



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**RECUPERACIÓN DE METALES PRECIOSOS Y MENORES POR
MEDIO DE LA MINERÍA ELECTRÓNICA EN MÉXICO**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

ING. PEDRO OMAR VILLAVICENCIO ARZOLA

DIRECTOR DE TESINA: **DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGOMEZ**

MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE 2015



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.

Contenido

1.	Problemática	3
1.1	Objetivo general	5
1.2	Objetivos particulares	5
1.3	Alcances	5
2.	Antecedentes.....	6
2.1	Minería Electrónica.....	7
3.	Tecnologías de la Minería Electrónica.....	11
3.1	Pretratamiento.....	14
3.2	Tratamientos para la recuperación de los metales preciosos y menores	16
3.2.1	Tratamiento Pirometalúrgico.....	17
3.2.2	Tratamiento Hidrometalúrgico	20
3.2.3	Tratamiento Biometalúrgico.....	22
4.	Manejo actual de los RAEE en México.....	23
4.1	Generación de RAEE en México.....	25
4.2	Manejo actual y disposición final de los RAEE en México	29
5.	Propuestas para implementar la Minería Electrónica en México.....	36
5.1	Legislación.....	36
5.2	Recolección y transporte	38
5.3	Criterios para la evaluación tecnológica.....	39
6.	Conclusiones	41
7.	Referencias.....	43

1. Problemática

El progreso tecnológico acelerado de los últimos años ha contribuido a aumentar la diversidad y complejidad de los residuos que contaminan el ambiente. El gran aumento en la producción de aparatos electrónicos, que debido a la innovación tecnológica y la globalización del mercado, acelera su sustitución y por lo tanto su desuso, lo que produce diariamente toneladas de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE).

Los RAEE pueden representar riesgos para la salud humana y para el ambiente por contener metales pesados y algunos compuestos orgánicos. Si no se manejan de manera adecuada, pueden ser liberados al ambiente y a su vez se puede perder un gran potencial para su valorización.

En la manufactura de éstos se emplean frecuentemente dos grupos de sustancias nocivas: los compuestos orgánicos polibromados, llamados también retardantes de flama (éteres bifenílicos polibromados, PBDE), que se usan como aditivos en los plásticos; y metales pesados como plomo, mercurio, cadmio y cromo en la elaboración de los dispositivos electrónicos (Barrera et al., 2007).

Estas sustancias pueden bioacumularse en los tejidos grasos de los seres vivos y los diversos compartimentos ambientales y representan un riesgo potencial a la salud humana cuando se liberan como resultado de actividades de reciclaje informal o cuando se disponen en tiraderos a cielo abierto o en sitios no controlados. Actualmente existe un intenso flujo de residuos electrónicos a nivel global (Wit, 2000).

El movimiento de residuos en la década de 1980 se caracterizó por el envío de éstos desde países industrializados, con regulaciones más estrictas, hacia países en vías de desarrollo en el sudeste asiático, el norte de África, Europa oriental y América Latina para su tratamiento y eliminación final. Por lo que fueron credos tratados internacionales como son el Convenio de Basilea (1989) sobre movimientos

transfronterizos, y el de Estocolmo (2001) sobre contaminantes orgánicos persistentes, para hacer frente a la desmedida movilización de los residuos en el mundo.

El factor detonante de este flujo internacional de residuos electrónicos es su contenido de metales preciosos como oro, plata y cobre. La recuperación de estos metales es un proceso rentable que genera un mercado transfronterizo tanto formal como informal. De hecho, la recuperación de metales preciosos a partir de residuos electrónicos históricamente ha sido uno de los mayores incentivos para la industria del reciclaje, si bien los fabricantes de productos electrónicos han reducido gradualmente el contenido de metales en sus productos con la finalidad de reducir sus costos; por ejemplo, una tonelada de mineral de hierro de una mina de oro produce en promedio solo 5 gramos de oro, mientras que de una tonelada de teléfonos celulares en desuso se pueden obtener 150 gramos o más (Valenzuela, 2011).

Energéticamente hablando, reciclar un teléfono celular ayuda a la conservación de la energía necesaria para que funcione una laptop por 44 horas. Por cada millón de teléfonos celulares reciclados, se puede recuperar 75 libras de oro, 772 libras de plata, 33 libras de paladio y 35 mil 274 libras de cobre; además los móviles contienen zinc, platino y estaño. También por cada millón de celulares reciclados se podría proveer a 185 aparatos electrodomésticos por un año. De igual manera, se debe tomar en cuenta que los teléfonos móviles contienen materiales como plomo, mercurio, cadmio y arsénico, que no pueden ir a contaminar el aire, el suelo ni el agua (Valenzuela, 2011).

En los últimos años se ha desarrollado una nueva industria conocida como Minería Electrónica (derivada de la Minería Urbana), la cual busca reciclar los metales de los RAEE en busca de gemas tales como el iridio y el oro. Los materiales recuperados se reintegran en el proceso de producción de los productos electrónicos o también pueden ser incluidos en la industria joyera (Urban Mining Square, 2014).

En Japón, ya existen empresas dedicadas exclusivamente al reciclaje de los aparatos electrónicos, como por ejemplo: *Eco-System Recycling Co* y *Yokohama Metal Co Ltd*.

1.1 Objetivo general

Proponer alternativas para la recuperación de los metales preciosos y menores por medio de la Minería Electrónica, aprovechando los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) generados en el país.

1.2 Objetivos particulares

- Definir a la minería electrónica como una alternativa al manejo de los RAEE y para la recuperación de metales preciosos y menores.
- Describir el estado del arte de la Minería Electrónica en algunos países del mundo con amplia experiencia en el tema.
- Describir la situación actual del manejo de los RAEE en el país a través de datos sobre su generación, tratamiento y disposición.
- Proponer alternativas para la implementación de la Minería Electrónica en México, con base en las experiencias internacionales en países desarrollados y en vías de desarrollo.

1.3 Alcances

Se realizará una búsqueda bibliográfica de experiencias internacionales sobre la recuperación de metales preciosos y menores provenientes de residuos de aparatos electrónicos, y se realizarán propuestas para la implementación de éstas en México.

2. Antecedentes

El término “Minería Urbana” fue introducido por el Profesor Nanjyo de la Universidad de Tohoku, en Japón, durante la década de 1980; con el que se propuso promover el reciclaje y la reutilización de los recursos naturales. Básicamente, se trata de un proceso en el que se recuperan componentes y materia prima de alto valor comercial, a partir de productos, construcciones y residuos (Urban Mining Square, 2014).

El pasar de un aprovechamiento de los recursos lineal a uno cíclico ha caracterizado las estrategias para la gestión de los residuos durante las últimas décadas. El aprovechamiento lineal se basa únicamente en la extracción de la materia prima, la producción o transformación, su uso, su desuso y disposición final a través de rellenos sanitarios, en el mejor de los casos. En cambio, un aprovechamiento cíclico de los recursos plantea una de las filosofías más destacadas en la gestión de los residuos: las 3 R's (reduce, reúsa y recicla) (Butterworth, 2012).

Éste concepto de un aprovechamiento cíclico nació de la creciente y continua necesidad de generar y obtener materia prima, como consecuencia del crecimiento económico y poblacional en el mundo. Por lo tanto, se origina la necesidad de desarrollar nuevas alternativas como la Minería Urbana.

Las actividades que se derivan de la Minería Urbana contienen acciones y tecnologías con el objetivo primordial de recuperar materias primas y el aprovechamiento de la energía proveniente de los productos generados por el catabolismo urbano. Por lo tanto, la Minería Urbana ofrece una gestión sistemática de los recursos antropogénicos, productos, construcciones, y los residuos que se derivan de éstos, en una visión a largo plazo para la protección del ambiente, la conservación de los recursos y grandes beneficios económicos (Urban Mining Square, 2014).

2.1 Minería Electrónica

Una de las mayores actividades que se derivan de la Minería Urbana es su aplicación en los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), la denominada Minería Electrónica. Debido a su corta vida económica, la cantidad de este tipo de residuos está aumentando continuamente. Actualmente, se ha estimado que su crecimiento aumenta tres veces más rápido que el crecimiento promedio de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) (Butterworth, 2012).

El consumo de los aparatos electrónicos se ha convertido en una parte integral de la vida diaria y ha revolucionado la manera de comunicarnos, de recuperar información y de aumentar la diversidad del entretenimiento. Entre celulares, computadoras personales y “laptops”, pantallas, tabletas electrónicas, en el 2008 se estimó que en promedio una persona que radicaba en países desarrollados usaba 24 de éstos dispositivos electrónicos (Consumer Electronics Association, 2008). Los rápidos avances tecnológicos y la creciente industria de los electrónicos han llevado a una constante creación de nuevos productos, que ha dado como resultado una disminución drástica en la vida útil de éstos aparatos.

En el 2009 se estimó que fueron dispuestos 50 millones de toneladas de RAEE en todo el mundo y se esperaba que para el 2014 se dispusieran más de 72 millones de toneladas de éstos (Jiang & Harney, 2012). En Europa se producen en promedio 20 kg de RAEE al año per cápita, mientras que en Estados Unidos se producen 7.2 kg. Sin embargo, esta discrepancia de cifras tan amplia se debe principalmente a una variedad en cuanto a la definición de RAEE; es decir, en Estados Unidos consisten únicamente de la llamada tecnología de la información (IT por sus siglas en inglés), equipo de telecomunicaciones, monitores y televisores; mientras que la legislación en Europa también incluye los grandes aparatos eléctricos caseros (refrigeradores y hornos, entre otros), los sistemas de calefacción y aire acondicionado, y los dispositivos médicos (Namias, 2013).

Debido a que la concentración de oro en los aparatos eléctricos y electrónicos es considerablemente más alta que la cantidad de oro que se obtiene en la minería tradicional, la recuperación de éste y otros metales preciosos a través de los RAEE por medio de la Minería Electrónica se convierte potencialmente en una actividad minera ecológicamente compatible, económicamente viable y socialmente aceptada, es decir, sustentable.

Estos dispositivos electrónicos contienen más de 60 elementos distintos, muchos de los cuales son valiosos, como se mencionó anteriormente sobre los metales preciosos, y otros son peligrosos. Los metales preciosos son escasos en cantidad dentro de la naturaleza, se caracterizan por tener altos puntos de fusión y por ser más dúctiles que otros metales, cualidades que le brindan entre otras, un alto valor económico como el del oro y la plata. Entre los metales menores se encuentran entre los más destacados el níquel y sus aleaciones, el cobalto y aleaciones de éste, titanio y sus aleaciones (Umicore, 2007).

Los equipos electrónicos son los principales "consumidores" de los metales preciosos y menores, por lo tanto es imperativo su aprovechamiento de manera cíclica con la finalidad de recuperar la mayor cantidad de estos elementos tan valiosos. Es por eso que las investigaciones sobre una gestión adecuada de los RAEE han tomado relevancia en los últimos años, sumado a que la materia prima proveniente de las minas, es cada vez más escasa y costosa, ver tabla 2.1.

Tabla 2.1 Concentración de metales en algunos aparatos electrónicos (Umicore, 2007).

Aparato	Cobre (% en peso)	Plata (ppm)	Oro (ppm)	Paladio (ppm)
Televisores y pantallas	10	280	20	10
PC's y Laptops	20	1000	250	110
Teléfonos celulares	13	3500	340	130
Dispositivos de audio portátiles	21	150	10	4
Reproductores de DVD	5	115	15	4

Como se mencionó anteriormente, los RAEE contienen una variedad de metales y compuestos que son tóxicos para la salud y para el ambiente, como el plomo, el cadmio, el mercurio, el cromo, el policloruro de vinilo (PVC), entre otros; por lo que su disposición aumenta los riesgos tanto a la salud pública como al ambiente, si no son manejados adecuadamente. Aunque los RAEE representan menos del 2% del total que se dispone habitualmente en rellenos sanitarios, estos aportan el 70% de los RP dispuestos debido a su contenido de metales pesados (Jiang & Harney, 2012). La tabla 2.2 muestra las sustancias peligrosas que se pueden encontrar en los RAEE:

Tabla 1.2 Materiales potencialmente peligrosos en los RAEE (Namias, 2013).

Material peligroso	Componentes de electrónicos
Plomo (Pb)	Tubos de rayos catódicos y soldaduras
Mercurio (Hg)	Interruptores y cubiertas
Óxido de antimonio (Sb₂O₃)	Retardantes de flama
Bifenilos polibromados (BPB)	Tarjeta de circuitos, carcasas y cables
Selenio (Se)	Tarjeta de circuitos
Cadmio (Cd)	Tarjeta de circuitos y semiconductores
Cromo (Cr)	Protección anticorrosiva
Cobalto (Co)	Dureza y magnetismo en el acero

Se estima que entre el 50 y 80 % de los RAEE recolectados en países desarrollados se exporta a países en desarrollo como China, India, y Pakistán debido a su mano de obra barata y a su legislación ambiental menos estricta (Wang et al., 2013). La ausencia de salud y seguridad en la infraestructura de estas naciones en desarrollo para poder procesar y disponer estos materiales provoca el manejo de tóxicos por parte de los trabajadores, sin un equipo adecuado para ello. Aunque existan, por ejemplo, operadores en China capacitados para manejar los RAEE, el mercado es dominado por pepenadores que no están autorizados ni cuentan con el equipo adecuado para tratar estos residuos. Las técnicas más comunes en los países en desarrollo para el tratamiento de los RAEE incluyen el desmantelamiento manual de los materiales peligrosos y la quema de estos a cielo abierto, lo que genera la

emisión de grandes cantidades de dioxinas y furanos al ambiente. La lixiviación con cianuro es otra de las técnicas más utilizadas en países en desarrollo para el tratamiento de RAEE, lo que implica un riesgo altamente significativo para el bienestar del trabajador si la solución de lixiviados no se dispone correctamente (Wang et al., 2013).

3. Tecnologías de la Minería Electrónica

Anteriormente se mencionó que los RAEE contienen más de 60 diferentes elementos, muchos son valiosos, como los metales preciosos y menores, y otros son peligrosos. Los aparatos electrónicos contienen, en promedio, los siguientes elementos (Namias, 2013):

- Metales preciosos: Oro (Au), Plata (Ag) y Paladio (Pd).
- Metales básicos o menores: Cobre (Cu), Aluminio (Al), Níquel (Ni), Zinc (Zn) y Hierro (Fe).
- Metales peligrosos: Mercurio (Hg), Berilio (Be) y Cadmio (Cd).
- Halógenos: Bromo (Br) y Cloro (Cl).
- Orgánicos, incluyendo polímeros.
- Vidrio y cerámicos.

El mayor incentivo económico que ofrece la Minería Electrónica es la recuperación de los metales preciosos contenidos en los RAEE, puesto que éstos representan más del 70% del valor en los teléfonos celulares, calculadoras y tarjetas de circuitos; y 40% del valor en las pantallas, monitores y reproductores de video (Namias, 2013).

Los siguientes aparatos pueden ser clasificados de acuerdo a su valor relativo:

- Alto: Tarjetas de circuitos de computadoras, teléfonos celulares y capacitores.
- Medio: Monitores y tarjetas de circuitos de laptops.
- Bajo: Pantallas, tarjetas de monitores e impresoras, teléfonos inalámbricos, calculadoras, entre otros.

Tabla 3.1 Valor, en porcentaje, de los metales preciosos presentes en algunos aparatos electrónicos (Umicore, 2007).

Aparato	Cobre (%)	Plata (%)	Oro (%)	Paladio (%)
Pantallas (TV)	50	7	22	7
Monitores (PC)	18	5	61	15
Teléfonos celulares	9	13	64	14
Reproductores de video	42	5	32	5

La Minería Electrónica es el proceso por el cual se recuperan los metales preciosos y menores, o básicos, de los RAEE. Este proceso puede dividirse en cuatro etapas subsecuentes: la recolección de los RAEE, su clasificación y desmantelamiento, su pretratamiento mecánico, y el tratamiento final, que incluye el refinado de los metales y la disposición de los materiales peligrosos; como se muestra en la Figura 3.1. Usualmente para cada una de estas etapas se requiere de personal especializado para incrementar la eficiencia de cada una y del proceso completo. Esta eficiencia en todo el proceso de la Minería Electrónica depende de la eficiencia de cada una de las etapas mencionadas y del manejo de las interfaces entre cada una de estas (Namias, 2013).



Figura 3.1 Etapas principales en el proceso de la Minería Electrónica (StEP, 2009).

Este proceso puede analizarse desde la perspectiva de donde se llevan a cabo cada una de sus etapas dentro de una sociedad, como se muestra en la Figura 3.2, donde se muestran las entradas a este proceso en color azul (los RAEE generados e

importados), en color verde se muestran las etapas que se llevan a cabo a nivel regional o municipal (la recolección, el transporte y la clasificación), en color naranja se muestran las actividades que se desarrollan dentro de complejos especiales a nivel estatal y nacional, y las salidas de este proceso se destacan en color café (los residuos que van a un relleno sanitario, que se reutilizan, o los metales recuperados) (Umicore, 2007).

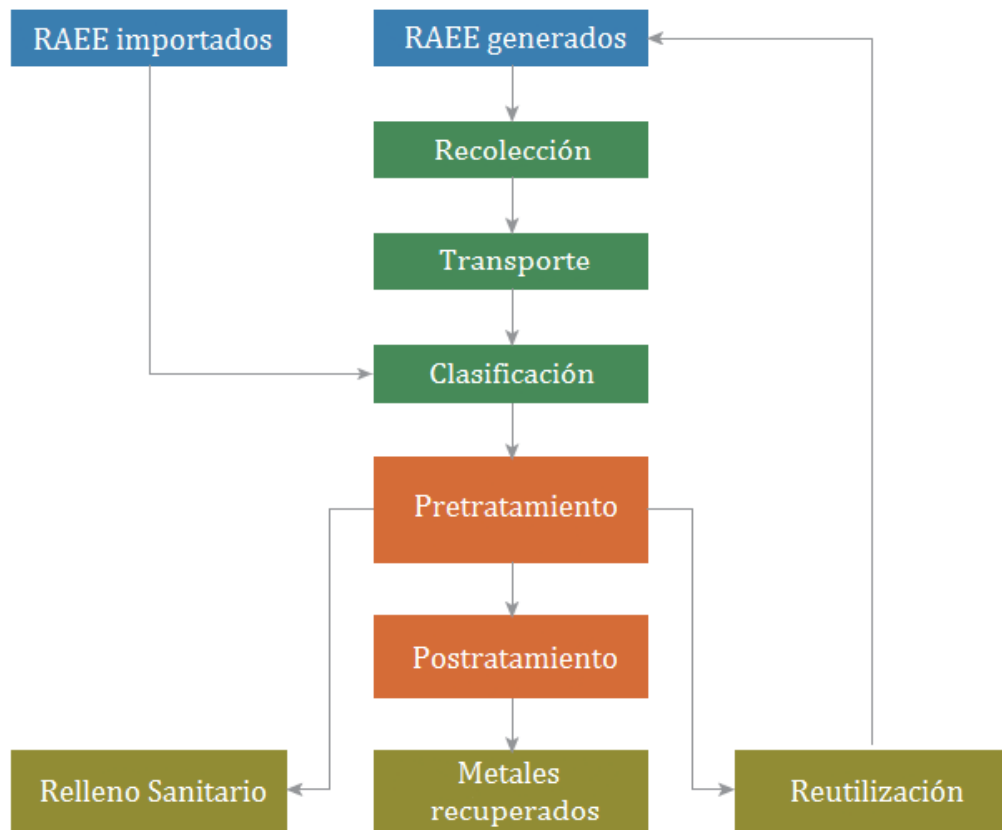


Figura 3.2 Procesos en la Minería Electrónica aplicados a nivel nacional (The World Bank Group, 2012).

La recolección y clasificación se realizan a nivel regional, es decir, en ciudades o municipios; impulsados por programas gubernamentales o por la iniciativa privada, ya sean compañías dedicadas al reciclaje de estos residuos o por las mismas compañías productoras de los aparatos electrónicos.

A continuación se describirán con más detalle las etapas del pretratamiento y los tratamientos metalúrgicos que reciben estos residuos con la finalidad de recuperar los metales preciosos y menores e incluirlos de nuevo en la cadena productiva como materia prima.

3.1 Pretratamiento

El pretratamiento es una de las etapas más importantes en el proceso de la Minería Electrónica. En la Figura 3.3 se puede observar un diagrama de flujo que sigue el procedimiento en un pretratamiento básico. Los RAEE son manualmente desmantelados hasta obtener componentes individuales que son probados y separados de los residuos. Los procesos mecánicos son una parte integral de esta etapa, puesto que los residuos desmantelados son triturados utilizando usualmente un molino de martillos. La fracción metálica es separada de la no metálica utilizando técnicas provenientes de la minería tradicional, como lo son: el cribado, bandas magnéticas, corrientes inducidas y técnicas de separación por densidad (Khaliq et al., 2014).

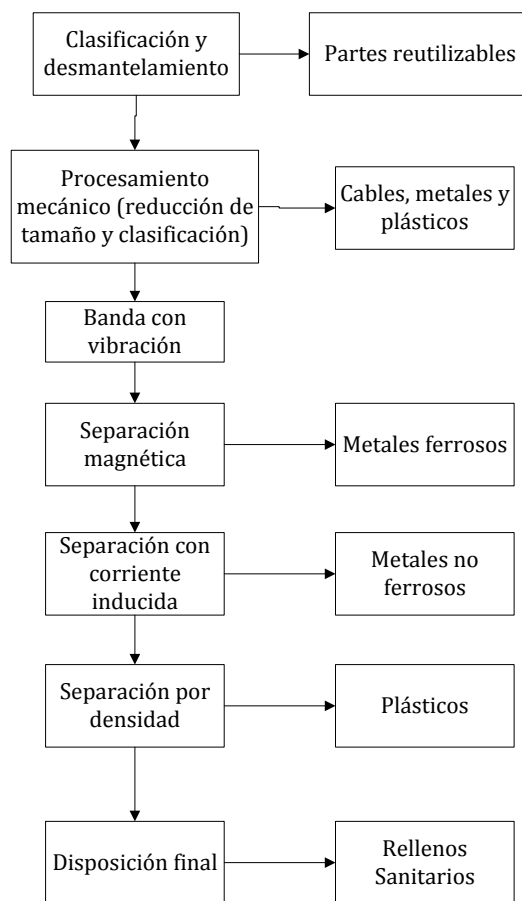


Figura 3.3 Pretratamiento de los RAEE para separar la fracción metálica de la no metálica (Khaliq et al., 2014).

El nivel en que se realiza un pretratamiento afecta directamente en cómo los residuos electrónicos se tratan y se aprovechan, al igual que la concentración de metales que pueden ser removidos. En algunas ocasiones resulta conveniente remover los componentes con un alto valor en metales preciosos antes de realizar el pretratamiento mecánico (Khaliq et al., 2014).

Los componentes y dispositivos complejos, como por ejemplo las tarjetas de circuitos y los teléfonos celulares, deben ser removidos de la corriente de RAEE que se lleva a un pretratamiento; puesto que, cuando las tarjetas de circuitos o los teléfonos celulares no son desmantelados manualmente y se trituran, los metales preciosos que contienen se mezclan con otras fracciones de los residuos, como vidrio o aluminio. Triturar o moler los residuos electrónicos con alto valor puede resultar en pérdidas por encima del 40% del total de los metales preciosos que contienen, lo que también

puede provocar la formación de residuos peligrosos como polvos y dioxinas (Jiang & Harney, 2012).

Como se puede observar en la Tabla 3.1, la composición de metales en los componentes de los teléfonos celulares depende del pretratamiento que éstos reciban.

Tabla 3.1 Composiciones de metales en componentes de teléfonos celulares (Umicore, 2007).

Componente	Cobre (%)	Plata (g/ton)	Oro (g/ton)	Paladio (g/ton)
Celular completo	12.8	3630	347	151
Celular triturado	13.4	2273	354	113
Tarjeta de circuitos de celulares	25.1	5541	982	287

3.2 Tratamientos para la recuperación de los metales preciosos y menores

El cobre es el metal más utilizado en los AEE debido a su elevada conductividad eléctrica, por lo que otros metales son adheridos a éste con la finalidad de modificar su dureza, su resistencia y sus propiedades anticorrosivas. Se obtienen entonces aleaciones de cobre con distintos tipos de metales, de las cuales destacan tres tipos principalmente (Cui & Zhang, 2008):

- Bronces: Aleaciones de cobre con estaño, aluminio o silicio.
- Latón: Aleación de cobre con zinc.
- Aleaciones de metales preciosos: Plata, Oro y Paladio.

Muchos metales se pueden disolver en el cobre, incluyendo el oro, la plata, el platino, el paladio, el selenio y el telurio; por lo tanto, la recuperación de los metales preciosos

contenidos en los RAEE se basa en la fundición para recuperar el cobre impuro y entonces refinarlo para obtenerlo puro y obtener los metales con los que éste se encontraba aleado. Existen dos procesos principales para realizar esta refinación, pirometalurgia e hidrometalurgia. En los últimos años se ha desarrollado una mayor tendencia a la utilización y perfeccionamiento de la hidrometalurgia (Cui & Zhang, 2008).

3.2.1 Tratamiento Pirometalúrgico

Este proceso consiste en fundir los residuos electrónicos pretratados dentro de un horno a temperaturas muy elevadas, y que actualmente sigue siendo el proceso más utilizado para la recuperación de los metales contenidos en los RAEE. Principalmente se recupera el cobre contenido en los residuos además de ciertas porciones de metales preciosos, como plata, oro, platino y paladio; que a través de la fundición se disuelven en el cobre. El hierro y el aluminio no se recuperan en este proceso y terminan como escorias del mismo (Cui & Zhang, 2008).

La ventaja de los residuos electrónicos es que pueden ser procesados en hornos pequeños, sin embargo, en los procesos industriales más comunes se realiza un co-procesamiento de éstos con concentrados de sulfuro de cobre en grandes hornos de fundición, como por ejemplo en el proceso *Noranda* (Xstrata, 2014).

En la actualidad destacan cuatro grandes compañías en la recuperación de metales a través de esta tecnología: *Boliden*, *Xstrata Copper* (antes *Noranda*), *Aurubis* y *Umicore*. Muchos de los residuos electrónicos son enviados a las plantas de estas compañías para ser tratados y recuperar los metales que contienen, tres de éstas se encuentran en Europa (*Boliden*-Suecia, *Aurubis*-Alemania, *Umicore*-Bélgica) y una se encuentra en América (*Xstrata Copper*-Canada). Algunas plantas que utilizan esta misma tecnología pero de menor capacidad de tratamiento se encuentran en Japón y Corea del Sur. Cabe destacar que en Estados Unidos no se cuenta con ninguna planta de este tipo, siendo todavía el mayor generador de RAEE en el mundo (Namias, 2013).

En la Tabla 3.2 se enlistan las plantas correspondientes a las compañías líderes en la tecnología de la pirometalurgia, así como su capacidad de tratamiento que ha aumentado en los últimos años.

Tabla 3.2 Capacidad de los principales fundidores de RAEE (Namias, 2013).

Complejo	Capacidad en 2008 (ton)	Capacidad en 2012 (ton)	RAEE tratados en 2012 (ton/año)
Fundidora Ronnskar de Boliden (Skelleftehamn, Suecia)	45,000	120,000	2,700,000
Horno de fundición de Xstrata Copper (Quebec, Canadá)	50,000	100,000	2,250,000
Fundidora Elektro-Recycling NORD de Aurubis GmbH (Hamburgo, Alemania)	N/A	60,000	1,350,000
Umicore (Hoboken, Bélgica)	27,000	40,000	900,000

El proceso que se lleva a cabo en estos complejos de tratamiento se describe de manera general a continuación:

1. Etapa de fundición: Una vez que lleva a cabo todo el pretratamiento requerido para los residuos electrónicos tratados, éstos se colocan en un fundidor, que trabaja a temperaturas muy elevadas, que produce una solución de cobre con sulfuro de hierro (llamada mate) mientras el hierro y otros óxidos forman una solución conocida como escoria. Los metales preciosos están contenidos en la solución mate, la cual es llevada a la etapa de conversión. La solución llamada escoria es tratada a través de un horno de plomo, refinería de plomo o una planta para metales especiales. Cabe destacar que los componentes más valiosos que se separan desde el pretratamiento, como se mencionó anteriormente, son enviados directamente al convertidor sin la necesidad de fundirse.

2. Etapa de conversión: La solución mate se lleva entonces a un convertidor para obtener como producto principal una solución de cobre impuro, conocida como “cobre blister”.
3. Horno anódico: El cobre blister líquido es refinado dentro de los hornos anódicos; primero es moldeado dentro de los ánodos que son posteriormente electrorefinados para obtener cobre puro.
4. Electrorrefinación: Durante el proceso, los ánodos de cobre producidos en el horno anódico son refinados para producir cátodos de cobre puro y obtener metales preciosos como plata, oro, selenio y telurio en forma de precipitados al fondo de la celda de electrorrefinación.
5. Refinación de los metales preciosos: Los precipitados de metales preciosos son fundidos y refinados, con procesos más específicos para cada metal según sea requerido, para producir lingotes de éstos metales preciosos (Cui & Zhang, 2008).

Los componentes plásticos obtenidos de los RAEE no pueden reciclarse fácilmente debido a que se mezclan con retardantes de flama, pigmentos y otras mezclas de polímeros. Sin embargo, los procesos de fundición son capaces de utilizar la energía calorífica contenida en los plásticos, debido a la combustión de éstos en la corriente de alimentación lo que reduce parcialmente la necesidad de los combustibles fósiles (Jiang & Harney, 2012).

Aunque el tratamiento pirometalúrgico es el método más utilizado, tiene algunas desventajas:

- No se pueden recuperar ciertos componentes como los chips o las tarjetas de fibra de vidrio.
- Tampoco pueden recuperarse el aluminio y el hierro contenidos en los residuos electrónicos debido a que se oxidan y terminan en la escoria del proceso.
- Al fundir los retardantes de flama y el PVC que contienen los RAEE se propicia la formación de dioxinas, por lo que se requiere de un control de emisiones.

- Se debe utilizar el proceso hidrometalúrgico de manera subsecuente para poder separar todos los metales que se requiera (Namias, 2013).

3.2.2 Tratamiento Hidrometalúrgico

Este proceso se ha convertido en el más utilizado para el tratamiento de los residuos electrónicos, esto se debe a que los métodos que se utilizan son más exactos, predecibles y más fácilmente controlables, que el proceso Pirometalúrgico. La hidrometalurgia puede separarse en tres áreas principales: la lixiviación, la concentración de soluciones y la purificación (recuperación de metales) (Kamberovic et al., 2011). El proceso general hidrometalúrgico se describe a continuación:

1. Tratamiento mecánico: Antes del tratamiento químico, es necesario un tratamiento mecánico con la finalidad de convertir los residuos electrónicos en materiales granulares (reducción del tamaño de partícula).
2. Lixiviación: Los residuos son sometidos a una serie de soluciones ácidas o caústicas, donde los componentes solubles son extraídos de los sólidos que se forman a través de un solvente. Las soluciones más eficientes para la lixiviación son las ácidas, debido a la eficiencia con la que separan los metales preciosos y menores. Soluciones de cianuro, de haluro, de tiourea y de tiosulfato son las más utilizadas en este proceso; para cada metal que se requiera separar existe una solución óptima para su lixiviación, como se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Agentes lixiviantes utilizados en el tratamiento Hidrometalúrgico (Khaliq et al., 2014).

Metal	Agente lixiviante
Metales menores o básicos	Ácido nítrico
Cobre	Ácido sulfúrico o agua regia
Oro y Plata	Tiourea o cianuro
Paladio	Ácido clorhídrico y clorato de sodio

3. Separación y purificación: Las soluciones lixiviadas son enviadas a los proceso de separación y purificación para concentrar los metales valiosos y eliminar impurezas.
4. Recuperación de metales preciosos: Este proceso se realiza a través de la electrorrefinación, reducción química o cristalización.

Las soluciones de cianuro, agua regia, tiourea y tiosulfato son corrosivas, e incluso tóxicas, por lo que requieren de un tratamiento especial al momento de su disposición. Aunque utilizar la solución de cianuro como agente lixivante representa el método más económico, es también el más peligroso debido a la alta toxicidad del cianuro (Cui & Zhang, 2008).

Al tratarse de una tecnología relativamente nueva, se han realizado estudios recientes para mejorar el proceso al aumentar el porcentaje de recuperación de los metales y disminuir la cantidad de residuos peligrosos. Se ha encontrado que, para componentes de residuos electrónicos que contienen una cantidad de oro superior a las 500 ppm, puede utilizarse una solución de ácido sulfúrico y tiourea como agente lixivante, obteniendo altos rendimientos en la recuperación del metal precioso (Kamberovic et al., 2011).

Sin embargo, existen algunas características que limitan la aplicación de esta tecnología a escala industrial (Khaliq et al., 2014):

- Todas las reacciones hidrometalúrgicas son lentas y consumen tiempo que repercute en la economía de la recuperación de los metales.
- El tratamiento mecánico que se necesita para disminuir su tamaño de partícula también consume demasiado tiempo, si se quiere tener una eficiencia mayor.
- El cianuro es una sustancia peligrosa que al convertirse en residuo debe tratarse con las medidas de seguridad más elevadas, puesto que puede producir contaminación irreparable en ríos y agua de mar.
- Los halogenuros como agentes lixivantes son muy complicados de manejar debido a sus propiedades, altamente corrosivo y oxidante.

- El uso de tiourea como lixiviante para la extracción de oro es limitado por su elevado costo y consumo.
- Existe el riesgo de que se pierdan cantidades de los metales durante la disolución.

3.2.3 Tratamiento Biometalúrgico

La biometalurgia es una tecnología que se ha desarrollado en los últimos años para la recuperación de metales contenidos en los RAEE. Esta tecnología tiene sus bases en las interacciones que se llevan a cabo entre microorganismos y los metales a través de sus funciones celulares, entre las que se incluyen: sorción, reducción, oxidación, y precipitación de sulfuros. Existen dos métodos para remover los metales a través de la biometalurgia, que son la biolixiviación y la biosorción. La biolixiviación ha sido utilizada en la industria minera para separar el metal del mineral extraído, principalmente se utiliza en la obtención de cobre y oro (Jiang & Harney, 2012).

La biosorción utiliza algas, bacterias, levaduras y hongos para acumular en éstos los metales pesados y preciosos. Es un proceso complejo que engloba tanto la absorción como la adsorción de los metales dentro de las paredes celulares y requiere que los microorganismos posean una gran área superficial (mayor a 100 m²/g), además de una afinidad por los metales. La capacidad de sorción varía según el tipo de biomasa utilizada, dentro de un intervalo aproximado de 0.003 a 40 mmol/g, y puede llegar a ser más efectivo el proceso si se añaden agentes absorbentes como el quitosano (Cui & Zhang, 2008).

Los tratamientos biometalúrgicos poseen ventajas sobre los tratamientos mencionados anteriormente, como los bajos costos de operación, minimización del volumen de residuos y efluentes secundarios no tóxicos (Kamberovic et al., 2011).

4. Manejo actual de los RAEE en México

Los RAEE requieren un manejo específico diferenciado de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y de los Residuos Peligrosos (RP), al identificarse como Residuos de Manejo Especial (RME), debido a su potencial de aprovechamiento y valorización, por contener compuestos tóxicos en una proporción mínima, y por su crecimiento acelerado determinado por el rápido avance tecnológico.

El concepto de los RAEE está basado en la idea del abandono o descarte por parte de su poseedor. Las características que hacen que un aparato eléctrico y electrónico (AEE) sea considerado como RAEE son las siguientes: cuando ya no pueda ser usado para el fin con el que haya producido, por ser obsoleto, o simplemente cuando su poseedor toma la decisión de descartarlo (Namias, 2013).

México cuenta con un marco jurídico específico en el tema de residuos que busca asegurar su prevención y gestión integral. Los instrumentos que regulan a los residuos electrónicos en particular se sustentan primeramente en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, y de ahí se derivan la Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), los reglamentos correspondientes, así como las Normas Oficiales Mexicanas que se aplican en todo el país (Rojas et al., 2014).

También en México se aplica una serie de convenios internacionales que el Gobierno ha suscrito con la aprobación del Senado, entre los que se encuentran el Convenio de Basilea sobre movimientos transfronterizos y eliminación de RP; y el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes, de los cuales se derivan una serie de obligaciones relacionadas directa o indirectamente con la gestión y manejo de los residuos (Pérez, 2013).

Los residuos electrónicos están definidos por la LGPGIR como de manejo especial de acuerdo al artículo 19 sección VIII, descritos como: *residuos tecnológicos*

provenientes de las industrias de la informática, de los fabricantes de productos electrónicos y de otros que al transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico.

Los residuos de manejo especial (RME) están definidos en el artículo 5 sección XXX como *aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.*

Las entidades federativas cuentan con la facultad de formular, conducir y evaluar la política estatal, así como elaborar los programas en materia de residuos electrónicos. También son las encargadas de autorizar el manejo integral de éstos, e identificar aquellos que puedan estar sujetos a planes de manejo.

Según el artículo 30 los residuos que podrán sujetarse a planes de manejo deben cumplir con los siguientes criterios, además de los que establezcan las Normas Oficiales Mexicanas:

1. Que los materiales que los componen tengan un alto valor económico.
2. Que se trate de residuos de alto volumen de generación, producidos por un número reducido de generadores.
3. Que se trate de residuos que contengan sustancias tóxicas persistentes y bioacumulables.
4. Que se trate de residuos que representen un alto riesgo a la población, al ambiente o a los recursos naturales.

Un plan de manejo es un instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de los residuos, con pasos específicos que busquen la eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos

y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno.

Los planes de manejo de RP son de competencia Federal, los de RME de las Entidades Federativas y los de RSU de los municipios del país. Para registrar los planes de manejo de RME, se tiene a las entidades federativas como los responsables para hacerlo. También tienen la autoridad para realizar programas para la instalación de sistemas destinados a su recolección, acopio, almacenamiento, transporte, tratamiento, valorización y eliminación final de acuerdo a la ley o a normas oficiales mexicanas en el ámbito de su competencia.

4.1 Generación de RAEE en México

México es un productor importante de equipos electrónicos, si bien con una clara vocación de país maquilador. La industria electrónica está segmentada en grandes rubros que incluyen computadoras y accesorios, telecomunicaciones, electrónica de consumo, electrónica industrial y componentes electrónicos.

En 2010 la producción de equipos electrónicos fue la principal actividad productiva exportadora del país con 20% de las exportaciones totales y 69.7 millones de dólares en aparatos electrónicos exportados. Los equipos completos representan 58% del total de equipos electrónicos producidos en México, seguidos de 29% de productos intermedios y 13% de productos finales ensamblados (Rojas et al., 2014).

Para la elaboración del inventario nacional se seleccionaron cinco aparatos electrónicos que representan el mayor consumo actual y futuro en México y son las fuentes principales de residuos electrónicos: televisores, computadoras personales de escritorio y portátiles, aparatos de sonido, teléfonos fijos y teléfonos celulares. Si bien la información estadística oficial sobre el mercado nacional de equipos electrónicos (tipo, número y peso) tiene algunos variantes, los datos disponibles pueden utilizarse en la estimación de las cantidades de residuos electrónicos potencialmente generados

tanto en el proceso de producción de aparatos nuevos como de aparatos usados (INE, 2010), como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Aparatos electrónicos en uso (INE, 2010).

Producto	Millones de Unidades 2006	Millones de Unidades 2007	Millones de Unidades 2008	Millones de Unidades 2009	Millones de Unidades 2010
Televisores	32.0	34.7	37.3	40.0	42.7
Computadoras de escritorio	13.3	14.6	15.9	17.2	18.5
Computadoras portátiles	5.0	5.4	5.7	6.1	6.5
Dispositivos de sonido	11.9	14.0	16.0	18.0	20.1
Teléfonos fijos	18.9	19.3	19.8	20.2	20.7
Teléfonos celulares	46.6	57.8	69.0	80.1	91.3

Para la estimación de la generación de RAEE se tomaron en cuenta algunas consideraciones, como la vida útil promedio estimada para los diferentes aparatos electrónicos, de cinco años para las computadoras, diez años para televisores, tres años para teléfonos celulares, seis años para teléfonos inalámbricos y seis años para reproductores de sonido (INE, 2010).

Asimismo se estimó una “tasa de desecho” de 50% anual, la cual puede variar entre dispositivos ya que algunos son desechados definitivamente por los usuarios mientras que otros son almacenados o transferidos a otros usuarios.

También es necesario considerar la importación y exportación formal de productos electrónicos. Los aparatos importados de manera temporal para maquila generan residuos durante su procesamiento, mientras que los artículos importados de manera definitiva para su venta en México generan residuos al final de su vida útil.

Con esta información se puede estimar la generación de residuos electrónicos a nivel nacional utilizando el peso unitario promedio de cada uno de los cinco aparatos estudiados y el número de aparatos por casa habitación. Estos datos preliminares fueron utilizados para hacer una estimación de los residuos electrónicos a desechar en México, medidos en número de aparatos y en peso (Rojas et al., 2014).

La generación de RAEE se estimó en 256 mil toneladas para 2006 y 307 mil 224 toneladas para 2010 (INE, 2010) esta información se presenta en la tabla 4.2 y en la figura 4.1.

Tabla 2.2 Generación anual estimada de RAEE (Ton) (INE, 2010).

Aparato	2006	2007	2008	2009	2010
Televisores	166,826	173,800	180,775	187,749	194,723
Computadoras (personales y portátiles)	47,500	49,486	51,472	53,457	55,443
Dispositivos de sonido	33,250	36,835	40,419	44,004	47,588
Teléfonos fijos	7,560	7,263	6,965	6,668	6,370
Teléfonos celulares	1,050	1,563	2,075	2,588	3,100
Total	256,186	268,949	281,705	294,465	307,224

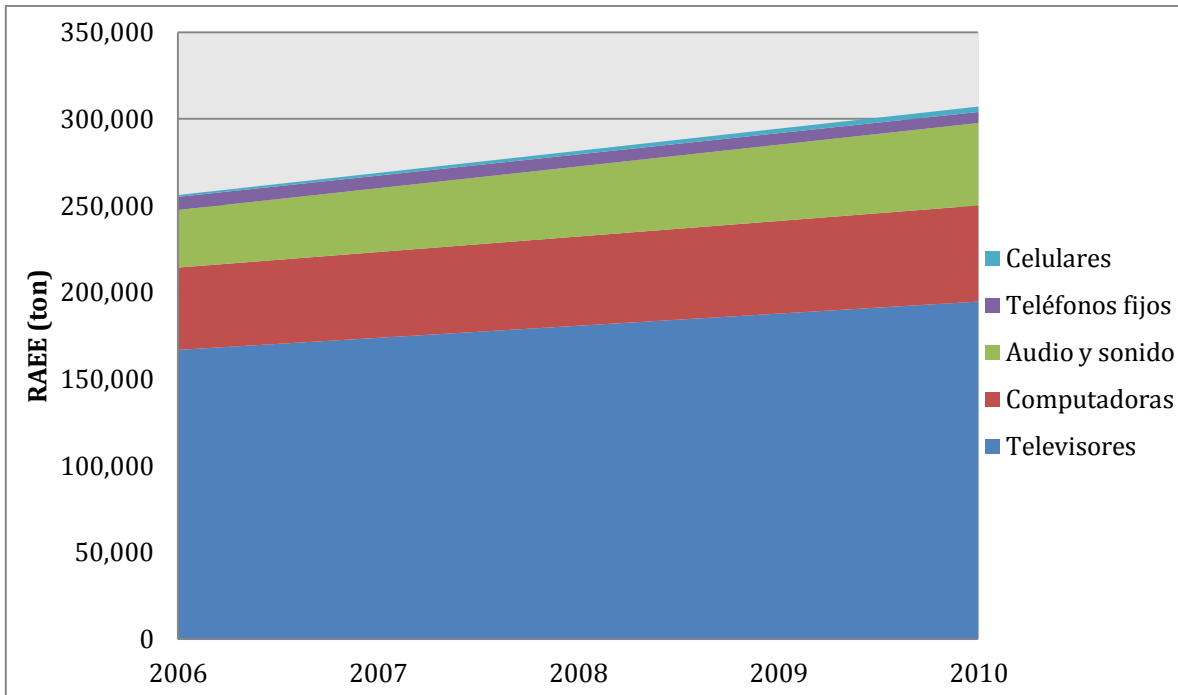


Figura 4.1 Generación anual estimada de RAEE (Ton) (INE, 2010).

Dentro de la República Mexicana destacan dos regiones como principales consumidores de AEE y por lo tanto principales generadores de RAEE, son la región fronteriza con Estados Unidos y la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

La región fronteriza al norte del país incluye a las siguientes ciudades como principales generadoras de RAEE: Tijuana, Mexicali, Hermosillo, Ciudad Juárez, Chihuahua, Torreón, Monterrey y Tamaulipas. La tabla 4.3 se muestran las ciudades.

Tabla 4.3. Generación de RAEE en las principales ciudades de la región fronteriza en 2009 (INE, 2009).

Aparato	Generación (unidades)	Generación (ton)
Televisores	825,751	18,322
Computadoras	724,469	14,489
Dispositivos de sonido	549,028	2,745
Teléfonos fijos	590,196	413
Teléfonos celulares	1,866,515	187
Total	4,555,960	36,166

Sin embargo, la región de la ZMVM destaca por generar la mayor cantidad de estos residuos en el país, debido, entre otros factores, a su gran densidad de población con un elevado número de consumidores de AEE, y a su intensa actividad económica incluyendo la industria electrónica. En la tabla 4.4 se muestra la generación de RAEE en la ZMVM durante el año 2010.

Tabla 4.4 Generación de RAEE en la ZMVM en 2010 (Meraz, 2010).

Aparato	Generación (unidades)	Generación (ton)
Televisores	2,944,865	65,376
Computadoras	1,901,900	38,038
Dispositivos de sonido	1,466,800	7,334
Teléfonos fijos	1,752,857	1,227
Teléfonos celulares	5,150,000	515
Total	13,216,422	112,490

Del total de los residuos potencialmente generados, el 53% son desechados o almacenados por considerarse obsoletos (por el usuario) y el restante 47% son reutilizados (Meraz, 2010).

4.2 Manejo actual y disposición final de los RAEE en México

Existen varias empresas que se dedican al reciclado de equipos de cómputo y electrónica de consumo en nuestro país. Según el Instituto Nacional de Recicladores INARE, en el país solamente se recicla el 5% de los RAEE. A continuación en la tabla 4.5 se presenta un listado de algunas de las plantas de reciclado presentes en la ZMVM (Meraz, 2010):

Tabla 4.5 Listado de algunas empresas dedicadas al manejo de los RAEE en la ZMVM (Meraz, 2010).

Nombre	Actividad	Datos	Capacidad (ton/año)
Electric Environmental Recycling de México	Reciclaje y disposición de equipos de cómputo y electrónicos.	Cuautitlán Izcalli, Estado de México www.eer-mexico.com	246
Genet Comercializadora y Reciclado S.A. de C.V.	Reciclaje y disposición de equipos de cómputo y electrónicos.	Tlalnepantla, Estado de México www.grupogenet.com	30
Gaia Vitare Ingenieros Ambientales	Manejo integral de RAEE.	Naucalpan, Estado de México www.gaiavitare.com	750
TBS Industries	Reciclaje de computadoras, celulares y televisores.	Tlalnepantla, Estado de México www.tbsindustries.com.mx	100
REMSA México	Reciclaje de RAEE.	México D.F. Reciclaelectronicos.com	2500

El principal problema que se presenta en el manejo de los RAEE es que quienes producen o consumen los AEE, no asumen total ni parcialmente los costos ambientales que resultan cuando los equipos son desechados.

Dado que no existe una normatividad suficiente para el manejo de estos residuos ni está claramente establecida la responsabilidad compartida de empresas, sociedad y gobierno al respecto, se siguen produciendo afectaciones al ambiente y a la salud como se mencionó anteriormente.

Sin embargo en años recientes se han desarrollado diversos programas de recolección y reciclaje de RAEE. Algunos son iniciativas de gobiernos municipales o estatales y otros de empresas de reciclaje o fabricantes de equipo electrónico.

Reciclón y Punto Verde son sendas iniciativas de acopio masivo y permanente de la compañía mexicana Recicla Electrónicos (REMSA), con sede en la ciudad de

Querétaro. REMSA tiene capacidad instalada para reciclar totalmente las cuatro materias primas básicas de un residuo electrónico que son plástico, vidrio, electrónica y metales ferrosos y no ferrosos. REMSA recicla, tanto residuos fácilmente comerciales como aquellos que no tienen un mercado redituable (REMSA, 2015).

Reciclón es un sistema para recibir residuos electrónicos sin costo para el usuario que opera durante uno o dos días de manera anual en espacios públicos de distintas ciudades. *Punto Verde* es un centro de acopio permanente que complementa al *Reciclón* y opera en conjunto con las autoridades municipales. A través de ambos programas se recibe una gran variedad de aparatos electrónicos incluyendo reproductores de video y música, computadoras y periféricos, equipos de telecomunicación, teléfonos celulares y otros, así como algunos electrodomésticos como hornos microondas, planchas y licuadoras (REMSA, 2015).

Existen 30 sedes permanentes de *Punto Verde* en 12 estados del país y el objetivo de REMSA es establecer por lo menos uno en cada entidad. En 2011 se programaron cerca de 50 *Reciclones* en 20 estados. REMSA cuenta con técnicas de reutilización de residuos electrónicos para fabricar muebles de baño, losetas, pisos y adoquines (REMSA, 2015).

Existe también el *Reciclatón*, un programa de reciclaje y eliminación de aparatos electrónicos sin costo para los usuarios operado por la empresa ProAmbi en colaboración con la iniciativa Televisa Verde y diversos gobiernos estatales. ProAmbi colabora con la empresa Apple en el “día verde” (*Apple Green Day*), un programa en el cual los usuarios entregan para su reciclaje dispositivos electrónicos como computadoras y reproductores de audio usados a cambio de bonos para adquirir equipos nuevos (ProAmbi, 2014).

En Chihuahua, la empresa Ecorecikla opera el programa *Ecoreciklatón* para recolectar RAEE en colaboración con autoridades estatales y municipales, instituciones educativas y tiendas de autoservicio (Ecorecikla, 2012).

Otro tipo de campañas se llevan a cabo por parte de la empresa de reciclaje *InCycle Electronics Mexico*, el *Reciclatrón*, que también ofrece servicios integrales para la eliminación de residuos electrónicos en diversas ciudades del país (Incycle Electronics, 2015).

Por su parte la empresa *TBS Industries* también ha organizado diversas iniciativas para recopilar y reciclar equipos electrónicos. En 2006 colaboró con el parque de diversiones *Six Flags*, y *Telefónica Movistar* en un programa de 30 días en los que se recopilaron más de 5,000 teléfonos celulares. *TBS Industries* ha colaborado con la SEMARNAT, autoridades estatales y municipales y organizaciones sociales y educativas de Tabasco para recopilar equipos electrónicos usados. Los residuos recopilados en las diversas iniciativas de *TBS Industries* son compactados y triturados en México para después ser llevados al extranjero para su fundición o tratamiento (TBS Industries, 2012).

Glezco, una compañía con sede en Monterrey, auspicia esquemas de acopio masivo de electrónicos al final de su vida útil, y programas de información y difusión del tema en colaboración con gobiernos locales y asociaciones civiles. En 2009 realizó una campaña de reciclado de RAEE en el estado de Durango junto con las autoridades ambientales estatales y federales. Durante tres meses se recibieron cerca de 9.3 toneladas de residuos, desechados principalmente por empresas. La empresa está desarrollando un proyecto integral de reciclaje con la Asociación de Maquiladoras y Manufactureras del Estado de Nuevo León (AMNL) y la Asociación de Maquiladoras y Manufactureras de Exportación (Glezco, 2014).

También existe una gran diversidad de empresas dedicadas a la recuperación de componentes electrónicos como los cables y las tarjetas impresas. En los diagnósticos realizados por el INE se identificaron cerca de 100 pequeños negocios de este tipo. Cabe señalar que las empresas incluidas en este grupo surgen y desaparecen en periodos cortos de tiempo (INE, 2010). De igual manera existen diversos chatarreros, pepenadores y acopiadores de residuos que de acuerdo a la demanda del

mercado recuperan diversos aparatos electrónicos como computadoras, televisores y celulares de forma temporal.

En cuanto a los grandes fabricantes de AEE, varias empresas que operan en México tienen programas de manejo de RAEE, de distintos tipos y alcances. El programa *Planet Partners* de Hewlett Packard atiende la recolección y eliminación adecuada de cartuchos para impresora usados. El servicio de recolección es a domicilio y sin costo y requiere que se entreguen por lo menos cinco cartuchos adecuadamente empaquetados y etiquetados. Los cartuchos se llevan a una planta de reciclaje para reutilizar los componentes (HP, 2015).

La empresa Dell México tiene un programa de reciclado gratuito para usuarios de hogares o pequeños negocios. El programa, que acepta únicamente computadoras y periféricos de esta marca tiene el objetivo de recuperar el valor remanente en los equipos desechados, ya sea por venta a terceros o donaciones. Los equipos recolectados deben estar empacados de acuerdo a las normas de la empresa y deben pesar 30 kilos o menos (DELL, 2015).

La empresa Motorola tiene un sistema de acopio y eliminación final de equipos de telecomunicaciones que acepta aparatos de todas las marcas. Los equipos pequeños como teléfonos celulares, radios de dos vías, baterías y accesorios son depositados por los usuarios en contenedores especiales que actualmente existen en el Distrito Federal, Guadalajara, Monterrey, Ciudad Juárez y Reynosa. En el caso de equipo de trabajo los usuarios deben ponerse en contacto con la empresa para coordinar la recopilación (LENOVO, 2015). Este procedimiento de contacto directo también es utilizado por el sistema de reciclaje de las empresas Lenovo e IBM.

Las compañías de telefonía celular *Telcel*, *MoviStar* y *Iusacell* también operan programas permanentes de acopio en sus centros de atención al cliente, mientras que la empresa Nokia (ahora *Lumia* de *Microsoft*) auspicia la campaña *We:Recycle* con la que promueve que los usuarios desechen teléfonos celulares y accesorios en centros de acopio autorizados. La empresa Sony tiene un programa llamado *D'évolution* mediante el cual recibe en sus tiendas y centros de servicio cámaras y audífonos de

todas las marcas a cambio de descuentos en la compra de productos nuevos (Meraz, 2010).

En México también existen programas de recolección masivos de residuos electrónicos organizados por los representantes de los gobiernos estatales o municipales, así como por representantes de SEMARNAT, que a su vez colaboran con empresas recicladoras para poder darle un buen fin a los materiales acopiados. A continuación se presentan algunos ejemplos de dichas iniciativas.

En 2011 el ayuntamiento de Xalapa, en coordinación con el gobierno del estado, realizó un *Reciclotón* de aparatos eléctricos y electrodomésticos. En Lerdo, Durango, las autoridades ambientales han emprendido una campaña de recolección de residuos de manejo especial, incluyendo equipos electrónicos, juguetes de baterías y llantas usadas para evitar que lleguen a rellenos sanitarios (INE, 2010).

La Dirección de Control y Protección Ambiental del municipio de General Escobedo, Nuevo León, opera un programa permanente de recolección y reciclaje de residuos electrónicos en colaboración con la Secretaría de Servicios Públicos Municipales, la Dirección de Protección Civil y la empresa *Home Depot* (INE, 2010).

En 2010 las autoridades municipales de Guadalajara, Jalisco, en colaboración con el Proyecto Ecovia, la asociación de *Scouts* y la empresa REMSA organizaron un *Reciclón* que recopiló 51 toneladas de RAEE. Un año después se unieron a la iniciativa las entidades jaliscienses de Salto, Tlajomulco de Zúñiga, Tonalá, Zapopan, Zapotlanejo, Río Ayuquila, Sierra de Quila y Sierra de Manantlán. El volumen de materiales recopilados fue de un poco más de 100 toneladas (REMSA, 2015).

Por su parte la Secretaría del Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable (SEMADES) de Jalisco realizó un programa con las empresas Nokia, Telefónica Movistar, Belmont y WRS para recibir computadoras en más de 80 tiendas de la cadena Oxxo y en plazas comerciales de la zona metropolitana de Guadalajara (Pérez, 2013).

En Baja California la Red Mexicana de Manejo Ambiental de Residuos (REMEXMAR) ha organizado varias campañas de acopio con el apoyo de la Universidad Autónoma de Baja California, la Universidad Politécnica de Baja California, la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) y el gobierno estatal, entre otros (Pérez, 2013).

5. Propuestas para implementar la Minería Electrónica en México

Existen modelos ejemplares a nivel mundial que han implementado la Minería Electrónica, no sólo como una alternativa para el tratamiento final de los RAEE, sino una nueva fuente para la obtención de materia prima como los metales preciosos y menores. Países como Alemania, Suecia, Bélgica, Japón, Corea del Sur, China, Canadá, entre otros, han implementado toda una metodología para llevar a cabo este proceso a partir del principio de responsabilidad compartida, desde el mismo productor, el que lo consume, hasta el que lo maneja. Por lo tanto, a continuación se describen las propuestas que permitirán establecer a la Minería Electrónica en nuestro país, tomando en cuenta los aspectos más importantes en los que los países mencionados se basaron para implementarla.

5.1 Legislación

Debido a que nuestro país carece de una legislación específica sobre el manejo de los RAEE, como se vio en el capítulo anterior, se convierte en la primera propuesta a implementar. Por lo tanto, tomando como referencia la legislación establecida por la Unión Europea desde 1992 y actualizada en 2012, se puede adaptar la clasificación mostrada en la tabla 5.1; en donde se clasifica a los residuos electrónicos en 10 diferentes categorías.

Además de incluir esta clasificación, también se debe definir a los RAEE como residuos peligrosos, debido a su contenido, y no como residuos de manejo especial; esto también con la finalidad de facilitar las importaciones y exportaciones de los residuos electrónicos de acuerdo al Convenio de Basilea, con la finalidad de abrir una nueva oportunidad de desarrollo privado en el país para el tratamiento de los RAEE.

Se debe desarrollar un programa nacional exclusivo para el manejo de los RAEE, donde se defina el alcance de las responsabilidades de cada actor tomando como base la responsabilidad compartida, es decir desde productores, importadores, consumidores, responsables del manejo, gobierno, sociedad, entre otros.

Tabla 5.1 Clasificación de los RAEE de acuerdo a la Unión Europea y la ONU (Baldé, 2015).

No.	Categoría	RAEE incluidos
1	Aplicaciones domésticas grandes.	Calefacción, aire acondicionado, ventilación, hornos/estufas, refrigeradores, lavadoras y secadoras.
2	Aplicaciones domésticas pequeñas.	Microondas, tostadores, parrillas, cafeteras, aspiradoras, secadoras, cepillos dentales y rasuradoras.
3	Tecnologías de la información y telecomunicaciones.	"Modems", "routers", computadoras de escritorio, laptops, tabletas, impresoras, celulares, teléfonos inalámbricos, servidores, monitores de tubos de rayos catódicos, monitores LCD y LED.
4	Equipo de consumo.	Audífonos, controles remoto, dispositivos de audio portátiles, instrumentos musicales, dispositivos de video, cámaras digitales, televisores, pantallas (LCD, LED, plasma)
5	Equipo de iluminación.	Linternas, focos fluorescentes, lámparas fluorescentes, focos LED, focos incandescentes, iluminación pública.
6	Herramientas eléctricas y electrónicas.	Taladros, sierras, podadoras, limpiadores de alta presión y soldadoras.
7	Juguetes y deportes.	Juguetes electrónicos, consolas de videojuegos, equipo de ejercicios y accesorios.
8	Dispositivos médicos.	Termómetros, manómetros, equipos especiales de hospitales y consultorios.
9	Instrumentos de medición y control.	Alarmas, control de humo, control de calor, Instrumentos de laboratorios y paneles de control.
10	Dispensadores automáticos.	Dispensadores refrigerados y no refrigerados.

5.2 Recolección y transporte

En cuanto a recolección, acopio y transporte de los RAEE, primero se debe estimar la generación, la recolección y el tratamiento de éstos mínimo dentro un periodo anual y para todas las entidades federativas. Para esto, el INECC ha desarrollado una metodología para estimar la generación de los residuos electrónicos en México en la que combina varios métodos para realizar inventarios de generación dependiendo de la disponibilidad en la información para cada estado del país, entre las cuales se encuentran (Román & Beltrán, 2012):

- Reportes oficiales de generadores.
- Reportes de empresas tratadoras.
- Estimaciones con base a indicadores económicos.
- Proyecciones a todo el estado con base en la información obtenida para zonas.
- Cálculos basados en tecnologías existentes.
- Cálculos basados en el consumo de los AEE.
- Cálculos del balance en el país (producción, importación, exportación y acumulación).
- Encuestas sobre uso, consumo y desecho de los AEE a la población.

Posteriormente, ya contando con los datos actualizados sobre la generación, la recolección y el tratamiento de los RAEE, se deben establecer metas específicas durante un determinado periodo de tiempo, al igual que la directiva en la Unión Europea y las autoridades en Japón, fomentando el crecimiento del reciclaje de los residuos electrónicos y a la Minería Electrónica como una actividad viable para la recuperación de metales preciosos y menores.

La recolección es una etapa crucial para el reciclaje de los residuos electrónicos, por lo que se deben establecer diversas opciones para su acopio, deben ser municipales, de los mismos productores, e incluso individuales. Por lo tanto, se recomienda tener un balance entre diversas rutas de recolección.

En cuanto al transporte de los RAEE una vez recolectados, se deben establecer complejos de pretratamiento en ciudades clave con la finalidad de disminuir los costos del transporte en largas distancias. Estos complejos deben de clasificar, dismantelar y triturar los residuos electrónicos para liberar las fracciones metálicas de otras residuales.

5.3 Criterios para la evaluación tecnológica

Las tecnologías para el tratamiento de los RAEE deben enfocarse en la necesidad de incrementar la sustentabilidad, por lo tanto es necesario establecer los requerimientos específicos que una tecnología debe presentar en el pretratamiento como se muestra en la Tabla 5.2:

Componente	Tratamiento o acción requerida
1. Separación antes del tratamiento	
a) Residuos peligrosos	
Refrigerantes y espumas	Eliminación y disposición controlada.
Residuos de mercurio	Depósito controlado.
Capacitores	Depósito controlado.
Baterías	Clasificación y procesado en plantas especializadas.
b) Residuos valiosos	
Componentes reutilizables	Restauración y ventas.
Tarjetas de circuitos (de alto y mediano grado)	Procesamiento en fundidores de cobre y metales no ferrosos.
Tarjetas de circuitos (de bajo grado)	Mejoramiento y procesamiento en fundidores
2. Dismantelamiento y clasificación	
Plásticos	Procesamiento posterior con tecnologías adecuadas.
Vidrio y Tubos de rayos catódicos	Procesamiento posterior con tecnologías adecuadas.
Metales ferrosos	Integrarse en refinerías de acero.

Aluminio y Magnesio	Postratamiento secundario.
Cobre, Plomo, Estaño, Níquel y metales preciosos	Postratamiento con tecnologías adecuadas.
Otros	Postratamiento con tecnologías adecuadas.

En la Tabla 5.3 se enlistan algunos atributos de sustentabilidad con sus respectivos indicadores que permitirán una evaluación tecnológica objetiva (StEP, 2009):

Atributos	Indicadores
Atributos económicos	
Bajos costos de producción	Costo del transporte y tratamiento vs. ingresos
Bajos costos de inversión	Costos de inversión para otras plantas y tecnologías utilizadas en un escenario.
Potencial para el crecimiento económico	Industrias adicionales y servicios implementando escenarios.
Atributos ambientales	
Bajo uso de la electricidad	Ahorros en la electricidad.
Bajo consumo de combustible para el transporte	Combustible utilizado en el transporte.
Bajo uso de agua potable	Consumo de agua.
Pocas emisiones	Emisiones contra emisiones prevenidas.
Alta recuperación de metales	Contenido de metales en los residuos.
Atributos sociales	
Creación de empleos	Horas de trabajo para trabajadores capacitados.
Creación de trabajo específicos	Horas de trabajo para trabajadores específicos
Creación de empleos fuera del país	Horas de trabajo generadas fuera del país.
Mínimos impactos en salud y seguridad	Impactos en escenarios de salud y seguridad.

6. Conclusiones

Inicialmente se definió a la minería electrónica como una alternativa al manejo de los RAEE y para la recuperación de metales preciosos y menores encontrándose que sí es económicamente viable y ayuda a la recuperación del medio ambiente.

Posteriormente se describió el estado del arte de la Minería Electrónica en algunos países del mundo con amplia experiencia en el tema y se puede observar que existen dos principales tecnologías para su tratamiento, como es la pirometalurgia y la hidrometalurgia y están ampliamente comprobados como procesos eficientes para recuperar los metales.

Por otro lado se describió la situación actual del manejo de los RAEE en el país a través de datos sobre su generación, tratamiento y disposición y se puede mencionar que estos son muy limitados puesto que no se hace una recopilación de datos sobre la estimación de dicha generación y sólo se tiene en algunas zonas. En cuanto al tratamiento y disposición no se tiene ningún dato al respecto en cuanto a dependencias gubernamentales.

Así mismo se propusieron alternativas para la implementación de la Minería Electrónica en México, con base en las experiencias internacionales en países desarrollados y en vías de desarrollo y se puede concluir que se debe de establecer una legislación adecuada y específica para el manejo de los RAEE y también se deben de realizar estimaciones sobre su generación, recolección y tratamiento en periodos mínimos de un año.

Finalmente se propusieron alternativas para la recuperación de los metales preciosos y menores por medio de la Minería Electrónica, aprovechando los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) generados en el país

considerándose como base criterios para la evaluación de esta tecnología siguiendo un modelo de manejo de estos residuos desde su pretratamiento hasta su aprovechamiento.

7. Referencias

- Baldé, K., 2015. *E-waste statistic: Guidelines on classification, reporting and indicators*. Bonn: UNU-IAS United Nations University.
- Barrera, J., Castro, J. & Gavilán, A., 2007. *Los retardantes de flama polibromados ¿nuevas sustancias de prioridad ambiental?* [En línea] Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx> [Último acceso: 22 Febrero 2015].
- Butterworth, T., 2012. Welcome to The Age Of Urban Mining. *Forbes*, pp.48-50.
- Consumer Electronics Association, 2008. *Market Research Report: Trends in CE Reuse, Recycle and Removal*. CEA.
- Cui, J. & Zhang, L., 2008. Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review. *Journal of Hazardous Materials*, 158, pp.228-56.
- DELL, 2015. *DELL Servicio de reciclado*. [En línea] Disponible en: www1.la.dell.com [Último acceso: 25 Junio 2015].
- Ecorecikla, 2012. *Ecorecikla*. [En línea] Disponible en: ecorecikla.com [Último acceso: 23 Junio 2015].
- Glezco, 2014. *Glezco Corp*. [En línea] Disponible en: glezco.com.mx [Último acceso: 24 Junio 2015].
- HP, 2015. *HP Planet Partners*. [En línea] Disponible en: www.hp.com/latam/mx [Último acceso: 25 Junio 2015].
- Incycle Electronics, 2015. *Incycle Electronics México*. [En línea] Disponible en: incycle.mx [Último acceso 23 Junio 2015].
- INE, 2009. *Diagnóstico regional sobre la generación de residuos electrónicos en la frontera norte de México*. México D.F.: SEMARNAT Instituto Nacional de Ecología.
- INE, 2010. *Diagnóstico sobre la generación de residuos electrónicos en México*. México D.F.: SEMARNAT Instituto Nacional de Ecología.
- Jiang, P. & Harney, M., 2012. *Improving the End-of-Life for Electronic Materials via Sustainable Recycling Methods*. Advanced Technology Materials Inc.

- Kamberovic, Z., Zeljko, K., Korac, M. & Ranitovic, M., 2011. *Hydrometallurgical Process for Extraction of Metals from Electronic Waste*. Association of Metallurgical Engineers of Serbia.
- Khaliq, A., Akbar, M., Brooks, G. & Masood, S., 2014. Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes. *Resources*, 2014(3), pp.152-79.
- LENOVO, 2015. *Motorola*. [En línea] Disponible en: www.motorola.com.mx [Último acceso: 25 Junio 2015].
- Meraz, R.L., 2010. *Diagnóstico de la Generación de Residuos Electrónicos en la Zona Metropolitana del Valle de México*. México: CIEMAD-IPN Instituto Politécnico Nacional.
- Namias, J., 2013. *The Future of Electronic Waste Recycling in the US*. Columbia: Earth Engineering Center. Columbia University.
- Pérez, A., 2013. *Contaminación en México por Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*. Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán.
- ProAmbi, 2014. *ProAmbi IT Managements Solutions*. [En línea] Disponible en: www.proambi.com [Último acceso 22 Junio 2015].
- REMSA, 2015. *REMSA Recilca Electrónicos México*. [En línea] Disponible en: reciclaelectronicos.com [Último acceso 22 Junio 2015].
- Rojas, L., Gavilán, A. & Alcántara, V., 2014. *Los Residuos Electrónicos en México y el Mundo*. México D.F.: INECC.
- Román, G. & Beltrán, L., 2012. Metodología para la elaboración de los diagnósticos de generación de residuos electrónicos en México. In *Los Residuos Electrónicos en México y en el Mundo*. México: INECC. pp.131-40.
- StEP, 2009. *Recycling. From E-Waste to Resources*. Berlin: UNEP UNU.
- TBS Industries, 2012. *TBS Industries Computer Recycling Specialist*. [En línea] Disponible en: www.tbsindustries.com.mx [Último acceso 24 Junio 2015].
- The World Bank Group, 2012. *Wasting No Oportunity: The case for managing Brazil's electronic waste*. [En línea] [Último acceso: 3 Agosto 2015].
- Umicore, 2007. *Metals Recovery from e-scrap in global environment*. Genova: Umicore Precious Metals Refining.
- Urban Mining Square, 2014. *Urban Mining vs. Traditional Mining*. [En línea] Disponible en: www.urbanminingsquare.com.
- Valenzuela, V., 2011. *Siempre!* [En línea] Disponible en: <http://www.siempre.com.mx/> [Último acceso: 10 Febrero 2015].

- Wang, F., Kuehr, R., Ahlquist, D. & Li, J., 2013. *E-waste in China. A Country Report*. United Nations University/StEP Initiative.
- Wit, C.A., 2000. *Brominated flame retardants*. Estocolmo: Swedish Environmental Protection Agency.
- Xstrata, 2014. *Xstrata Copper's Horne Smelter*. [En línea] Disponible en: www.xstrata.com [Último acceso: 7 Agosto 2015].