

## RESIDUOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS: PROBLEMAS Y OPORTUNIDADES DE GESTIÓN

Lijteroff \*, R.; Marchevsky, N.; Barroso Quiroga, M.; Marchevsky, E.

Departamento de Minería, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales, (UNSL)  
Chacabuco 917, C.P. 5700, San Luis, Argentina.

\* rlijte@yahoo.com.ar

### Resumen

El aumento exponencial de los residuos eléctricos y electrónicos, como consecuencia del desarrollo informático y tecnológico de la sociedad, insta a realizar un estudio más profundo sobre la gestión actual de este tipo de residuos y los problemas medioambientales asociados al manejo inadecuado de los mismos. El presente trabajo tiene por objetivo realizar una revisión general del tema y plantea nuevas alternativas de reciclaje utilizando procesos de la metalurgia extractiva, como la pirometalurgia y la hidrometalurgia, exponiendo las ventajas y desventajas de ambas tecnologías.

### Abstract

An exponential increase of electric and electronic wastes -as a result of computational and technological development- encourages a deep study of waste management and its associated environmental problems due to improper handling. This work aims to conduct a general review of the subject and suggests recycling alternatives using extractive metallurgy processes such as pyrometallurgy and hydrometallurgy, explaining advantages and disadvantages of both technologies.

### Introducción.

Los aparatos electrónicos forman parte de la vida de las personas y se asocian a factores como el mejoramiento de las condiciones de vida, confort o estatus social. Los constantes avances tecnológicos hacen que los equipos eléctricos y electrónicos como televisores, computadoras y teléfonos celulares se conviertan rápidamente en productos obsoletos, aunque no tengan defectos de funcionamiento. Independientemente de las condiciones económicas de los usuarios, la carrera tecnológica no da tregua a los consumidores que, guiados por una tendencia social, se mantienen constantemente actualizados con sus equipos.

Cada grupo de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) cuentan con ciclos de vida diferentes, por lo que la adquisición y desuso de los mismos está en función de la probabilidad de que el usuario deseche un equipo antes de su vida útil o hasta que éste deje de funcionar. En general, los usuarios tienen la tendencia a almacenar los residuos electrónicos en sus hogares y no los asocian con el concepto de residuos peligrosos, considerando que no es necesario tomar recaudos o precauciones especiales para desecharlos.

A nivel mundial, se estima que se producen anualmente entre 20-50 millones de toneladas de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). En nuestro país, se desecha per cápita aproximadamente unos 3 kg de RAEE al año, es decir 120.000 ton/año de RAEE (Lindhqvist, 2008). Estas cifras, probablemente aumentarán en los próximos años, por lo que el manejo de este tipo de desechos supone un importante desafío en múltiples ámbitos: social, cultural, político, científico-tecnológico y ambiental.

A fines de la década de los 90, varios países europeos implementaron nuevas normativas para comenzar la regularización de la gestión de este tipo de residuos; en junio de 2005 entró en vigencia la directiva 2002/96/CE de la Unión Europea sobre RAEE (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE, en inglés). A ésta, se le suma la Directiva 2002/95/CE, sobre la restricción de ciertas sustancias

peligrosas en AEE; y la directiva RoHS que prohíbe en el mercado europeo la comercialización de AEE que contengan Pb, Hg, Cd, Pb, Cr(VI), bifenilos polibrominados (PBB) y polibromodifenil éteres (PBDE).

Según un informe de la CEPAL (2015, 23) en América Latina los países que mayor volumen de RAEEs generan con respecto a su población alcanzan 11 kg per cápita, entre los dos primeros están Argentina y Chile. Entre el 50 y 60% de los residuos se acumulan en hogares y empresas, y regularmente, un porcentaje de esa cantidad se desechan mezclados con la basura doméstica terminando en basurales o rellenos sanitarios; entre 5 y 15% se recuperan y se reutilizan partes y equipos en empresas usuarias, servicios técnicos de PyMEs y hogares; entre 10 y 20% es recuperado por recuperadores primarios informales para el reciclado de los plásticos y metales ferrosos, pero sólo alrededor del 5% (6.000 Toneladas) es recuperado, aislado y tratado adecuadamente y con certificación por plantas habilitadas por la Autoridad Nacional (Consultoras Prince & Cooke, y Escrap).

En Argentina, el marco legal utilizado para el manejo de estos residuos de RAEE es la Ley Nacional N° 24.051 (residuos peligrosos) y para su exportación, la Ley Nacional N° 23.992, que aprueba el convenio de Basilea. Algunas provincias argentinas, tales como San Luis, San Juan, Chaco y Buenos Aires, poseen leyes provinciales específicas para la gestión sustentable de RAEEs; mientras que las demás provincias han lanzado proyectos de ley sobre esta temática particular. Mientras que la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable del Gobierno de la República Argentina ha implementado programas basados en las 5R:

- Reducción de los residuos sólidos urbanos generados en origen,
- Recolección diferenciada o logística reversa de ciertos residuos valorizables,
- Re uso de los residuos,
- Reciclado para transformar desechos en nuevos insumos, y
- Revalorización de materiales procesados para su venta posterior.

El objetivo del presente trabajo es realizar una revisión general de los RAEEs, brindar información actualizada a usuarios y docentes, reflexionar sobre el mal manejo de este tipo de residuos, y proponer rutas alternativas para su revalorización y reciclado.

### ¿Qué hay dentro de los equipos eléctricos y electrónicos?

Los AEE son un mezcla compleja de cientos de materiales, muchos de los cuales pueden y deben recuperarse y reciclarse (materiales valorizables), además de contener sustancias tóxicas que pueden y deben reemplazarse. Los porcentajes de componentes varían significativamente si se trata de línea blanca (heladeras, lavarropas), línea marrón (televisores, monitores) o línea de computación.

Contienen una amplia variedad de sustancias orgánicas e inorgánicas (más de 1000), de acuerdo al tipo de manufactura y edad del equipamiento. Frecuentemente, presentan una composición mayoritaria de metales (más del 61%) y en menor proporción de plásticos (21%). Entre los plásticos más comunes se han reportado polietileno, polipropileno, poliéster y policarbonato. La mayoría de los materiales presentes en los AEE (sustancias cloradas y bromadas, metales, materiales foto y biológicamente activos, ácidos, plásticos) son potencialmente tóxicos. Aunque por otra parte, los RAEE constituyen una importante fuente de metales básicos y metales preciosos con un alto potencial económico (Huang, 2009, 399; Cui, 2008, 228; Tuncuk, 2012, 28).

### Gestión inadecuada de RAEEs: Potenciales efectos sobre la salud y el ambiente

Si bien los RAEEs en estado sólido no generan efectos directos sobre la salud humana y el medioambiente, se han publicado numerosos artículos, donde se menciona su peligrosidad principalmente en los procesos de recuperación y reciclaje inadecuados (Ghosh, 2015, 5). Las sustancias potencialmente

peligrosas a menudo se concentran en ciertos componentes dentro de las piezas de RAEEs y en muchos casos son liberadas al medio en su manipulación incorrecta. Ciertos estudios claramente indican una relación causal entre los niveles de contaminación y las emisiones de actividades de reciclaje de RAEEs informales. (Tsydenova, 2011, 56; Peeranart, K., 2013, 1237, Umair, 2013, 1237).

La exportación de residuos electrónicos en forma incontrolada, desde países desarrollados a otros en vías de desarrollo como China e India, hace que el problema se globalice. (Wong, 2007, 139; Lepawsky, 2015, 156).

Todos los trabajos indican que los más afectados por la contaminación de los RAEEs son los trabajadores del reciclaje, a través de la exposición directa al Pb, PBDE (polibromodifenil éteres) y la contaminación por dioxinas en el aire. Sin embargo a largo plazo, se observa la posibilidad de transporte de contaminantes, que sugieren un riesgo de exposición secundaria también para áreas remotas. Lixiviados ácidos con compuestos cianurados, cenizas y vertederos informales, se han identificado como otra fuente importante de contaminación ambiental.

#### **Reciclaje mediante metalurgia extractiva**

La placa de circuito impreso es la parte esencial de los aparatos electrónicos, y aunque representa solamente el 6% aproximado en peso, es donde está contenida la fracción más valiosa que constituye su potencial económico. Una placa típica puede contener más de 20% de Cu y 250 g/tn de Au, es decir entre 25-250 veces el contenido de oro y 20-40 veces el contenido de cobre si se los compara con una mena primaria de estos metales (1-10 g/tn Au) y (0,5-1% Cu), respectivamente (Tuncuk, 2012, 28).

El reciclado de los RAEE permite transformar estos residuos en una fuente secundaria (mena) para la recuperación y reutilización de metales y no metales contenidos, mitigando los efectos ambientales de dichos materiales (Tuncuk, 2012, 28; Cui, 2003, 243).

La naturaleza compleja y heterogénea de los RAEE (diversidad de metales, asociaciones metal-no metal) es el principal obstáculo para la recuperación de metales (Cui, 2003, 243). Para llevar a cabo esta recuperación se proponen varias opciones basadas en procesos mecánicos, físicos, pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos (Cui, 2003, 243; Cui, 2008, 228). Los principales factores que afectan la selección del proceso de tratamiento son: la ley metálica de los desechos, las pérdidas de metal, el impacto ambiental y el volumen de residuos a ser tratados.

La pirometalurgia es la tecnología por excelencia para la recuperación de metales no ferrosos a partir de RAEE, así como también para los metales nobles. Existen a nivel mundial varias plantas industriales que usan esta tecnología para el tratamiento de RAEEs, las operaciones pirometalúrgicas se enfocan en la producción de lingotes de cobre con contenido de metales preciosos por medio de altas temperaturas. Un proceso pirometalúrgico característico involucra el pretratamiento de los residuos (desmantelado, trituración y procesamiento físico) y luego la fundición de producto metálico enriquecido para obtener lingotes de cobre; que luego se someten a refinación electrolítica para producir cobre de alta pureza. Los lodos recogidos del cobre electrorefinado son refinados nuevamente para recuperar metales preciosos incluyendo Ag, Au, Pt, Pd, Rh, Ru e Ir. Además de Cu y metales preciosos, otros metales pueden extraerse de las fundiciones modernas. Los procesos pirometalúrgicos pueden considerarse potencialmente adecuados para el tratamiento de los RAEE en que los componentes orgánicos pueden parcialmente o totalmente suplantar al coque como combustible y agente de reducción en los hornos. Sin embargo, son procesos de elevado uso energético y alto costo que requieren alta ley en la alimentación (rica en cobre y metales preciosos). Los retardantes de llama halogenados utilizados en las placas de circuito impresas provocan la formación de dioxinas, furanos, metales volátiles y polvo, presentando así problemas medioambientales, y por tanto, requiriendo tratamiento adicional de los gases de escape (Cui, 2003, 243; Cui, 2008, 228).

En comparación con los procesos pirometalúrgicos, los hidrometalúrgicos ofrecen relativamente bajos costos de capital, la reducción del impacto ambiental (por ejemplo, no hay generación gases peligrosos ni polvos) y altas recuperaciones, teniendo la ventaja también de ser idóneo para su aplicaciones a pequeña escala (Yazici, 2009, 3). Estos atributos hacen que los procesos hidrometalúrgicos sean alternativas potenciales para el tratamiento de los RAEE. Un proceso hidrometalúrgico típico supone un pretratamiento mecánico de los residuos, la posterior lixiviación de los metales por un agente lixivante adecuado, la purificación de la solución de lixiviación enriquecida y ulterior recuperación de metales. Dado que a menudo los elementos metálicos en las placas son recubiertos o encapsulados por materiales de plástico o cerámica, se les realiza un pretratamiento mecánico (reducción de tamaño) para exponer los metales de interés a la acción del reactivo lixivante y de esta manera, facilitar su extracción eficiente. Dentro de los procesos hidrometalúrgicos, la recuperación de metales por medios biotecnológicos también es una alternativa viable, de bajo costo y ambientalmente amigable, siendo particularmente aplicable para materias primas de baja ley y a pequeña escala. Sin embargo, tiene la desventaja de sus grandes tiempos de residencia y baja densidad de pulpa (<20%) (Tuncuk, 2012, 28).

### Conclusiones

La gestión ambiental responsable de los RAEEs, representa un desafío y una oportunidad en forma simultánea. Las actuales tendencias en nuestro país y el mundo, indican que la producción de estos residuos seguirá en aumento, ya que la generación, no solo tiene que ver con la obsolescencia de los equipos, sino con una tendencia de renovación, antes de la finalización de su vida útil. La distribución de los RAEEs, en las casas de los usuarios y su eventual disposición, con el resto de los residuos sólidos urbanos, hace que su potencial contaminante, se incremente considerablemente y se pierde la posibilidad de una gestión ambientalmente responsable.

El proceso de reciclaje de RAEEs, está concentrado en la actualidad en países como China, India y Paquistán, pero los reportes actuales, indican que no se siguen procesos ambientalmente responsables.

En la actualidad, se dispone de tecnologías para el tratamiento de RAEEs en forma ambientalmente responsable, como son los hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos y los biotecnológicos. De este modo, se revaloriza su contenido a través de su uso como una fuente secundaria (mena) para la recuperación de compuestos metálicos y no metálicos, de gran valor económico y que son necesarios para la construcción de nuevos aparatos electrónicos.

El contexto planteado, muestra la oportunidad para replantear los modelos actuales de gestión de RAEEs, desde su generación, manejo y disposición final ambientalmente responsable, optando por tecnologías tendientes a la recuperación de metales presentes en estos desechos. De este modo, se contribuye a minimizar los inconvenientes que enfrenta el mundo, por la disposición final de residuos, sino que abre un camino para la investigación en el campo de la metalurgia extractiva, que hasta hace unos años no se había planteado, orientando a la minería hacia nuevos paradigmas.

Es por esto que consideramos, que en la gestión adecuada de RAEEs, existe un desafío y una oportunidad: un desafío para la mejora en los actuales modelos de gestión y una oportunidad de recuperación por medios ambientalmente sustentables, de minerales necesarios para el desarrollo tecnológico.

### Bibliografía

- Akcil, A., Erust, C., Gahan, C. S., Ozgun, M., Sahin, M., & Tuncuk, A., 2015. *Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixiviants—A review*. Waste Management. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>
- CEPAL. El desafío de la sostenibilidad ambiental en América Latina y el Caribe, 2015. ISBN: 978-92-1-057087-9 (publicación electrónica), ONU.

- Cui, J., Forssberg, E., 2003. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials* B99, 243–263.
- Cui J., Zhang L., 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials* 158, 228–256.
- Consultoras: Prince & Cooke. [www.princecooke.com](http://www.princecooke.com), Escrap. [www.escrap.com.ar](http://www.escrap.com.ar)
- Ghosh, B, M.K. Ghosh , P. Parhi , P.S. Mukherjee , B.K. Mishra, 2015. Waste Printed Circuit Boards recycling: an extensive assessment of current status. *Journal of Cleaner Production* 94, 5-19
- Huang, K., Guo, J., Xu, Z., 2009. Recycling of waste printed circuit boards: a review of current technologies and treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials* 164 (2–3), 399–408.
- Lepawsky, J., 2015. The changing geography of global trade in electronic discards: time to rethink the e-waste problem. *The Geographical Journal* 181 (2) 147–159.
- Lindqvist T, Manomaivibool P, Tojo N., 2008. La responsabilidad extendida del productor en el contexto latinoamericano. La gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Argentina. Lund University, International Institute for Industrial, Environmental Economics.
- Peeranart Kiddee, Ravi Naidu, Ming H. Wong., 2013. Electronic waste management approaches: An overview. *Waste Management* 33, 1237–1250.
- Tuncuk A., Stazi V., Akcil A., Yazici E.Y., Deveci H., 2012. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering* 25, 28–37.
- Tsydenova, Oyuna, Magnus Bengtsson, 2011. Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. *Waste Management* 31, 45–58.
- Umair, S., Björklund, A., & Petersen, E. E., 2013. Social life cycle inventory and impact assessment of informal recycling of electronic ICT waste in Pakistan. In Hilty L, Aebischer E, Andersson G, Lohmann W, Proceedings of the First International Conference on Information and Communication Technologies for Sustainability ETH Zurich, 52-58.
- Wang, X., Gaustad G., 2012. Prioritizing material recovery for end-of-life printed circuit boards. *Waste management* 32.10, 1903-1913.
- Wong, M.H., S.C. Wu , W.J. Deng, X.Z. Yu, Q. Luo, A.O.W. Leung, C.S.C. Wong , W.J. Luksemburg, A.S. Wong, 2007. Export of toxic chemicals e A review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling. *Environmental Pollution* 149, 131-140.
- Yazici, E.Y., Deveci, H., 2009. Recovery of metals from E-wastes. *The Journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey* 48 (3), 3–18.

-----