidad de estudiar lo que yo deseaba.

DEDICATORIA

Al Espíritu infinito por todos los regalos que me ha dado, por dejarme fluir, por darme oportunidades de oro y sobre todo por no permitir que la ceguera me acobardara.

A mi madre Eva Ayala Aguilar por darme la vida, por enseñarme a no desfallecer, por siempre creer en mí y por enseñarme a caminar dos veces.

A Fernando León Santos por sus sabios consejos, por animarme a continuar, por compartir mi historia, por su apoyo incondicional. Sin ti, nunca hubiera logrado finalizar los sueños de mi vida.

A mi hija Ilse por existir y ayudarme a ser mejor ser humano.

A mi hija Valeria por dar sentido a mi vida, por dar luz a mis días grises y ayudarme a no perecer.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| Resumen..... | i |
| Agradecimientos..... | iii |
| Dedicatoria..... | iv |
| Abreviaturas..... | vii |
| | |
| Introducción | 1 |
| | |
| I. Marco Teórico | |
| 1.1 Situación mundial..... | 3 |
| 1.2 Situación en Latinoamérica..... | 7 |
| 1.3 Situación en la República Mexicana..... | 9 |
| 1.3.1 <i>Importación y exportación formal de productos electrónicos.....</i> | 11 |
| 1.4 Recolección en Ciudad de México..... | 12 |
| 1.4.1 <i>Transferencia.....</i> | 12 |
| 1.4.2 <i>Selección.....</i> | 13 |
| 1.4.3 <i>Disposición final.....</i> | 13 |
| 1.4.4 <i>Reciclaje informal.....</i> | 14 |
| 1.4.5 <i>Reciclaje formal.....</i> | 14 |
| 1.5 Regulaciones ambientales..... | 16 |
| 1.5.1 <i>Convenio de Basilea.....</i> | 16 |
| 1.5.2 <i>Convenio de Estocolmo.....</i> | 17 |
| 1.5.3 <i>Convenio de Róterdam.....</i> | 18 |
| 1.5.4 <i>Comisión para la cooperación ambiental de América del Norte.....</i> | 18 |
| 1.6 Desechos..... | 19 |
| 1.6.1 <i>Toxicidad de retardadores de flama.....</i> | 20 |
| 1.6.2 <i>Metales pesados.....</i> | 23 |
| 1.7 Definición de soldadura blanda (soldering)..... | 28 |
| 1.7.1 <i>Diagrama de fases estaño-plomo.....</i> | 30 |
| 1.8 Métodos de separación..... | 35 |
| 1.8.1 <i>Pirometalurgia.....</i> | 35 |
| 1.8.2 <i>Hidrometalurgia.....</i> | 37 |

II. Experimentación

| | |
|--|----|
| 2.1 Visita de campo..... | 39 |
| 2.2 Metodología experimenta | |
| 2.2.1 Selección..... | 39 |
| 2.2.2 Separación..... | 40 |
| 2.2.3 Extracción..... | 41 |
| 2.3 Caracterización..... | 45 |
| 2.3.1 Difracción de Rayos X (DRX)..... | 45 |
| 2.3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)..... | 50 |
| 2.3.3 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)..... | 54 |

III. Resultados y Discusión

| | |
|--|----|
| 3.1 Visita de campo..... | 58 |
| 3.2 Separación y extracción de soldadura base plomo..... | 59 |
| 3.2.1 Selección..... | 60 |
| 3.2.2 Separación..... | 61 |
| 3.2.3 Extracción..... | 62 |
| 3.3 Caracterización..... | 63 |
| 3.3.1 Difracción de rayos X (DRX)..... | 64 |
| 3.3.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)..... | 70 |
| 3.3.3 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)..... | 77 |

IV. Proceso

| | |
|---|----|
| 4.1 Proceso de extracción de soldadura..... | 81 |
| 4.1.1 Diagrama general de proceso..... | 81 |
| 4.1.2 Descripción general del proceso..... | 82 |
| 4.1.3 Sección de alimentación..... | 83 |
| 4.1.4 Sección de fusión y extracción de soldadura..... | 85 |
| 4.1.5 Sección de tableros sin circuitos..... | 86 |
| 4.1.6 Sección de separación de soldadura y circuitos..... | 87 |

| | |
|----------------------|-----|
| V. Conclusiones..... | 89 |
| Apéndice..... | 91 |
| Bibliografía..... | 112 |

ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| A° | Angstrom |
| APCPEL | Alianza de América del Norte para la Prevención de la Contaminación con Productos Electrónicos Limpios |
| ATSDR | Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades |
| BPCs | Bifenilos policlorados |
| CANIETI | Cámara Nacional de la Industria, Electrónica, de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información, México |
| CCA | Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte |
| COFETEL | Comisión Federal de Telecomunicaciones, México |
| COPs | Contaminantes orgánicos persistentes |
| DHHS | Department of Health and Human Services, Estados Unidos |
| EMAS | Eco Management and Audit System |
| EMPA | Oficina Federal Suiza Laboratorios de pruebas e Investigación de Materiales |
| EPA | Environmental Protection Agency, Estados Unidos |
| FDS | Fondo Global de Solidaridad Digital |
| Gramos | g |
| hrs | Horas |
| HP | Hewlett-Packard |
| IIM | Instituto de Investigaciones de Materiales |
| IMU | Empresa recolectora de celulares y Pilas en México |
| INARE | Instituto Nacional de Recicladores, México |
| INE | Instituto Nacional de Ecología, México |
| INEGI | Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México |
| JCPDS | Joint Committee of Powder Diffraction Standards |
| UIT | Unión Internacional de Telecomunicaciones |
| LAC | Latinoamérica y el Caribe |
| LGEEPA | Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección Ambiental |
| LPGGIR | Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos |

| | |
|----------------|--|
| m ³ | Metros cúbicos |
| mm | Milímetros |
| OECD | Organisation for Economic Co-operation and Development |
| PAR | Planes de Acción Regionales, América del Norte |
| PCB | Tableros de circuitos electrónicos |
| PC | Computadora |
| PBBs | Bifenilos polibromados |
| PBDEs | Éteres bifenílicos polibromados |
| PIB | Producto Interno Bruto |
| PNUMA | Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente |
| P & C | Price & Cooke |
| ppm | Partes por millón |
| PIC | Prior Informed Consent |
| PyMES | Pequeñas y medianas empresas |
| UIT | Unión Internacional de Telecomunicaciones |
| REP | Responsabilidad Extendida del Productor |
| RoSH | Restriction of the use of certain Hazardous Substances |
| SEMARNAT | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México |
| TBBPA | Bisfenol tetrabromado A |
| TLCAN | Tratado del Libre Comercio de América del Norte |
| TIC | Tecnología de Comunicación e Información |
| Toneladas | ton |
| TPCs | Terfenilos policlorados |
| TV | Televisión |
| UNESCO | Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura |
| VCR | Video casetera |
| WEEE | Waste Electrical and Electronic Equipment |

INTRODUCCIÓN

La humanidad ha sido muy hábil para generar basura. Los arqueólogos, observaran un nuevo residuo nocivo que a finales del siglo XX apareció alrededor de todo el paisaje, ese despojo digital conocido como desechos electrónicos. En cualquier momento todos los equipos considerados de vanguardia están simultáneamente a las puertas de la obsolescencia. Se calcula que el 70% de las computadoras y de los monitores desechados, como el 80% de los televisores terminarán a la larga en un tiradero de residuos, pese al creciente número de leyes estatales que prohíben tirar desechos electrónicos, ya que pueden filtrar plomo, mercurio, arsénico, cadmio, berilio y otras sustancias tóxicas en la tierra. Por otra parte, desde el 2005 se ha guardado un volumen incontable de equipo electrónico que no se usa. El cual, permanece en áticos y sótanos indefinidamente, sin llegar nunca a un tiradero de residuos, esa solución tiene su propio efecto indirecto en el medio ambiente. Actualmente, menos del 20% de los desechos electrónicos que entra en proceso de eliminación de desechos sólidos se trata mediante compañías que se anuncian como recicladoras [1].

Los tableros electrónicos, se encuentran principalmente en: tabla de circuitería de TV, chasis de Monitor en PC, tarjeta de circuitos en Monitor, plásticos y tarjetas de circuitos de Teclado y ratón de una PC, gabinete plástico en PC, tarjeta madre en PC, microprocesador de videojuego, tarjetas de circuitos de VCR, etcétera. Estos, representan aproximadamente el 3% del total de desperdicios generados [3,4]. Los materiales tóxicos como el plomo contenido en los tableros de circuitos electrónicos pueden contaminar aire, tierra y agua, lo que ha ocasionado la elevación de los niveles de plomo en la sangre de los niños [6-9]. Debido a esta problemática, en la siguiente investigación se plantean los objetivos:

1. Dar una respuesta, a un problema global, en donde la Ciencia Básica se amalgame con la industrial, para proponer una solución ambientalmente segura.

2. Separar y extraer de soldadura base Plomo de los tableros de circuitos electrónicos de monitores de computadora. En este punto se considera lo siguiente:

- Encontrar las fases presentes en la soldadura en los tableros de circuitos electrónicos.
- Determinar la microestructura, composición de la soldadura, así como su temperatura de fusión.

De acuerdo a los objetivos planteados, la presente investigación se realizó de la forma siguiente:

Capítulo I Marco Teórico. En este capítulo se presenta los antecedentes de la generación de residuos electrónicos y regulaciones ambientales. Tomando en cuenta todo esto se presentan los desechos tóxicos, la soldadura blanda, sus características y el diagrama de fases de Sn-Pb.

Capítulo II Experimentación. En este capítulo se hace una reseña de la visita de campo realizada al relleno sanitario bordo poniente. Además, se presenta la secuencia experimental de separación, extracción, recuperación, preparación de muestras y las técnicas de caracterización utilizadas, para caracterizar la soldadura obtenida de los tableros de circuitos electrónicos.

Capítulo III Resultados y Discusión. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con las técnicas de caracterización utilizadas, para caracterizar la soldadura obtenida de los tableros de circuitos electrónicos. Por otra parte, se discuten los resultados tomando en cuenta los objetivos planteados.

Capítulo IV Proceso Propuesto En este capítulo se presentan un prototipo de proceso para la separación y extracción de soldadura a nivel industrial, acorde a los resultados obtenidos en el capítulo II y III.

Capítulo V Conclusiones. En este capítulo se puntualiza los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 SITUACION MUNDIAL

Son muchas las oportunidades que ofrecen la Tecnología de Comunicación e Información (TIC), para mejorar la calidad de la educación, facilitar el acceso universal a la información, reconoce la UNESCO. No obstante, la reducción de la brecha digital, a través del uso de las TIC como herramientas del desarrollo, implica un crecimiento de residuos electrónicos al final de la vida útil de los equipos, cuyas repercusiones para el medio ambiente se deben tomar en cuenta. Las cantidades de equipos electrónicos, como: computadoras, monitores, impresoras y celulares, están creciendo de manera exponencial desde las últimas décadas. Desde el lanzamiento de la primera computadora personal en 1981 hasta el año 2008 se han producido un billón de computadoras. Por lo tanto, es de suponer que este número se duplique para el 2013 [2]

Aún no se dispone de una estrategia de administración sustentable de residuos electrónicos, el aumento de producción de TIC genera consecuencias graves para el medio ambiente. Al final del ciclo de su vida útil muchas computadoras y celulares terminan en la basura intoxicando los terrenos alrededor de los basureros donde son depositados. Sustancias químicas y metales pesados como: **berilio, cromo, cadmio, arsénico, selenio, antimonio, mercurio y plomo** contenidos en aparatos electrónicos son altamente peligrosos y necesitan un depósito especial para no contaminar e intoxicar el medio ambiente. Por lo tanto, la recolección y el tratamiento de los equipamientos electrónicos en desuso son indispensables. Los equipos electrónicos contienen hasta 17 metales preciosos incluyendo **oro, plata y cobre**, los cuales siguen teniendo un valor económico significativo cuando los aparatos caen en desuso. Si bien, el reciclaje de los residuos electrónicos es considerado como un ámbito

de negocio lucrativo, en muchos países faltan tanto reglamentaciones específicas como iniciativas empresariales [3].

El reacondicionamiento y el reciclaje de residuos electrónicos son dejados al sector informal, lo que expone a miles de recicladores a graves riesgos de salud por falta de conocimiento de los peligros causados por la incineración abierta de desechos, entre otros tratamientos [1].

La UNESCO considera los residuos electrónicos como un desafío de las sociedades y estimula iniciativas para lograr su administración adecuada, la cual representa tanto una obligación como una oportunidad. Un estudio publicado por el **Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente** (PNUMA) (Recycling – from Ewaste to Resources2), señala el valor monetario que se pierde por falta de un reciclaje efectivo de residuos electrónicos. Según el informe de PNUMA, 15% de la producción mundial de cobalto, 13% de la producción de paladio así como 3% de la extracción de oro y plata son procesados cada año en computadoras y celulares. En el año 2008 los componentes de oro, plata, cobre, paladio y cobalto procesados en las computadoras vendidas tenían un valor de 3,7 billones de dólares [2, 3].

En la tabla 1.1 se muestran los lugares donde terminan los residuos electrónicos al final de su vida útil, de acuerdo con, la Agencia de Protección Ambiental de los E.E.U.U (EPA) [4, 5].

Tabla 1.1 Lugares donde terminan los residuos electrónicos [6].

| |
|--|
| <p>Relleno Sanitario: De acuerdo con la EPA (Environmental Protection Agency, Estados Unidos); más de 4.6 millones de toneladas de desechos electrónicos van a parar a basureros en 2009. Las sustancias tóxicas de los productos electrónicos, puede filtrarse en la tierra a través del tiempo y liberarse a la atmósfera, afectando a las comunidades vecinas y al medio ambiente.</p> |
|--|

| |
|---|
| <p>Incineración: Este proceso libera metales pesados como plomo, cadmio y mercurio a la atmósfera. Estos, se pueden acumular en la cadena alimentaria,</p> |
|---|

especialmente en el pescado, el cual es fuente principal de exposición al público en general.

Reutilización: Es una buena manera de aumentar la vida útil de un producto. Muchos de los productos viejos son exportados a los países en desarrollo.

Reciclar: Aunque, el reciclaje puede ser una buena forma de reutilizar las materias primas de un producto, las sustancias peligrosas en los residuos electrónicos, significa poner en riesgo a los trabajadores de los astilleros de reciclaje, así como a sus comunidades vecinas y al medio ambiente.

Exportación: El desperdicio electrónico es habitualmente exportado por los países desarrollados, a menudo en violación de la ley internacional. Las inspecciones de 18 puertos marítimos europeos en 2005 encontraron que hasta un 47% de los residuos a la exportación, incluidos los desechos electrónicos, era ilegal. Por lo menos 23,000 toneladas métricas de basura electrónica no declarada o del mercado “negro” fue enviada ilegalmente en 2003 para el lejano Oriente, India, África y China. En los E.U, se estima que 50-80% de los residuos recolectados para su reciclaje se exporta de esta manera. Esta práctica es legal, porque los E.U. no ha ratificado el convenio de Basilea (éste convenio se explicará en la sección 1.5.1).

De acuerdo con un estudio realizado por Hewlett-Packard (HP), el fondo Global de Solidaridad Digital (FDS), y la Oficina Federal Suiza Laboratorios de pruebas e Investigación de Materiales (EMPA). La mayoría de los países de África carecen de la infraestructura para reciclar estos residuos, es más ni siquiera reconocen que es una fuente de desechos peligrosos. Sin embargo, se han hecho diversos proyectos piloto para demostrar que el reciclado puede ser fuente de oportunidades y generar fuentes de empleo para las comunidades locales. Por ejemplo, un proyecto piloto iniciado por HP en Ciudad del Cabo, puede dar trabajo a 19 personas, procesar 60 toneladas, ingreso de 14,000 dls, durante 10 meses del 2008 [7]. A continuación, se muestra en la tabla 1.2 la generación, reciclaje y final de su vida útil de residuos electrónicos de 1999 al 2008 y la predicción del 2009 al 2015 en el mundo.

Tabla 1.2 Generación, reciclaje y final de vida útil de residuos electrónicos en el mundo [3,7].

| Año | Total de los productos | | Total Reciclada | | | Total eliminados | | |
|------|------------------------|-----------|---------------------|-----------|---------|---------------------|-----------|---------|
| | Unidades (Millones) | Ton (000) | Unidades (Millones) | Ton (000) | Ton (%) | Unidades (Millones) | Ton (000) | Ton (%) |
| 1999 | 159 | 1056 | 23,6 | 157 | 14,9 | 135,4 | 899,2 | 85 |
| 2000 | 161,6 | 1282 | 24 | 190 | 14,8 | 137,7 | 1092 | 85 |
| 2001 | 193,6 | 1447.6 | 28,1 | 210 | 14,5 | 165,5 | 1237.6 | 85 |
| 2001 | 225,2 | 1634 | 34,6 | 250 | 15,3 | 190,7 | 1384 | 85 |
| 2003 | 273,8 | 1944.7 | 40,8 | 290 | 14,9 | 232,9 | 1654.7 | 85 |
| 2004 | 310,7 | 2043.5 | 48,6 | 320 | 15,7 | 262 | 1723.5 | 84 |
| 2005 | 342,1 | 2172.6 | 54,3 | 345 | 15,9 | 287,8 | 1827.6 | 84 |
| 2006 | 342,9 | 2107.8 | 61,3 | 377 | 17,9 | 281,5 | 1730.8 | 82 |
| 2007 | 372,7 | 2251.7 | 68,5 | 414 | 18,4 | 304,2 | 1837.7 | 82 |
| 2008 | 412,6 | 2527.1 | 72,4 | 441,2 | 18 | 340,1 | 2088 | 83 |
| 2009 | 441,5 | 2674.7 | 78,2 | 471,9 | 18,4 | 363,2 | 2205.4 | 82 |
| 2010 | 470,5 | 2822.9 | 84 | 502,6 | 18,8 | 386,3 | 2322.8 | 82 |
| 2011 | 499,4 | 2970.5 | 89,8 | 533,3 | 19,2 | 409,4 | 2440.3 | 82 |
| 2012 | 528,4 | 3118.7 | 95,6 | 564 | 19,1 | 432,5 | 2557.7 | 82 |
| 2013 | 557,3 | 3266.3 | 101,5 | 595,3 | 19,9 | 455,6 | 2675.1 | 81 |
| 2014 | 586,3 | 3414.5 | 107,3 | 626 | 20,3 | 478,7 | 2792.5 | 81 |
| 2015 | 615,2 | 3562.1 | 113,1 | 656,7 | 20,7 | 501,8 | 2909.9 | 81 |

1.2 SITUACIÓN EN LATINOAMÉRICA

La generación de residuos electrónicos en Latinoamérica se muestra en la tabla 3. Las cifras están expresadas en millones de unidades, y consideran el total de equipos, como las computadoras personales, de escritorio (PC) y portátiles en uso en los respectivos países mostrados en diciembre de 2005 y 2008 [2].

Tabla 1.3 Cantidades de equipos en seis países de la región de Latinoamérica y el Caribe (LAC) [2].

| País | Cantidad PC 2005 Millones | Cantidad PC 2008 Millones | % de PC en Uso | PC/100 Habitantes |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|
| Argentina | 5.25 | 8.2 | 8.5 | 20-7 |
| Brasil | 27.59 | 39 | 40.4 | 19.9 |
| Chile | 3.75 | 5.3 | 5.5 | 31.4 |
| Colombia | 3.3 | 3.7 | 3.8 | 8.3 |
| México | 15.93 | 20.6 | 21.4 | 19.3 |
| Venezuela | 2.19 | 3.6 | 3.7 | 13.8 |
| Subtotal 6 Países | 58.01 | 80.4 | 83.3 | - |
| Subtotal Resto de LAC | 11.09 | 16.1 | 16.7 | - |

Los seis países seleccionados representan a fines del año 2008 un 83,3% del total de PC en la región. En tan sólo tres años, la cantidad en uso se incrementó en un 38,6%, que la cantidad de PC por 100 habitantes es, a esa fecha, de 18,35 equipos, prácticamente igual al promedio mundial. Los valores estimados de PC en uso son una cifra muy menor a las ventas acumuladas de estos equipos en la región hasta la fecha considerada. La diferencia entre ambas cantidades nos da el acumulado de equipos que han quedado en desuso por cualquier motivo a esa fecha [2].

Tabla 1.4 Equipos PC en desuso en la región LAC, acumulados en diciembre 2008 (estimación de enero 2009) [2].

| PC en desuso | Unidades | Toneladas |
|--------------|------------|-----------|
| Total | 84,500,000 | 794,000 |

Las ventas crecientes de estos equipos, la tasa de este crecimiento en la región y la antigüedad del parque en uso llevan a proyectar, que en los próximos cinco a seis años puede producirse un volumen de PC en desuso similar al acumulado histórico reflejado en el cuadro anterior. De hecho, la estimación es que anualmente quedan en desuso una cantidad de PC del orden del 8 al 10% del parque en servicio, es decir que durante el año 2009 y según este cálculo, se habrían sumado 8,7 millones más equipos PC al acumulado de residuos informáticos. Sólo en Argentina, según P & C y otras fuentes, se generaron durante el año 2009 entre 700 y 800 mil PC en desuso, 80% de ellos del formato PC de escritorio. Estimando que las ventas de nuevos equipos fueron en el mismo año de 2 a 2,4 millones de equipos, resulta que un 34% de las ventas van a reposición de equipos que quedaron fuera de uso. Se estima que esa proporción es similar en la región, probablemente mayor en Brasil, Chile y México, y menor en el resto de los países. Para estimar las cantidades de residuos electrónicos, al volumen de equipos PC en desuso, deben considerarse otros productos relacionados. Debe tenerse en cuenta que, aproximadamente un 60% o más de los PC tiene asociada una impresora de alguna de las tecnologías disponibles (láser, de chorro, de punto, etc.) así como otros periféricos (teclado, ratón, etc.), y que estos productos tienen un ciclo de vida mucho menor a los siete años (aproximados y en promedio) de un PC en la región. Ya sea por renovación o por rotura, y siendo productos de menor costo, tiene una tasa el doble de alta que el de un PC. Si bien su peso y volumen son generalmente menores, es claro que causan un problema de la misma o mayor magnitud que el de los PC [2].

En los últimos años fue muy marcado, el cambio de los viejos monitores de PC de escritorio hacia los modelos de pantallas planas. Si bien, es muy fuerte la tendencia hacia la adquisición de PC portátiles (ya representan un 40-50% de

las ventas anuales de PC en países como Brasil, Chile y México), debe tomarse en cuenta que una gran parte de estos equipos se adiciona al uso, por parte de quienes los adquieren, y no remplazan a las PC de escritorio. En el caso de las impresoras, es importante destacar asimismo que en este tipo de equipos, tan sólo la reparación no es nada económica y que la posibilidad de recuperación de equipos es muy baja. Según el estudio de P & C (2006), en diciembre de 2005 se estimaron en 20 millones de unidades de impresoras en desuso en la región, unas 30 mil toneladas aproximadas de residuos totales acumulados desde la introducción de este equipo en el mercado. Los elementos más contaminantes son los insumos: tinta, cartuchos así como los componentes electrónicos [2].

1.3 SITUACIÓN EN LA REPÚBLICA MEXICANA

Final de Vida de los desechos electrónicos en México

El “final de vida” de los desechos electrónicos en México presenta características análogas a otros desechos post consumo y puede clasificarse en tres tipos: reuso, reciclado o relleno sanitario. Actualmente, existen dos “grupos de interés”, los cuales pueden estar entrelazados, que tienen fuerte injerencia en el destino final de los desechos electrónicos: 1) Los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos, 2) y los recolectores (“acopiadores”) y comercializadores de “chatarra” [9].

Primeramente, los sistemas de recolección de residuos sólidos urbanos intervienen en la disposición final como “final de vida” de los desechos electrónicos. Se trata de un grupo bien establecido en las distintas ciudades y municipios del país; sin embargo, es difícil tratar de establecer sistemas alternativos que permitan la recolección completa, de manera que los componentes electrónicos lleguen a los centros de transferencia y sean canalizados hacia acopiadores o recicladores de desechos electrónicos para lograr su valorización integral. Investigaciones realizadas en los rellenos sanitarios del Distrito Federal, de Tlalnepantla, de Naucalpan y de Tijuana muestran que son, prácticamente inexistentes los desechos electrónicos que

llegan a ellos; no obstante, por comunicaciones personales, se sabe que es posible solicitar a los “operadores” de los rellenos sanitarios cantidades de “basura electrónica” para comprarla, así como de muchos otros desechos [9].

El segundo grupo de interés, está constituido por los acopiadores; también se trata de un grupo bien establecido en México, al igual que en otros países, como India. Este grupo tiene influencia en el reciclado como alternativa de disposición final de los desechos electrónicos. Funciona con base en el mercado de compra-venta, por lo que podría tener una fuerte influencia, bien positiva o negativa, sobre el posible establecimiento de algún sistema de manejo público o privado de los desechos electrónicos. Este grupo no facilitó información sobre las cantidades disponibles de dichos desechos, aunque se sabe que opera con desechos electrónicos y tiene interés sobre el desarrollo de un sistema de manejo. Los acopiadores poseen los canales de “recepción y concentración” de distintos desechos y conocen su manejo y comercialización. El mercado de compra de los acopiadores está constituido principalmente por empresas y organizaciones grandes que periódicamente desechan equipos de cómputo y otros electrónicos obsoletos [9].

La tercera alternativa de destino final de los desechos electrónicos es el reuso; a la fecha, es la que menos se practica y la que menor potencial de desarrollo presenta. Una de las opciones consiste en transferir equipos obsoletos desde empresas hacia escuelas o comunidades de bajos recursos, de esta manera se logra obtener un “uso extendido”. Otra forma se materializa a través de pequeños esfuerzos de personas que adquieren lotes completos de computadoras obsoletas para aprovechar las partes útiles de éstas en la reconstrucción de computadoras “nuevas” [9].

Cabe apuntar que existe en nuestro país una empresa “recicladora”, aunque en realidad es desmanteladora de dispositivos electrónicos. Ésta se ubica en la ciudad de Guadalajara, cerca del cinturón de mayor producción de equipos electrónicos en México. También se cuenta con la presencia de la mayor empresa recicladora de metales del mundo. Finalmente, en noviembre del año

2006, se anunció por un fuerte grupo económico la creación de una empresa especializada en el reciclado de desechos electrónicos.

En suma, se desconoce a ciencia cierta la cantidad de desechos electrónicos que llegan al “final de vida” en sus distintas formas; sin embargo, por los volúmenes estimados de generación potencial de estos desechos, se considera que aún el mercado no ha sido captado más que en una fracción muy reducida, dado que sería notoria la entrada a las empresas de valorización de miles de toneladas de desechos electrónicos; además, en los registros de la SEMARNAT no hay empresas registradas para tales fines [9].

1.3.1 IMPORTACIÓN Y EXPORTACIÓN FORMAL DE PRODUCTOS ELECTRÓNICOS.

Con base en la integración de los datos de producción, importación y exportación de los aparatos electrónicos se puede estimar la cantidad de desechos electrónicos potenciales en México. Debido a que no se cuenta con todos los datos estadísticos sobre los cinco aparatos seleccionados (televisores, computadoras personales –de escritorio y portátiles–, aparatos grabadores/reproductores de sonido, teléfonos fijos y teléfonos celulares), se construyeron las tablas con los datos disponibles; en ellas se presentan las cantidades de aparatos electrónicos, habiéndose hecho un desglose por peso, dependiendo del tipo de aparato y considerando lo siguiente:

Tabla 1.5 Desechos potenciales estimados a partir de teléfonos celulares, 2003 [9].

| Categoría Gramos | Producción (Unidades) | Peso (Unitario) gramos | Peso (Total) Gramos | Peso Toneladas |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 65-75 | 14,202 | 72.16 | 1,024,820 | 1 |
| 76-85 | 85,211 | 82.1944 | 7,003,342 | 7 |
| 86-95 | 47,339 | 89.8 | 4,251,124 | 4 |
| Más de 96 | 47,339 | 104.65 | 4,954,122 | 5 |
| TOTAL | 194,094 | | | 17 |

En conclusión, se puede afirmar que la cantidad potencial de generación de desechos electrónicos en el año 2006 se ubica entre las 150,000 y 250,000 toneladas; ello con base en datos de producción, importación y uso, de acuerdo a la vida útil supuesta para desecharse en 2006. La generación de desechos electrónicos no crece linealmente. Una tendencia de ello se presenta en la figura 1.1 [9].

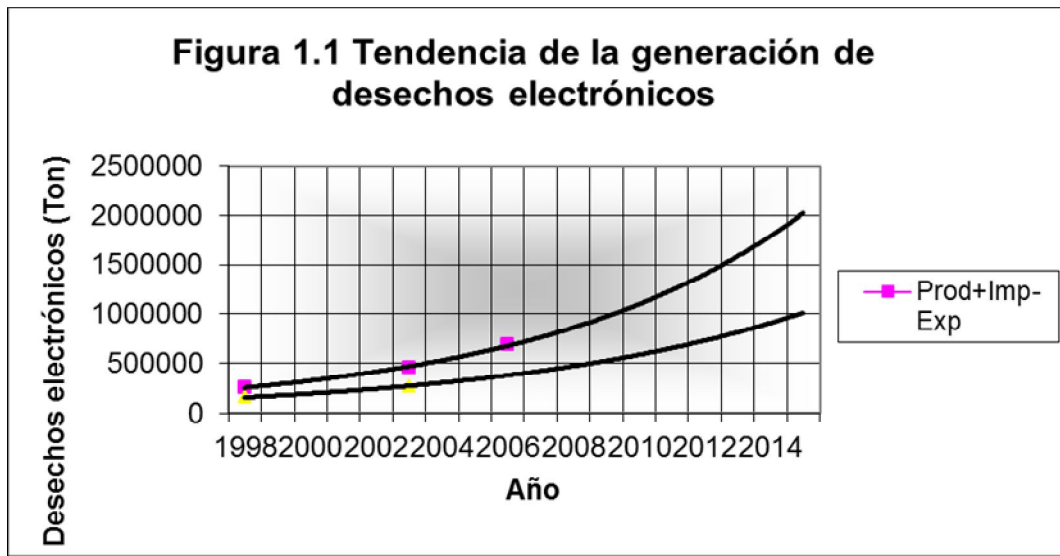


Figura 1.1 Tendencia de la generación de desechos electrónicos en México [9].

1.4 RECOLECCIÓN EN CIUDAD DE MEXICO

El manejo de los residuos sólidos en la Ciudad de México incluye: la recolección, transportación a las estaciones de transferencia, posteriormente a las plantas de selección y por último al sitio de disposición final. Se generan diariamente alrededor de 12,000 toneladas de residuos sólidos. Las Delegaciones tienen a su cargo la recolección de los residuos y su transporte fundamentalmente a las estaciones de transferencia y en menor medida a las plantas de selección o directamente a los sitios de disposición final [9].

1.4.1 TRANSFERENCIA

La Ciudad de México cuenta con trece estaciones de transferencia, que son instalaciones intermedias entre las diversas fuentes generadoras de residuos

sólidos y las plantas de selección o el sitio de disposición final; su objetivo principal es incrementar la eficiencia del servicio de recolección, en la medida que los vehículos recolectores reducen los tiempos para la descarga de sus residuos. El Gobierno del Distrito Federal adoptó la tecnología de estaciones de transferencia cerradas, con la finalidad de controlar los efectos ambientales adversos, tales como ruido, polvo, fauna nociva, microorganismos y malos olores; así como reducir el impacto y deterioro del entorno urbano a la estación de transferencia [10].

1.4.2 SELECCIÓN

El Distrito Federal cuenta actualmente con tres plantas de selección de residuos urbanos mezclados, con capacidad instalada conjunta de 6,500 toneladas por día. Estas tres plantas se ubican en Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina. La organización y operación de las plantas se realiza de manera coordinada entre el Gobierno del Distrito Federal (la Dirección General de Servicios Urbanos, de la Secretaría de Obras y Servicios) y los gremios de selectores (antes pepenadores); en estas instalaciones se recuperan más de 20 materiales reciclables que son comercializados en la Ciudad de México y sus alrededores por los gremios de selectores; el material no recuperado o rechazado, se transporta al Sitio de Disposición Final Bordo Poniente(dejó de funcionar en dic 2011) [10].

Los principales materiales recuperados son: Aluminio traste, macizo, chatarra, perfil, bote aluminio, bote ferroso, fierro, lámina metálica, cobre, alambre, botellas de refresco y cerveza, vidrio ámbar, transparente y verde, cartón, todo tipo de papel, periódico, PVC, PET, plástico rígido o nylon y vinil, entre otros.

En el capítulo II se detallará el funcionamiento y separación de residuos, del relleno sanitario Bordo Poniente con la visita de campo realizada (por la sustentante de esta tesis) a estas instalaciones en el 2011.

1.4.3 DISPOSICION FINAL

En la construcción de los sitios de disposición final, previo al inicio del depósito de materiales, se coloca una geomembrana de polietileno de alta densidad,

que funge como impermeabilizante para evitar la filtración de lixiviados a los mantos freáticos e incluso al acuífero. Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes, producidos por la circulación de agua -generalmente la de lluvia- en la basura y también al disolverse algunos elementos contenidos en ésta. En los sitios de disposición final, los residuos sólidos son confinados en forma segura y controlada, en espacios que al saturarse son reforestados y se convierten en áreas verdes destinadas a la recreación [10].

1.4.4 RECICLAJE INFORMAL

El negocio de la basura electrónica es una mina de oro para algunos recicladores informales en la Ciudad de México. En el país se produce poco más de 200,000 toneladas de basura electrónica al año (en 2006 fueron 257,021), de acuerdo con Rosalynn Herrera, coordinadora del programa "Manejo responsable de pilas y celulares usados en el DF", de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. Los principales artículos electrónicos que los mexicanos consumen son televisores, computadoras personales, aparatos reproductores de audio, teléfonos fijos y celulares, de acuerdo con el "Diagnóstico sobre la generación de basura electrónica en México", dado a conocer en 2007 por el Instituto Politécnico Nacional. Algunos aparatos pueden reconstruirse para su venta o algunas de sus partes pueden ser reutilizadas como refacciones. Los comerciantes ambulantes de las colonias Renovación y El Salado, al oriente de la capital mexicana, aprovechan esa oportunidad y una vez por semana venden en la calle desperdicio electrónico que aún funciona. Es tan buen negocio que a los vendedores de El Salado les han robado cargamentos de basura [11].

1.4.5 RECICLAJE FORMAL

En el Distrito Federal, las delegaciones cuentan con programas anuales con los que camiones recolectores se llevan desde muebles viejos y colchones hasta computadoras y televisores. Muchos de esos aparatos terminan en locales del Centro Histórico de la capital mexicana, donde los comerciantes los reconstruyen o reparan para su venta. En el área se estima que hay casi 1,000 locales donde se venden equipos de cómputo o refacciones. En 2008 se

emprendió en la ciudad el programa "Si no lo usas, dónalo. Si no sirve, recíclalo", en el que están involucrados el Gobierno del Distrito Federal, la empresa IMU, que ha colocado 283 contenedores urbanos para la recolección de pilas y celulares usados, y la firma Recall International, que cubre los costos de la campaña, almacena y clasifica los productos. Según el Instituto Nacional de Ecología, de 1960 a 2003 se depositaron en la basura común 635,000 toneladas de pilas, que generaron 190 toneladas de sustancias tóxicas. Y se estima que hay registrados casi 87 millones de celulares en el país y, de éstos, 31% está en la zona metropolitana del Valle de México. Aunque hoy las pilas comunes no contienen sustancias peligrosas, sí sirven para ser recicladas. Recall ha enviado hasta ahora 187 toneladas de pilas a la planta del Sistema de Tratamiento Ambiental, en Irapuato, Guanajuato, para recuperar litio, cadmio, níquel y zinc. En el caso de los celulares, selecciona como "viables" los que aún funcionan (cerca de 10%) y como "no viables" los demás (cerca del 90%). Se mandan al estado de Florida en los E.E.U.U. Los celulares "viables" para su venta en países con atraso tecnológico. Los "no viables" se embarcan a Bélgica para su destrucción, de donde se recuperan hasta 17 metales. México no cuenta con plantas recicladoras de celulares porque adoptó en 1989 el Convenio de Basilea, en el que se prohíbe tenerlas en países del tercer mundo para asegurar, dicen ellos, que los desarrollados les exporten demasiada basura [11].

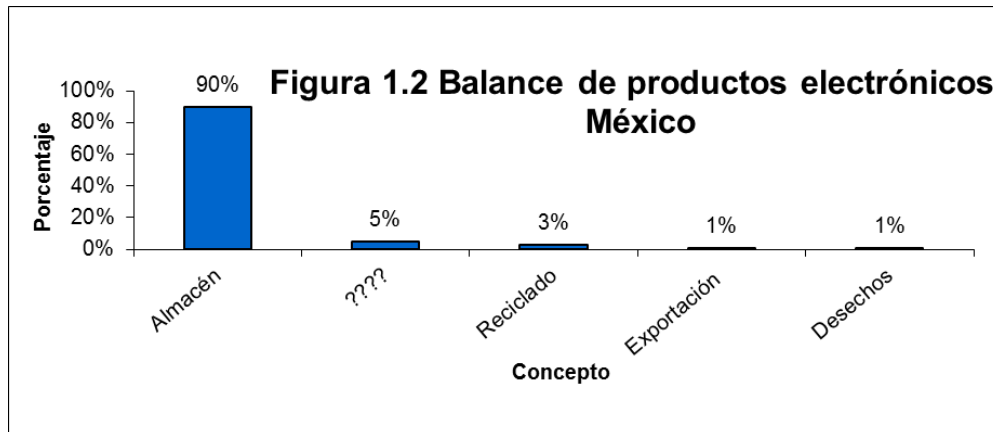


Figura 1.2 Esquema del balance de materiales de productos electrónicos en México, porcentajes estimados [9].

1.5 REGULACIONES AMBIENTALES

La formación de tratados internacionales, comenzó con mayor fuerza en el transcurso de la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, no fue sino hasta el año de 1987 el Sr. Barber B. Conable [13], exhortó de forma general a todas las naciones a hacer un esfuerzo real para cooperar en la conservación del entorno natural mundial. Los desechos electrónicos han sido motivo, en años recientes, de interés de Acuerdos Ambientales Multilaterales (Basilea y Estocolmo), así como de Directivas y acuerdos legales Regionales (Europa y Norteamérica). A la fecha de su adopción, 1989, el Convenio de Basilea es el que más desarrollo y logros ha tenido en lo que ha desechos electrónicos se refiere [13].

1.5.1 CONVENIO DE BASILEA

El Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, desde el 5 de mayo de 1992, tiene entre sus principales objetivos: a) reducir al mínimo la generación de desechos; b) establecer instalaciones adecuadas para la eliminación y manejo ambientalmente racionales de los desechos; c) adoptar las medidas necesarias para impedir que el manejo de desechos provoque contaminación; d) minimizar el movimiento transfronterizo. Como resultado de la ratificación del Convenio de Basilea por parte de México, existe la obligación de nuestro país de atender tanto sus disposiciones como las derivadas de su Protocolo, cuyo objetivo consiste en establecer un régimen global de responsabilidad e indemnización pronta y adecuada por daños producto de un incidente ocurrido durante un movimiento transfronterizo de desechos peligrosos, otros desechos y su eliminación, incluido el tráfico ilícito. La incineración de chatarra eléctrica y electrónica, así como la de cables produce dioxinas, por lo que requiere de controles ambientales. El Plan Estratégico para la aplicación del Convenio de Basilea hasta 2010, define las corrientes de desechos prioritarias, entre las que se incluyen los desechos electrónicos, BPCs y dioxinas/furanos, entre otros [13]. Respecto de los desechos electrónicos, se han gastado 196,000 dólares

de los fondos del Convenio de Basilea. Todos los proyectos sobre desechos electrónicos se han realizado en Asia. A través de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible se logró definir el papel del Convenio de Basilea en la formación de alianzas para su implementación efectiva [13].

1.5.2 CONVENIO DE ESTOCOLMO

El Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes fue adoptado por 150 países, incluido México el 22 y el 23 de mayo de 2001. El Convenio tiene por objeto limitar la contaminación ocasionada por COPs. Entre sus disposiciones precisa las sustancias reguladas y deja abierta la posibilidad de añadir nuevas; también establece las reglas de producción, importación y exportación de estas sustancias. Los COPs son productos químicos con ciertas propiedades tóxicas, resistentes a la degradación y acumulativas en el tejido humano, lo que los hace nocivos para la salud humana y el ambiente. Se trata de sustancias que pueden ser transportadas por aire, agua y especies migratorias, provocando su acumulación en los ecosistemas terrestres y acuáticos. Así pues, debido a que el problema es transfronterizo, resulta indispensable tomar medidas a escala internacional. El Convenio de Estocolmo inicialmente determina prohibir la producción y uso de 12 COPs (aldrina, clordano, diclorodifeniltricloroetano (DDT), dieldrina, eldrina, heptacloro, mírex, bifenilos policlorados (BPCs), toxafeno y hexaclorobenceno, dioxinas y furanos). El Convenio, en vigor a partir del 17 de mayo de 2004, se refiere a la reducción y eliminación de las liberaciones intencionales y no intencionales de los COPs señalados [13]. Cabe apuntar que el gobierno de México restringió, desde 1992, el uso de los BPCs, uno de los compuestos objeto del Convenio de Estocolmo, cuya gestión inició en 1988 con la publicación de Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y su Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos y, más adelante, con la elaboración de la NOM-133-SEMARNAT-2000, Protección ambiental, especificaciones de manejo de bifenilos policlorados (BPCs). Si se refiere a los desechos electrónicos, tenemos que algunos de ellos contienen BPCs; además, su incineración libera al ambiente metales pesados como plomo,

cadmio y mercurio, así como dioxinas y furanos, contaminando el aire, los suelos y, en ocasiones, llegando a los acuíferos [13].

1.5.3 CONVENIO DE RÓTTERDAM

En la actualidad, el Convenio regula más de 30 productos químicos a los que se aplica el *PIC*, entre los que se incluyen: PBBs (hexa-, octa- y deca-) y BPCs. En consecuencia, el Convenio es aplicable a los desechos electrónicos, en tanto se hallan entre sus componentes algunas de las sustancias peligrosas reguladas [13].

1.5.4 COMISIÓN PARA LA COOPERACIÓN AMBIENTAL DE AMÉRICA DEL NORTE.

El Acuerdo de Cooperación Ambiental, negociado paralelamente al Tratado del Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), en 1994, por Canadá, los Estados Unidos y México, estipuló la creación de una Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), cuyo Consejo emitió la Resolución 95-05 sobre “Manejo Adecuado de Sustancias Químicas” (CCA, 2002), misma que incluyó el diseño y aprobación de “Planes de Acción Regionales” (PAR), los cuales están orientados a la reducción de los riesgos y, en la medida de lo posible, eliminación del uso de las sustancias seleccionadas, entre ellas, persistentes y acumulables: mercurio, BPCs, dioxinas y furanos [9,13].

Áreas de oportunidad

1. Elaborar reglamentaciones específicas.
2. Implementar Iniciativas empresariales.
3. Implementar procesos que incluyan el aprovechamiento de los equipos usados, la recolección, separación y venta de las partes y materiales.

En estos programas y proyectos deben participar Estados, organizaciones de la sociedad civil, universidades así como empresas privadas. Resulta también crecientemente necesario realizar análisis comparados de prácticas, medidas, estrategias y proyectos e implementar la cooperación internacional o regional [2].

Propuestas

Objetivos principales de reciclaje de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

- ✓ Tratar las fracciones peligrosas de manera ambientalmente segura.
- ✓ Maximizar la recuperación del material valioso.
- ✓ Crear modelos de negocio amigables al ambiente y sostenibles.
- ✓ Tener en cuenta el impacto social y el contexto local. Puesto que grandes cantidades de aparatos electrónicos son abandonados por defectos menores o sin defecto alguno, el potencial social de reacondicionamiento equipos en desuso es igualmente enorme.

La administración sustentable de los equipos electrónicos incluye varios pasos según su utilidad. En casos que permiten un reacondicionamiento, los pasos a seguir son: **recolección, clasificación, desmontaje, análisis, procesamiento mecánico, reacondicionamiento, remontaje y distribución** a los beneficiarios. Al final de su vida útil los procesos de reciclaje incluyen: **el desmontaje, la separación de componentes, el procesamiento de materias reciclables en plantas de reciclaje**, así como **el procesamiento final y depósito de sustancias peligrosas**. Las asociaciones público-privadas son indispensables para garantizar soluciones sustentables y eficaces para la gestión de los residuos electrónicos [2].

1.6 DESECHOS

En los dispositivos electrónicos y, por tanto, en los desechos generados al concluir su vida útil, existen dos grupos de sustancias consideradas tóxicas al ambiente y a la salud humana. Primeramente, **los compuestos orgánicos policromados** –conocidos también como Retardadores de Flama Bromados (BFR), entre los utilizados con mayor frecuencia se hallan: PBBs, PBDEs y el TBBPA. En segundo término, los **metales pesados**: Cadmio, Cromo hexavalente, mercurio y plomo, los cuales son también motivo de la Directiva

de la Unión Europea que propone su eliminación total de los aparatos electrónicos [14].

Los retardadores de flama bromados se usan como aditivos de los plásticos de los compuestos siguientes: Tabla de circuitería de TV, Chasis de Plástico de TV , TRC en TV, Chasis de Monitor en PC, Tarjeta de circuitos en Monitor, Plásticos y tarjetas de circuitos de Teclado y ratón de una PC, Gabinete plástico en PC, Tarjeta madre en PC, Pasta de adhesión en el microprocesador de PC, Memoria en PC, Plásticos de equipo de videojuego, Microprocesador de videojuego, Tarjetas de circuitos de VCR, Microcontroladores de VCR y Chasis de VCR. Adicionalmente, se encuentran metales pesados en las partes siguientes de los dispositivos electrónicos: Plomo en tubos de rayo catódico y soldadura, Arsénico en tubos de rayo catódico más antiguos, Trióxido de antimonio como retardante de fuego, selenio en los tableros de circuitos como rectificador de suministro de energía, cadmio en tableros de circuitos y semiconductores, cromo en el acero como anticorrosivo, Cobalto en el acero para estructura y magnetividad y mercurio en interruptores y cubiertas [14].

1.6.1 TOXICIDAD DE RETARDADORES DE FLAMA EN PRODUCTOS ELECTRÓNICOS.

Los elementos reportados en los desechos electrónicos como tóxicos son los compuestos polihalogenados y algunos metales pesados. En esta sección se presentan las principales características de toxicidad hacia humanos, muchas de ellas determinadas en animales a partir de estudios de laboratorio. Cuando una sustancia se libera, desde una planta industrial, o un recipiente, aquella entra al ambiente. Sin embargo, la liberación no siempre conduce a exposición, pues ésta implica inhalación, ingestión o contacto directo. Adicionalmente, hay que valorar otros factores que determinan si la exposición a alguna sustancia tóxica es perjudicial. Estos factores incluyen la dosis (la cantidad), la duración (por cuánto tiempo), y la forma de exposición (cómo se entra en contacto con las sustancias). Así mismo, debe considerarse la posible interacción con otras sustancias químicas a las que se esté expuesto, la edad, sexo, dieta, características personales, estilo de vida y condiciones de salud de las personas [14, 15].

Éteres bifenílicos polibromados

Los éteres bifenílicos polibromados (PBDEs, por sus siglas en inglés) son compuestos químicos manufacturados que retardan el fuego. Hay tres productos de PBDEs de uso comercial, los éteres del bifenilo pentabromado (pentaBDE), del bifenilo octabromado (octaBDE) y del bifenilo decabromado (decaBDE). Los productos comerciales de decaBDE y octaBDE son sólidos incoloros a blancuzcos; el decaBDE se usa principalmente en cubiertas plásticas de artículos electrónicos, como por ejemplo televisores; mientras que el octaBDE se emplea en plásticos para artículos de oficina. El pentaBDE es un líquido espeso que se usa en espumas para cojines de muebles (ATSDR, 2004) [12].

Los PBDEs entran al aire, al agua y al suelo durante su manufactura y uso en productos de consumo. Eventualmente regresan a la tierra o al agua cuando el polvo es arrastrado por la nieve o la lluvia. Los cuerpos de agua, tales como ríos o lagos, generalmente actúan como reservorios de pequeñas cantidades de decaBDEs, las cuáles se depositan en el fondo pudiendo permanecer ahí durante años. Algunos PBDEs con bajo contenido de bromo (por ejemplo, tetra- y pentaBDEs), pueden acumularse en bajas concentraciones en peces (aproximadamente desde 10 billonésimas de gramo hasta 1 millonésima de gramo de PBDE por gramo de pez [10×10^{-9} a 1×10^{-6} gramos de PBDE por gramo de pez]). Debido a que la degradación de los PBDEs es muy lenta, estas sustancias permanecen en el suelo por varios años; debido a que el agua de lluvia no las dispersa mucho bajo la superficie del suelo, es improbable que los PBDEs se filtren a los acuíferos subterráneos (ATSDR, 2004) [12].

La concentración de los PBDEs con bajo contenido de bromo en la sangre, leche materna y grasa corporal indica que la mayoría de la gente está expuesta a bajos niveles de estos PBDEs. Los PBDEs con alto contenido de bromo, por ejemplo decaBDE, generalmente no se encuentran en el ambiente. La manera por la cual los PBDEs entran y abandonan el cuerpo depende de la estructura química de los componentes individuales. Los PBDEs con alto contenido de bromo, especialmente decaBDE (el principal PBDE en uso hoy en día), se comportan de manera muy diferente en el cuerpo a los PBDEs con bajo

contenido de bromo. Si se respira aire que contiene PBDEs o ingiere alimentos, agua o tierra contaminados con PBDEs, los PBDEs con bajo contenido de bromo tienen una probabilidad mucho más alta de pasar a través de los pulmones y el estómago a la corriente sanguínea [12]. Sí se toca tierra que contiene PBDEs, como podría suceder en un sitio de disposición de desechos peligrosos, es muy improbable que PBDEs con bajo o alto contenido de bromo pasen a la corriente sanguínea a través de la piel. Una vez dentro del cuerpo, los componentes individuales de los PBDEs pueden degradarse a productos llamados metabolitos. En unos cuantos días, el decaBDE puede abandonar el cuerpo inalterado o en forma de metabolitos a través de las heces y, en cantidades muy pequeñas, por la orina (ATSDR, 2004). A la fecha, no se tiene certeza sobre los efectos de los PBDEs en la salud de los seres humanos. Prácticamente toda la información disponible proviene de estudios en animales, los cuales indican que las mezclas comerciales de decaBDE son, generalmente, mucho menos tóxicas que los productos que contienen PBDEs con bajo contenido de bromo (ATSDR, 2004). Aunque no se sabe si los PBDEs pueden producir cáncer en seres humanos, las ratas y ratones que ingirieron de por vida cantidades sumamente altas de decaBDE desarrollaron tumores del hígado. Las cantidades de PBDEs que afectan la salud de animales son mucho más altas que las que se encuentran comúnmente en el ambiente. La exposición prolongada a los PBDEs es potencialmente más perjudicial para la salud que la exposición breve a niveles bajos de PBDEs debido a la tendencia de estas sustancias a acumularse en el cuerpo con los años [12]. Basado en la evidencia de cáncer en animales, la *Environmental Protection Agency (EPA)*, de los Estados Unidos, ha clasificado al decaBDE como posiblemente carcinogénico en seres humanos. En lo que respecta a los PBDEs ni el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) ni la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer de los Estados Unidos les han clasificado en cuanto a carcinogenicidad [12].

La forma más probable de exposición para niños pequeños es a través de la leche materna que contiene PBDEs con bajo contenido de bromo; también hay que considerar que durante el embarazo estas sustancias se liberan y son capaces de cruzar la placenta y entrar a los tejidos del feto. El cuerpo absorbe

muy poco decaBDE, por tanto, es improbable que se encuentren cantidades significativas en la leche materna o en el feto. Los niños que viven cerca de sitios de disposición de desechos peligrosos pueden ingerir BDEs accidentalmente si se llevan las manos u otros objetos cubiertos con tierra a la boca o si comen sin lavarse las manos. Los trabajadores involucrados en la manufactura y producción de resinas que contienen PBDEs están expuestos a concentraciones más altas de PBDEs. La exposición ocupacional también puede ocurrir en lugares de trabajo cerrados donde se reciclan plásticos y espumas que contienen PBDEs; donde se reparan monitores de computadores que contienen PBDEs y durante la producción de mezclas comerciales de PBDEs y de productos de plástico que los contienen. Las personas que viven cerca de sitios de disposición de desechos peligrosos pueden estar expuestas a PBDEs al respirar aire que contiene polvo contaminado con PBDEs; sin embargo, estas sustancias, eventualmente, se depositan sobre la superficie, de manera que la ruta de exposición por inhalación es poco importante. [14, 15]

1.6.2 METALES PESADOS

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para el ser humano; el término siempre suele estar relacionado con la toxicidad que presentan. Hay una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un serio problema medioambiental y es común referirse a ellos con el término genérico de "metales pesados". Los metales pesados tóxicos más conocidos son el mercurio, el plomo, el cadmio y el talio [12]. A veces también se habla de contaminación por metales pesados incluyendo otros elementos tóxicos más ligeros, como el berilio o el aluminio. Los considerados generalmente como metales pesados tóxicos como el cadmio, el mercurio o el plomo, tienen cationes, como por ejemplo el Cd^{2+} , Hg^{2+} o Pb^{2+} y tienen tendencia a enlazarse a bases. Los metales pesados se distinguen de otros contaminantes por no ser biodegradables y por acumularse en los organismos, provocando trastornos y en ocasiones la muerte.

Plomo

Características

El plomo es un metal pesado con número atómico 82, punto de fusión de 327.4°C, temperatura de ebullición de 1725°C y es de color azulado. [14]. Las valencias químicas normales son 2 y 4. Es relativamente resistente al ataque de los ácidos sulfúrico y clorhídrico pero se disuelve con lentitud en ácido nítrico. El plomo es anfótero, ya que forma sales de plomo de los ácidos, así como sales metálicas del ácido plúmbico. El plomo forma muchas sales, óxidos y compuestos órgano metálicos. El plomo se obtiene de las minas de galena y de los sulfuros de plomo y se separa calentando el mineral a bajas temperaturas. También se encuentra plomo en varios minerales de uranio y de torio, ya que proviene directamente de la desintegración radiactiva (decaimiento radiactivo). Los minerales comerciales pueden contener sólo un 3% de plomo, pero lo más común es un contenido de poco más o menos el 10%. Los minerales se concentran hasta alcanzar un contenido de plomo de 40% o más antes de fundirse [14].

El plomo no se degrada, pero los compuestos del plomo son transformados por la luz solar, el aire y el agua. Cuando se libera al aire puede movilizarse a largas distancias antes de depositarse en el suelo; una vez que cae al suelo se adhiere a las partículas del suelo, desde donde se moviliza al agua subterránea (ASTSDR, 2005B) [12].

Efectos sobre la salud humana

El plomo es uno de los cuatro metales que tienen un mayor efecto dañino sobre la salud humana. Este puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida (65%), agua (20%) y aire (15%). Los efectos del plomo son los mismos si se ingiere o se inhala. La exposición a plomo tiene como origen, entre otros, las pilas y baterías, el cemento Pórtland, la masilla, polvo de algunas industrias, tuberías de plomo o las soldaduras de estas, equipamiento para las granjas, elementos de joyerías y cosméticos, etc. Las comidas como fruta, vegetales, carnes, mariscos, refrescos y vino pueden contener plomo, así como el humo

de los cigarrillos. Actualmente ya no se utilizan tuberías de plomo ya que la corrosión de éstas provoca que el plomo entre en el agua potable. El plomo no es necesario para el funcionamiento del cuerpo humano. Por lo contrario, puede causar, daños como: aumento de la presión arterial, anemia, disminución de la fertilidad, decremento del aprendizaje, problemas en el sistema nervioso como cambios en comportamiento, aumento de agresión, impulsividad y abortos [14]

A la fecha no existe evidencia definitiva de que el plomo produzca cáncer en seres humanos, aunque algunas ratas que recibieron dosis altas de un cierto tipo de compuestos de plomo desarrollaron tumores en los riñones. Es así como, la DHHS ha determinado que es razonable predecir que el plomo y sus compuestos son cancerígenos; mientras que para la EPA para ellos sólo es probable (ATSDR, 2005B) [9,12,14].

Efectos sobre el Medio Ambiente

La contaminación antropogénica de plomo es mucho más significativa que la natural. Antiguamente, la aplicación del plomo en gasolinas daba lugar a un ciclo no natural de este metal: los motores de los coches quemaban el plomo, generando sales de plomo (cloruros, bromuros, óxidos) que entran en el ambiente a través de los tubos de escape. Las partículas grandes precipitan en el suelo o en la superficie de aguas y las pequeñas viajan largas distancias a través del aire y permanecerán en la atmósfera. Parte de este plomo caerá de nuevo sobre la tierra cuando llueva. El plomo puede terminar en el agua y suelos a través de la corrosión de las tuberías en los sistemas de transportes y a través de la corrosión de pinturas que contienen plomo. El plomo se acumula en los cuerpos de los organismos acuáticos y organismos del suelo. La contaminación por plomo afecta por ejemplo al fitoplancton, que es una fuente importante de producción de oxígeno en mares y muchos animales marinos grandes lo comen. Con lo anterior se puede afirmar que el plomo es un elemento químico particularmente peligroso, ya que no sólo se puede acumular en organismos individuales sino que también puede entrar en las cadenas alimenticias [9,14].

Aplicaciones del Plomo

El uso más amplio del plomo, como tal, se encuentra en la fabricación de acumuladores. Otras aplicaciones importantes son la fabricación de tetraetilplomo, forros para cables, elementos de construcción, pigmentos, soldadura suave y municiones [14]. Debido a su excelente resistencia a la corrosión, el plomo encuentra un amplio uso en la construcción, en particular en la industria química. Es resistente al ataque por parte de muchos ácidos, porque forma su propio revestimiento protector de óxido. Como consecuencia de esta característica ventajosa, el plomo se utiliza mucho en la fabricación y el manejo del ácido sulfúrico. Se utiliza también como forro para cables de teléfono y de televisión. La ductilidad única del plomo lo hace particularmente apropiado para ésta aplicación, porque puede estirarse para formar un forro continuo alrededor de los conductores internos. El uso del plomo en pigmentos ha sido muy importante, pero está decreciendo en volumen. El pigmento que se utiliza más, en que interviene este elemento, es el blanco de plomo $2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$; otros pigmentos importantes son el sulfato básico de plomo y los cromatos de plomo. Se utilizan una gran variedad de compuestos de plomo, como los silicatos, los carbonatos y sales de ácidos orgánicos, como estabilizadores contra el calor y la luz para los plásticos de cloruro de polivinilo [14]. Se usan silicatos de plomo para la fabricación de fritas de vidrio y de cerámica, que resultan útiles para introducir plomo en los acabados del vidrio y de la cerámica. El azuro de plomo, $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$, es el detonador estándar para los explosivos. Los arseniatos de plomo se emplean en grandes cantidades como insecticidas para la protección de los cultivos. El litargirio (óxido de plomo) se emplea mucho para mejorar las propiedades magnéticas de los imanes de cerámica de ferrita de bario. Asimismo, una mezcla calcinada de zirconato de plomo y de titanato de plomo, conocida como PZT, está ampliando su mercado como un material piezoeléctrico [14].

Obtención del Plomo

La obtención de este metal figura (1.3), se centra básicamente en cuatro fases [14]:

1. **Enriquecimiento.** La galena se tritura y muele. Después se separa la ganga de la mena mediante flotación.
2. **Oxidación de los solutos.** Hay que tostar (a 700 °C) todos los sulfuros de Pb para transformarlos en óxidos. Al añadir sílice y cal, se obtiene monóxido de plomo (PbO).
3. **Reducción del monóxido de plomo.** Se realiza en un horno de mufla. Se usa carbón de coque y cal. El plomo obtenido contiene muchas impurezas. Se llama plomo de obra.
4. **Afinación del plomo.** Hay dos fases:
 - ✓ Separación de otros metales (cobre, cinc, plata, etcétera).
 - ✓ Afinado electrolítico

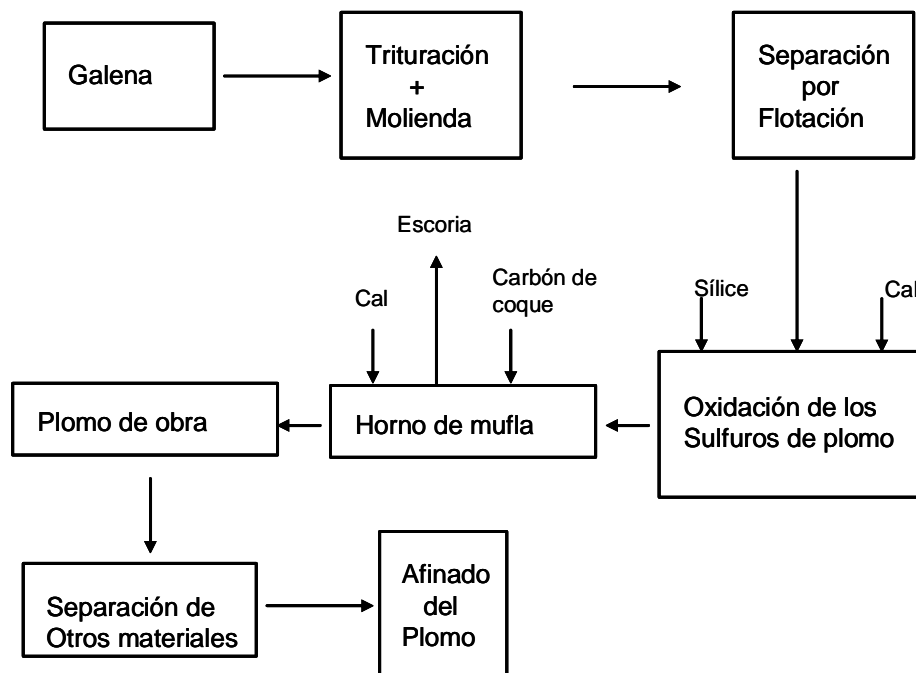


Figura 1.3 Proceso de obtención del plomo [16].

El Plomo en la soldadura blanda de los componentes electrónicos.

Los componentes electrónico se interconectan entre si uniendo sus terminales a las pistas de un sustrato común (por ejemplo una placa de circuito impreso) mediante una aleación denominada soldante, que es la encargada de realizar

la unión metalúrgica denominada soldadura blanda (en inglés *soldering*). Las soldaduras, de color gris que se puede ver al abrir cualquier equipo eléctrico son normalmente de esta aleación [17]. En la siguiente sección de este capítulo, se verá el diagrama de fases de esta soldadura, así como su microestructura. Lo cual, permitirá comprender el capítulo III Resultados y Discusión.

1.7 DEFINICIÓN DE SOLDADURA BLANDA (SOLDERING)

La soldadura blanda (*soldering*) es un proceso de unión que produce coalescencia de los metales base mediante el calentamiento hasta la temperatura de soldadura blanda y el empleo de un metal de aporte no ferroso, cuyo punto de fusión no rebasa 450 °C y esta por debajo del punto de fusión de los metales a ser soldados. Por lo general, se utiliza como metal de aporte, una delgada película de la aleación de plomo y estaño, cuyo objetivo primordial es el de asegurar una conexión permanente, firme, hermética y con continuidad metálica, que no sea afectada por los cambios de temperatura y que acepte deformaciones y esfuerzos menores de torsión sin romperse [13]

Ventajas de la soldadura blanda [17,18]

- ✓ Proceso sencillo de realizar
- ✓ Es un proceso de unión de metales a baja temperatura por lo que ejerce un efecto mínimo sobre las propiedades del metal base.
- ✓ Es posible adoptar una amplia gama de procesos de calentamiento, que da como resultado la flexibilidad a los procedimientos de diseño y fabricación.
- ✓ Los procesos de soldadura se pueden automatizar en alto grado si ya se evaluaron con detenimiento todas las variables de materiales, procesamiento y control.
- ✓ El costo en metales de aporte y fundentes es relativamente bajo.
- ✓ Las soldaduras realizadas presentan una gran resistencia, buena conductividad eléctrica y térmica, gran fiabilidad, son impenetrables a gases y líquidos.

-
- ✓ Es posible un control muy preciso del soldante, se requiere una baja aportación de energía para fundir este soldante que se produce a temperatura relativamente baja de 183 °C, temperatura muy aceptable para la mayoría de los componentes electrónicos.

Desventajas [18].

- ✓ Las uniones realizadas con soldadura blanda no se utilizan cuando las piezas o conjuntos van a trabajar a temperatura que se acerquen al punto de fusión de la aleación de soldadura.
- ✓ Las aleaciones para soldadura blanda tienen una resistencia a la tensión relativamente baja.
- ✓ La soldadura exige ajustarse a tolerancias dimensionales y geométricas estrictas para asegurar uniones de calidad, por lo que el costo de producción de las piezas soldadas se incrementa.

La industria microelectrónica ha utilizado soldaduras Sn-Pb, para una variedad de interconexión, prácticamente desde sus inicios. No está claro por qué la soldadura Pb-Sn se convirtió en el material de soldadura predominante, aunque se especula que era un remanente de la industria eléctrica, en que las soldaduras Pb-Sn fueron utilizados para hilos de cobre de soldadura. La soldadura con estaño consiste en unir dos fragmentos de metal (habitualmente cobre, latón o hierro) por medio de un metal de aportación (habitualmente estaño) con el fin de procurar una continuidad eléctrica entre los metales que se van a unir. Esta unión debe ofrecer la menor resistencia posible al paso de la corriente eléctrica; para ello, la soldadura debe cumplir una serie de normas con el fin de conseguir una unión eléctrica óptima. Un factor fundamental es la calidad del estaño: éste debe tener una mezcla de 60-40, es decir, una aleación de 60% de estaño y 40% de plomo **[18]**.

En Europa, con la iniciativa de los RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos), ha estado insistiendo en el objetivo de hacer realidad una electrónica amigable al medio ambiente. Los ensambladores de productos electrónicos se encuentran dispersos en todo el mundo, con altas

concentraciones en Asia, América y Europa Oriental, incluyendo Europa. La distribución de los conocimientos científicos y tecnológicos pertinentes para esta industria global es imprescindible para la transición a circuitos electrónicos libres de plomo. El impulso para el montaje de soldadura libre de plomo ha llevado a muchas investigaciones para materiales y acabados de PCB, por sus siglas en inglés, (tableros de circuitos electrónicos). Estos se basan principalmente en la capacidad de discernir de los materiales para resistir temperaturas más altas del proceso de soldadura libre de plomo. Este nuevo escenario sin plomo trae diferentes materiales y acabados, así como los cambios específicos que se requiere en la fabricación de PCB [19,30].

1.7.1 DIAGRAMA DE FASES ESTAÑO-PLOMO

La mejor manera de ilustrar el comportamiento de las aleaciones de estaño-plomo es por su diagrama de fases como se muestra en la figura 1.4.

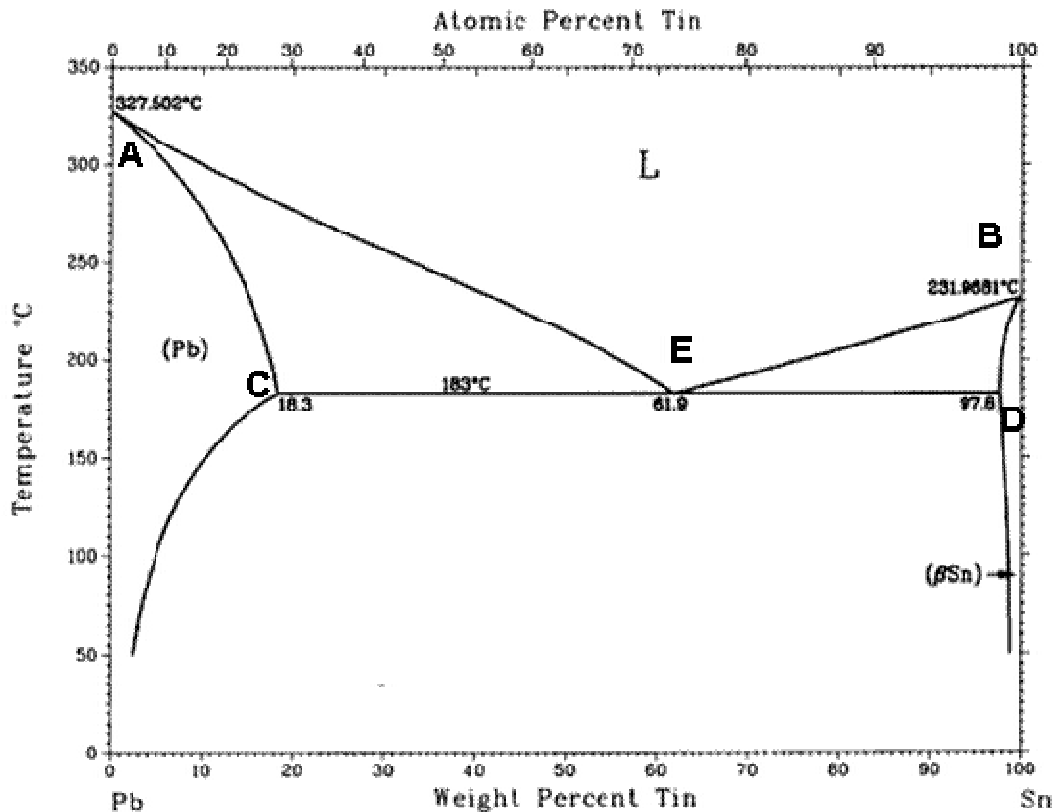


Figura 1.4. Diagrama de fases Sn-Pb [38].

Para comprender el diagrama se definen los siguientes términos [38]:

Línea de sólidos. (Curva ACEDB). Indica la más alta temperatura a la cual un metal o aleación está completamente en estado sólido.

Línea de líquidos. (Curva AEB). Es la temperatura más baja en la que un metal o aleación está completamente en estado líquido.

Aleación Eutéctica. (Punto E). Es una aleación que se comporta como un elemento puro, pues cambia de fase sólida a fase líquida de una sola vez. Esta aleación tiene aproximadamente 63% en peso de Estaño.

Intervalo de fusión. (Curva ACEDB y AEB). Es la temperatura entre el sólido y el líquido en la cual la aleación se encuentra parcialmente fundida.

Como se muestra en el diagrama, el plomo puro se funde a 327 °C (Punto A), el estaño puro a 232 °C (punto B). La aleación que contiene 19.5 % en peso de estaño (punto C) a 97.5% en peso de estaño (Punto D) tiene la misma temperatura de sólido que es de 183 °C. A este rango de composición se le denomina “composición eutéctica”; cualquier otra composición que no sea la eutéctica no empieza completamente a hacerse líquido más arriba de los 183 °C. Por ejemplo, la aleación 50-50% tiene una temperatura de sólido de 183 °C y una temperatura de líquido de 214 °C , por lo que el intervalo de fusión es de 31 °C que es la diferencia entre el líquido y el sólido [20,21].

En el diagrama de fases, se observan los cambios que se producen en la microestructura en las diferentes fases conforme se varía la temperatura. La microestructura final determina las propiedades mecánicas de la aleación. De acuerdo a la composición, es posible obtener varios tipos de microestructura con el enfriamiento lento de las aleaciones. Se analizarán tres casos diferentes.

Para el caso 1: en que las composiciones varían entre en un componente puro, el cual se muestra en la figura 1.5, en donde se representa esquemáticamente las microestructuras en equilibrio de la aleación Sn-Pb de composición C₁ enfriada a partir de la región líquida [27].

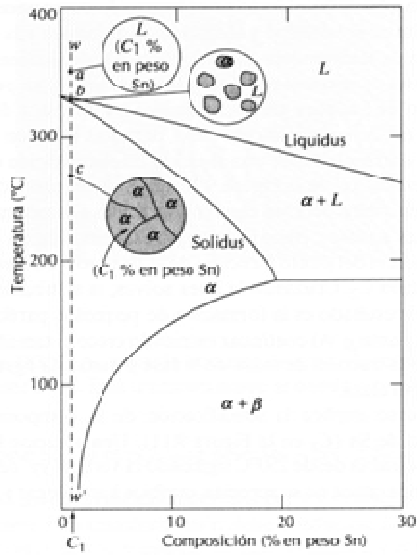


Figura 1.5. Microestructura en equilibrio de aleación Sn-Pb de concentración C_1 [27].

Para el caso 2: Se muestran las composiciones que varían entre el límite de solubilidad a temperatura ambiente y la solubilidad sólida máxima a la temperatura eutéctica. En la figura 1.6 se tiene una representación de las microestructuras en equilibrio de composición C_2 enfriada a partir de la región líquida [27].

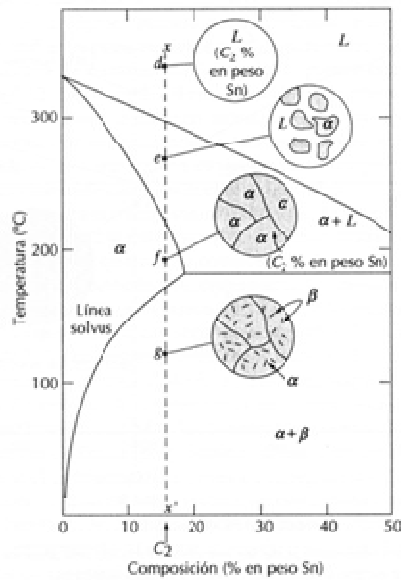


Figura 1.6 Microestructura en equilibrio de aleación Sn-Pb de concentración C_2 [27].

Para el caso 3: Es la solidificación de la composición eutéctica. La cual se muestra en la figura 1.7 donde se muestra un esquema de las microestructura en equilibrio de una aleación de composición C_3 por encima y debajo de la temperatura eutéctica [27].

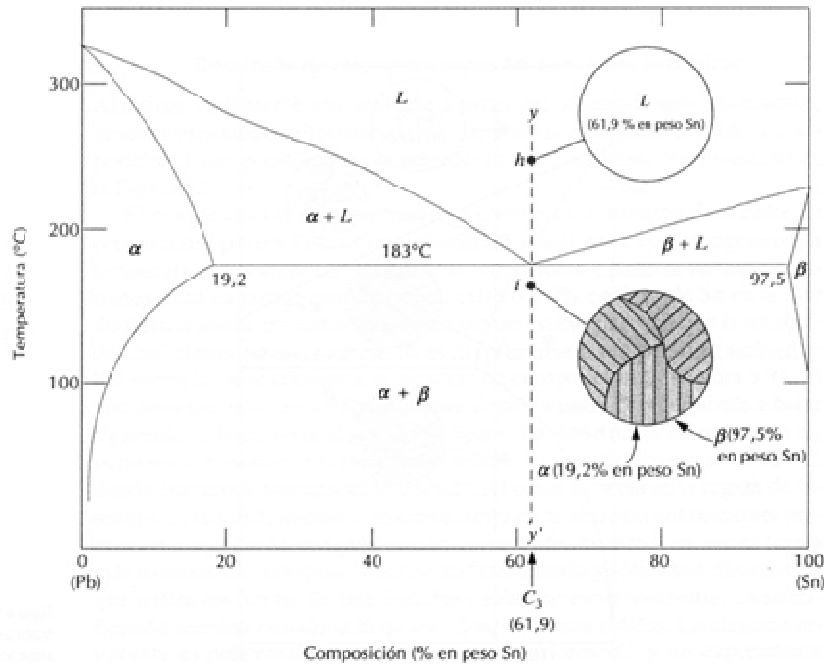
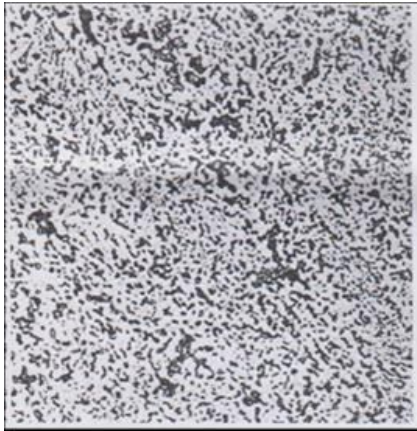


Figura 1.7 Microestructura en equilibrio de aleación Sn-Pb de concentración eutéctica C_3 [27].

La aleación usada en la soldadura blanda en el sector electrónico, es una aleación de 63/37 (63% de Sn y 37% Pb) [21], la cual tiene una estructura eutéctica como se muestra en la figura 1.7 y la microestructura de la figura 1.8 (estos datos se corroborarán en el capítulo III de Resultados). La razón por la cual se utiliza esta composición de la soldadura es debido a que: El estaño puro funde a 232 °C y el plomo puro funde a 327 °C. Sin embargo, una aleación de estos dos metales funde a una temperatura mucho menor (183 °C) y para el caso de una aleación 60/40 (60% de Sn y 40% Pb) a 190 °C [18].

La microestructura de estas composiciones se muestra a continuación. La figura 1.7 a) muestra una micrografía 63Sn/37Pb de soldadura blanda eutéctica, en una solución sólida rica en plomo, algunos de los cuales muestran

una estructura ligeramente dendrítica en una matriz de estaño, b) igual que el inciso a), excepto que el moldeo fue templado, resultando un enfriamiento mas lento [37].



a)

b)

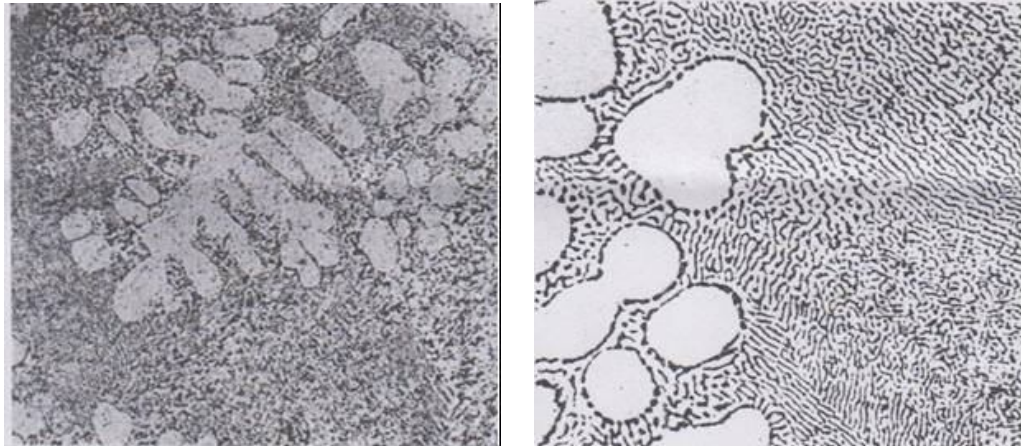
Figura 1.7 Micrografía de aleación de 63/37 (63% de Sn y 37% Pb) [37].

La figura 1.8 muestra una micrografía de soldadura blanda 60Sn-40Pb con estructura de pequeñas dendritas de solución sólida ricas en plomo (sección oscura), en una matriz globular eutéctica de estaño-plomo más fina que la mostrada en la figura 1.7 a) [37].



Figura 1.8 Micrografía aleación 60/40 (60% de Sn y 40% Pb) [37].

En la figura 1.9 a) muestra una micrografía 70Sn-30Pb de una soldadura blanda. Las dendritas ricas en estaño de una solución sólida (sección clara) de una matriz eutéctica de estaño-plomo, se observará la figura 1.9 b) para la estructura eutéctica, b) Igual que el inciso a), pero con mayor amplificación, lo cual muestra la estructura eutéctica de estaño-plomo. La parte oscura destaca la formación de dendritas por la separación eutéctica [37].



a)

b)

Figura 1.9 Micrografía aleación 70/30 (70% de Sn y 30% Pb) [37].

Todos estos datos serán necesarios para el capítulo III “Resultados y Discusión”.

1.8 MÉTODOS DE SEPARACIÓN

Se utilizan generalmente dos tecnologías de recuperación metales, los procesos **pirometalúrgicos** y los **hidrometalúrgicos**. En los primeros se utiliza calor para separar los metales deseados de otros materiales. En estos procesos se aprovechan las diferencias entre potenciales de oxidación, puntos de fusión, presiones de vapor, densidad y/o miscibilidad de los componentes del mineral cuando se funden. Las tecnologías hidrometalúrgicas se diferencian de los procesos pirometalúrgicos en que los metales deseados se separan de otros materiales utilizando técnicas que aprovechan las diferencias de solubilidad y/o entre las propiedades electroquímicas de los constituyentes mientras se encuentran en solución acuosa.

1.8.1 PIROMETALURGIA

Durante el procesado pirometalúrgico, un mineral, después de ser beneficiado (concentrado mediante machaqueo, trituración, flotación y secado), se sinteriza

o tuesta (calcina) con otros materiales, tales como polvo de la cámara de sacos filtrantes y fundente [37]. A continuación, el concentrado se funde en un horno de cuba para obtener un lingote fundido impuro que contiene los metales deseados. Este lingote se somete seguidamente a un tercer proceso pirometalúrgico para refinar el metal hasta conseguir el nivel de pureza deseado. Cada vez que se calienta el mineral o el lingote, se crean materiales residuales. El polvo procedente de la ventilación y los gases del proceso puede capturarse en una cámara de sacos y eliminarse o devolverse al proceso, dependiendo del contenido metálico residual. También se captura el azufre del gas, y cuando las concentraciones son superiores al 4 % puede convertirse en ácido sulfúrico. [21]. Este proceso se utilizará en el Capítulo III “Experimentación”, (para refinar la soldadura obtenida del proceso de extracción de la misma de los PBC’s).

Dependiendo del origen del mineral y de su contenido residual de los metales, pueden obtenerse también como subproductos diversos metales, como oro y plata. La tostación es un importante proceso pirometalúrgico. La tostación por sulfatado se utiliza en la producción de cobalto y zinc. Su fin es separar los metales de forma que puedan transformarse en una forma hidrosoluble para el ulterior procesado hidrometalúrgico. La fusión de los minerales sulfurosos produce un concentrado de metal parcialmente oxidado (mata). En la fusión, el material inservible, generalmente hierro, forma una escoria con el material fundente y se convierte en su óxido. Los metales útiles adquieren la forma metálica en la etapa de conversión, que tiene lugar en los hornos de conversión. Este método se utiliza en la producción de cobre y níquel. Se produce hierro, ferro cromo, plomo, magnesio y compuestos de hierro por reducción del mineral con carbón vegetal y un fundente (caliza); el proceso de fusión se realiza generalmente en un horno eléctrico. La electrólisis de sales fundidas, empleada en la producción de aluminio, constituye otro ejemplo de proceso pirometalúrgico [21].

La alta temperatura necesaria para el tratamiento pirometalúrgico de los metales se consigue quemando combustibles fósiles o utilizando la reacción exotérmica del propio mineral (como, por ejemplo, en el proceso de fundición a la llama). El proceso de fundición a la llama constituye un ejemplo de proceso

pirometalúrgico ahorrador de energía en el que el hierro y el azufre del concentrado de mineral se oxidan. La reacción exotérmica, acoplada a un sistema de recuperación de calor, ahorra una gran cantidad de energía para la fusión. La elevada recuperación de azufre del proceso es también beneficiosa para la protección del medio ambiente. La mayoría de las fundiciones de cobre y níquel construidas recientemente utilizan dicho proceso [21].

El proceso pirometalúrgico de reciclaje requiere alta inversión, gran cantidad de energía y tiene algunos retos ambientales debido a los gases generados de dioxinas y furanos. Se realizó una investigación reciente en la República China en el 2011 sobre la “Recuperación de Plomo y Cobre de residuos de tableros de circuitos electrónicos por condensación y evaporación” [22]. El proceso de separación consistió en: Trituración de los PBC (hasta un tamaño de partícula de 5 mm), separación electrostática de los metales, separación metálica al vacío del plomo y partículas ricas de cobre con soldadura. Se realizaron dos categorías de experimentos uno con soldadura única Pb-Sn (40-60) y el otro con partículas ricas de cobre y soldadura (95% en peso de Cobre).

1.8.2 HIDROMETALURGIA

Ejemplos de procesos hidrometalúrgicos son la lixiviación, la precipitación, la reducción electrolítica, el intercambio iónico, la separación por membranas y la extracción con disolventes. La primera etapa de los procesos hidrometalúrgicos es la lixiviación de los metales útiles a partir de materiales menos valiosos, por ejemplo, con ácido sulfúrico. La lixiviación a menudo va precedida de un tratamiento previo (p. ej., tostación por sulfatado). El proceso de lixiviación normalmente exige altas presiones, la adición de oxígeno o temperaturas elevadas. También puede realizarse con electricidad. A partir de la solución lixiviada, el metal deseado o su compuesto se recuperan por precipitación o reducción, según distintos métodos. En la producción de cobalto o níquel, por ejemplo, la reducción se realiza con gas. La electrólisis de metales en soluciones acuosas también se considera un proceso hidrometalúrgico. En el proceso de electrólisis, el ión metálico resulta reducido. El metal se encuentra en una solución ácida débil a partir de la cual precipita en los cátodos por

efecto de una corriente eléctrica. La mayoría de los metales no férricos también pueden refinarse por electrólisis. Comúnmente, los procesos metalúrgicos son una combinación de procesos piro e hidrometalúrgicos, según el concentrado del mineral a tratar y el tipo de metal a refinar [21,22].

Debido a que, la lixiviación es un método de separación amigable al medio ambiente. Se han realizado trabajos de investigación reciente en India y Corea en el 2010, relacionados a la “Recuperación de plomo de la soldadura de residuos electrónicos a través de lixiviación” [24].

CAPÍTULO II

EXPERIMENTACIÓN

En esta sección se presenta como antecedente la visita hecha a planta de recicladora en la Ciudad de México, se describe la metodología experimental para separar la soldadura base plomo de los circuitos electrónicos de monitores de computadoras y las técnicas experimentales empleadas para su caracterización.

2.1 VISITA DE CAMPO

Con la finalidad de observar lo que sucede con los desechos electrónicos en la Ciudad de México, se visitó la planta de separación que se encuentra en el relleno Sanitario Bordo Poniente, para ello se solicitó a la Dirección de Servicios Urbanos del Distrito Federal una visita guiada a sus instalaciones. La cual, se llevó a cabo el 23 Noviembre del 2011. El personal responsable mostraron tres plantas: lixiviados, composta y separación de residuos sólidos. Los datos recolectados y observados en la planta de separación se muestran en el capítulo III “Resultados y Discusión”.

2.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.2.1 SELECCIÓN

Al final de la vida útil de los monitores el reciclaje incluye: desmontaje, separación de componentes, procesamiento final y depósito de sustancias peligrosas. Para este estudio, se utilizaron monitores de computadora obsoletos fabricados antes del 1º de Julio del 2006. Debido a que, a partir de esta fecha se ha limitado el uso de soldadura base plomo, por la Directiva RoSH (Restriction of the use of certain Hazardous Substances) [30]. Es por ello, que se solicitaron monitores en desuso a las Secretaria Administrativa y

Técnica del Instituto de Investigación de Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México. Cuando se obtuvo acceso al basamento del IIM, se observaron varios monitores (figura 2.1), los cuales pertenecían a fechas anteriores al 2006 y se tomaron los equipos existentes. Las características de estos, se detallan en el Capítulo III “Resultados y Discusión”.



Figura 2.1 Monitores obsoletos del IIM

2.2.2 SEPARACIÓN

Al contar con los monitores, se extrajeron las PBC's, de sus siglas en inglés, (tarjetas de circuitos electrónicos) de cada uno de ellos. Como los que se muestran en la figura 2.2.



Figura 2.2 Tableros Electrónicos de monitores

Una vez desmontados los PBC's, se identificaron (Figura 2.3), y se tomaron los datos correspondientes a código de barras, fecha y modelo, éstos se presentan en el Capítulo III "Resultados y Discusión". .



Figura 2.3 Tableros de circuitos electrónicos identificados

2.2.3 EXTRACCIÓN

La extracción de la soldadura de cada PBC's, se realizó elevando la temperatura del tablero mediante el empleo de un soplete . Sabiendo que la temperatura de fusión de la soldadura Sn-Pb es de 183 °C, (de acuerdo al diagrama de fases presentado en el Capítulo I "Marco Teórico" en la sección 1.7), debido a esto, se supone que la temperatura estuvo en el rango de 183 a 200 °C, pues inició a escurrir dicha soldadura. El soplete se colocó en posición vertical a una distancia de 30 centímetros durante 20 segundos (figura 2.4). La razón, por la que se realizó la prueba a esta distancia y tiempo de exposición, fue debido a que fueron las condiciones encontradas experimentalmente para que se fundiera la soldadura de los PBC's.



Figura 2.4 Posición de tablero y Soplete

Al fundirse la soldadura escurrió, inmediatamente se sacudió el tablero simulando una vibración. Entonces, por gravedad cayó la soldadura y los circuitos se desprendieron automáticamente, recolectándose en una charola (figura 2.5).



Figura 2.5 Separación de Soldadura y circuitos electrónicos.

La soldadura sobrante en los PCB's, se extrajo fundiendo punto por punto (figura 2.6), con un Cautin Weller (rango 175-455°C y 50 Wats), cabe mencionar que fue una cantidad mínima y se extrajo la de soldadura con un extractor de embolo marca Halde.



Figura 2.6 Soldadura de sobrante y extractor Halde.

Se separaron los circuitos electrónicos de la soldadura manualmente y se identificó la soldadura obtenida (figura 2.7). Los PCB's quedaron libres de soldadura y circuitos electrónicos (figura 2.8).



Figura 2.7 Soldadura extraída e identificada



Figura 2.8 Tableros libres de soldadura y circuitos

Los residuos obtenidos de soldadura se sometieron a un refinamiento, como el descrito en el Capítulo I "Marco Teórico" en la sección 1.8. Se realizó una fusión controlada de la soldadura con fundente 157 Flux, en un crisol cerámico y metálico (figura 2.9), ambos recubiertos con una placa de cerámico (spray de nitrato de boro), el cual fungió como aislante para evitar que la soldadura se adhiriera al recipiente o se contaminará con residuos extraños. La fusión se realizó a temperatura 190 °C. Como ya se mencionó en el Capítulo I; la

soldadura funde a 183 °C [27,38], es por ello que se utilizó esta temperatura en una parrilla marca Mirak (figura 2.10).



Figura 2.9 Crisol cerámico y metálico



Figura 2.10 Parrilla Mirak

Una vez fundida la soldadura con fundente flux 157 (figura 2.11). Se coló la soldadura en un molde cilíndrico de cobre recubierto con spray en aerosol de nitruro de boro, (Figura 2.12). Se obtuvieron lingotes de soldadura cilíndricos (Figura 2.13).



Figura 2.11 Fundición de Soldadura



Figura 2.12 Molde cilíndrico de cobre
Para colado



Figura 2.13 Lingotes de soldadura e impurezas separadas

Algunos lingotes se sometieron nuevamente a fusión con fundente flux 157, para refinar la soldadura hasta conseguir el nivel de pureza deseado.

Una vez, obtenidos los lingotes de cada PBC lo más puros posible, se pesaron (figura 2.14) en una Balanza Sartorius BL2105 (rango de 210g -0.1 mg), los datos se muestran en el Capítulo III “Resultados y Discusión”.



Figura 2.14 Balanza Sartorius BL2105

2.3 CARACTERIZACIÓN

Las técnicas experimentales empleadas en esta investigación para caracterizar los lingotes de soldadura fueron las siguientes:

2.3.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

El fenómeno de rayos X consiste en un proceso de interferencias constructivas de ondas de rayos X que se producen en determinadas direcciones del espacio. Esto significa que, las ondas tienen que estar en fase, lo que ocurre

cuando su diferencia de trayectoria es cero o un múltiplo entero λ . La identificación de fases cristalinas constituye uno de los campos de aplicación más importante. El registro del espectro difractado puede realizarse empleando un difractómetro de polvos, el cual normalmente posee una geometría que obedece a la Ley de Bragg [31].

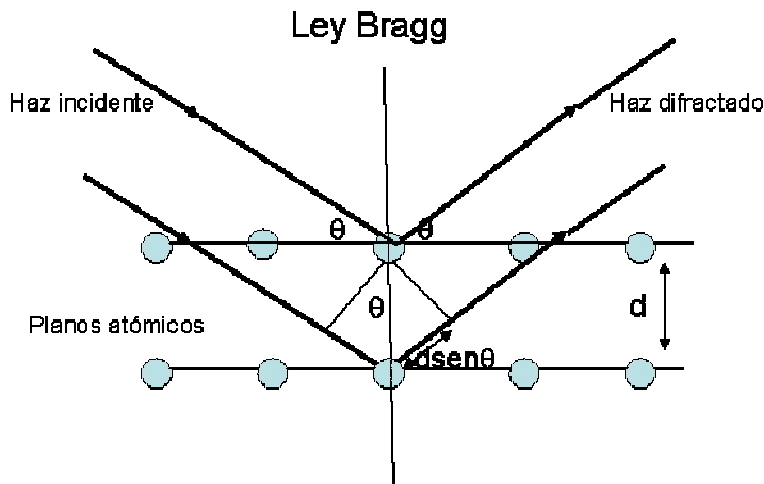


Figura 2.15 Ley de Bragg [29]

Esta ley, es la más utilizada y supone átomos puntuales en planos reflectores o incidentes (figura 2.15) y se describe con la fórmula:

$$n \lambda. = d_{hkl} \text{ sen } 2 \theta$$

En donde n : Planos (1,2,3,...), d : distancia interplanar, hkl : índices de Miller, θ : ángulo de incidencia. A partir del ángulo θ en el que aparece el pico de difracción, se pueden calcular las distancias interplanares para cada familia de planos designada por sus índices de Miller (hkl), ya que la longitud de onda es conocida. Estas distancias se comparan con las que están reportadas en las fichas de archivo JCPDS (Joint Committee of Powder Diffraction Standards) y después con las intensidades. Al menos 8 picos deben coincidir con la ficha JCPDS, tanto en su posición (distancia interplanar), como en su intensidad relativa. Para obtener las intensidades relativas, al pico más intenso se le

asigna el 100% y en base a este se calculan el resto de las intensidades (sí se trabajara con intensidades absolutas, los laboratorios no podrían comparar resultados o tendrían que fijar la unidad de medida). De esta manera, se logra identificar compuestos presentes en una mezcla hasta en un 3%, si el porcentaje es menor no se puede identificar esa fase (ya que se encuentra por debajo del límite de detección del aparato). Además, en las fichas JCPDS suelen aparecer la simetría cristalina del compuesto, su grupo espacial, sus parámetros de red y la referencia de donde se obtuvieron los datos [29].

Interpretación de Resultados

Las identificaciones por DRX no siempre son fáciles; sin embargo, realizando una serie de pasos, se logran obtener. Puede ser, que se tengan dos patrones de difracción de la misma muestra con intensidades relativas distintas, aunque los picos aparecen en la misma posición angular. La diferencia se debe a la morfología de la muestra y al modo de prepararla. Sí, las intensidades de un compuesto no concuerdan con las de la ficha JCPDS, y la posición de los picos es la misma; la primera explicación que se debe hacer es la presencia de orientaciones preferentes y, por lo tanto, de una morfología laminar [29]. Los factores que afectan la intensidad relativa de los haces difractados en el caso de un haz incidente monocromático son: Factor de Polarización, Factor de Estructura, Factor de Multiplicidad, Factor de Lorentz, Factor de Absorción, y Factor de Temperatura [31].

Cuando los anchos de todos los pico son despreciables los compuestos identificados son totalmente cristalinos. Cabe señalar que el ancho de pico puede deberse al tamaño de partícula y a las microdeformaciones [29].

Sí, el tamaño de partícula de la muestra es pequeño, los picos son anchos y su altura pequeña. Sí, el tamaño de partícula de la muestra es grande, los picos tendrán un ancho pequeño y altura grande. También puede existir corrimiento de picos. Sí, el corrimiento es hacia la izquierda puede ser por aumento del parámetro de red. Sí, el corrimiento es hacia la derecha puede ser por: disminución de parámetro de red y a microdeformaciones. Además, el corrimiento también puede ocasionarse por la manera de colocar la muestra en el porta muestras (error instrumental). Una vez identificados los compuestos, se pueden encontrar en la tarjeta JCPDS, los valores de h , k y l (índices de Miller)

[29]. Estos caracterizan la orientación de la familia de planos cristalográficos a la que se debe el pico estudiado y con su distancia interplanar correspondiente se puede calcular los parámetros de red del sistema cristalino [29].

Preparación de muestras

La preparación de las muestras comenzó cortando el lingote con un disco abrasivo diamantado y enfriado con agua, para obtener muestras con 4 mm de espesor. Esta actividad, se realizó con una cortadora Buehler ISOMET 2000 con carga de 110 y velocidad de 500 rpm. (Ver Figura 2.16).



Figura 2.16 Cortadora Buehler ISOMET 2000 y corte de lingote

Para devastar la superficie y dar planicidad a las superficies irregulares, se pasaron las muestras por lijas de 600,1500 y 4000 (figura 2.17). Se uso agua como lubricante. Una vez lijadas las muestras, se sometieron a limpieza ultrasónica. Se sumergió la muestra en etanol y se dejó expuesta a la frecuencia ultrasónica durante 15 minutos. Después se seco la muestra aplicando aire con una pistola. Debido a ralladuras el examen óptico reveló en algunas ocasiones la necesidad de repetir el procedimiento de pulido final. De esta manera, se obtuvieron muestras con una superficie para un análisis microestructural satisfactorio.



Figura 2.17 Base para lijar muestras y muestras obtenidas del lingote

Por último se colocó cada muestra en un portamuestras de plástico fijándola con plastilina, alineada al ras y al centro del portamuestras (teniendo cuidado que la plastilina no se confundiera con la muestra, pues aquella podría interferir en los resultados). Para el análisis de DRX, se utilizó un difractómetro Bruker axs D8 Advance (figura 2.18), usando radiación $K\alpha$ de Cu ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) a 30 kV. Las muestras fueron barridas en un intervalo de 25 a 90° en 2θ con un tamaño de paso de 0.016°, tiempo de paso de 0.2 segundos y una velocidad de rotación de porta muestras de 30 rpm. La identificación de las fases presentes en la muestra se realizó empleando los paquetes XRD Commander y *Evaluation*.



Figura 2.18 Difractómetro Bruker, modelo D8-Advanced

Mediante esta técnica se identificarán las fases cristalinas presentes en los lingotes obtenidos de las soldaduras utilizadas en los PBC's. La posición de los picos de difracción, su intensidad, así como la estructura cristalina del material

y parámetros de red, también fueron obtenidos los patrones de difracción para cada muestra y se reportan en el Capítulo III “Resultados y Discusión”.

2.3.2 MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM)

La microscopia electrónica de barrido (*Scanning Electron Microscope*), SEM, por sus siglas en inglés. Es una técnica de caracterización, en donde se examina la superficie de la muestra barriéndola con un haz de electrones. Este haz se focaliza sobre la superficie de la muestra de forma que realiza un barrido de la muestra siguiendo una trayectoria de líneas paralelas. La interacción de los electrones incidentes con la muestra genera: **electrones secundarios** SEI (Secondary Electron Image), **electrones retrodispersados** BEI (Backscattered Electron Image), rayos X generados por la misma muestra (energía dispersiva EDS Energy Dispersive Spectrometer), **electrones Auger** y **electrones transmitidos** como los que se muestran en la figura 2.19 [27].

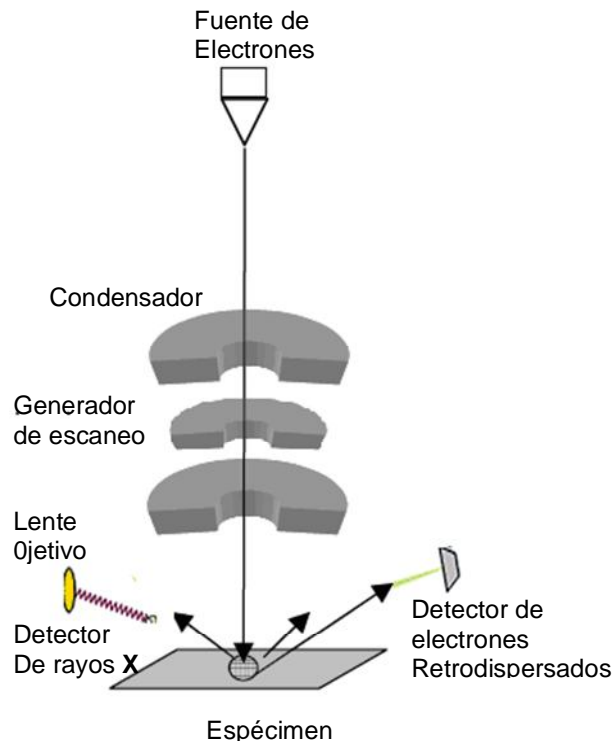


Figura 2.19 Esquema de Microscopia Diferencial de Barrido (SEM)

Con lo **electrones secundarios**, se obtiene una imagen de alta resolución de apariencia tridimensional. La intensidad de emisión de los **electrones**

retrodispersados, permite la obtención de imágenes de composición y topografía de la superficie, depende del número atómico de los átomos de la muestra, así los átomos más pesados producen mayor cantidad de electrones retrodispersados. Una imagen originada por los electrones retrodispersados revela diferencia en la composición química por diferencia de contraste. El haz de electrones reflejados **retrodispersados**, se recoge y se muestra a la misma velocidad de barrido en un tubo de rayos catódicos (semejante a una pantalla de TV de rayos catódicos). La muestra debe ser conductora, independientemente de que haya sido pulida o sometido a ataque químico [32].

Para los análisis químicos elementales, los microscopios de barrido cuentan con espectrómetros como el de energía de dispersión (EDS) [40]. El detector de energía dispersiva EDS, permite coleccionar los rayos X generados por la muestra y realiza diversos análisis e imágenes de distribución de elementos en superficies pulidas [33]. Con estas señales se construye un espectro de número de cuentas de rayos X contra energía de rayos X [40].

Interpretación de Resultados

Con las micrografías obtenidas por esta técnica se puede determinar las fases presentes, la composición de las fases y la microestructura de las mismas. Ésto se puede realizar con la ayuda de del diagrama de fases, el cual se explicó a detalle en el Capítulo I “Marco Teórico”, sección 1.7.1

Preparación de muestras

Se hicieron los mismos pasos que para la preparación de muestras de DRX (corte y lijado de muestra). Después del desgaste con lija, se pasaron por paño y se agregó alumina, agua y jabón neutro líquido, con lo cual se obtuvo una superficie totalmente limpia con acabado espejo. Esto, se hizo en una pulidora semiautomática marca Buehler (figura 2.20).



Figura 2.20 Pulidora Buehler

Posteriormente, se lavó la muestra con agua y jabón neutro. Se sometió la muestra a limpieza ultrasónica durante 15 minutos en una caja de Petri sumergiendo la muestra en alcohol etílico. Esto, con el objetivo de eliminar las trazas de alumina o pelusa generada por el paño (figura 2.21). De esta manera, se obtuvieron muestras con una superficie microestructural satisfactoria.



Figura 2.21 Limpiador ultrasónico Cole Parmer 8890

Al final, se observó la muestra en el microscopio óptico (figura 2.22). Por último se observaron las muestras en microscopio óptico a 200 aumentos para constatar la inexistencia de ralladuras y residuos extraños. En algunas ocasiones el examen óptico reveló la necesidad de repetir el pulido debido a impurezas como carburos (ocasionados por la adherencia de la lija a la muestra, ya que esta es muy blanda), o por ralladuras. En la preparación de las muestras el procedimiento de la limpieza es una etapa fundamental, ya que una mala limpieza puede influir en que los resultados sean de muy mala calidad.



Figura 2.22 Microscopio óptico Olympus AH3-UAN

Una vez listas las muestras (figura 2,23), se sometieron a la técnica de SEM.



Figura 2.23 Muestras para SEM

El microscopio utilizado fue un Microscopio electrónico de barrido JSM-7600F Jeol (figura 2.24). Este instrumento proporciona aumentos de 25 x hasta 1,000,000 x con resolución de 1 nm. Es un instrumento muy útil para la observación y análisis de las características microestructurales, morfológicas y topográficas de materiales sólidos. La superficie de la muestra examinada se barre con una haz de electrones y el haz reflejado de electrones (“retrodispersados”) se recoge y se muestra a la misma velocidad de barrido en un tubo de rayos catódicos. La imagen que aparece en la pantalla puede fotografiarse y representa las características superficiales de la muestra.



Figura 2.24 Microscopio electrónico de barrido modelo JSM-7600F Jeol

Mediante esta técnica se obtuvo el análisis composicional y estructural, de los lingotes de los PBC's. Las micrografías y resultados obtenidos se reportarán en el Capítulo III Resultados y Discusión”.

2.3.3 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

La Calorimetría diferencial de barrido, del inglés, Differential Scanning Calorimetry DSC, determina cuantitativamente las temperaturas de conversión y las entalpías (calor involucrado en el proceso), de una muestra determinada. Esta consiste en la medición de la variación en el flujo de calor entre la muestra y la referencia cuando dicha muestra se somete a un programa de temperatura, a una determinada velocidad, en una atmósfera controlada. El principio básico de esta técnica, es que, cuando se experimenta un cambio físico en la muestra, como cambio de fase, se necesita que fluya más o menos (exotérmico ó endotérmico) calor a la muestra, que a la referencia, para mantener las dos a la misma temperatura. Esta técnica, proporciona temperaturas de fusión, de transición vítrea, de cristalización, etc. [34]. El DSC consiste en calentar una muestra dada y una de referencia (figura 2.25). La temperatura en ambas muestras es siempre igual. Esto se logra midiendo la temperatura con sensores y ajustando el calentamiento. Se programan velocidades de calentamiento en

(grados/segundo) uniforme a ambas muestras para realizar el barrido de temperaturas. El flujo de calor versus la temperatura es a lo que se le llama termograma DSC (figura 2.26) [35].

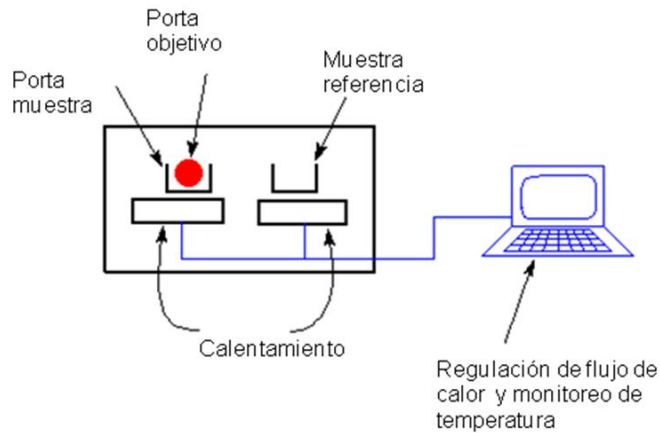


Figura 2.25 Principio de funcionamiento de DSC [34].

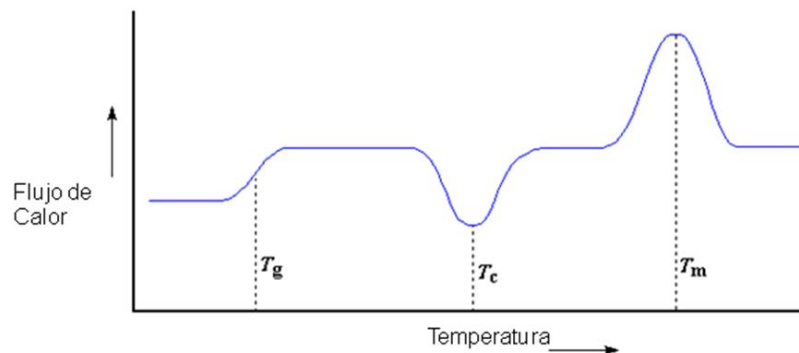


Figura 2.26 Termograma de DSC [35].

Interpretación de Resultados

Cuando una muestra sólida funde a líquida se necesitará que fluya más calor a la muestra, para aumentar su temperatura a la misma velocidad que la de referencia. Esto se debe a la absorción de calor de la muestra en tanto ésta experimenta la transición de fase endotérmica desde sólido a líquido. Por el contrario, cuando la muestra experimenta procesos exotérmicos (como una

cristalización) se requiere menos calor para alcanzar la temperatura de la muestra. Los calorímetros del DSC, miden la cantidad de calor absorbido o eliminado durante tales transiciones. El DSC puede ser utilizado, para determinar cambios de fase como las transiciones vítreas. Además, el DSC es una herramienta usada con frecuencia en la Industria, como instrumento de control de calidad, ya que se aplica para valorar la pureza de las muestras. Al observar uno o varios picos en los termogramas estos son atribuidos a la formación o desaparición de las fases presentes en la aleación [35].

Preparación de muestras

La preparación de las muestras para el análisis de DSC, se realizó cortando el lingote previamente obtenido. Se tomaron muestras de 2 mm de diámetro, a 0.2 mm de espesor que dieron un peso de 20 mg de peso (figura 2.27). Mediante esta técnica, en esta investigación, se determinaron las temperaturas de fusión, por calorimetría diferencial de barrido (DSC) de las muestras de los lingotes de los PBC's, para determinar la pureza de la soldadura.



Figura 2.27 Muestras para DSC

Se utilizó un calorímetro TA Instruments modelo DSC 2910 modulated DSC (figura 2.28). Los análisis se hicieron con los siguientes parámetros: muestras de 20 mg, desde temperatura ambiente, hasta 300 °C, con una velocidad de calentamiento 10 °C por minuto. Los termogramas se presentarán en el capítulo III Resultados.



Figura 2.28 Calorímetro TA Instruments modelo DSC 2910 modulated DSC

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la separación y extracción de soldadura base plomo de los tableros de circuitos electrónicos. Así como la caracterización de la soldadura con las técnicas de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) y análisis calorimétrico diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés). Es necesario mencionar que los resultados aquí presentados son la base científica para el diseño del prototipo propuestos en el Capítulo IV.

3.1 VISITA DE CAMPO

En la visita del relleno sanitario Bordo Poniente de la Ciudad de México realizada el 23 Noviembre del 2011; se recabaron los siguientes datos de la planta de selección: inicio su funcionamiento el 18 de julio 1994 y cuenta con un área de 3 hectáreas. Se separa: Papel, Cartón, Tortilla, Metales (Al, Cu, Hierro, Bronce, etc.), Trapo, Tetra pack, Vidrio (verde, ámbar y transparente), PET, PVC (estos dos últimos ascienden a 100 ton/mes). Diariamente se reciben los camiones y se pesan, se vacía el contenido en patio y se empuja con tractores a 4 rampas en donde entran a las bandas de selección (en un primer piso), en donde los operadores seleccionan hasta cuatro tipos de material diferentes por operador (figura 3.1), el material que seleccionan lo colocan en tolvas en donde caen a costales, al estar llenos se pesan y contabilizan para cada banda. En total se recupera sólo el 10%.



Figura 2.1 Tiradero de basura y planta de selección [39]

Se seleccionan 2000 ton/diarias con 3 turnos (5 hrs/turno efectivas) y 600 operadores en bandas. Los materiales se comercializan y se reparten por grupo. La planta se opera con los pepenadores del relleno sanitario.

Cabe señalar, que en la planta de selección no se encontraron residuos electrónicos, ya que estos son separados desde su recolección en sitio y vendidos para el comercio informal. Lo cual confirma la información plasmada en el capítulo I sección 1.3 y 1.4, en donde se menciona a los dos grupos de interés que maneja los residuos electrónicos.

3.2 SEPARACION Y EXTRACCION DE SOLDADURA BASE PLOMO

La semilla que ha germinado mi interés por el manejo de los residuos sólidos, fue a través de mi experiencia en la vida laboral, debido a que he observado la gran cantidad de desperdicios industriales que se generan en los diferentes centros de producción. En la Purificadora de Agua los Reyes (Electropura), sólo se separaba el vidrio por colores. El PVC (policloruro de vinilo) y PET (Polietilentereftalato), se depositaban en la basura, así como las cantidades de agua utilizada en retro lavados de baterías (filtros de arena y carbón). Estas cantidades de materiales eran considerablemente fuertes y todo se mandaba a la basura y al drenaje (1992). En Evenflo, mi inquietud fue creciendo cuando se iniciaron a tomar datos de cantidades generadas mensualmente y tipos de desperdicio (1998). Se trabajó con un proyecto específico para eliminar desperdicios, disminuir mermas y reciclarlos, buscando compradores potenciales de los residuos generados. Fue sorprendente, que sólo se

pudieron colocar tres tipos de materiales, se encontraron compradores para el cartón, policarbonato y hule natural y hule sintético (ocasionalmente). En Lincoln Electric se separaba aluminio, acero al silicio, cobre, chatarra, pilas y lodos de aguas residuales. Para el 2004, se inició un proyecto en Lincoln Electric de separación de residuos sólidos para cumplir con la ley “Manejo de Residuos Sólidos” que entraría en vigencia en 2006 en el Distrito Federal y se inició la separación de cartón, papel, polvos químicos, Pastas (cerámicos de diferentes composiciones con mayor porcentaje en arena de rutilo TiO_2 , Silicatos K_2SiO_3 y $Na_2 SiO_3$, y otros químicos), y cascarilla (FeO). Al tratar de reciclar los materiales de mayor cantidad generada como las pastas (10 toneladas semanales) y cascarilla (1 tonelada al mes), para evitar enviar estas cantidades a los rellenos sanitarios, no se encontró a nadie en toda la República Mexicana que quisiera reciclar estos materiales. Fue frustrante querer encontrar alternativas para reciclar materiales y no se tenga la infraestructura, los hábitos y herramientas para poder llevar a cabo este propósito. Pienso que hay mucho trabajo por hacer, pues a lo más que llegamos en México es a separar los desperdicios (de acuerdo a lo confirmando en la sección anterior de este capítulo), el cual es manejado totalmente por el sector informal (charreros, pepenadores, tianguistas, etcétera). Por esta razón, mi trabajo de tesis esta enfocado a contribuir a la investigación en un material de alto impacto en nuestro ecosistema como lo es el Plomo (Pb) y se trabajo en la selección, extracción y caracterización del mismo en PCB's.

3.2.1 SELECCIÓN

Los monitores utilizados en este estudio se identificaron y se tomaron los datos correspondientes a código de barras, fecha y modelo, éstos se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Monitores utilizados para la separación de soldadura

| Item | Marca | Modelo | Serie | Ensamble | Tarjetas # pzas |
|------|---------|--------|-------------------|--------------|-----------------|
| 1 | Siemens | F720 | C79453-A3032-B806 | Probable1985 | 1 |
| 2 | Samsung | 753 sl | AQ17HCBT721636W | Tijuana, | 2 |

| | | | | | |
|----|---------------------|-------------|-----------------|-------------------------------|---|
| | Sync Master | | | México Julio 2002 | |
| 3 | Samsung Sync Master | 793 VS | LE17HCDX944130Y | Tijuana, México Sep 2004 | 1 |
| 4 | Samsung Sync Master | 793 VS | LE17HCGX714525M | Tijuana, México Julio 2004 | 1 |
| 5 | Apple Vision | 850 Display | WR73509A947 | Singapore Agosto 1997 | 2 |
| 6 | Sgi | GDM-541 | 2429444 | Fabricado Japón Dic 2000 | 5 |
| 7 | Samsung Sync Master | 551 VS | AN15HCDW212858K | Tijuana, México Feb 2003 | 2 |
| 8 | Samsung | 550 V | DT15HCEN722630D | Tijuana, México Jul 2000 | 2 |
| 9 | Samsung | 550 V | DT15HCEN718375H | Tijuana, México Jul 2000 | 2 |
| 10 | Samsung Sync Master | 753 V | AN17HCGW733321J | Tijuana, México Jul 2003 | 2 |
| 11 | Apple ColorSync | M2935 | SG8140S6B9J* | Singapore Marzo 1998 | 3 |

Los monitores pertenecen a cuatro marcas: Siemens, Samsung, Apple y Sgi con un rango de fabricación de 1985 a 2004, ensamblados en México, Japón y Singapore. La cantidad de PCB's extraídos por monitor fue de 1 a 5 piezas según la marca. Los monitores de la marca Samsung contaban con 2 PCB's y la que mayor número de PCB's tuvo fue la marca Japonesa Sgi.

3.2.2 SEPARACIÓN

Se extrajeron los PCB's de cada monitor, los datos se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 PCB's extraídas de los monitores

| Item | Código | Modelo | Fabricado |
|----------------|-------------------------|---------------|--------------|
| 1 | C3041703 | B1546 | Siemens 1985 |
| 2 ^a | BH4100170A | I Aquila 17LS | 2001-09-28 |
| 2 ^b | BH4100170A | I Aquila 17L | |
| 3 | BH41-00268 ^a | LE015/17inch | 2004-04-12 |

| | | | |
|-----------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 4 | BH41-00268 ^a | LE015/17inch | 2004-03-04 |
| 5 ^a | OE7320479JCA | 820-0802-B | 1997 |
| 5 ^b | Parte final pantalla | 1-673-882-28 | Singapore 1996 |
| 6 ^b | HCMK-C2X50 | 1-673-882-28 | Sony |
| 6 ^c | HCMK-C2X50 | 1-673-882-28 | Sony |
| 6 ^d | A-1298-874-H | 1-673-882-28 | Sony |
| 7 ^a | BH41-00218 ^a | ANI5VS BH41-00217 ^a | 2002.10.29 |
| 7 ^b | BH41-00218 ^a | Andromeda-Video | 2002.12.03 |
| 8 ^a | BH41-C0052A | DTI5VSPN31B | 2002.03.02 |
| 8 ^b | BH41-00011 ^a | DP14L/DP1SL | 1999.06.09 |
| 9 ^a | BH41-00011 ^a | DT15VSPN319 | 2000.03.02 |
| 9 ^b | BH41-00052 ^a | DT15VSPN319 | 2000.03.02 |
| 10 ^a | BH41-000215 ^a | AN17K(TDA6888) | 2003.01.06 |
| 10 ^b | BH41-000216 ^a | AN17K (video) | 2002.07.01 |
| 11 ^a | 820-09669 ^a | Apple Computer Signapore | 1997 Malasya |
| 11 ^b | OE81310R9WAB | Apple Computer Signapore | 1997 |

3.2.3 EXTRACCIÓN

Se pesaron los lingotes obtenidos de cada PCB's los datos obtenidos se muestran en la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Pesos de lingotes de soldadura por tablero

| Ítem | Lingote (g) | Residuo (g) |
|-----------------|-------------|-------------|
| 1 | 3.2646 | 0.4889 |
| 2 ^a | 6.5534 | 4.0454 |
| 2 ^b | 3.0507 | 0.1460 |
| 3 | 7.8925 | 0.5251 |
| 4 | 7.5324 | 0.2377 |
| 5 ^a | 1.9660 | 0.0474 |
| 5 ^b | 4.7360 | 0.2380 |
| 6 ^a | 3.9947 | 0.2380 |
| 6 ^b | 2.5322 | 0.1118 |
| 6 ^c | 6.6370 | 0.3618 |
| 6 ^d | 10.3257 | 0.4567 |
| 7 ^a | 6.7683 | 0-0170 |
| 7 ^b | 2.1016 | 0.4279 |
| 8 ^a | 6.5114 | 0.4503 |
| 8 ^b | 2.2976 | 0.1885 |
| 9 ^a | 1.6124 | 2.5162 |
| 9 ^b | 6.1526 | 0.3702 |
| 10 ^a | 7.0320 | 0.2860 |
| 10 ^b | 3.9837 | 0.930 |
| 11 ^a | 5.7528 | 0.1728 |
| 11 ^b | 4.1302 | 0 |

Tabla 3.4 Pesos de lingotes de soldadura por monitor

| Monitor | Gramos | Marca |
|---------|--------|---------|
| 1 | 3 | Siemens |
| 2 | 10 | Samsung |
| 3 | 15 | Samsung |
| 4 | 8 | Samsung |
| 5 | 7 | Apple |
| 6 | 23 | Sgi |
| 7 | 9 | Samsung |
| 8 | 9 | Samsung |
| 9 | 8 | Samsung |
| 10 | 11 | Samsung |
| 11 | 10 | Apple |

Como se puede observar el máximo de soldadura extraída es de 23 gramos de la marca Japonesa Sgi fabricado en Japón en diciembre del 2000, el mínimo es de Siemens del año 1985 y el promedio es de 10 gramos de soldadura por monitor.

Si el promedio (10.27 gramos/monitor), lo multiplicamos por los monitores fabricados con soldadura base plomo desde 1981 hasta 2008 (dato producción mundial de un billón [1], proporcionado en el capítulo I “Marco Teórico”, se han generado por lo menos 10 millones de toneladas de soldadura de base plomo. La cual, se encuentra en muchos tiraderos municipales, rellenos sanitarios o en los áticos y sótanos alrededor del mundo.

3.3 CARACTERIZACIÓN

Como se mencionó en el capítulo II “Experimentación”, las técnicas experimentales empleadas en este estudio para caracterizar los lingotes de PBC´s son:

Difracción de Rayos X (DRX): Mediante esta técnica se identificaron las fases cristalinas presentes en las muestras de lingotes de PBC´s para cada monitor.

Microscopia Electrónica de Barrido (MEB): Mediante esta técnica se determinaron la microestructura y la composición de cada muestra de lingotes de PBC´s para cada monitor.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC): Mediante esta técnica se determina el punto de fusión de las muestras de lingotes de PBC's para cada monitor.

Para facilitar, en esta sección la presentación de resultados y su análisis, se mostrarán los resultados de las cuatro marcas analizadas, las cuales son: **Siemens, Samsung, Apple y Sgi**. Por esta razón, se reportarán únicamente los monitores 1, 2, 5 y 6, en este capítulo. Sin embargo, en el anexo I se podrán ver los resultados obtenidos de todos los monitores analizados.

3.3.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Los patrones de difracción obtenidos se muestran de la figura 3.2 a la 3.9, para las muestras correspondientes a los monitores 1, 2, 5 y 6 correspondientes a las marcas **Siemens, Samsung, Apple y Sgi**.

El patrón de difracción, de la muestra 1, del único PCB encontrado en el monitor 1 de la marca Siemens., se muestra en la figura 3.2. Los picos corresponden a las intensidades del estaño y plomo y fueron identificados de acuerdo a las fichas PDF-2 (2006) de la base de datos ICDD de: 0.3.065.0296 (estaño) y 03.065.2873 (plomo).

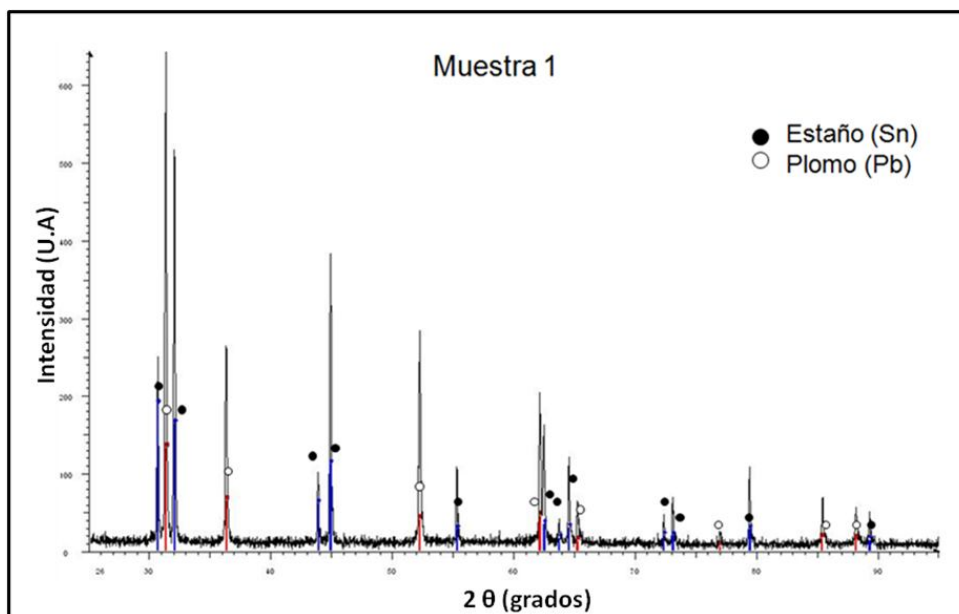


Figura 3.2 Difractograma de la muestra 1 de PBC del monitor 1 marca Siemens.

En el monitor 2 marca Samsung y el monitor 5 marca Aple, se encontraron dos PBC's y los patrones de difracción para cada muestra de PCB se muestran en las figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6. Para estas muestras, los picos de difracción fueron identificados de acuerdo a las fichas PDF-2 (2006) de la base de datos ICDD de: 0.3.065.7657 (estaño) y 03.065.2873 (plomo).

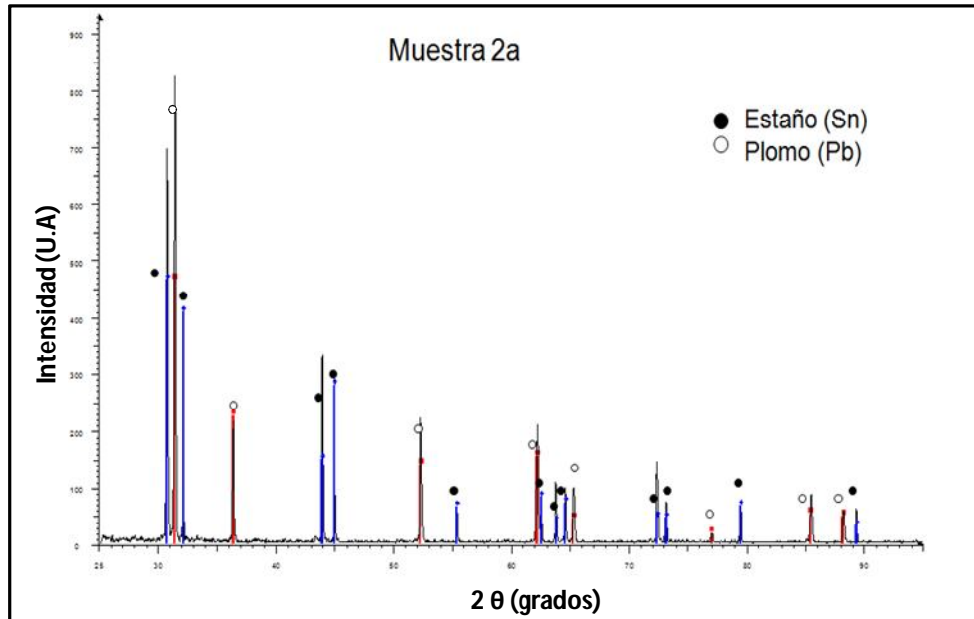


Figura 3.3 Difractograma de la muestra 2a del PBC del monitor 2 marca Samsung.

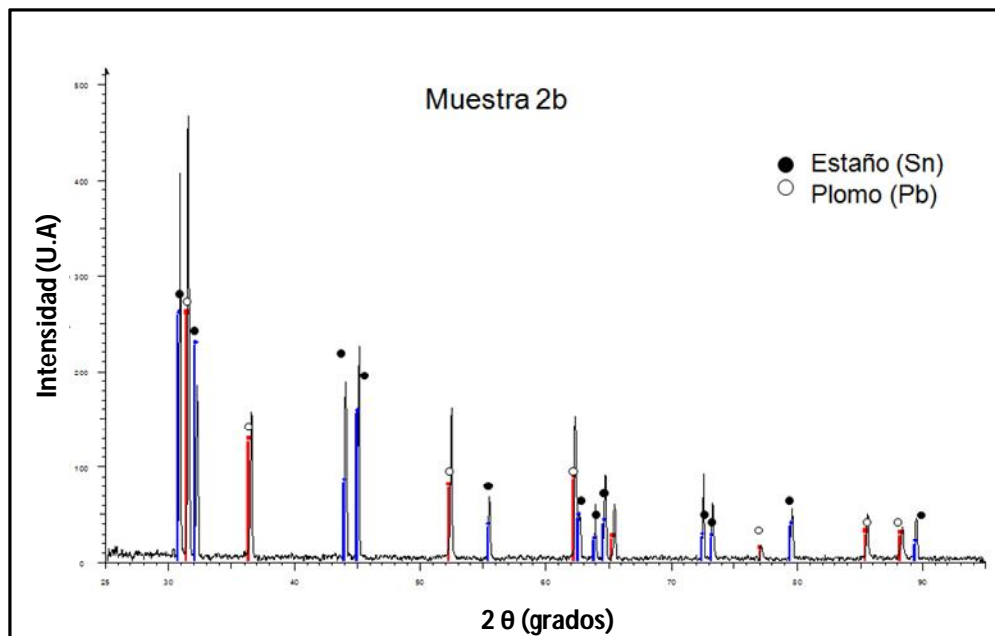


Figura 3.4 Difractograma de la muestra 2b del PBC del monitor 2 marca Samsung.

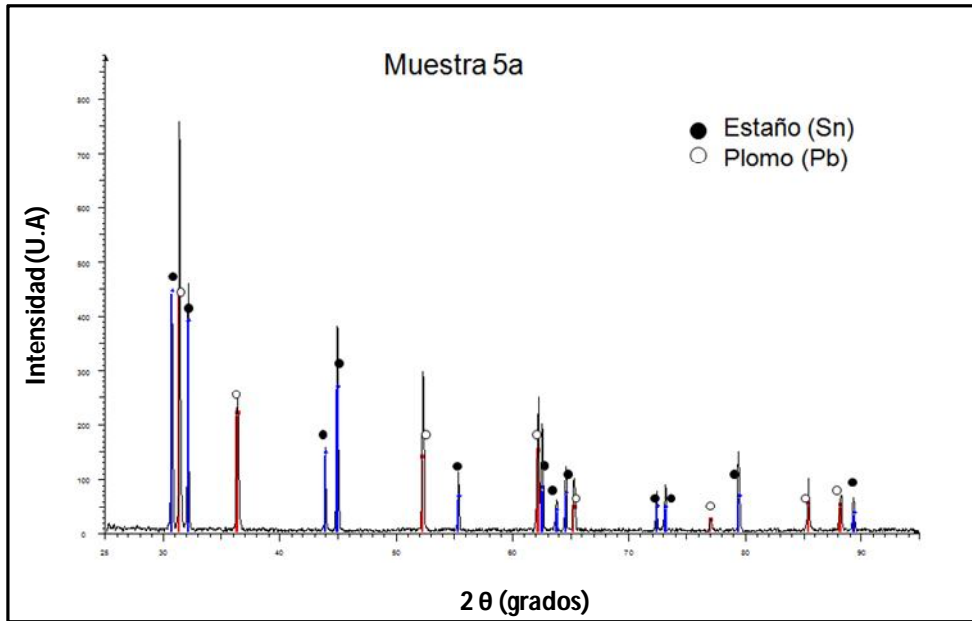


Figura 3.5 Difractograma de la muestra 5a del PBC del monitor 5 marca Apple.

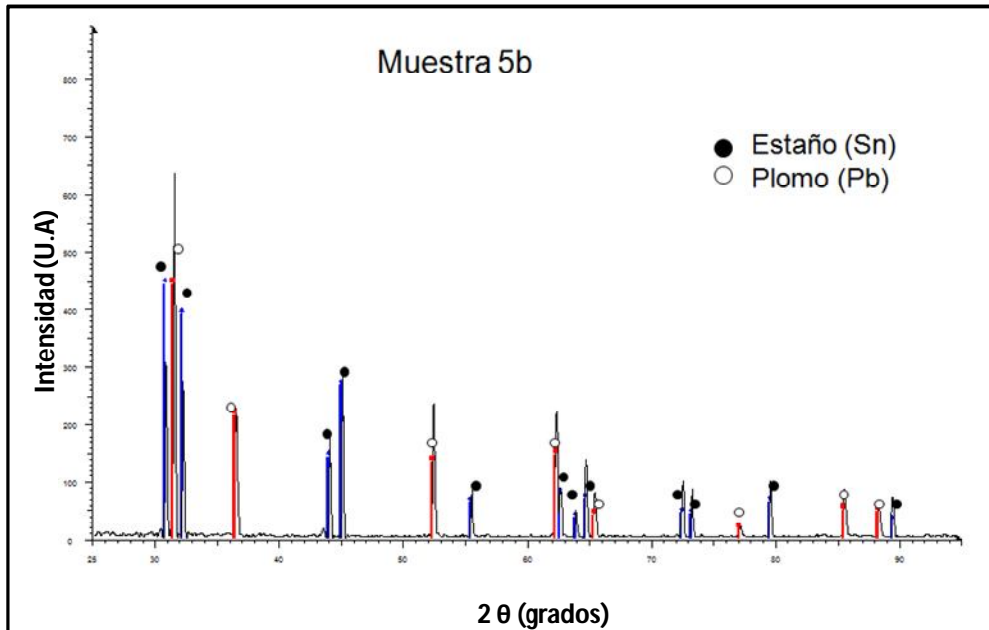


Figura 3.6 Difractograma de la muestra 5b del PBC del monitor 5 marca Apple.

Para el monitor 6 de la marca Sgi se encontraron 3 PBC's. Los patrones de difracción se muestran en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9. En el difractograma de la figura 3.7; los picos de difracción fueron identificados de acuerdo a las fichas

PDF-2 (2006) de la base de datos ICDD de: 03.065.2873 (plomo) y 0.3.065.0296 (estaño).

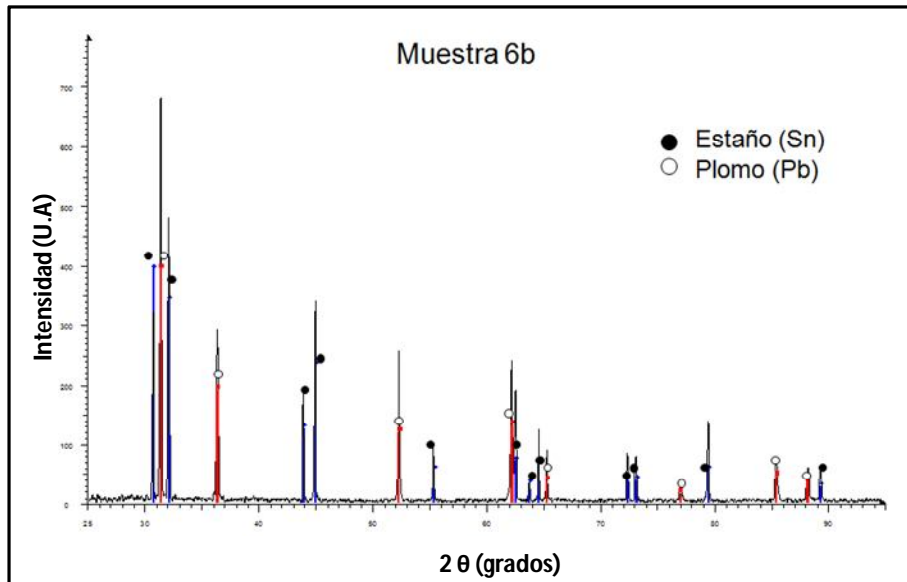


Figura 3.7 Difractograma de la muestra 6b del PBC del monitor 6 marca Sgi.

En el patrón de difracción de la figura 3.8 los picos de difracción fueron identificados de acuerdo a las fichas PDF-2 (2006) de la base de datos ICDD de: 03.065.2873 (plomo) y 03.065.7657 (estaño)

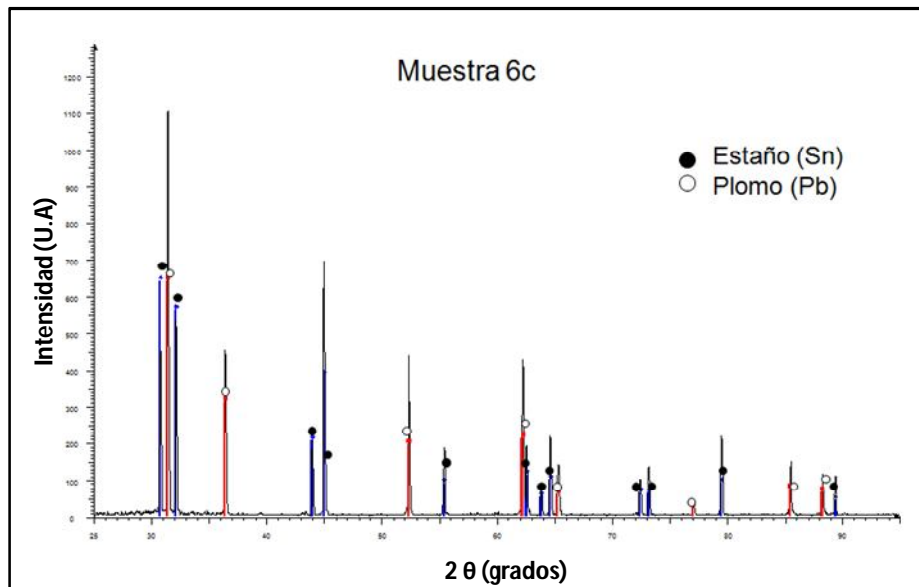


Figura 3.8 Difractograma de Muestra 6c del PBC del monitor 6 marca Sgi.

En la figura 3.9 los picos de difracción fueron identificados de acuerdo a las fichas PDF-2 (2006) de la base de datos ICDD de: 03.065.2873 (plomo) y 0.3.065.2265 (estaño).

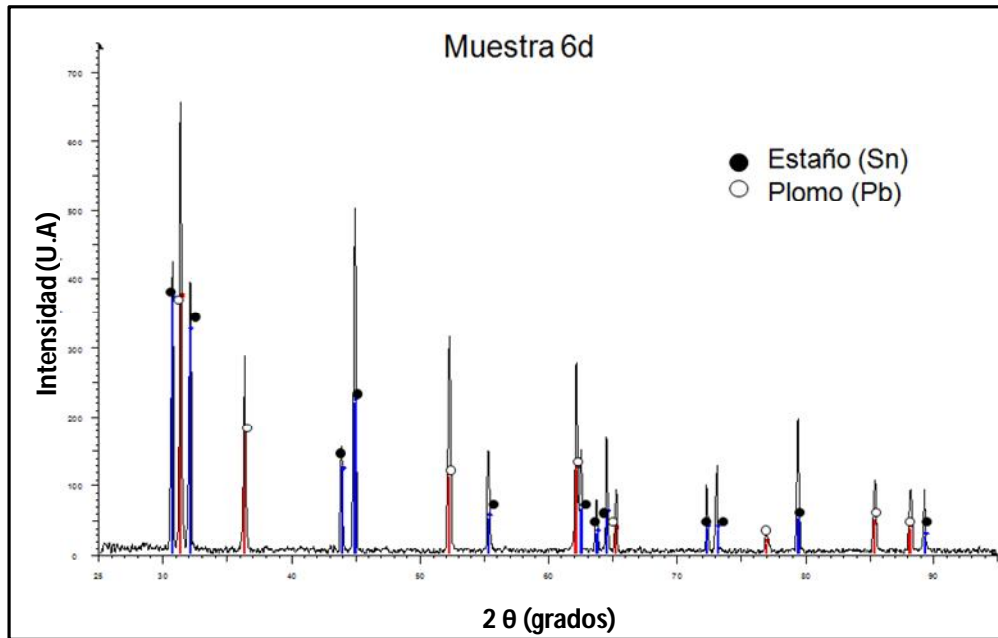


Figura 3.9 Difractograma de la muestra 6d del PBC del monitor 6 marca Sgi.

En base a estas fichas y analizando los patrones de difracción, se puede observar, que las reflexiones presentes sólo corresponden a los materiales base (Plomo y Estaño), es decir no se presentan otros compuestos o fases cristalinas o están en porciones lo suficientemente baja como para no ser detectadas por el equipo (menores al 3% [29]), lo cual corresponde a lo que se esperaba. La estructura cristalina del Plomo es cúbica FCC y el Estaño con estructura cristalina tetragonal BSC. Por otra parte, se puede observar que la posición de los picos es igual a los reportados en las fichas PDF-2 (2006) de la base de datos ICDD. No obstante, las intensidades varían, esto es debido a que el equipo utilizado es un difractómetro de polvos y las muestras utilizadas fueron en bulto, lo que genera orientaciones preferenciales, para eliminar estas variaciones en las intensidades; sería necesario pulverizar la muestra. Sin embargo, el objetivo que se buscaba era identificar las fases presentes en los PBC's y ese se logró con los resultados obtenidos en los patrones de difracción de DRX. Por último se presenta el patrón de difracción de Rayos X indexado

para el Plomo y Estaño (figura 3.10). Así como, la relación de distancias, índices de Miller y ángulos 2θ en la tabla 3. 5 y 3.6.

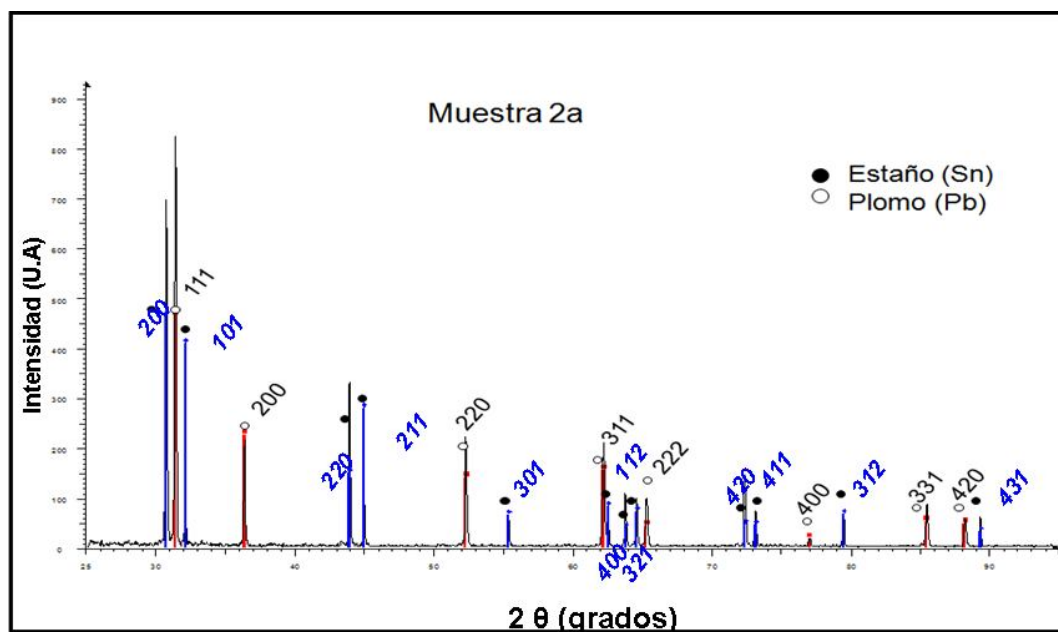


Figura 3.10 Difractograma indexado para el Pb y Sn muestra 2a.

Tabla 3.5 Relación de distancia, índices de Miller y ángulo 2θ del Plomo

| d(A°) | hkl | 2θ (ángulo) |
|--------------|------------|--------------------|
| 2.85748 | 111 | 31.278 |
| 2.47465 | 200 | 36.272 |
| 1.74984 | 220 | 52.235 |
| 1.49227 | 311 | 62.155 |
| 1.42874 | 222 | 65.155 |
| 1.23732 | 400 | 77.006 |
| 1.13545 | 331 | 85.439 |
| 1.10670 | 420 | 88.219 |

Tabla 3.6 Relación de distancia, índices de Miller y ángulo 2θ del Estaño

| d(A°) | hkl | 2θ (ángulo) |
|--------------|------------|--------------------|
| 2,91590 | 200 | 30.636 |
| 2.79319 | 101 | 32.017 |
| 2.06185 | 220 | 43.875 |
| 2.01707 | 211 | 44.902 |
| 1.65885 | 301 | 55.337 |
| 1.48431 | 112 | 62.525 |

| | | |
|---------|-----|--------|
| 1.45795 | 400 | 63.787 |
| 1.44186 | 321 | 64.585 |
| 1.30403 | 420 | 72.414 |
| 1.29248 | 411 | 73.166 |
| 1.20463 | 312 | 79.502 |
| 1.09511 | 431 | 89.401 |

Como ya se mencionó en el capítulo anterior (Experimentación), los índices de Miller se obtienen de la tarjeta JCPDS correspondiente y caracterizan la orientación de la familia de planos cristalográficos a la que se debe el pico estudiado. Además, con su distancia interplanar, permite calcular los parámetros de red del sistema cristalino [29].

Por otra parte, se presume tener lingotes con aleación con composición eutéctica, con 63% en peso de Estaño y 37% en peso de Plomo. Se sabe que, una aleación con composición eutéctica se comporta como un elemento puro, ya que, cambia de fase sólida a fase líquida de una sola vez, de acuerdo al diagrama de fases (ver Capítulo I “Marco Teórico” sección 1.7.1). Por lo tanto, no se tienen fases secundarias presentes y eso se confirma al observar los patrones de difracción de rayos X de las diferentes muestras. Sin embargo, esto se podrá corroborar con la utilización de las técnicas de caracterización siguientes, Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), ya que se determinará la microestructura y la composición de cada lingote de soldadura obtenida de los PCB’s y la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), al determinar la temperatura de fusión de las muestras.

3.3.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Una vez identificadas las fases presentes en las muestras de los lingotes de PCB’s (Estaño-Plomo), como se mostró en la sección anterior. Se continuó con la determinación de la microestructura y composición de los lingotes de PCB’s, para ello se utilizó MEB.

Las micrografías obtenidas se muestran a continuación en las figuras 3.11 a la 3.17, para las muestras correspondientes a los monitores 1, 2, 5 y 6 de las marcas **Siemens, Samsung, Apple y Sgi**, respectivamente.

Monitor 1 Marca Siemens

En la figura 3.11 Se exhibe la micrografía de la muestra 1, para el monitor Siemens. De acuerdo al diagrama de fases del Sn-Pb a) En esta micrografía se observan dendritas de estaño β Sn (sección clara), dentro de una estructura eutéctica laminar de estaño-plomo. b) A mayor ampliación se puede observar mejor la estructura eutéctica estaño-plomo. Esto se puede confirmar con las micrografías tomadas de la literatura [37] y mostradas en la figura 1.9 del capítulo I “Marco Teórico”.

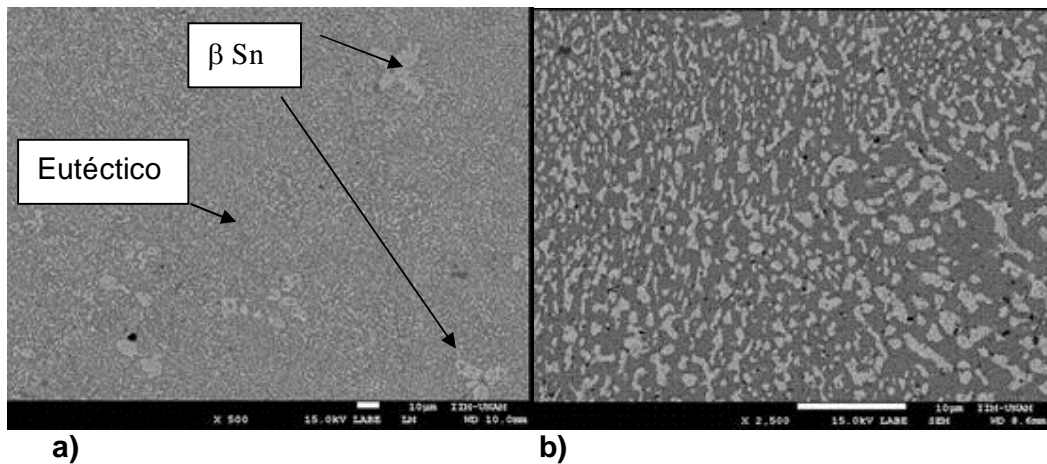


Figura 3.11 Micrografías de muestra 1

Para el análisis elemental se empleó espectroscopia por dispersión de energía, EDS, por sus siglas en inglés, (Energy Dispersive Spectroscopy). Debido a que, la energía de cada rayo X es característica de cada elemento (Capítulo II “Experimentación”), se obtuvo información cuantitativa de la composición de la muestra (figura 3.12), la cual fue una aleación de Sn/Pb de 70/30 % en peso. Además, la imagen revela una diferencia de contraste la cual depende del número atómico de los átomos de la muestra [32], para este caso el Pb (80), gris claro y el Sn (50), gris oscuro.

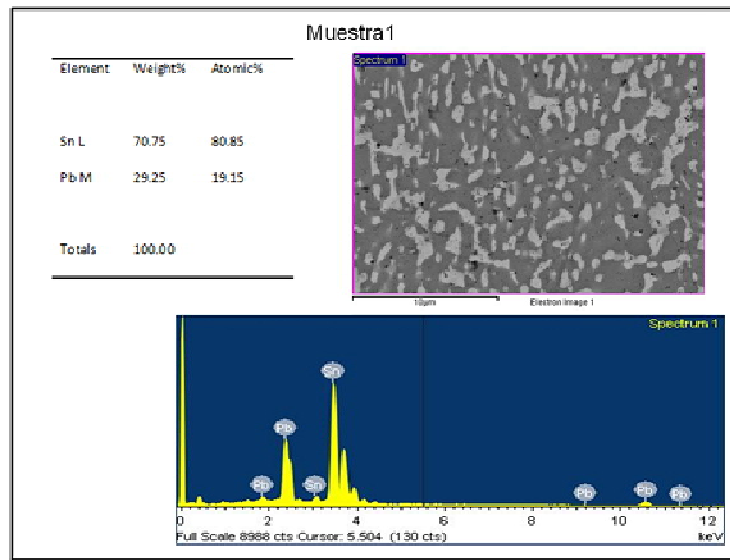


Figura 3.12 Análisis Elemental (EDS) muestra 1

Monitor 2 Marca Samsung

En las micrografías de la figura 3.13 se observa un intermetálico el cual se determinó que era cobre. La formación del intermetálico, fue ocasionada por contaminación de la muestra. Debido a que, el Sn fundido es excelente solvente para la disolución del Cu, así como las condiciones de tiempo y temperatura (más tiempo y mayor temperatura, permite mayor disolución) [27], Ocasionó la generación del intermetálico en la muestra (puntos grandes oscuros).

La figura 3.13 además se observa, a) Micrografía de estructura eutéctica laminar de estaño-plomo (ver figura 1.7 Capítulo I) [37]. b) Igual que inciso a) pero a mayor amplificación.

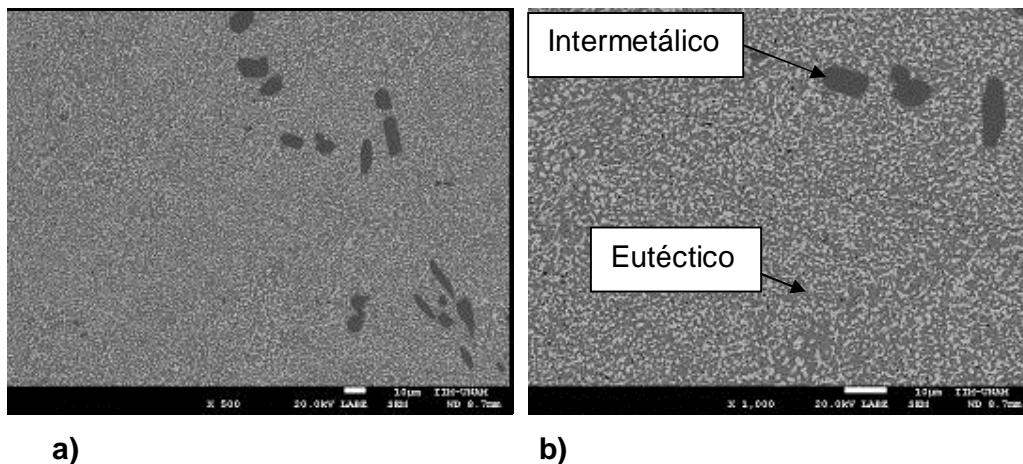


Figura 3.13 Micrografías de muestra 2a.

En el análisis elemental (EDS), para la muestra 2^a se determinó una aleación eutéctica de Sn/Pb 65/35 % en peso (figura 3.14).

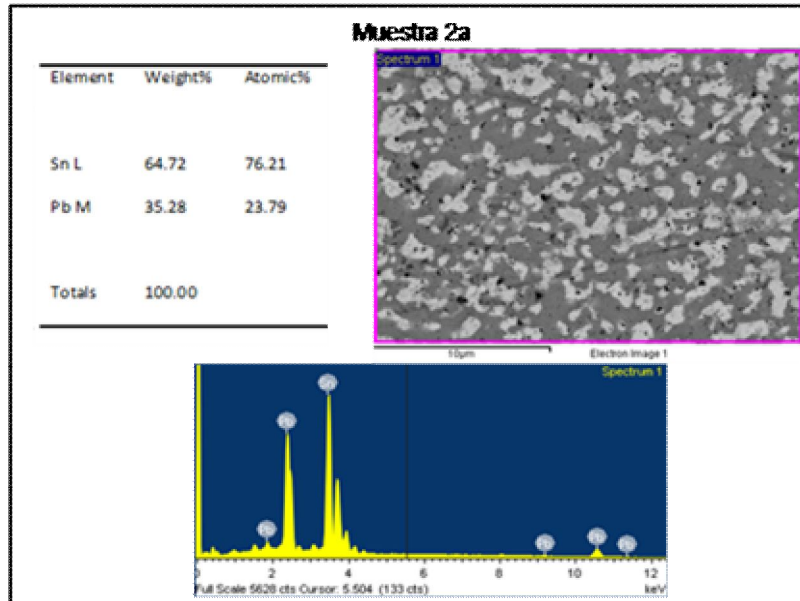


Figura 3.14 Análisis Elemental muestra 2^a

La muestra 2^b tiene la misma composición y microestructura que la 2^a, excepto que no se observó ningún intermetálico, esto quiere decir que no se contaminó. Por lo tanto, no se presentará en esta sección y se podrá ver en el anexo 1

Monitor 5 Marca Apple

Para este monitor se observa en la figura 3.15 a) una la soldadura con una estructura eutéctica, en una solución sólida rica en plomo, en una matriz de estaño, b) igual que el inciso a), con más amplificación

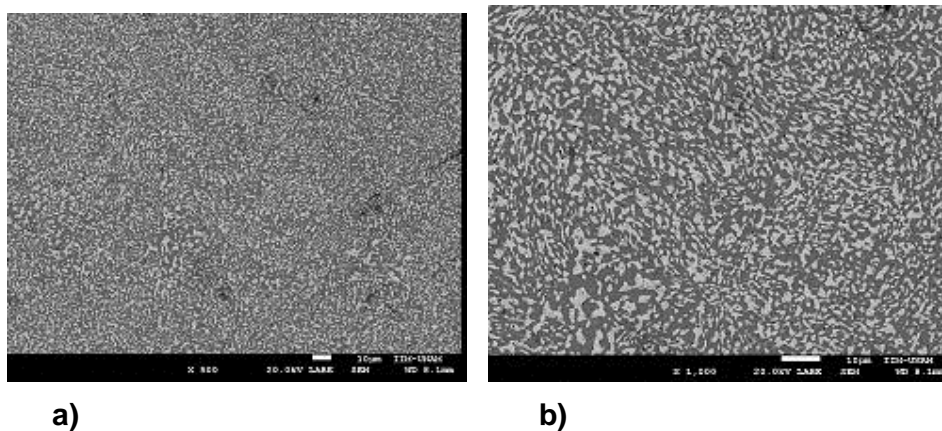


Figura 3.15 Micrografías de muestra 5^a

En el análisis elemental (EDS), para la muestra 5^a se determinó una aleación eutéctica de Sn/Pb 67/33 % en peso (figura 3.16).

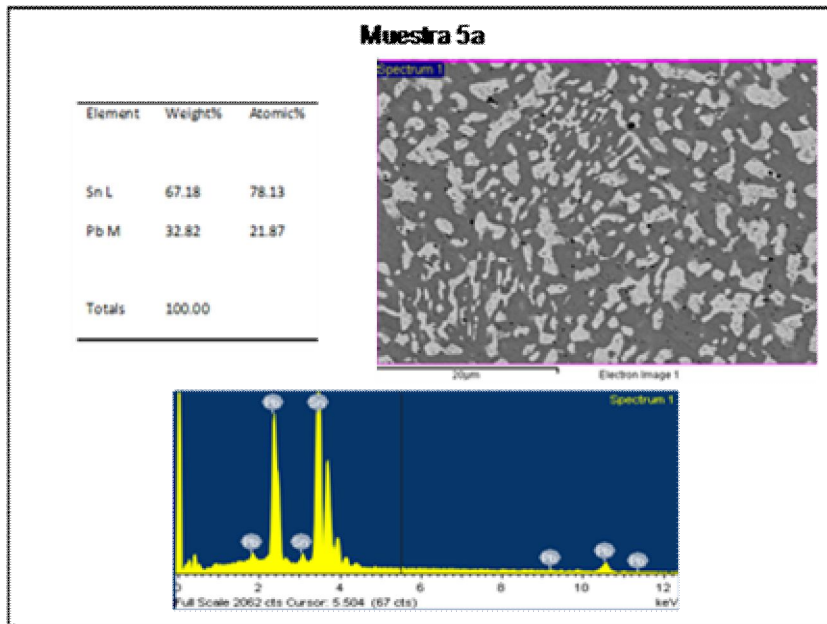


Figura 3.16 Análisis Elemental muestra 5^a

Para la muestra 5^b, se tiene la misma microestructura que la 5^a, sólo que en la 5^b, se obtuvo un intermetálico de cobre, ya que se contaminó la muestra, este análisis se encuentra en el apéndice 1.

Monitor 6 Marca Sgi

En la figura 3.17 se observa una micrografía de soldadura blanda, con estructura de pequeñas dendritas de solución sólida ricas en plomo (sección oscura), en una matriz globular eutéctica de estaño-plomo más fina que la mostrada en la figura 3.15. Además se formó un intermetálico de cobre por contaminación de la muestra.

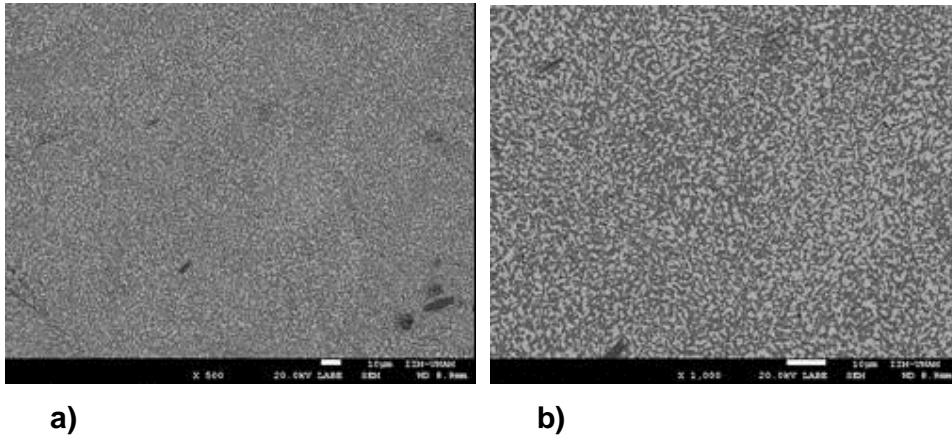


Figura 3.17 Micrografías de muestra 6^b

En el análisis elemental (EDS), para la muestra 6^b se determinó una aleación eutéctica de Sn/Pb 60/40 % en peso (figura 3.18).

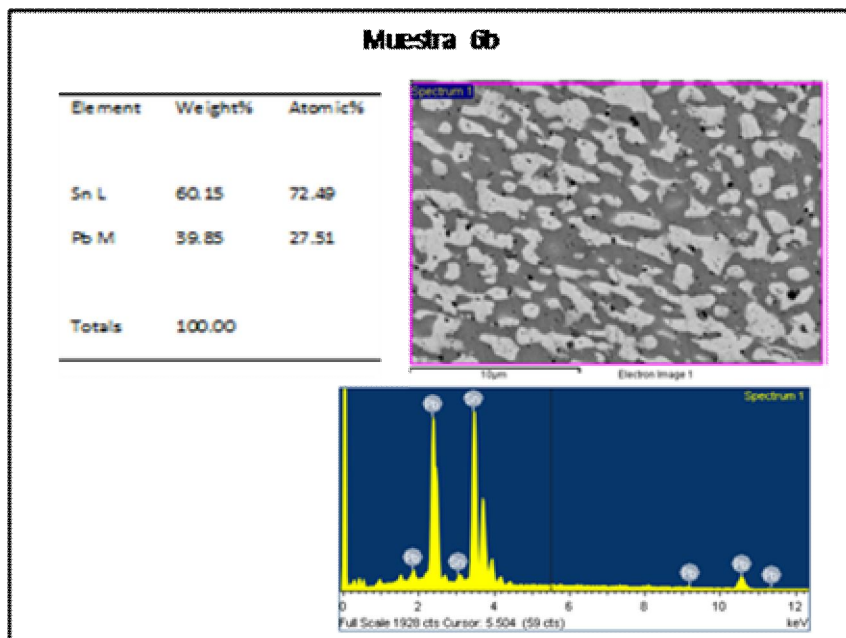


Figura 3.18 Análisis Elemental muestra 6^b

De acuerdo a los resultados obtenidos por esta técnica de caracterización, se confirma que las composiciones de las aleaciones utilizadas para la soldadura son de composiciones de Sn/Pb 60/40 % en peso (línea azul, figura 3.19), Sn/Pb 63/37 % en peso estructura eutéctica (línea roja, figura 3.19) y Sn/Pb 70/30 % en peso (línea verde, figura 3.19), para los PCB's de los monitores

estudiados en esta tesis. De acuerdo al diagrama de fases mostrado en el capítulo I, se puede esquematizar las composiciones de las aleaciones y obtener los rangos de temperatura de fusión (tabla 3.7), encontrados en los PCB's analizados.

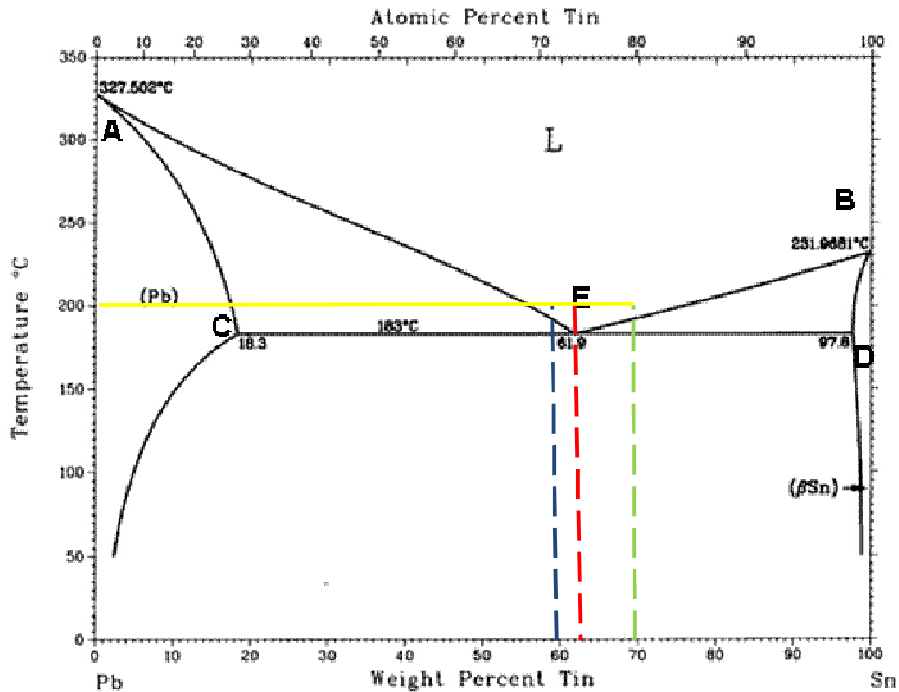


Figura 3.19 Diagrama de fases Sn-Pb [38].

Tabla 3.7 Composiciones de aleaciones Sn-Pb y rango de temperatura de Fusión.

Aleación eutéctica



| Sn | Pb | T (°C) solidus | T (°C) liquidus |
|----|----|-------------------|--------------------|
| 60 | 40 | 183 | 190 |
| 63 | 37 | 183 | 183 |
| 70 | 30 | 183 | 192 |

De acuerdo a la literatura [21] estas composiciones son utilizadas para recubrimiento de metales, en electrónica (aleación eutéctica) y usos generales en componentes electrónicos.

Por lo tanto, se determina que en un proceso de extracción de soldadura con estas composiciones, se puede utilizar una temperatura de proceso de 200 °C (línea amarilla, figura 3.19) y con ellos se garantiza la fusión de la soldadura.

Por otra parte, de las 20 muestras analizadas, tres (15%), se contaminaron y formó intermetálico de cobre. Dicha contaminación, se ocasionó por la forma de separar los circuitos electrónicos de la soldadura, ya que en un inicio a estos PCB's, se cortaron con pinza los circuitos, quedando residuos del anclaje con la soldadura y al momento de aplicar calor se fundió la soldadura y se disolvió el cobre junto con ella. Cabe señalar, que estos intermetálico no fueron detectados en la técnica de caracterización de DRX, esto se debió a que la composición del cobre estaba fuera del intervalo detectable (mínimo 3% en peso, [29].) por el equipo. Sin embargo, con la técnica de microscopía electrónica de barrido y EDS se confirmó la existencia de las fases (Sn y Pb), que previamente se determinaron con DRX.

Hasta ahora, se han identificado las fases presentes (Estaño-Plomo) por DRX, se ha determinado la microestructura por MEB y composición de las muestras por EDS, de los lingotes de PCB's. Por último, se determinó la temperatura de fusión, para confirmar las temperaturas obtenidas a partir del diagrama de fases (figura 3.19 y tabla 3,7), para ello se utilizó la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC).

3.3.3 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

Esta técnica de caracterización Calorimetría Diferencial de Barrido, DSC, (por sus siglas en inglés, Differential Scanning Calorimetry), permite determinar la temperatura de fusión de las muestras obtenidas de los lingotes de PCB's. Con este análisis se pretende saber que tan puro fue la extracción de soldadura y la temperatura de operación del prototipo propuesto en el siguiente capítulo, para la extracción de la soldadura en los PCB's.

Se determinó la temperatura de fusión de los monitores 1, 2, 5 y 6, correspondientes a las marcas **Siemens, Samsung, Apple y Sgi**. Como se puede observar en el termograma correspondiente al **Monitor 1 Marca Siemens** (figura 3.19). La temperatura de fusión obtenida fue de 181.69 °C, comparada con la temperatura de fusión eutéctica de la soldadura en el diagrama de fases (capítulo I sección 1.7.1) que es de 183 °C, se puede

considerar que se encuentra en el intervalo la composición eutéctica. También se puede ver que, el ancho del pico no es puntual (existe un pequeño intervalo), esto puede deberse a cierto grado de impurezas en la muestra. Sin embargo, estas impurezas no son significativas, pues la temperatura de fusión es muy cercana a la esperada (183 °C). Lo mismo ocurre para las muestras de 2, 5 y 6 (figura 3.19), correspondientes a las marcas **Samsung, Apple y Sgi**. Sus temperaturas de fusión son de 182.01, 182.78 y 182.95 °C. Las cuales también se acercan a la temperatura de fusión eutéctica.

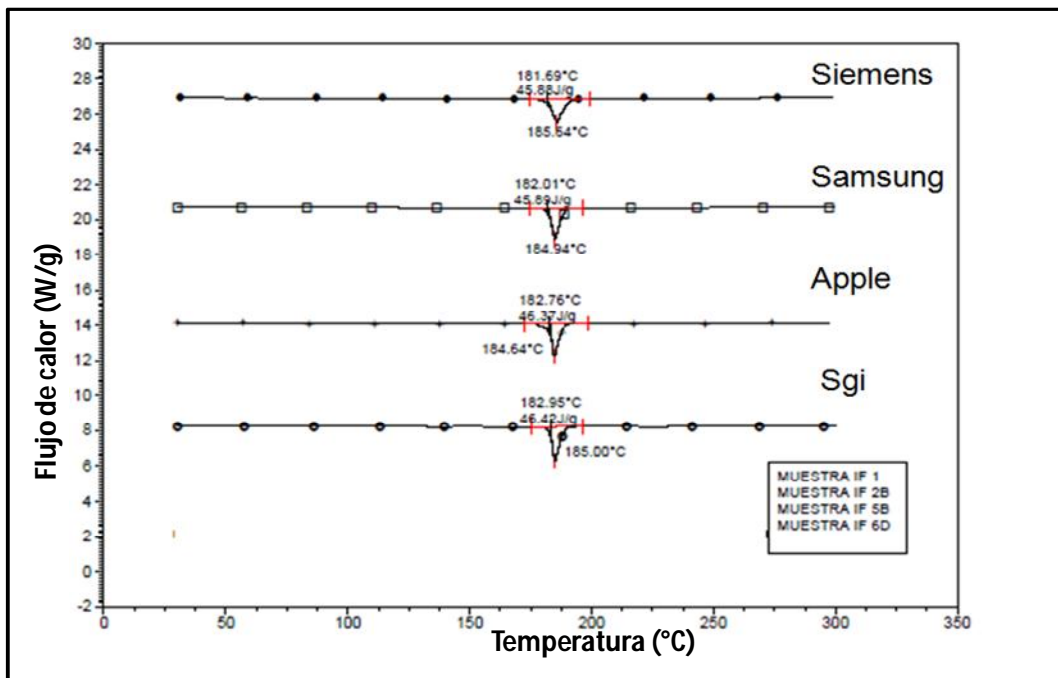


Figura 3.19 Termograma concentrado de temperaturas de fusión de los monitores 1,2, 5 y 6.

Como se observa en el termograma (figura 3.20), sólo aparece un pico, lo cual es atribuido a una sola transformación de fase. En seguida, se presenta la terminología de la ICTA III, (3rd International Conference on Thermal Analysis), para interpretar curvas de DCS [41]. Se tomará como referencia el termograma de la muestra 1 del monitor de Siemens.

Línea Base: Corresponde a la parte de la curva de DSC en que el flujo de calor es aproximadamente cero (tramos AB y DE).

Pico: Es la cúspide con cambio de pendiente (tramo BCD). Para la muestra 1 el pico es endotérmico, ya que la temperatura de la muestra disminuye respecto a la de la sustancia patrón, por lo que el flujo de calor fue negativo y la muestra desprendió calor.

Anchura del pico: Es el intervalo de temperatura entre los puntos en que la curva de DSC no coincide con la línea base al eje de temperaturas, entre la interpolación de la línea base (B'D').

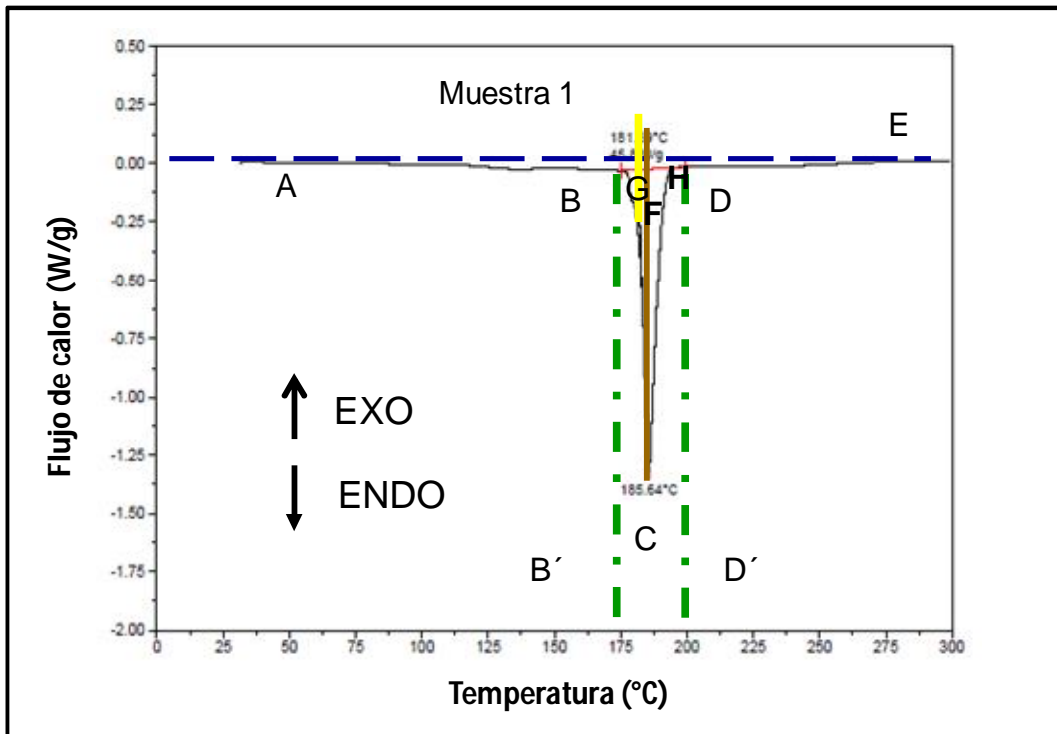


Figura 3.19 Interpretación del Termograma de la muestra 1 según las normas ICTA III [41].

Altura del pico: Es la distancia, perpendicular al eje de temperaturas, entre la interpolación de la línea base y el vértice del pico (CF).

Área del pico: Es el área encerrada por el pico y la interpolación de la línea base (BCDB). El área es directamente proporcional a la entalpía de la reacción.

Temperatura de inicio de transformación: Es la temperatura correspondiente al punto de intersección entre la tangente trazada desde el punto de mayor pendiente al principio del pico y la interpolación de la línea base (punto G)

Temperatura final de transformación: Es la temperatura correspondiente al punto de intersección entre la tangente trazada desde el punto de mayor pendiente al final del pico y la interpolación de la línea base (punto H).

En base a estos resultados se confirma que las muestras de los lingotes de los PCB's, utilizan soldadura de Estaño-Plomo con temperatura de fusión eutéctica. Por lo tanto, ésta se tomará como referencia para el control de temperatura del prototipo del proceso propuesto que se presentará en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO IV

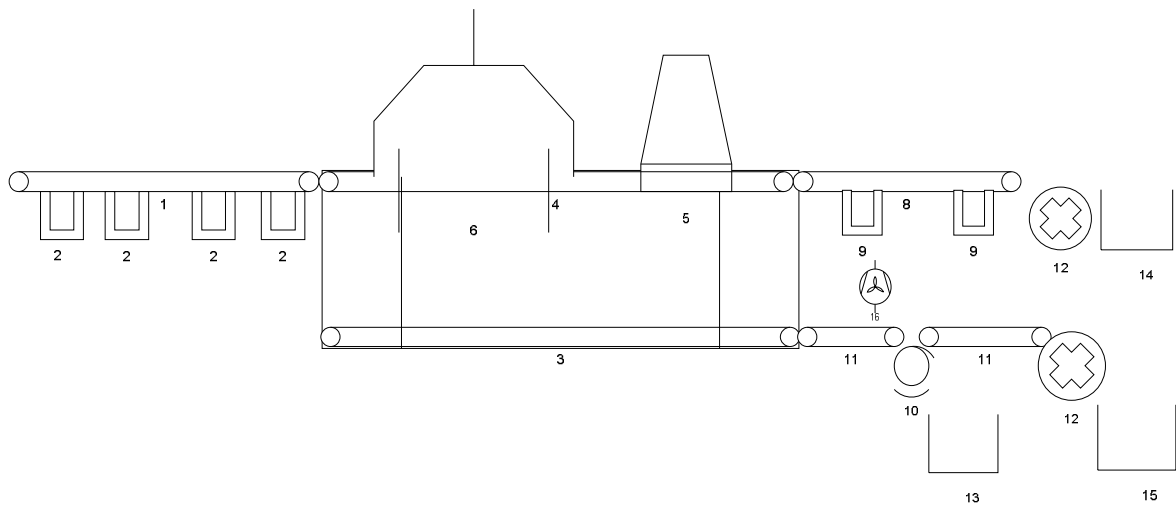
PROCESO DE EXTRACCIÓN

4.1 PROCESO DE EXTRACCIÓN DE SOLDADURA

En esta sección se propondrá un proceso de extracción de soldadura base plomo de los PCB's, separando los componentes de manera ambientalmente segura. Se muestra y se describe el diagrama proceso general y sus secciones.

4.1.1 DIAGRAMA GENERAL DE PROCESO

De acuerdo a la investigación realizada en el capítulo I, a la experimentación del capítulo II y a los resultados obtenidos en la caracterización de DRX, MEB, EDS y DSC, del capítulo anterior de "Resultados y discusión", en donde se confirmó que las fases presentes en la soldadura fueron Estaño-Plomo (DRX), con composiciones de 60/40, 63/37 y 70/30 % en peso (EDS) y con temperatura fusión eutéctica de 183 °C (DSC), de PCB's de los monitores analizados para la extracción de soldadura base plomo. Se pudieron obtener, las condiciones de operación de un proceso prototipo en línea para la extracción de soldadura de PCB's (figura 4.1), que a continuación se describe.



Lista de componentes

- 1 Riel transportador de tableros con circuitos electrónicos
- 2 Tableros de circuitos electrónicos
- 3 Banda transportadora de residuos (Soldadura y circuitos electrónicos)
- 4 Riel vibratorio
- 5 Tobera
- 6 Campana extractora
- 7 Horno de resistencia
- 8 Riel transportador de tableros
- 9 Tableros
- 10 Filtro giratorio
- 11 Banda transportadora
- 12 Trituradora
- 13 Colector de soldadura
- 14 Colector de tableros triturados
- 15 Colector de circuitos triturados
- 16 Ventilador

Figura 4.1 Diagrama de Proceso de Extracción de Soldadura

4.1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO

El proceso consiste en colocar manualmente los tableros de circuitos electrónicos **2** en el riel transportador **1**, el cual entra al horno **7** a temperatura controlada de 200 a 230 °C. Este rango de temperaturas, se determinó de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización de microscopia electrónica de barrido, EDS y DSC, del capítulo anterior de “Resultados y discusión” sección 3.3.3 y 3.3.4 . Por otra parte, se propone este rango de temperatura de operación del horno , ya que el rango de temperatura en que se forman las dioxinas (compuestos orgánicos clorados, descritos en el capítulo I “Marco Teórico”), es de 250 a 400 °C [12,19]. Como medida preventiva, es importante contar con interruptor de seguridad para no alcanzar la temperatura de 250 °C. Y en caso de sobrepasar esta temperatura y para evitar la emisión a la atmósfera de las dioxinas que pudieran formarse, se inyectaría carbón activado en polvo, que es un buen absorbente de este tipo de compuestos) [12,14].

En el interior del horno los tableros se calientan y el riel **4** vibra. La soldadura escurre por gravedad, así como también se van desprendiendo los circuitos del tablero, recolectándose en la banda transportadora **3**. Posteriormente, los tableros se someten a aire caliente con la tobera **5**, para extraer las últimas trazas de soldadura. Al salir del horno la soldadura se solidifica con aire **16** y se separará por medio de un filtro rotatorio **10** de los circuito electrónicos, recolectándose en el contenedor **13**. Los tableros libres de circuito electrónicos **9** se transportan con el riel **8**, pasan a la trituradora **12**, y por último se recolectan en el contenedor **14**. Los circuitos se transportan con la banda **11**, pasan a la trituradora **12**, y finalmente se recolectan en el contenedor **15**.

El proceso general consta de cuatro secciones: Alimentación, Extracción, PCB's sin circuitos y Separación de soldadura y circuitos. Los cuales se desglosarán a detalle a continuación.

4.1.3 SECCIÓN DE ALIMENTACIÓN

La sección de alimentación (figura 4.2), se ajusta al riel alimentador **1** a las dimensiones de los tableros a tratar (figura 4.3 y 4.4), el cual puede ser en el rango de 10 a 20 cm de ancho y los tableros se colocaran con un espacio de 20 cm, estas dimensiones se consideran adecuadas de acuerdo al capítulo II "Experimentación" (figura 4.4). La alimentación de tableros **2** se lleva a cabo manualmente en el riel transportador **1** y se sujetan a presión al colocarse en los canales de sujeción (figura 4.5).

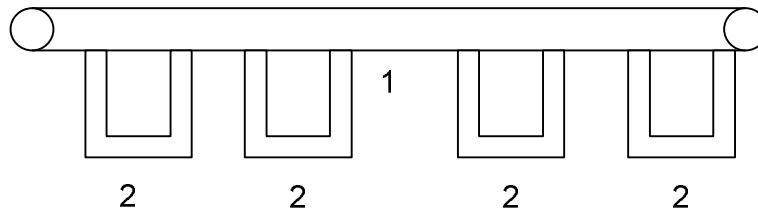


Figura 4.2 Diagrama de Sección de Alimentación de los PCB's

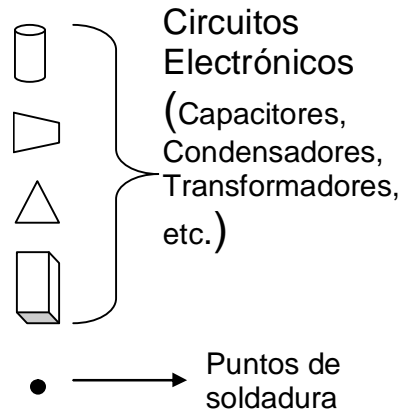


Figura 4.3 Identificación de partes.

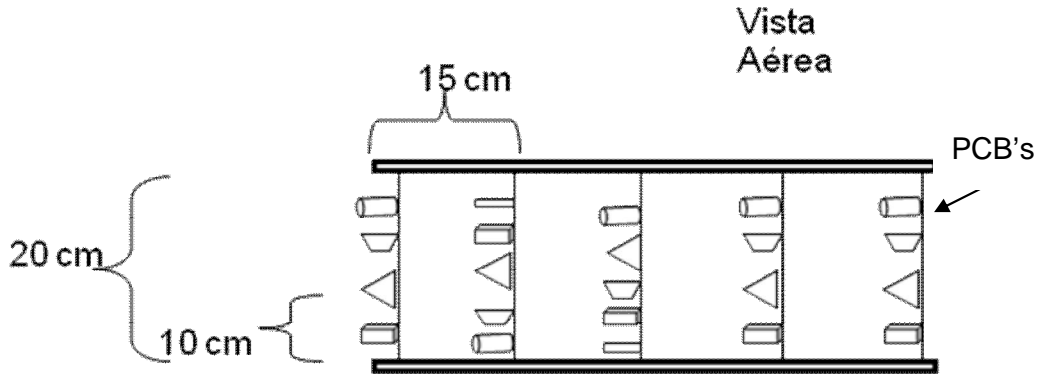


Figura 4.4 Vista aérea de diagrama de sección de alimentación.

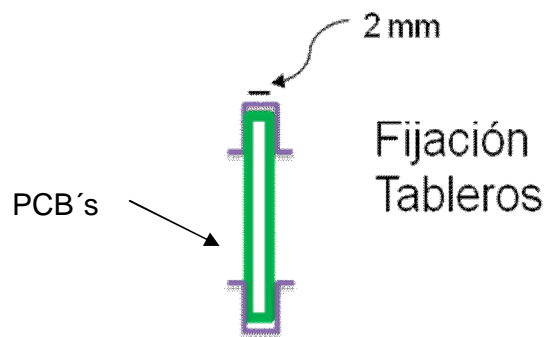


Figura 4.5 Vista aérea de sujetadores de tableros electrónicos.

4.1.4 SECCIÓN DE FUSIÓN Y EXTRACCIÓN DE SOLDADURA

Al entrar los PCB's a la sección de fusión y extracción de soldadura, los PCB's se someten a temperatura de 200 a 230 °C (figura 4.6), con un tiempo de exposición dentro de horno de 3 minutos (de acuerdo al capítulo II Experimentación).

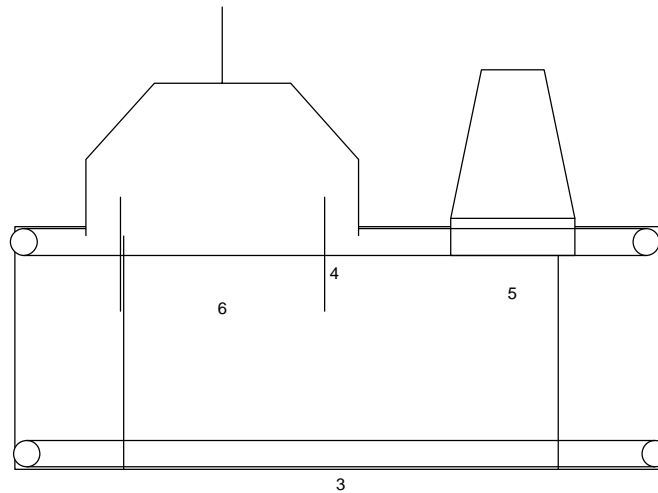


Figura 4.6 Diagrama de Sección de Fusión y Extracción

El riel 4 vibra, para favorecer la extracción de soldadura, la cual escurre por gravedad y los circuitos van cayendo a la banda transportadora (figura 4.7), al finalizar el recorrido a lo largo del horno 6, los PCB's, se someten a aire caliente generado en la tobera, con una temperatura de 200 °C para lograr extraer los últimos residuos de soldadura.

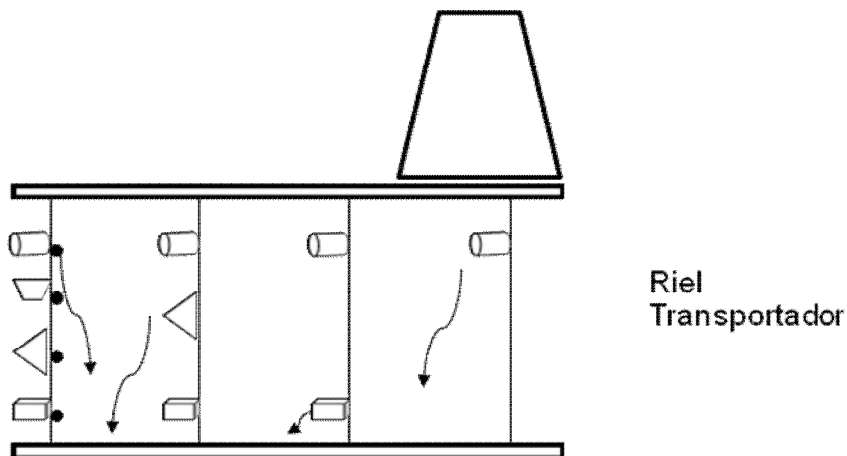


Figura 4.7 Vista aérea riel transportador sección de extracción

Los residuos se colectan en la banda transportadora (figura 4.8).

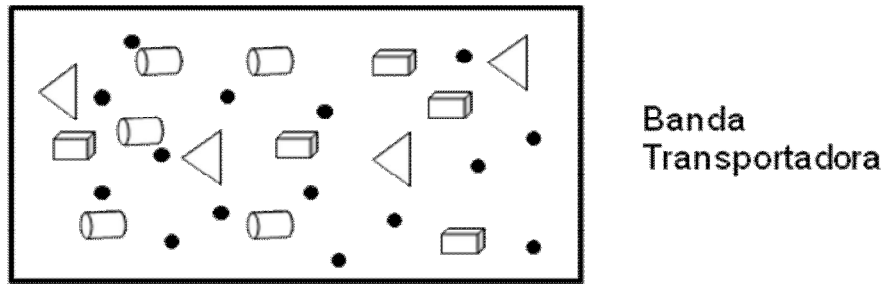


Figura 4.8 Vista aérea banda transportadora de sección de extracción

4.1.5 SECCIÓN DE TABLEROS SIN CIRCUITOS

Los PCB's sin circuitos salen en el riel 8 (figura 4.9), los cuales se retiran manualmente y se colocan en la trituradora 12, una vez procesados se depositan en el contenedor 14 (figura 4.10).

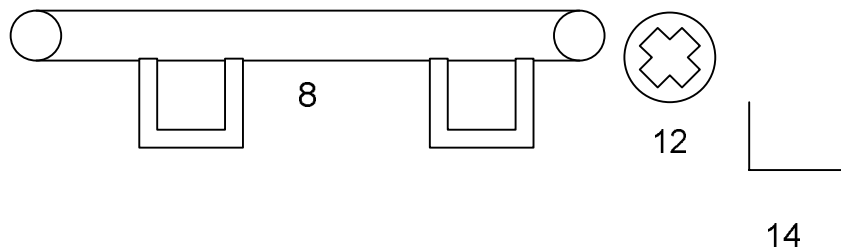


Figura 4.9 Diagrama de Sección de Fusión y Extracción

Tableros
limpios

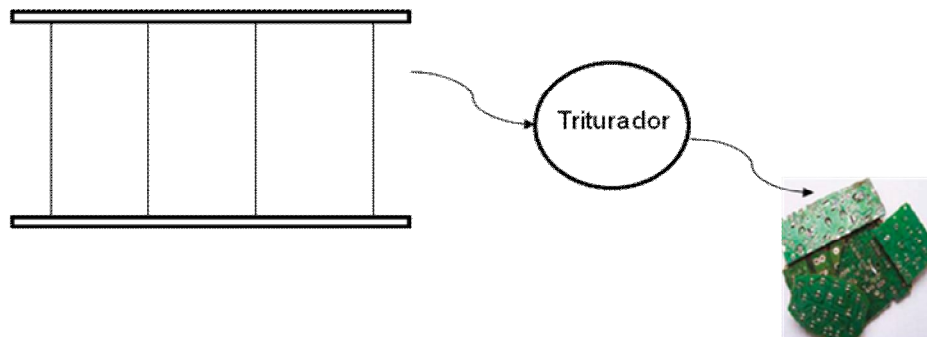


Figura 4.10 Vista aérea tableros limpios

4.1.6 SECCIÓN DE SEPARACIÓN DE SOLDADURA Y CIRCUITOS

Al salir del horno la banda transportadora **11** (figura 4.11), los residuos se someten a aire frío (temperatura ambiente), para favorecer la solidificación de la soldadura (figura 4.12), posteriormente se separa a través del filtro rotatorio y se depositan en el contenedor **13**. Los circuitos se trituran en el equipo **12** y se recolectan en el contenedor **15** (ver figura 4.11 y 4.12).

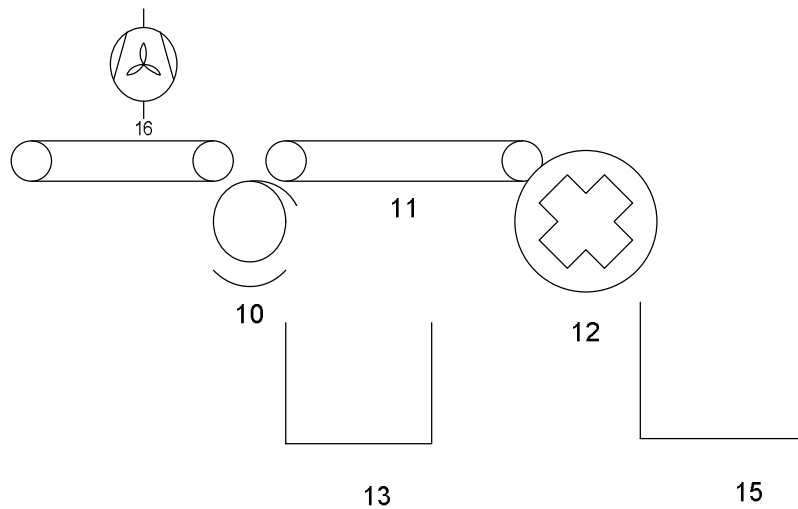


Figura 4.11 Diagrama de Sección de Separación de Soldadura y Circuitos electrónicos.

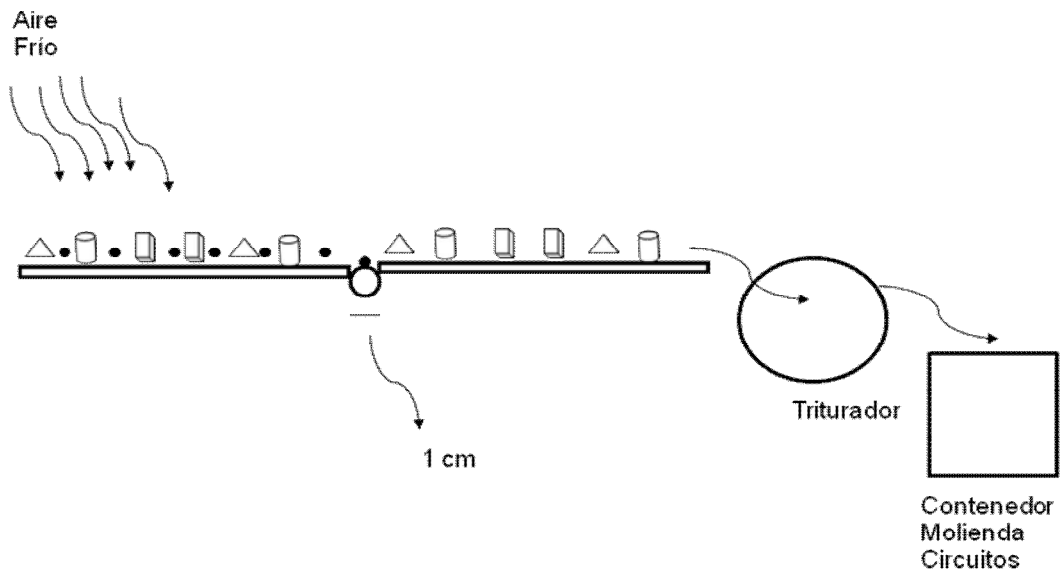


Figura 4.12 Separación de Soldadura y Circuitos Electrónicos

.

Con el proceso, se separaría la soldadura base plomo, circuitos y tableros. Cabe señalar que este proceso se debe someter a una prueba piloto, para ajuste y prueba de las condiciones de operación de temperatura, tiempos, velocidades y dimensiones de accesorios.

Puede haber varias alternativas para la disposición final de los residuos obtenidos, las cuales se tendría que verificar su viabilidad:

- ✓ Algunos circuitos electrónicos, una vez separados pueden clasificarse y reusarse como los transformadores, reactores, etc.
- ✓ Los residuos triturados se pueden someter a otro proceso para separar metales como oro, plata, cobre, etc.
- ✓ Los tableros limpios de circuitos podrían utilizarse para generar energía a través de la incineración controlada de estos, etc.

Por último, es importante mencionar que este proceso propuesto no es exclusivo para extraer soldadura estaño-plomo, pues es tan versátil, que se puede utilizar para extraer otro tipo de soldadura como estaño-plata, u otros.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

1. Separar y extraer de soldadura de los tableros de circuitos electrónicos de monitores de computadora.

Se logró separar y extraer la soldadura de PCB's de monitores fabricados antes del 2006 de marcas estudiadas Siemens, Samsung, Apple y Sgi.

2. Encontrar las fases presentes en la soldadura en los tableros de circuitos electrónicos.

Se identificaron las fases presentes en la soldadura de los PBC's, a través de la técnica de caracterización de Rayos X (DRX). En base a los 20 patrones de difracción analizando, se determinó, que las reflexiones presentes sólo corresponden a los materiales base (Plomo y Estaño), y no se observaron fases secundarias. Lo cual corresponde a lo que se esperaba.

3. Determinar la microestructura y composición de la soldadura.

Se determinó la microestructura de la soldadura de los PCB's con la técnica de caracterización de microscopía electrónica de barrido (MEB) y se realizó análisis elemental con EDS, por sus siglas en inglés, (Energy Dispersive Spectroscopy). De acuerdo a los resultados obtenidos, se confirmó que las composiciones de las aleaciones utilizadas tienen composiciones de Sn/Pb 60/40 % en peso, Sn/Pb 63/37 % en peso (composición eutéctica) y Sn/Pb 70/30 % en peso.

4. Determinar la temperatura de fusión.

Se determinó la temperatura de fusión de la soldadura con la técnica de caracterización de DSC. Se confirma que las muestras de los lingotes de los PCB's, utilizan soldadura de Estaño-Plomo con temperatura de fusión eutéctica. Por lo tanto, ésta se tomará como referencia para el control de temperatura del prototipo del proceso propuesto.

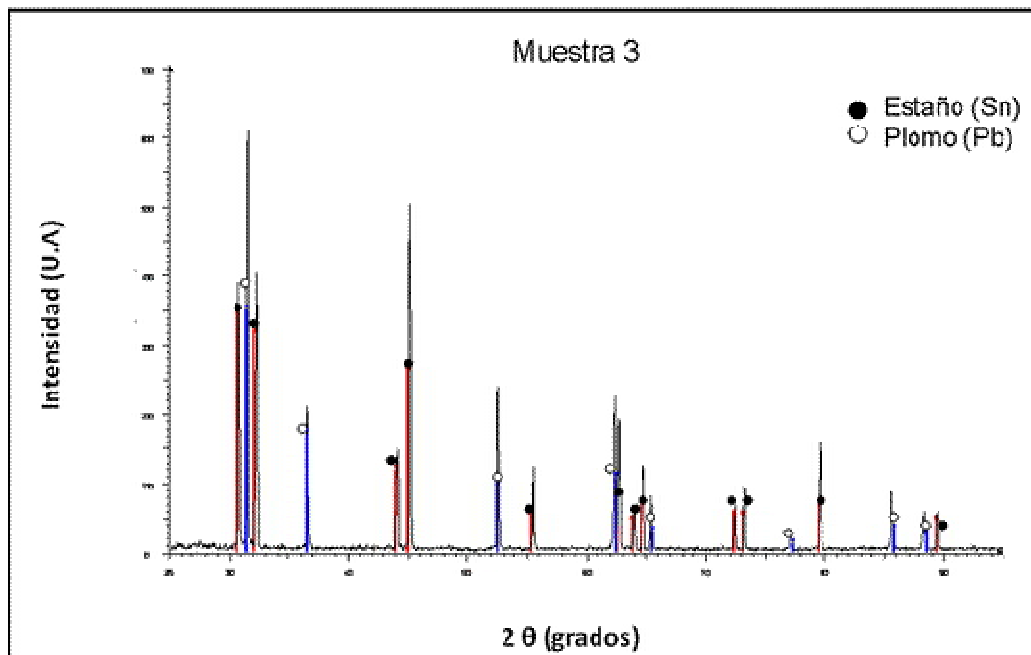
5. Dar una respuesta, a un problema global, en donde la Ciencia Básica se amalgame con la industrial, para proponer una solución ambientalmente segura.

Se planteó un proceso para realizar la extracción de la soldadura en serie con las condiciones de operación obtenidas de las técnicas de caracterización de rayos X, microscopia electrónica de barrido, análisis elemental (composición) EDS y calorimetría diferencial de barrido. Cabe mencionar que este proceso es versátil y puede utilizarse para extraer otro tipo de soldadura como estaño-plata u otras, tan sólo con cambiar las condiciones de operación. Ya que, se utilizó como base en este estudio los monitores de PBC's, que contienen estaño-plomo los cuales constituyen una pequeña parte de la basura electrónica. Sin embargo, existe una gran área de oportunidad, puesto que los CPU's, impresoras, teclados y accesorios de PC, la línea de audio y TV, así como la línea blanca representan, sin duda otro tanto equivalente en volumen y cantidades. La tendencia hacia productos 'inteligentes' hace que de modo creciente muchos otros productos como autos, contengan cada día más tableros de circuitos electrónicos.

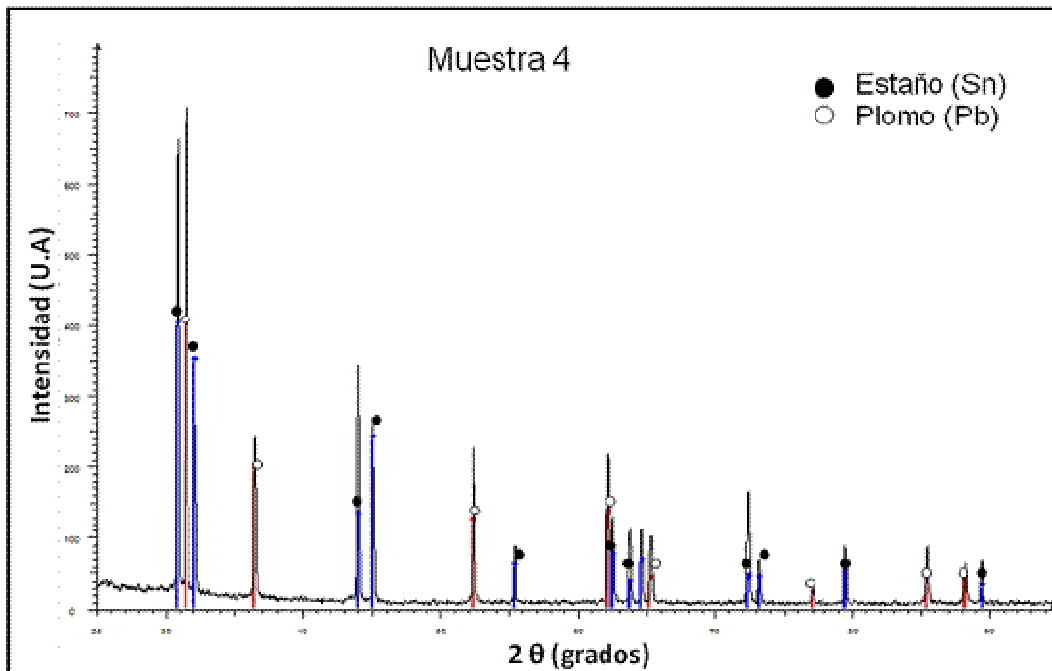
APÉNDICE

DIFRACTOGRAMAS

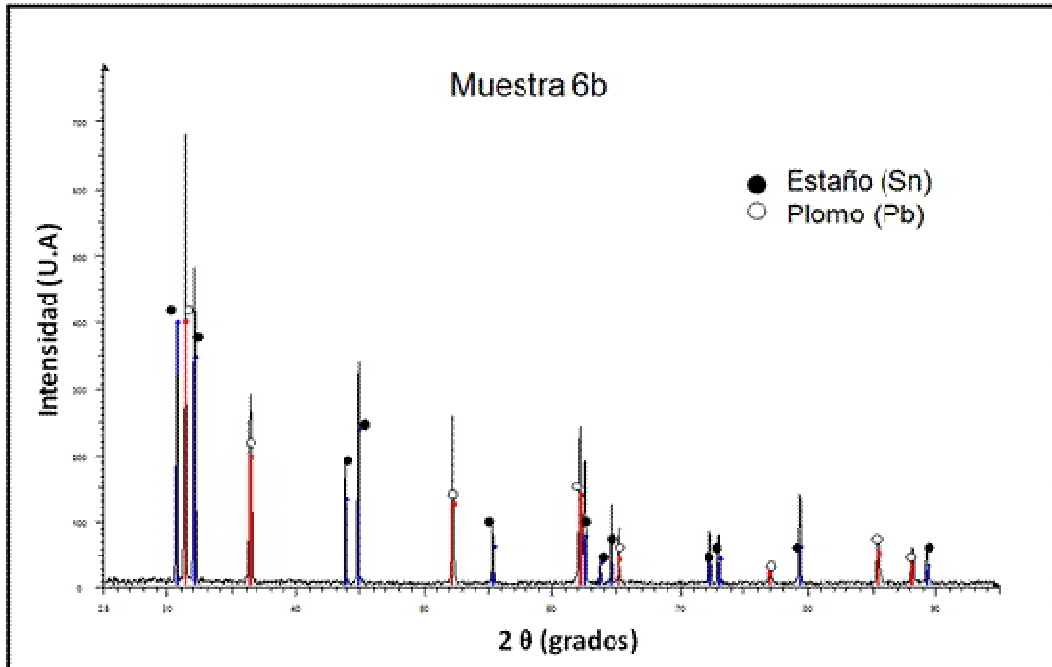
Muestra 3



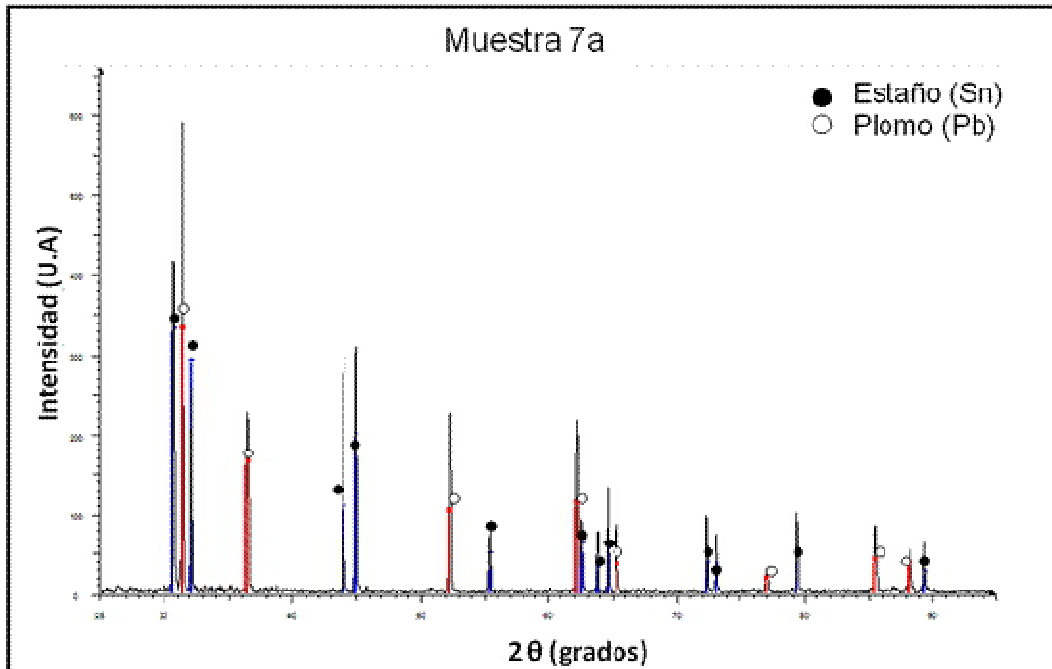
Muestra 4



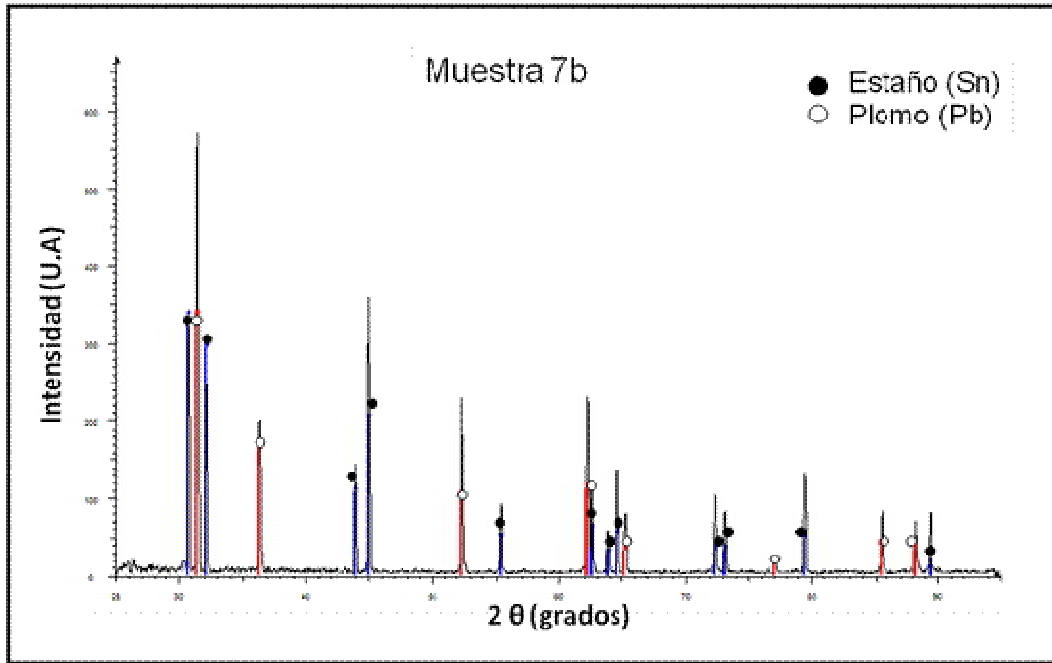
Muestra 6b



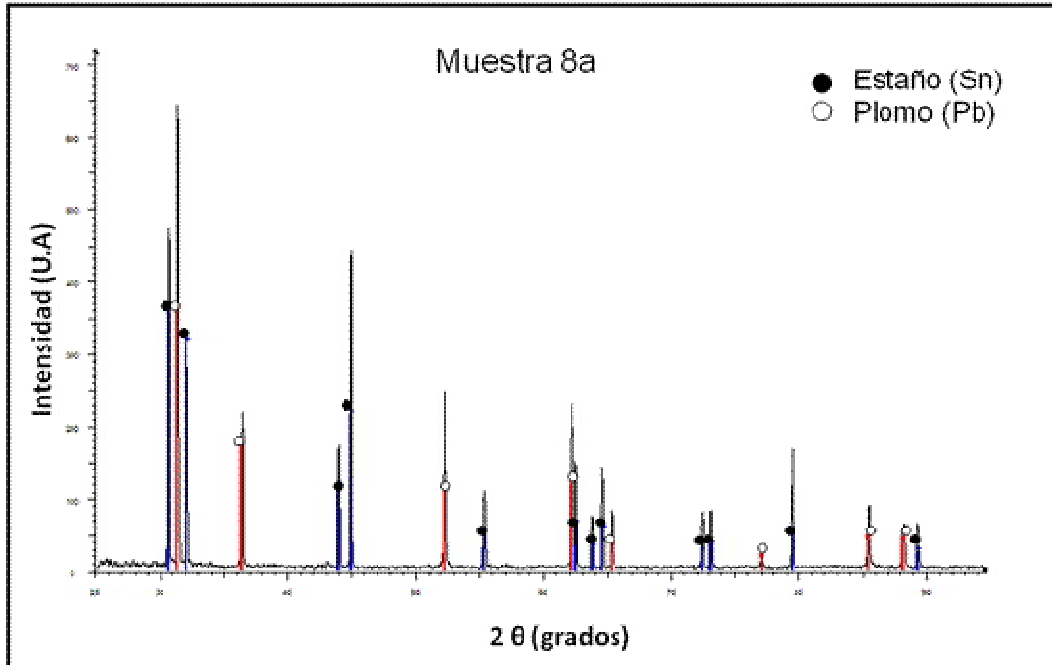
Muestra 7a



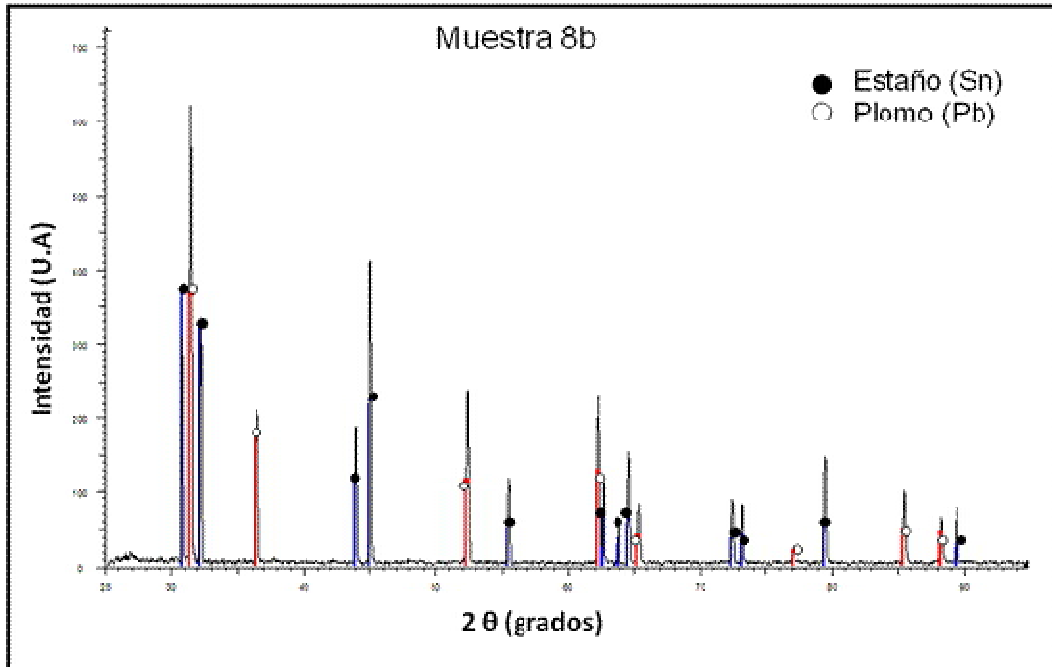
Muestra 7b



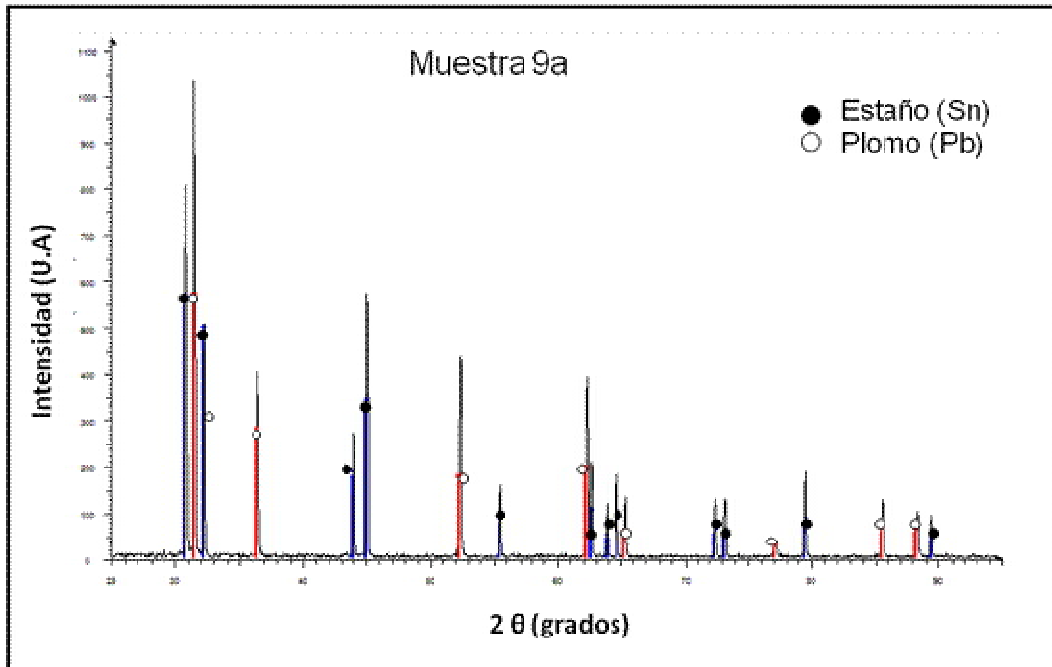
Muestra 8a



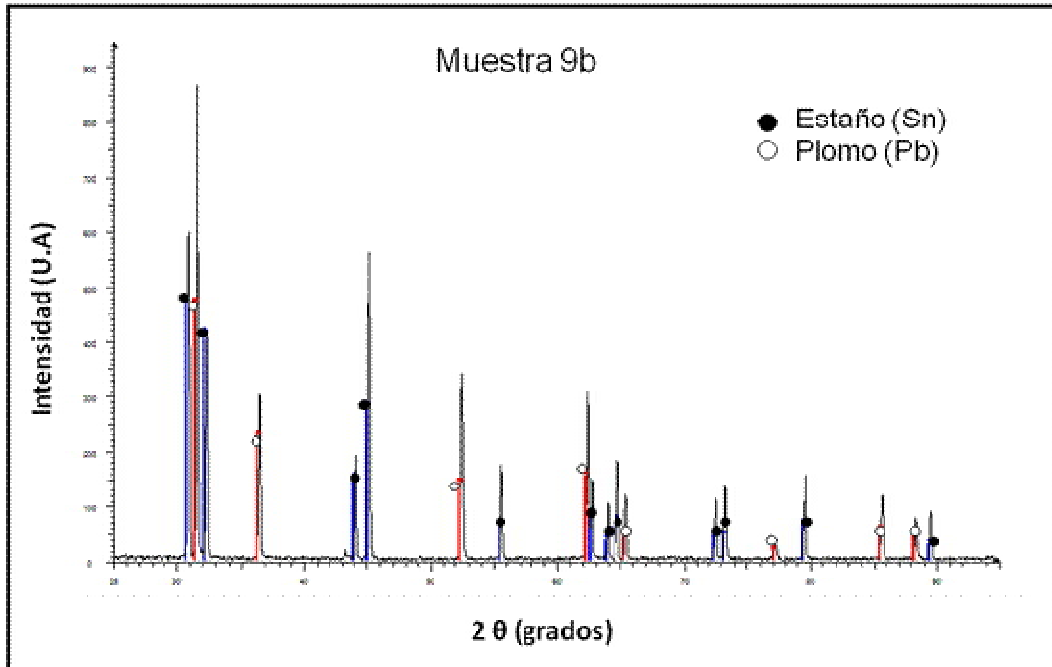
Muestra 8b



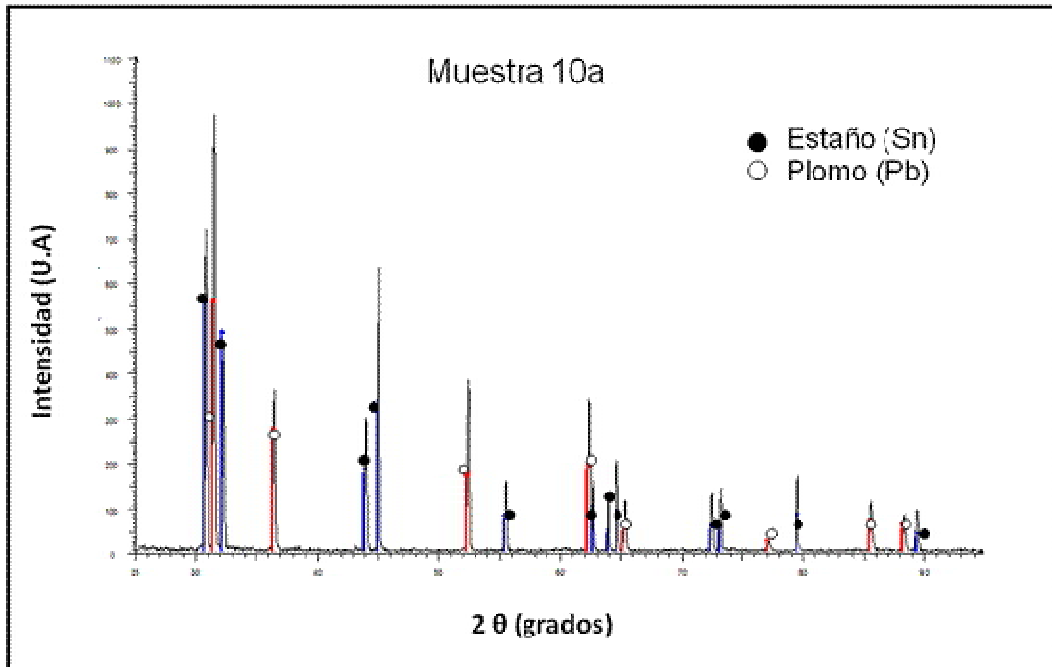
Muestra 9a



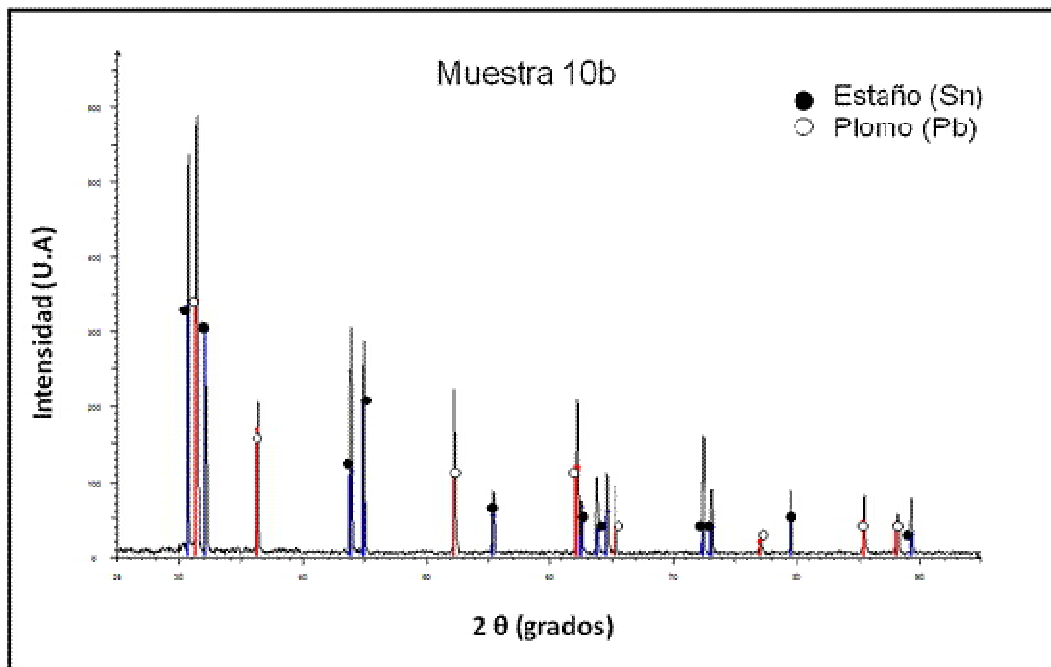
Muestra 9b



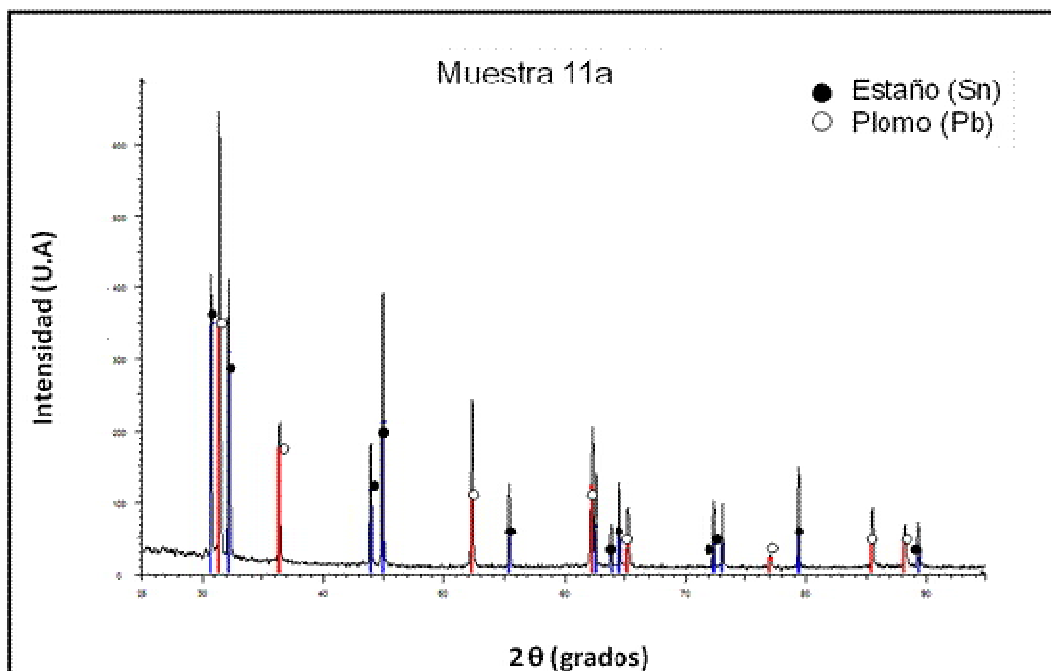
Muestra 10^a



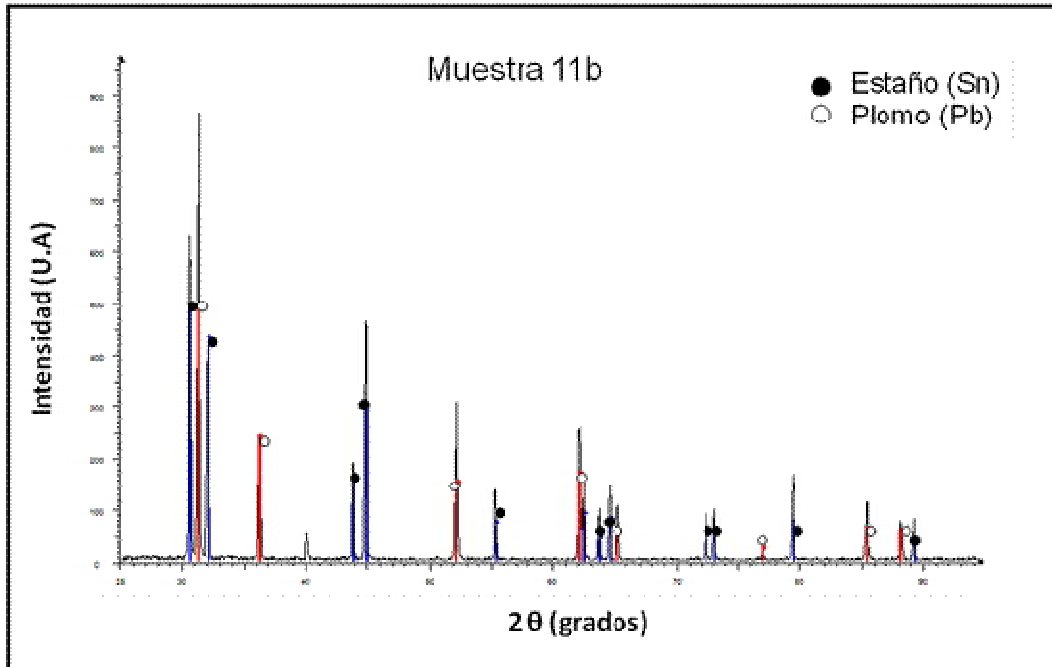
Muestra 10^a



Muestra 11^a

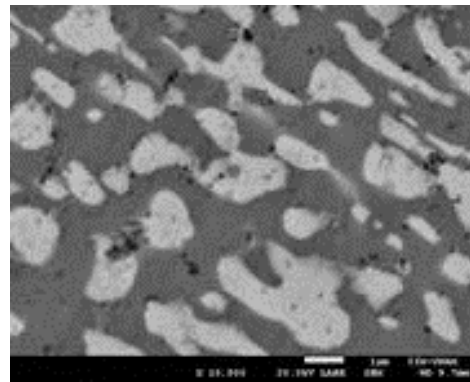
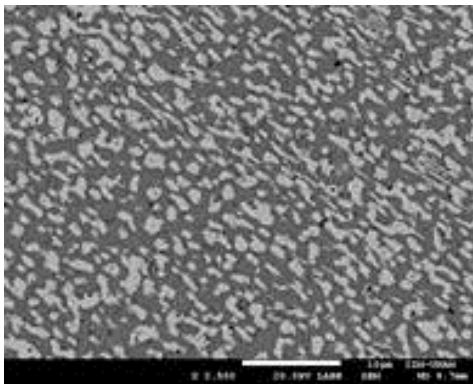


Muestra 11b

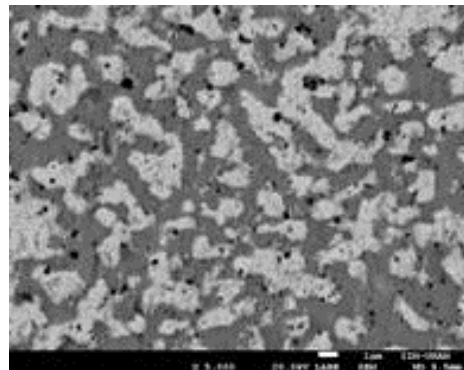
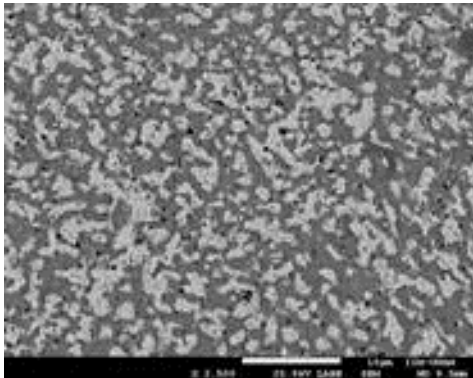


MICROGRAFÍAS

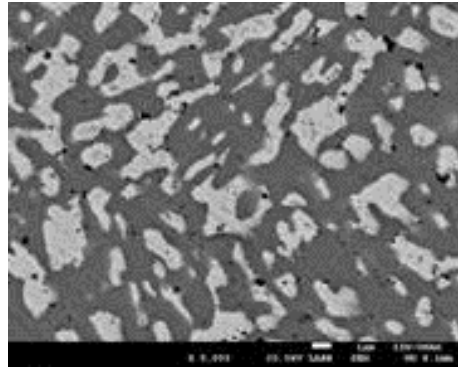
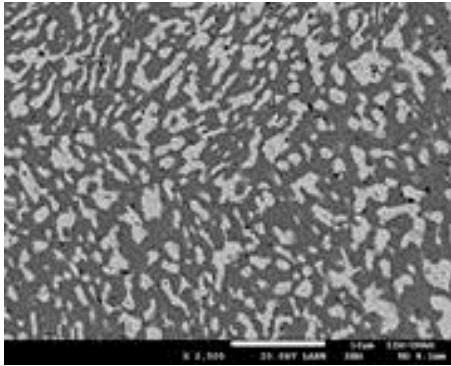
Muestra 3



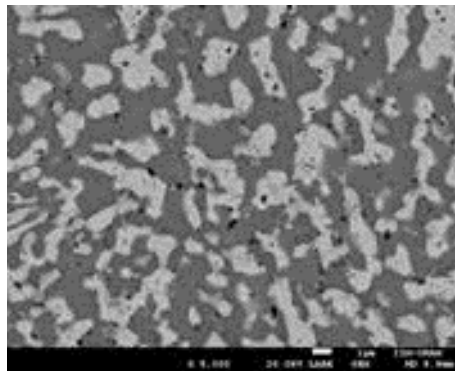
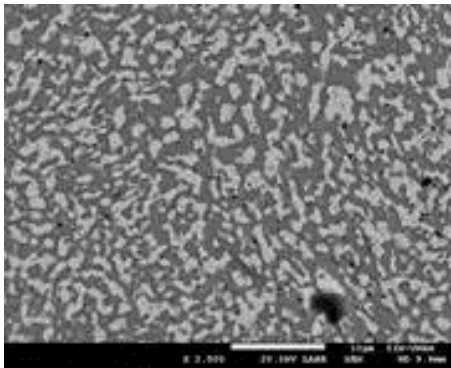
Muestra 4



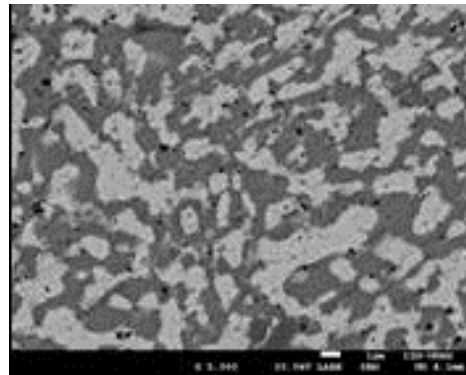
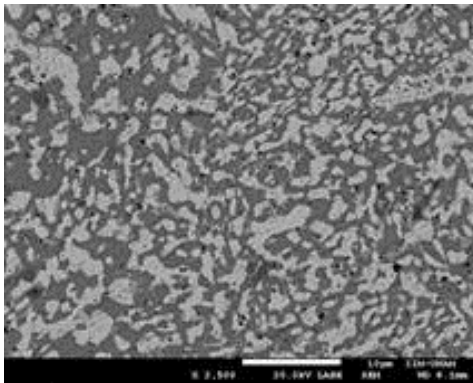
Muestra 5a



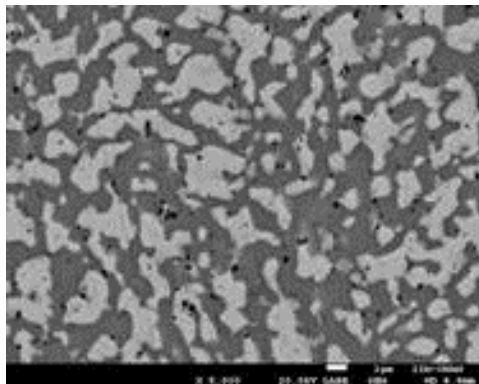
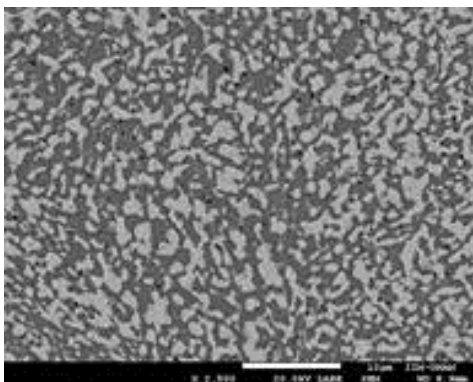
Muestra 5b



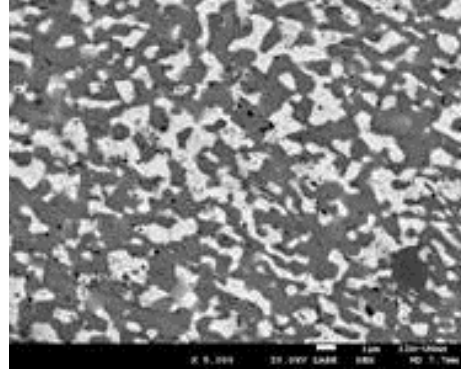
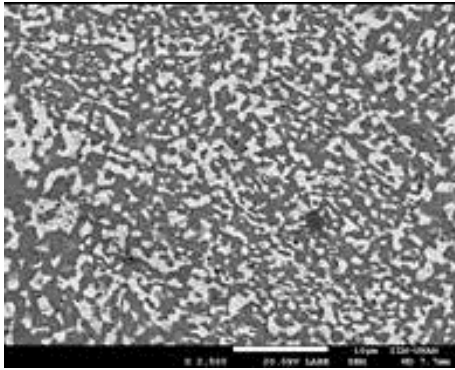
Muestra 6a



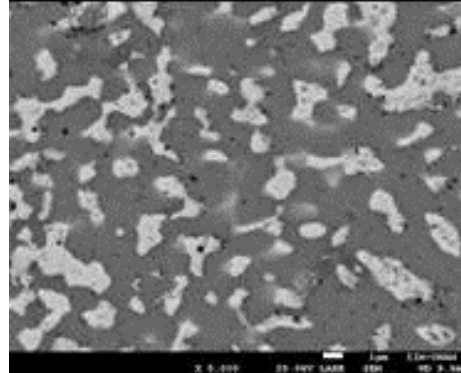
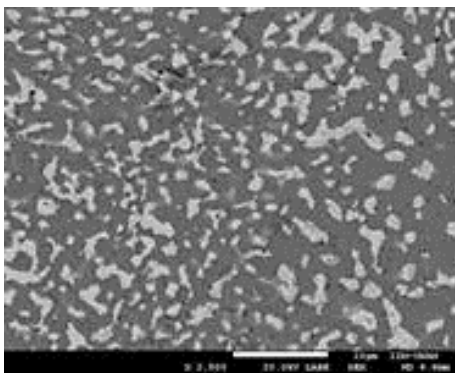
Muestra 6b



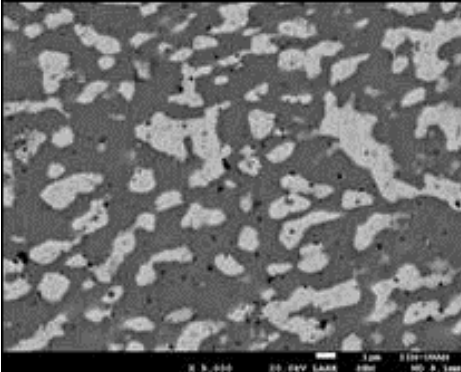
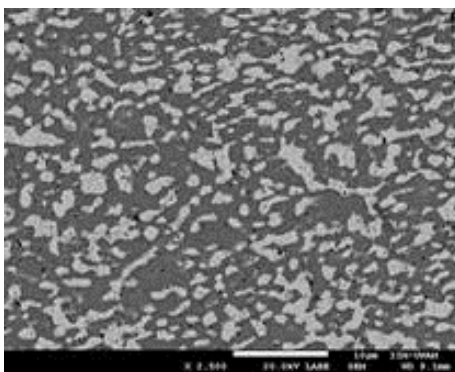
Muestra 6c



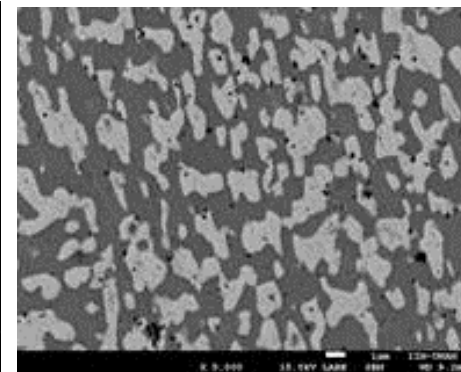
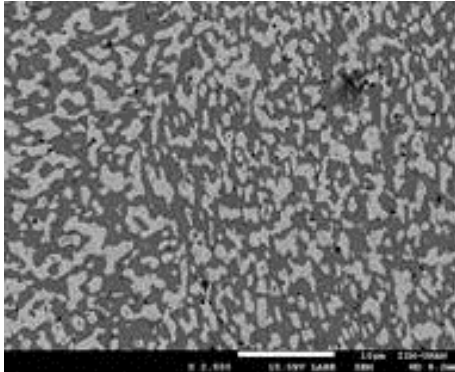
Muestra 6d



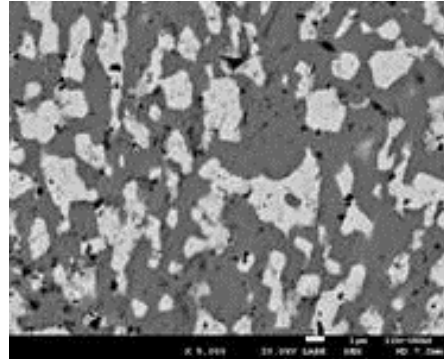
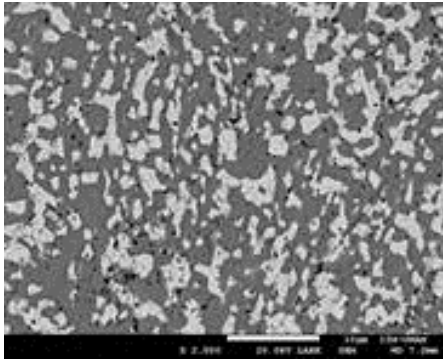
Muestra 7^a



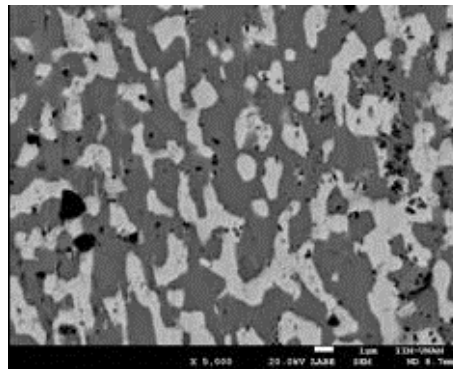
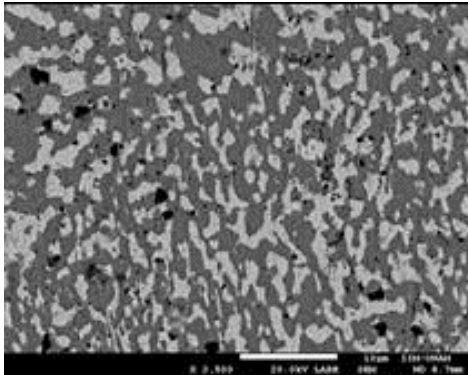
Muestra 7b



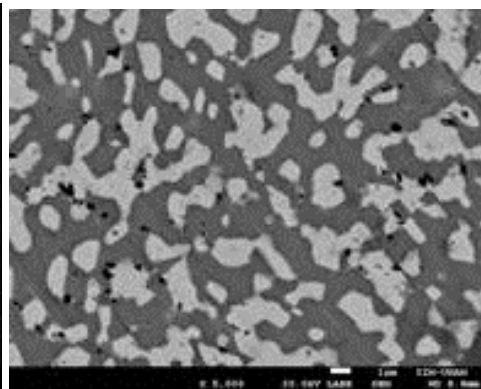
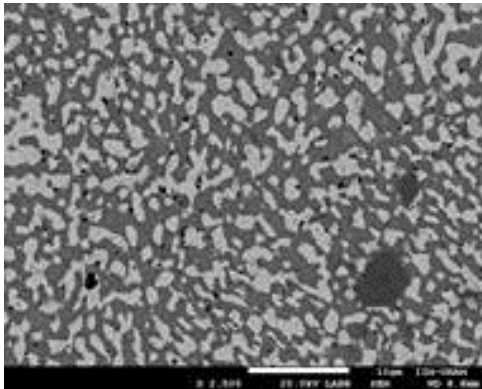
Muestra 8^a



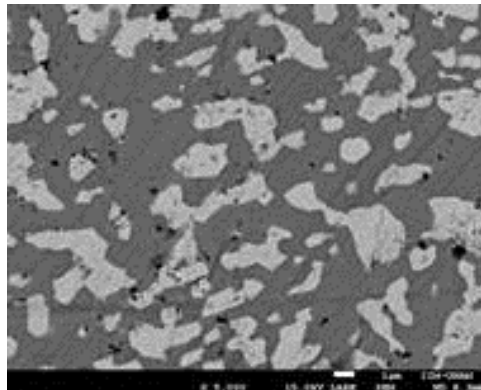
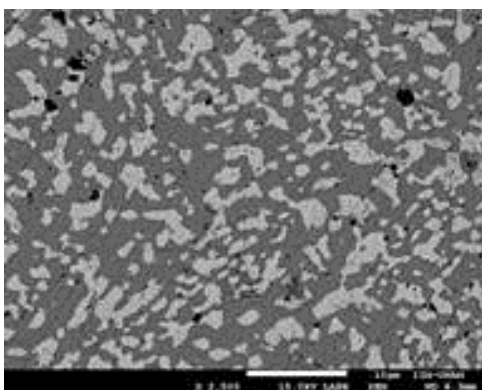
Muestra 8b



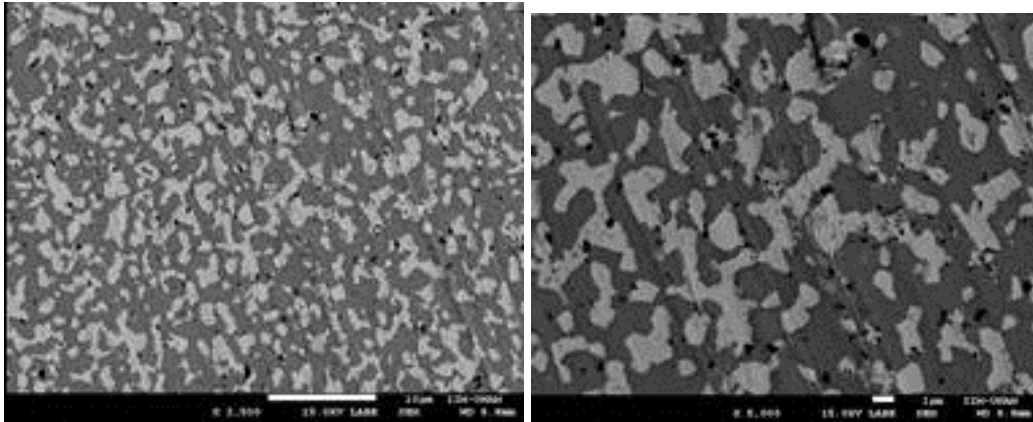
Muestra 9a



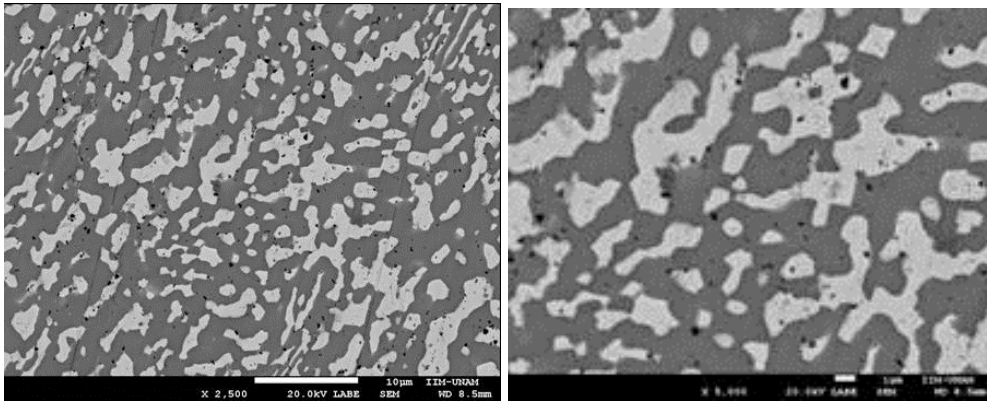
Muestra 9b



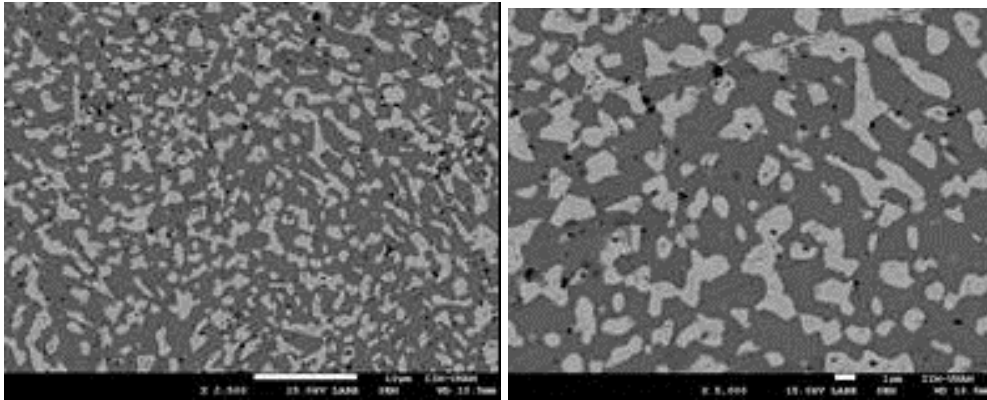
Muestra 10^a



Muestra 11^a

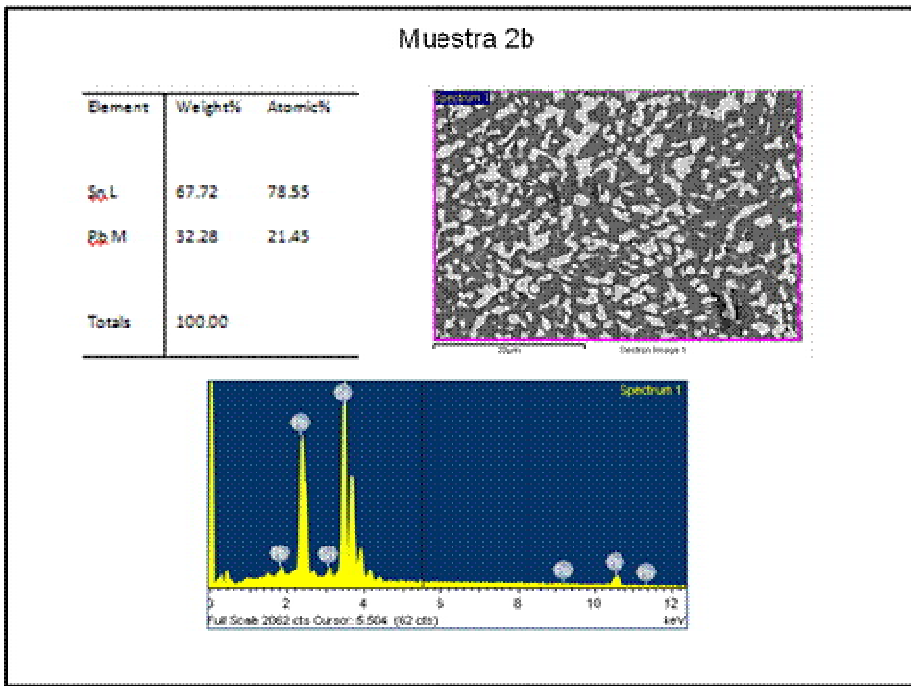


Muestra 11b

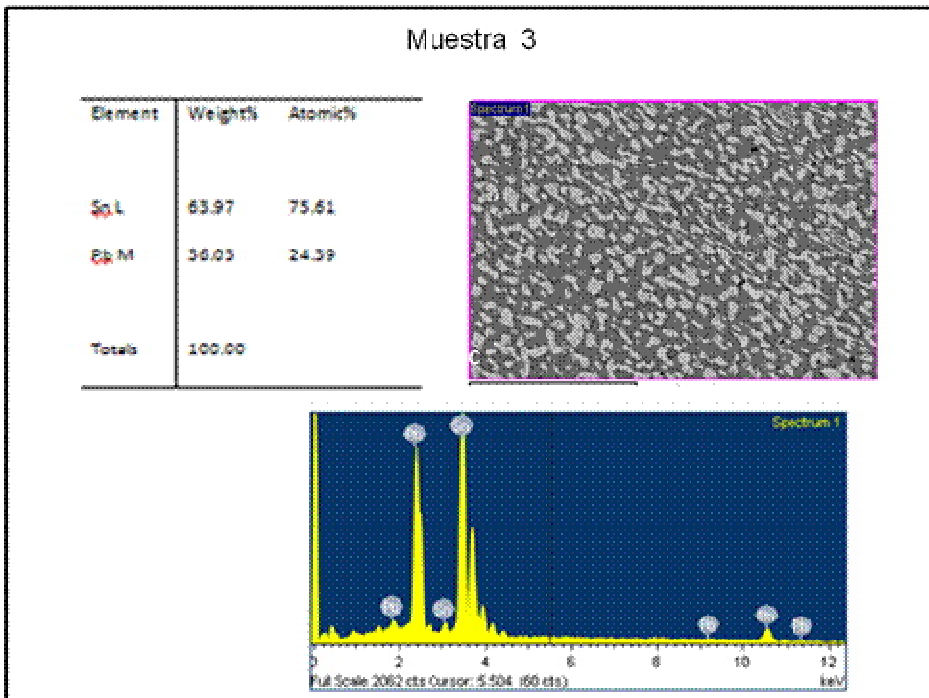


EDS

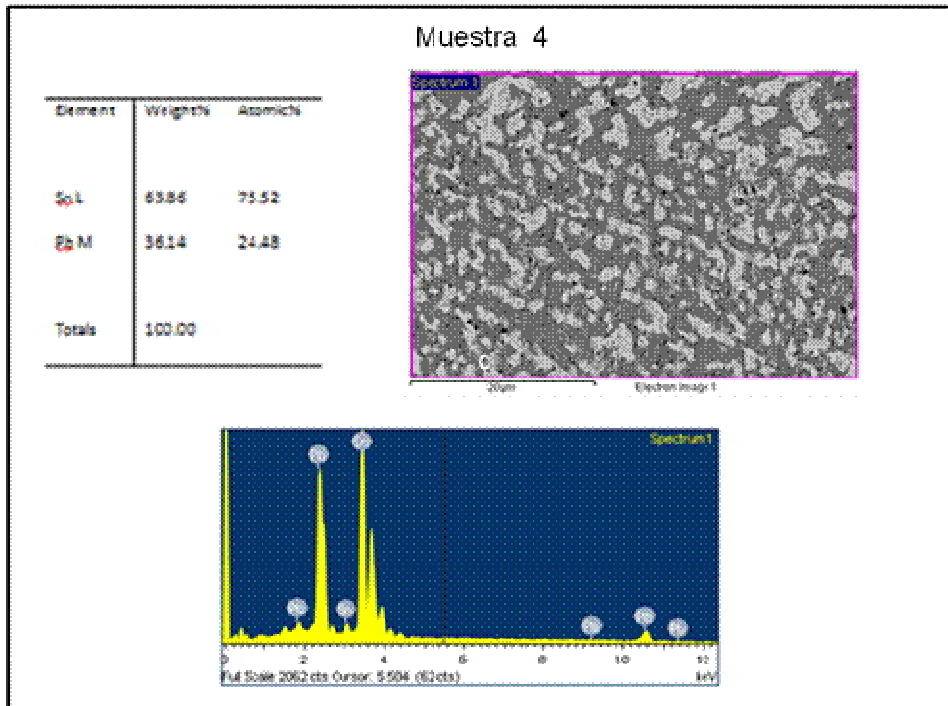
Muestra 2b



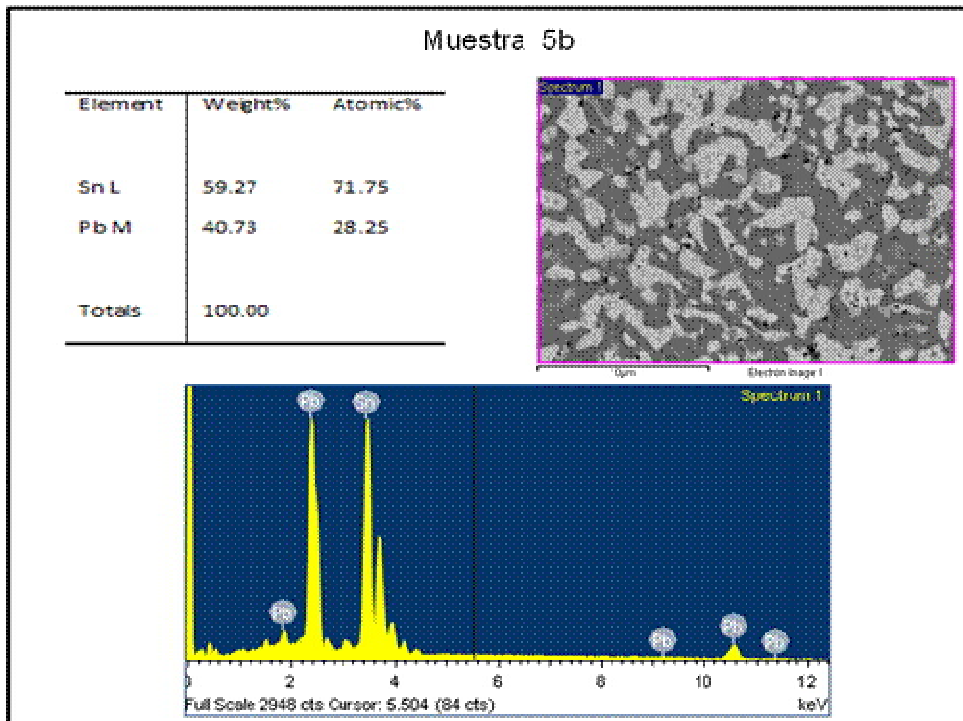
Muestra 3



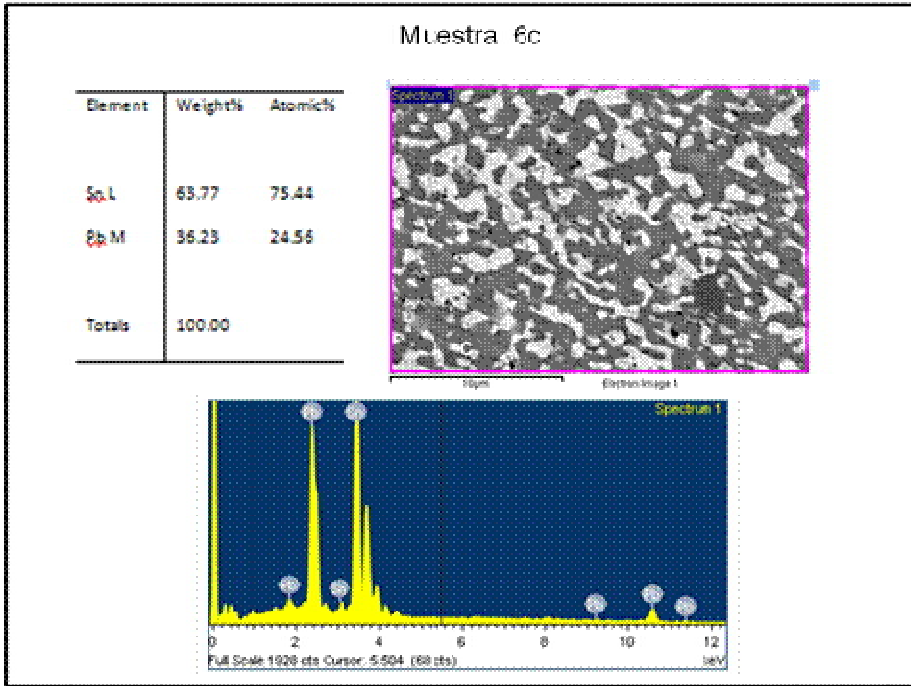
Muestra 4



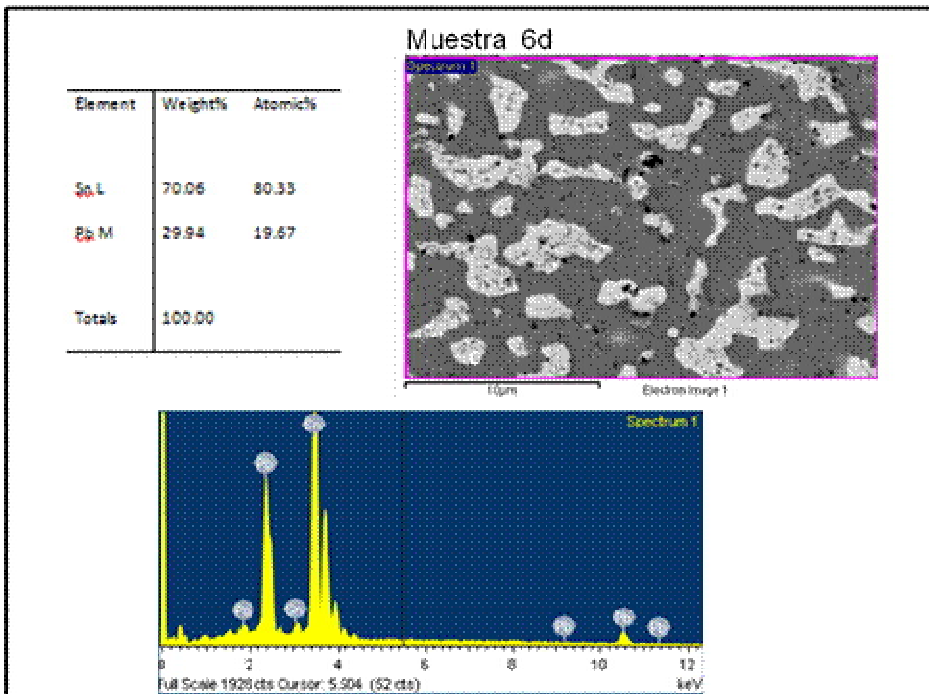
Muestra 5b



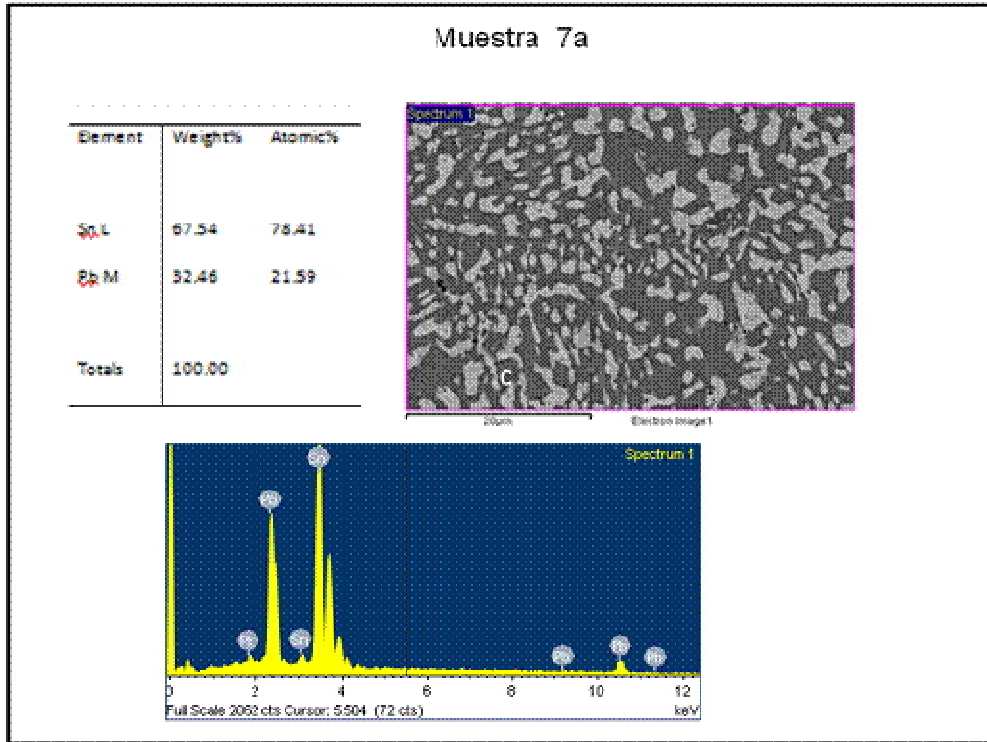
Muestra 6c



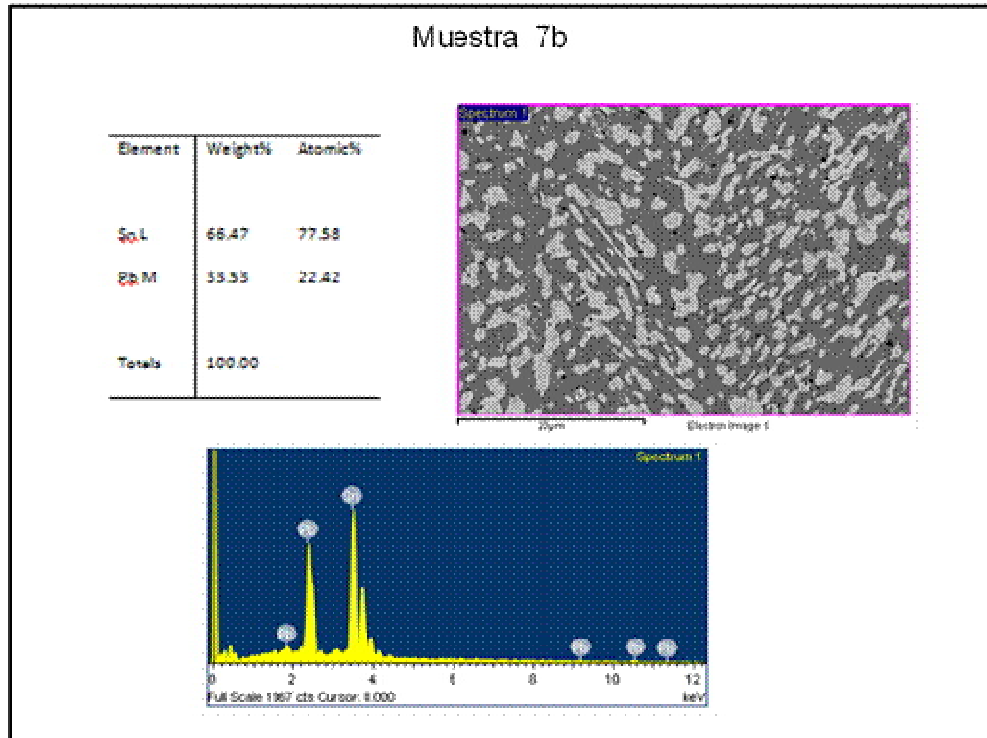
Muestra 6d



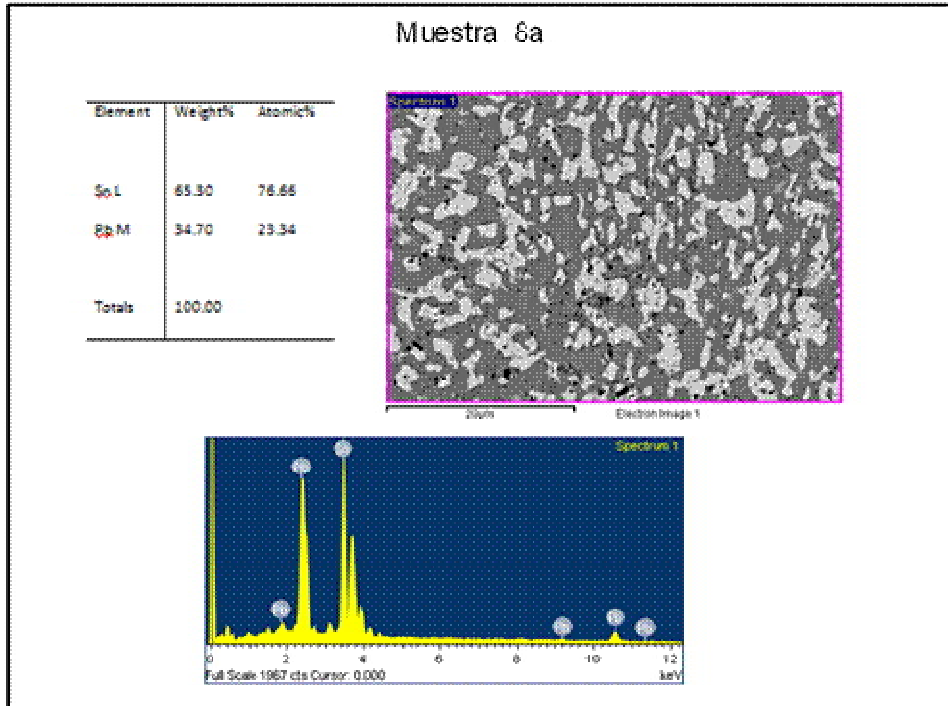
Muestra 7^a



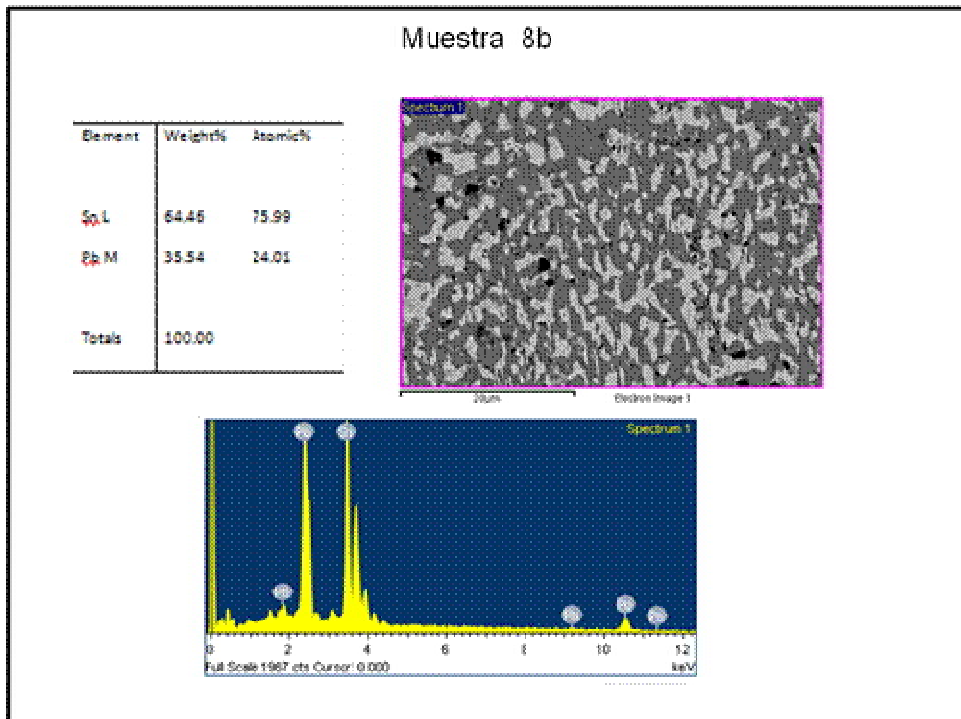
Muestra 7b



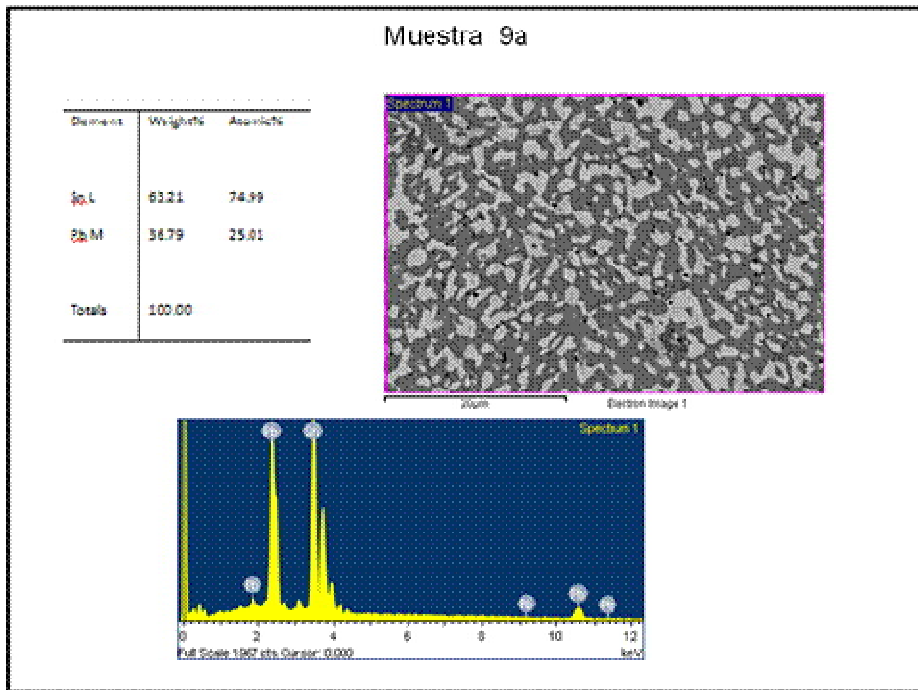
Muestra 8^a



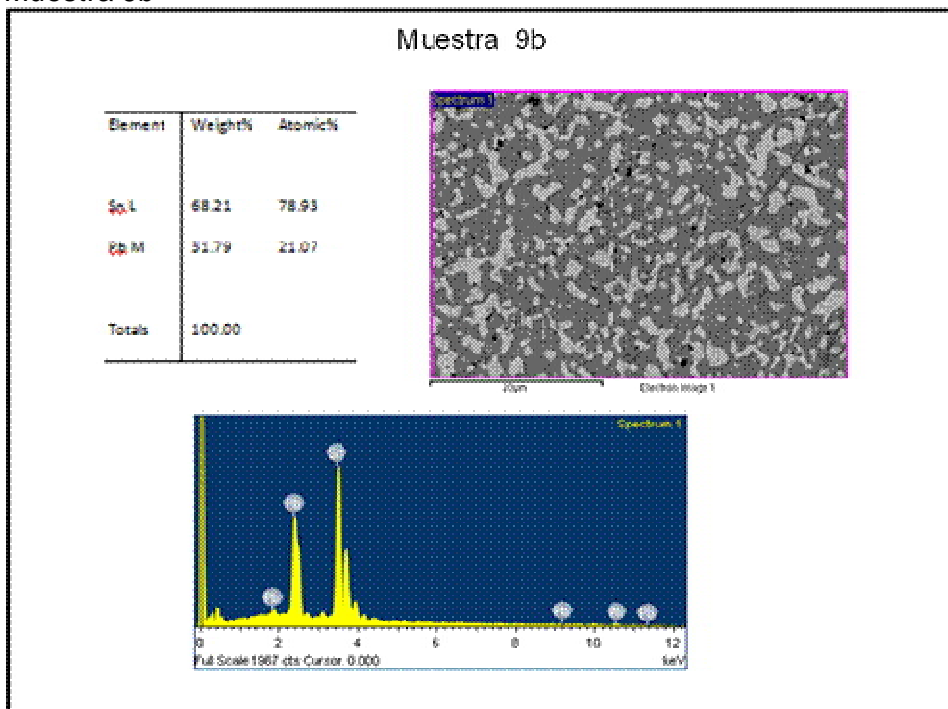
Muestra 8b



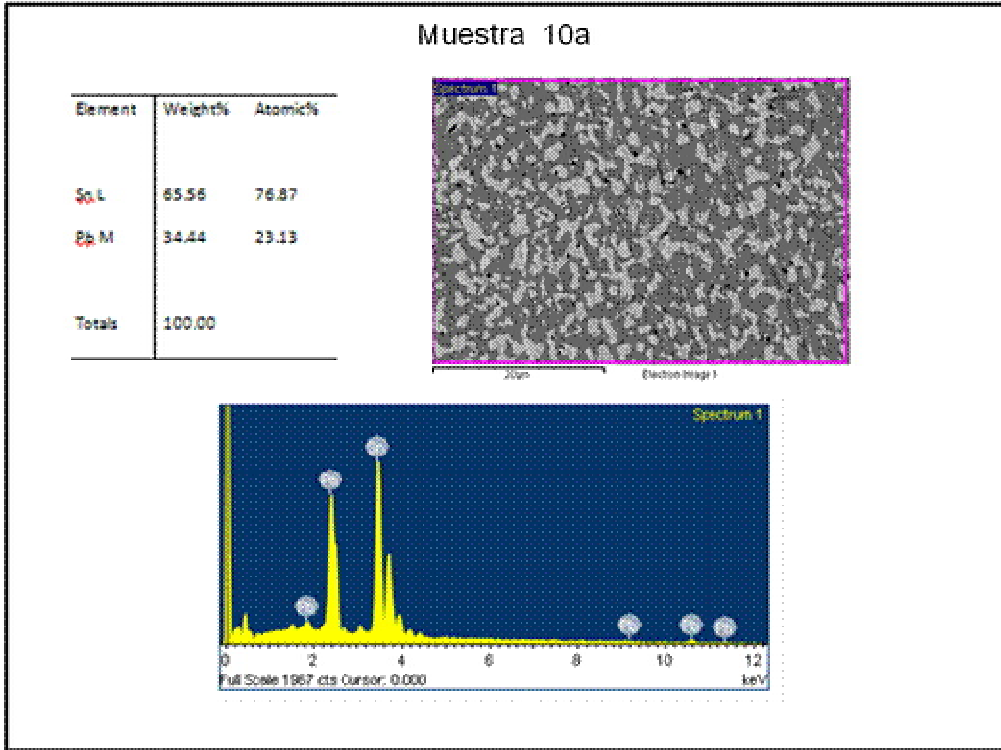
Muestra 9^a



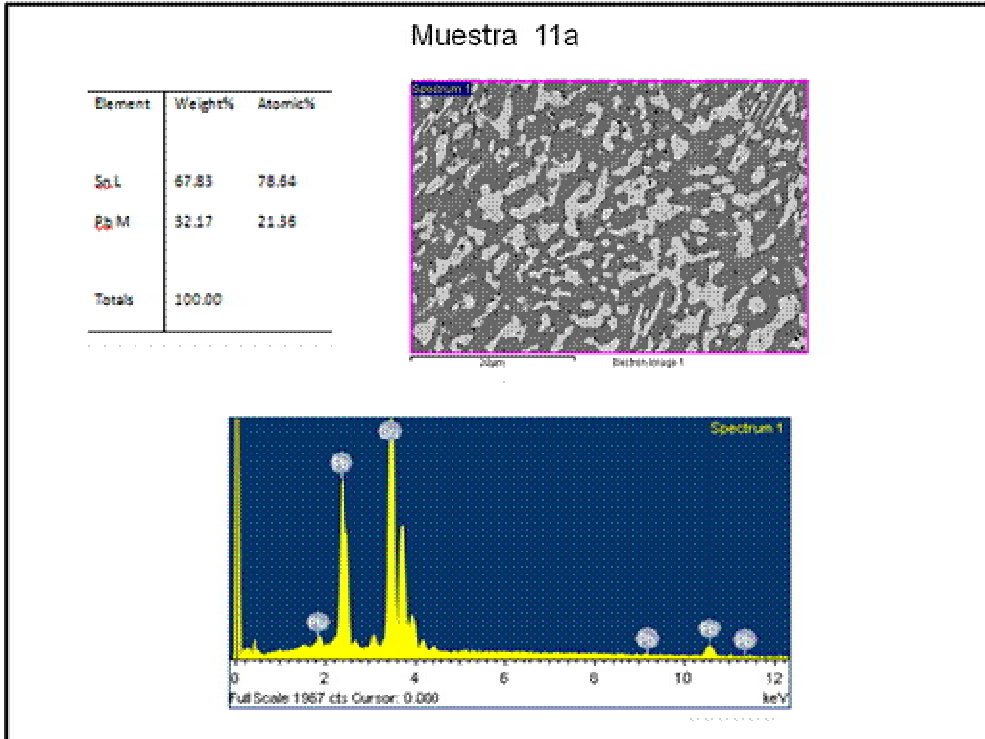
Muestra 9b



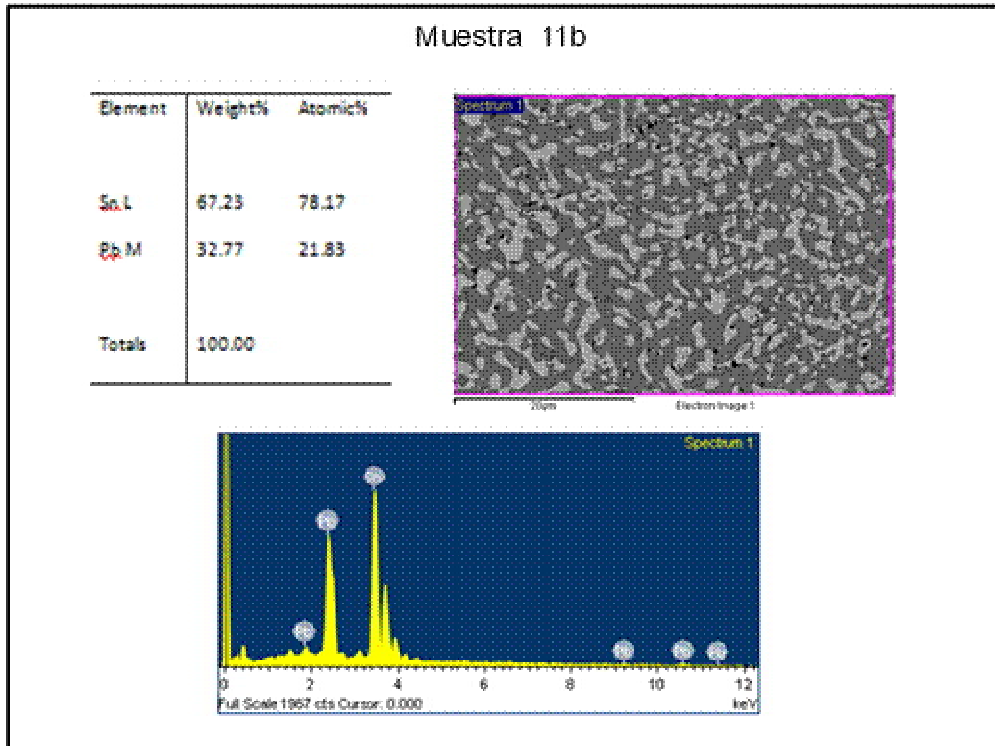
Muestra 10^a



Muestra 11^a

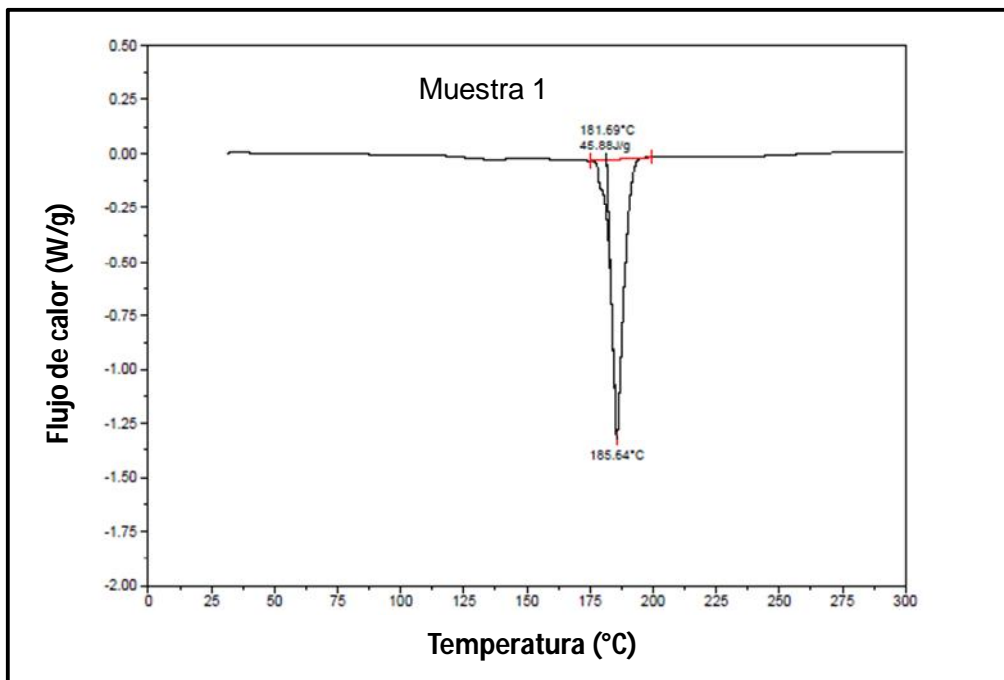


Muestra 11b

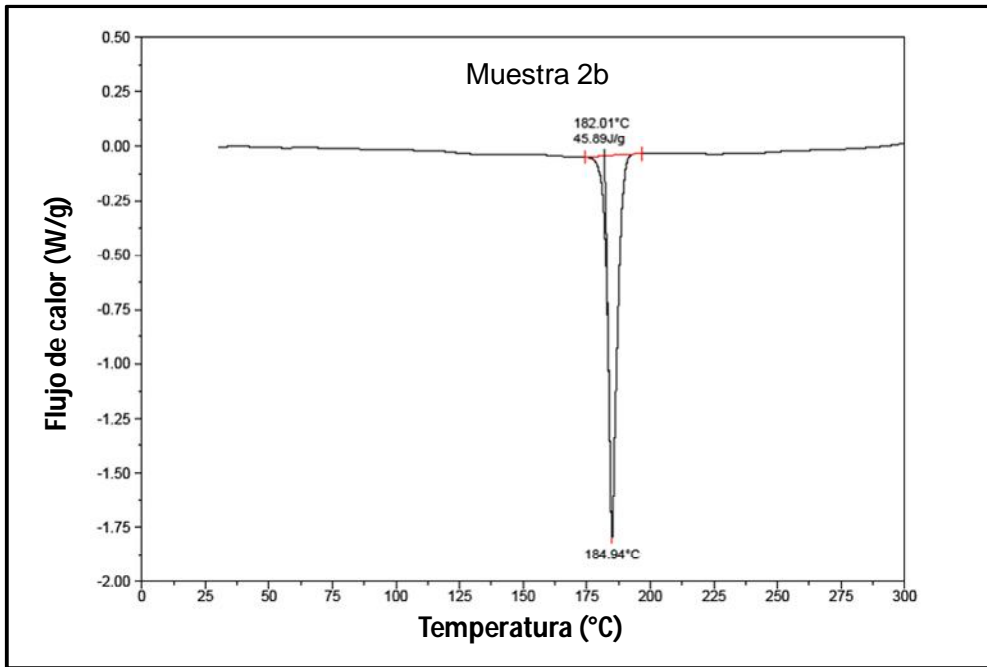


TERMOGRAMAS

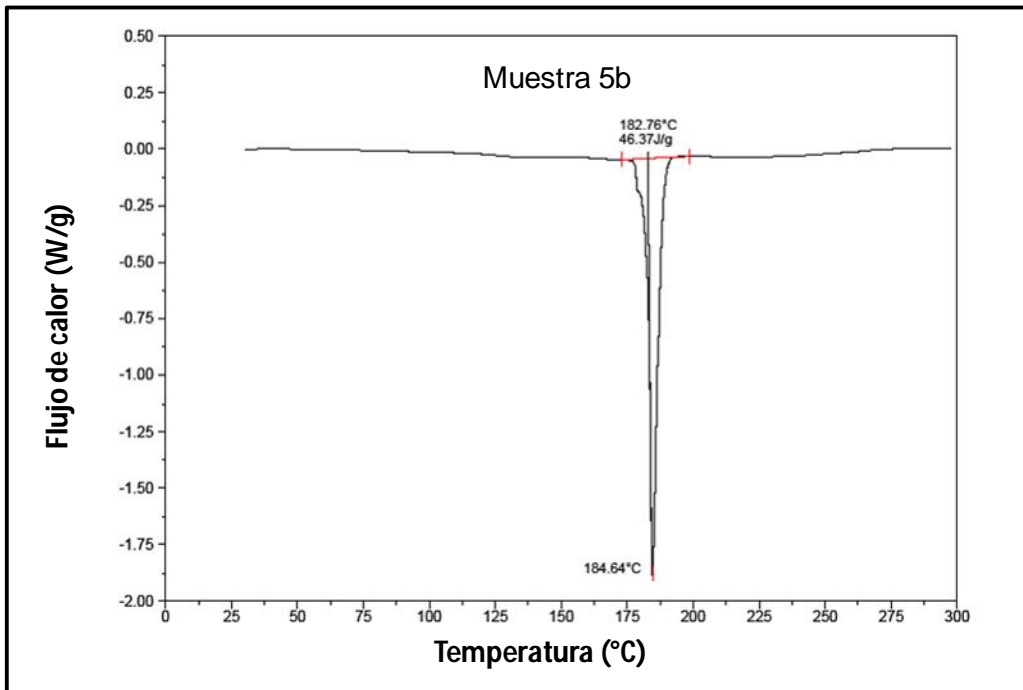
Muestra 1



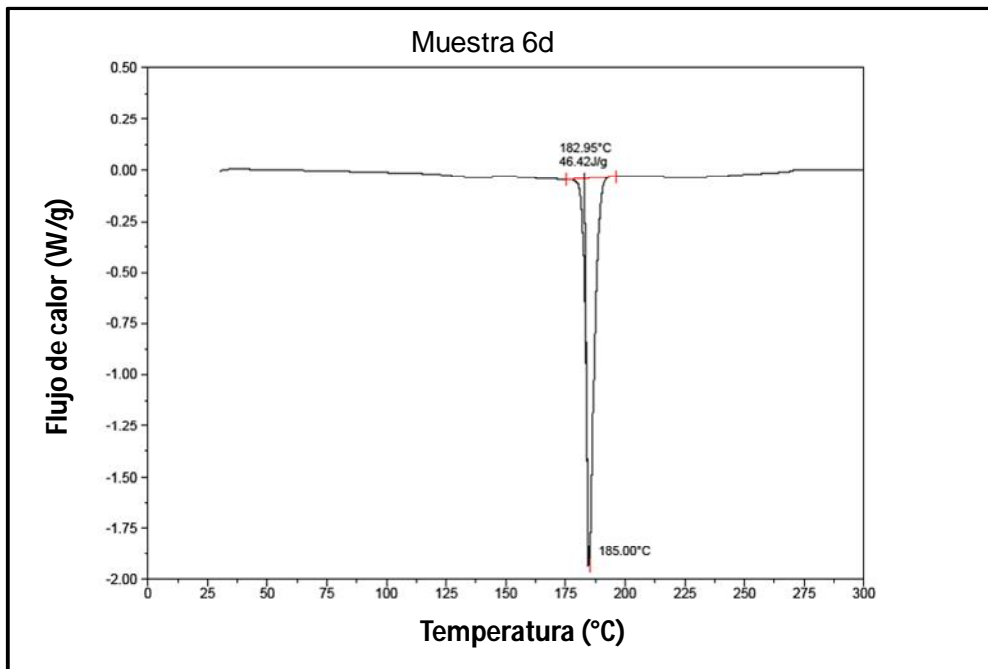
Muestra 2b



Muestra 5b



Muestra 6d



BIBLIOGRAFÍA

1. Unidos Carroll, C. (2007). Basura Tecnológica. National Geographic en Español. <http://ngen espanol.com/2007/12/31/basuratecnologica/>.
2. www.unesco.org/uy/ci/fileadmin/.../LibroE-Basura-web.pdf
3. M. Khurram S. Bhutta, Adnan Omar, y el Yang Xiaozhe, "Residuos Electrónicos: una preocupación creciente en el entorno actual," *Investigaciones de Economía Internacional*, vol. 2011, Artículo ID 474230, de 8 páginas, 2011. doi: 10.1155/2011/474230 <http://www.hindawi.com/journals/econ/2011/474230/>
4. US EPA, Statistics in the Management of Used and End of Life Electronics, 2008.
5. EPA, *Electronics Waste Management in the United States Approach 1 Final*, Office of Solid Waste US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, 2008, <http://www.epa.gov/epawaste/conservation/materials/ecycling/docs/app-1.pdf>
6. Greenpeace International: Your Guide to Greener Electronics, 2006. <http://www.greenpeace.org/international/news/greenelectronics-guide-ewaste250806> (verificado: 02.04.2010) Greenpeace Internacional.
7. D. Sinha-Khetriwal, Kraeuchi P. y R. Widmer, " La responsabilidad del productor para la gestión de los residuos electrónicos: cuestiones clave para la consideración del aprendizaje de la experiencia suiza , " *Journal of Environmental Management*, vol. 90, no. 1, pp 153-165, 2009.
8. Böni, H.: Proyectos e iniciativas latinoamericanas para la gestión de residuos electrónicos. Un análisis transversal, Sustec – MPA, 2009. http://www.residuoselectronicos.net/archivos/boletin/PLATAFORMA_RELAC_BOLETIN17_diciembre2009.html
9. Instituto Nacional de Ecología (2006). Residuos electrónicos. www.ine.gob.mx/sqre-estudios
10. http://www.obras.df.gob.mx/?page_id=85
11. <http://mexico.cnn.com/planetacnn/2010/12/10/la-basura-electronica-de-la-ciudad-de-mexico-es-una-mina-de-oro>

-
12. www.atsdr.cdc.gov/es/es_glossary.html - Estados
 13. www.ciceana.org.mx Tratados Internacionales
 14. LENNTECH. Plomo: Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. <http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Pb.htm>, 25 de marzo de 2006
 15. Shinitman, N. Metales pesados, ambiente y salud. [http://www.ecoportel.net/contenido/temas_especiales/contaminacion/metales_pesados_ambiente_y_salud, 18 de noviembre de 2006]
 16. www.textoscientificos.com/mineria/materiales-ferrosos Metales NoFerrosos
 17. Círculos de Innovación y Tecnología. Universidad de Cádiz. www.uca.es/cit
 18. <http://proton.ucting.udg.mx/temas/circuitos/ivan/soldar.htm>
 19. Lead-free soldering in electronica science, technology and environmetal impact. Edited bye Katsuaki S. Uganuma. *Osaka University Osaka, Japan.*
 20. bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/.../1/CD-0991.pdf Similar
 21. www.bvsde.paho.org/bvsast/e/fulltext/enciclopedia/82.pdf
 22. Lu Zhan and Zhenming Xu, “*Separating and Recovering Pb from Copper-Rich Particles of Crushed Waste Printed Circuit Boards by Evaporation and Condensation*”, School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 800 Dong chuan Road, Shanghai, People’s Republic of China. *Environ. Sci. Technol.*, 2011, 45 (12), pp 5359–5365 DOI: 10.1021/es200243f Publication Date (Web): May 19, 2011
 23. Recuperación de Pb y Cd www.upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3694/1/55706-1.pdf
 24. <http://eprints.nmlindia.org/2593/1/124.pdf>
 25. www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405...script=sci_arttext
 26. www.impi.gob.mx
 27. William D. Callister “*Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales*” Limusa Wiley 2009.
 28. Starink M.J *Int.Mat Rev* Vol.49 p 191-225 (2004)

-
29. Bosch Giral Pedro y Lara Corona. *“Difracción y fluorescencia de rayos X”*. Editorial Terracota. Colección claves Universitarias. Nov.2010.
 30. RoHS_Technical_Manual_Esp.pdf
 31. Cullity B.D; *“Elements of X-ray Diffraction”*. Addison-Wesley, Mass;1956
 32. http://www.uned.es/cristamine/mineral/metodos/micr_electr.htm#fig
 33. <http://cabierta.uchile.cl/revista/28/articulos/pdf/edu3.pdf>
 34. <http://ssti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-analisis-termico/calorimetria-diferencial-de-barrido.html>
 35. http://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/biotec_FQbiomol/DSC0607.pdf
 36. Massalski Thaddeus B, Murray Joanne L, Bennet Laurence H., Baker Hugh. *“Binary Alloy Phase diagrams”* .Vol.2 .American Society for Metals.
 37. Metals Handbook.8th Ed. Vol 7 Atlas of Microstructures of Industrial Alloys.
 38. ASM_Metals_HandBook_-_Volume_03_-_Alloy_Phase_Diagrams
 39. “Construcción de una planta procesadora de basura en el tiradero Neza”. periodicoafondo.com
 40. Juanico Loran, José A. *“Síntesis y Caracterización de Nanofibras de Carbono para su Aplicación en la Adsorción de Gases Tóxicos”* Tesis UAM Depto. de Ciencias Básicas. México D.F, Nov. 2004.
 41. Mackenzie 1972, Lombardi 1977 *“3rd International Conference on Thermal Analysis”*

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

1. <http://www.san-lan.com/cablepcbrecyclingplant.asp?categoryID=6>
2. Lee, JC, Song, HT y Yoo, JM, 2007, *de Conservación de Recursos y Reciclaje*, **50**, p. 380.
3. Li, J., Lu, H., Guo, J., Xu, y Z. Zhou, Y., 2007, *Environmental Science Technology*, de 41 años, p. 1995.
4. Abdel-Aal, EA y Rashad, MM, 2004, *Hidrometalurgia*, **74**, p. 189.

-
5. Clyde F. Coombs, Jr. *"Printed Circuits Handbooks"* Sixth Edition. McGraw Hill Handbooks.
 6. Hernández Rivera Omar *"Caracterización microestructural y mecánica de aleaciones Aluminio-Estaño"* Tesis UNAM Posgrado. Ciencia e Ingeniería de Materiales. 2006.
 7. Pérez Hernández Alfredo *"Caracterización microestructural de las aleaciones Zn-27% Al-3% Cu y Zn-22% Al-18% Cu y Zn 5% Al-11% Cu producidas a través de Aleación Mecánica"* Tesis UNAM Posgrado. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2005.
 8. Chávez Rivas Bernardo *"Caracterización de las aleaciones Nanoestructurales Fe-10wt% Al"* Tesis UNAM Posgrado. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 1999.
 9. Figueroa Vargas Ignacio Alejandro *"Producción y Caracterización de Cintas Metálicas Amorfas"* Tesis Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich, Octubre 2003.
 10. Novelo Peralta Omar *"Correlación entre microestructura y propiedades mecánicas en aleaciones Al-Mg-Cu"* Tesis UNAM Posgrado de la Facultad de Ingeniería, 2011.
 11. Arellano Jiménez María Josefina *"Análisis por microscopía electrónica y difracción de rayos X de la estructura del fosfato octacálcico obtenido por precipitación y de la hidroxiapatita obtenida por hidrólisis del mismo"* Tesis UNAM Posgrado Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2009.