



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Propuesta conceptual de
reciclaje de tecnología LED,
beneficios económicos y
ambientales.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Alejandro Rodríguez Mendoza

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Georgina Fernández Villagómez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018





ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
ACRÓNIMOS.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	8
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	10
1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES	10
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES	10
2. ANTECEDENTES	11
2.1 ECONOMÍA CIRCULAR	11
2.2 RAEE	15
2.3 TECNOLOGÍA LED.....	23
3. MARCO JURÍDICO	27
3.1 MARCO INTERNACIONAL.....	27
3.2 MARCO NACIONAL	32
4. ACTUALIDAD DEL RECICLAJE DE RAEE Y LEDs	35
4.1 ETAPAS DEL RECICLAJE DE RAEE	35
4.2 ACTUALIDAD DE PROCESOS DE RECICLAJE DE LEDs	37
4.3 RETOS Y VENTAJAS DEL RECICLAJE DE LOS LEDs EN EL MUNDO	38
5. PROCESOS Y MÁQUINAS QUE SE UTILIZAN EN LA GESTIÓN DE LOS RAEE.....	40
5.1 CONMINUCIÓN DE RESIDUOS	40
5.1.1 CONMINUCIÓN O TRITURACIÓN MECÁNICA.....	40
5.1.2 CONMINUCIÓN ELECTROHIDRÁULICA.....	40
5.2 SEPARACIÓN DE MATERIALES	41
5.3 RECUPERACIÓN DE MATERIALES.....	43
5.3.1 PIROMETALURGIA	44
5.3.2 HIDROMETALURGIA	45
5.3.3 BIOMETALURGIA	46
6. PROPUESTA CONCEPTUAL DE UNA PLANTA RECICLADORA DE TECNOLOGIA LED	51



6.1 PLANTA DE TRATAMIENTO FINAL.....	52
6.2 CONDICIONES DE LA PLANTA	52
6.2.1 ENFOQUE EN COMPONENTES	52
6.2.2 CANALIZACIÓN DE MATERIALES NO OBJETIVO.....	53
6.2.3 MODELO DE COOPERACIÓN Y PTAR.....	53
6.2.4 VENTAS.....	54
6.3 RESIDUOS A TRATAR.....	54
6.3.1 CELULARES.....	54
6.3.2 PANTALLAS	56
6.3.4 LÁMPARAS LED	58
6.4 PROCESOS A UTILIZAR	60
6.4.1 PROCESO DE RECUPERACIÓN ELECTROQUÍMICA DE METALES BASE Y METALES NOBLES EN 3 ETAPAS (TCI).....	60
6.4.2 LIXIVIACIÓN ÁCIDA DEL INDIO ASISTIDA POR ONDAS ULTRASÓNICAS (PANTALLAS)	63
6.4.3 EXTRACCIÓN, PRECIPITACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TR. (IMANES)	64
6.4.4 LIXIVIACIÓN ÁCIDA PRESURIZADA PARA LA EXTRACCIÓN DE GALIO (MODULOS LED).	65
7. ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES	66
8. CONCLUSIONES	76
REFERENCIAS.....	78



• ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Modelo simplificado de la economía circular, aplicado en la gestión de los RAEE. Basado en (Baldé, 2017)12

Figura 2-2 Movimientos intercontinentales de RAEE (Senseable City Lab Basel Action Network, 2018).....18

Figura 2-3 Colores producto de diferentes longitudes de onda emitidas por diversos materiales (Matthias Buchert et.al., 2012).....23

Figura 4-1 Cadena de reciclaje de RAEE, traducida de (Copenhagen Resource Institute, 2014).....36

Figura 6-1 Diagrama de flujo propuesto para planta recicladora, modificado de (Fulvio Ardente, 2014).....59

Figura 6-2 Diagrama conceptual del proceso después del desmantelamiento selectivo de las piezas objetivo.59

Figura 6-3 Detalle del modelo de columnas en serie para la extracción de MB (Diaz L. , Process development for the recovery of critical materials from electronic waste., 2016)61

Figura 6-4 Modelo de recuperación electroquímica de MB y MP, traducido de (Diaz L., Process development for the recovery of critical materials from electronic waste., 2016)62

Figura 6-5 Proceso para la recuperación del Indio proveniente de pantallas de cristal líquido descartadas (Celulares y TVs)63

Figura 6-6 Esquema de proceso de extracción selectiva de Tierras Raras (Diaz L. A., 201764

Figura 6-7 Proceso de reciclaje del Galio a partir de los módulos LED (Chen,2018)65

Figura 7-1 Flujo de efectivo de la MUP70

Figura 7-2 Análisis de sensibilidad al precio de los insumos (RAEE) vs el precio del producto más rentable.....71

Figura 7-3 Cantidad relativa entre los recursos necesarios para la obtención de 1 kilogramo de material, diferencia entre MT y MUP73

Figura 7-4 Dimensiones de las relaciones B/C que se pueden obtener en la aplicación del proceso propuesto74



• ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Generación de RAEE entre países americanos. (elaboración propia basada en datos de (Baldé,2017)..... 17

Tabla 2-2 Tierras raras utilizadas en diversos productos EE (modificada de (Binnemans, 2013)22

Tabla 2-3 Metales críticos que componen los fósforos semiconductores de las lámparas LEDs. Elaboración propia basado en los datos de (Isildar,Arda et al, 2017;Golev, Artem et.al.,2014;Uebercaht et al,2017;Binnemans Koen et al.,2013;Punkkinen,Henna et al. , 2017).....26

Tabla 3-1 Principales COPs ubicados en los RAEE y su toxicidad.....28

Tabla 5-1 Diferentes tecnologías de conminación de materiales42

Tabla 5-2 Diferentes tecnologías de separación de materiales empleadas actualmente en la gestión de RAEE43

Tabla 5-3 Diversos procesos metalúrgicos para la recuperación o aprovechamiento de materiales provenientes de los RAEE en la actualidad.47

Tabla 5-4 Ventajas y desventajas de la operación cada enfoque metalúrgico (Isildar, 2018).....50

Tabla 6-1 Componentes promedio en celulares (Singh, 2018).55

Tabla 6-2 Tratamientos finales propuestos para la recuperación de los diferentes materiales objetivo que componen los celulares.....56

Tabla 6-3 Principales componentes de Pantallas electrónicas LED , procesos y eficiencias con los que se propone recuperar los materiales objetivo.57

Tabla 6-4 Principales componentes de las lámparas LED y procesos de recuperación de los materiales objetivo.....58

Tabla 7-1 Precios de Mercado de los materiales objetivo.....66

Tabla 7-2 Suposiciones realizadas para el análisis económico del proyecto basadas en las hechas por (Diaz L. A., 2017)67

Tabla 7-3 Gastos operacionales de la planta recicladora (USD).....67

Tabla 7-4 Ingresos esperados por la recuperación de metales objetivo.68

Tabla 7-5 Criterios económicos resultantes del análisis del proyecto propuesto.69

Tabla 7-6 Rendimientos e impactos generados en la producción de un kilogramo de material, basado en datos de (Angel, 2016) (Copa, 2015) (Darmouth.edu, 2018) (Deng, 2016) (Haque, 2014) (Koltun, 2014) (Usapein, 2016) (Tost, 2018)..... 71

Tabla 7-7 Rendimientos e impactos generados en la recuperación de un kilogramo de material por medio del proceso propuesto, mediante los datos en (Chancerel, 2015) (Diaz L. ,2016)(Diaz L. ,2017)(Zhang,2017)(BOREL HORNOS,2017) 72

Tabla 7-8 Diferencias entre rendimientos y recursos utilizados para la producción de un kilogramo de material por la MT y la MU, así como las relaciones Beneficio-Costo de la producción con la MUP..... 72



• ACRÓNIMOS

AEE: Aparatos Eléctricos y Electrónicos

BAN: Basel Action Network, en español Red de Acción de Basilea

CDMX: Ciudad de México.

COPs: Compuestos Orgánicos Persistentes

DOF: Diario Oficial de la Federación

EE. UU: Estados Unidos de Norteamérica

GEI: Gases de efecto invernadero.

GPS Global Positioning System, en español Sistema de Posicionamiento Global

IDH: Índice de Desarrollo Humano

LCD: Liquid Cristal Display, en español Display de Cristal Líquido

LED: Light Emitting Diode, en español Diodo Emisor de Luz

LFC: Lámparas Fluorescentes de Contacto

LGPGIR: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

LMP: Límites Máximos Permisibles

MB: Metales Base

MP: Metales Preciosos

MT: Minería Tradicional

MU: Minería Urbana

MUP: Minería Urbana Propuesta

MXN: Pesos Mexicanos

RAEE: Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

REP: Responsabilidad Extendida del Productor

TCI: Tarjetas de Circuito Impreso

TR: Tierras Raras

TRC: Tubos de Rayos Catódicos

USD: Dólares estadounidenses



1. INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

A través de la historia y con el crecimiento de la población mundial se presentaron problemas o necesidades en todos los ramos de la actividad humana, los cuales fueron solventados en gran parte con la invención de productos o servicios, lo cual creó un sistema económico de consumo lineal (producir, utilizar, tirar) que se intensificó con la revolución industrial y que desde entonces sigue funcionando; sin embargo a medida que la tecnología progresa y las necesidades individuales evolucionan, estos productos son cada vez más complejos y se producen en mayor cantidad, dejando de lado el daño ambiental que pudieran ocasionar cuando estos productos dejen de ser útiles y formen parte de la basura. Tal es el caso de las bolsas de plástico, los aerosoles, los popotes, los residuos industriales y una gran variedad de productos electrónicos. Como una respuesta a todos los productos que en un principio se crearon y que no se puso atención a las afectaciones posteriores a su ciclo de vida, nacieron los conceptos de reducción, reúso, reciclaje y economía circular, las cuales están íntimamente ligadas y son importantes para la conservación del planeta tierra (Ruiz, 2018).

Se ha comentado que la economía circular es la evolución del modelo económico lineal y es hacia donde van las nuevas formas de hacer negocio en la actualidad, en virtud de la necesidad imperiosa de hacer algo por el cambio climático, el calentamiento global y los daños que las industrias en el pasado generaron al ambiente. De hecho, se han firmado compromisos internacionales como el acuerdo de París, entre otros. En todo el mundo se fomenta el reciclaje de todo tipo de materiales y productos. Entre ellos los más complejos de reciclar son los residuos de aparatos eléctrico y electrónicos (RAEE) que se componen de distintos materiales (metales, plásticos, vidrio, etc.) y que se ofrecen en distintas formas, tamaños y modelos, lo que hace tardado su reciclaje, pues se necesitan separar todos los materiales para hacerlo. Además, la demanda para adquirir productos tecnológicos va en aumento a nivel mundial y entre el rápido crecimiento de la cantidad de estos productos y la poca velocidad en el reciclaje sugiere que tarde o temprano, habrá una acumulación muy grande de estos residuos, los cuales en muchos casos resultan tener sustancias tóxicas para la salud y el ambiente. Precisamente por esta razón se tiene que poner atención este gran afluente de residuos electrónicos ya que se proyecta un aumento considerable de su producción (3-5% anual) (Cucchiella, 2015) y en consecuencia presenta problemas para su disposición adecuada a nivel mundial; en este rubro es importante tomar en cuenta la cantidad de aparatos con tecnología LED (lámparas, tabletas, monitores, pantallas, celulares, etc.) la cual también ha ido aumentando y se prevé que sean los aparatos con mayor presencia en el efluente de residuos electrónicos en el futuro cercano (LED professional, 2016).

La tecnología LED llegó para quedarse, ya que ha resultado ser una alternativa más eficiente, barata y ambientalmente amigable que cualquier tecnología de iluminación antes existente (lámparas incandescentes, lámparas ahorradoras, luces neón; etc.). Debido a esta situación se proyecta que su utilización en diferentes ámbitos se multiplique y crezca como la alternativa dominante de



iluminación a nivel mundial para el 2020 (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

Sin embargo, la complejidad de esta tecnología dificulta su reciclaje con los procedimientos convencionales para el reciclaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y se tiene hasta el momento poco enfoque a nivel mundial para hacer más eficiente el reciclaje de los materiales que conforman a los LEDs (Rahman, 2017).

Los LEDs están conformados por metales, tierras raras y materiales de gran valor tanto económico como ambiental, puesto que al extraer estos materiales propios de la naturaleza y sintetizarlos para poder utilizarlos (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016), se produce un impacto ambiental considerable que con el reciclaje de los RAEE y en particular de los LEDs se puede mitigar.

La presente tesis aborda una alternativa para el tratamiento adecuado de los RAEE con tecnología LED, ya que debido a la creciente relevancia de estos productos a nivel mundial y al desafío que presentarán para su disposición (cuando tengan mayor presencia en el efluente de basura electrónica), es pertinente estudiar su situación. Este trabajo toma en cuenta investigaciones recientes y la práctica actual en gestión de residuos electrónicos en diferentes partes del mundo, considerando los procesos que se pueden aplicar para su manejo adecuado, ya que no hay un proceso específico para el tratamiento de estos residuos (Rahman, 2017), así como también los precios de mercado de los metales extraídos de las minas y de la recuperación de fuentes secundarias, el rendimiento económico de los procesos y el costo aproximado de ejecutarlos.



1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Llevar a cabo una propuesta conceptual de tratamiento para el reciclaje de RAEE con tecnología LED considerando su factibilidad técnica y económica en México.

1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

Presentar los conceptos principales de la gestión del reciclaje y la recuperación de materiales de los RAEE de acuerdo a la experiencia internacional.

Poner de manifiesto la importancia de la tecnología LED en la actualidad considerando la necesidad de su gestión al fin de vida útil.

Investigar las prácticas actuales del reciclaje y el aprovechamiento de materiales de los RAEE, analizando los pros y contras de la aplicación de la metodología de reciclaje con la tecnología LED.

Proponer alternativas de tratamiento de tecnología LED con base en los fundamentos de la economía circular.

Medir los beneficios tanto económicos como ambientales de la propuesta de tratamiento de tecnología LED.

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Para esta tesis se considerarán únicamente, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos con tecnología LED.

Por otro lado, no se incluirán las baterías de los distintos aparatos, pues se sabe de sobra su beneficio tanto económico como ambiental. Asimismo, los RAEE provenientes de los vehículos automotores.

Solamente se tomará en cuenta las publicaciones científicas, artículos de investigación e informes técnicos de los últimos 10 años.



2. ANTECEDENTES

2.1 ECONOMÍA CIRCULAR

Con una preocupación cada día más latente sobre el calentamiento global, aunado a la rápida explosión demográfica a nivel mundial, un modelo económico tradicional lineal de producción y consumo se empieza a cuestionar por la generación de una cantidad considerable de residuos y abre la puerta hacia la discusión sobre las bondades de la economía circular, la cual busca un balance entre el desarrollo económico, la eficiencia en la utilización de los recursos naturales y la protección al ambiente. (Rondon, 2017) Para poder cosechar recursos a través de la minería urbana, es necesario evolucionar del modelo clásico de tomar-hacer-tirar y adoptar el sistema de la economía circular. Asimismo, se requiere un manejo eficiente para desviar los residuos electrónicos de caer en los botes de basura (Baldé, 2017).

En una economía circular, se persigue la idea de aprovechar de forma óptima los recursos que se tienen actualmente, así como los recursos en el futuro, los productos son reusados, compuestos o reciclados de manera segura y eficiente; lo que normalmente se considera como residuo, en este modelo, al término de su vida útil se le da el trato de recurso, por lo que el reciclaje forma el pilar más importante de este modelo económico (Ruiz, 2018) (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Sin embargo, en un modelo de economía circular, representado en la figura 2-1, no solo se considera el reciclaje como la respuesta a este gran problema, sino también tiene que ver con el diseño de los productos, ya que muchas veces es más caro reparar un dispositivo que comprar uno nuevo. Además, tanto el diseño del dispositivo como el material utilizado hacen del reciclaje un verdadero reto, en tanto se utilizan componentes que contienen sustancias o residuos peligrosos, tales como el mercurio en pantallas LCD o retardantes de flamas como los bifenilos policlorados, etc. (Baldé, 2017) Por la modernización y sofisticación de los mismos, se vuelve aún más complejo su aprovechamiento al final de su vida útil y por ende se dificulta su reciclaje; en respuesta de este problema se ha exhortado a los diseñadores a crear nuevos productos más fáciles de reciclar al término de su vida útil, con el fin de no desperdiciar recursos energéticos, materiales y tiempo para su aprovechamiento.

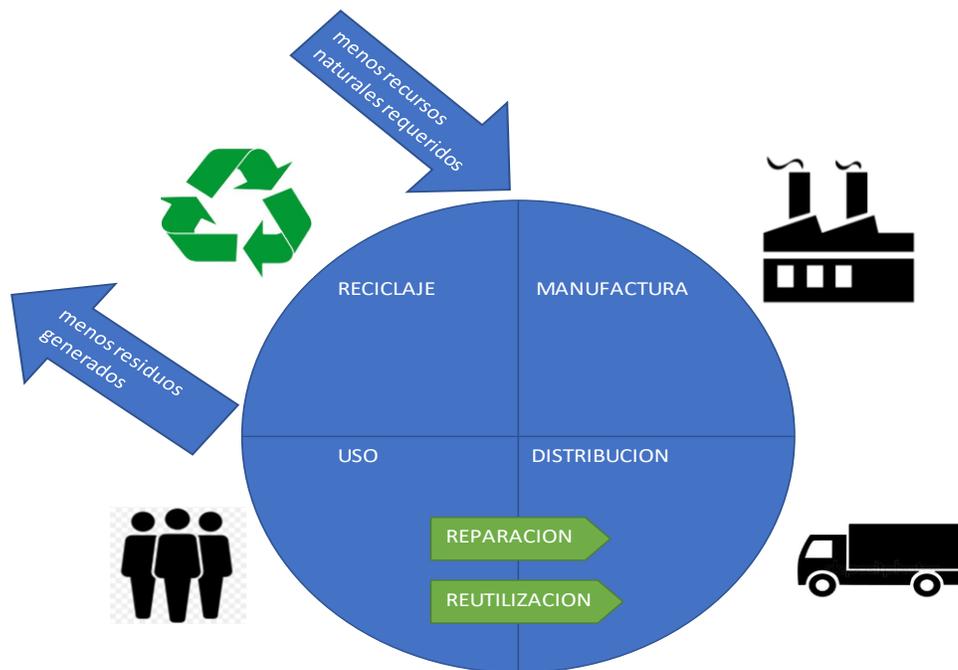


Figura 2-1 Modelo simplificado de la economía circular, aplicado en la gestión de los RAEE. Basado en (Baldé, 2017)

Aplicado en el campo de los residuos electrónicos, la economía circular permitiría incrementar el valor del equipo cuando es desechado, mientras que reducir las presiones medioambientales que tienen que ver con la extracción de los materiales de la tierra, las emisiones al aire y los residuos. Cerrar el ciclo de los materiales implica la reducción de la necesidad de nuevos materiales crudos, disposición de residuos y energía, todo esto mientras se crean nuevos trabajos que ayuden al medio ambiente y crece la economía con nuevas oportunidades de negocio (Baldé, 2017).

Actualmente algunas empresas, entre ellas PHILIPS, están experimentando con el concepto de diseñar para el fin de vida útil de los dispositivos eléctricos, en este caso las lámparas LED. Con un concepto de vender la iluminación como un servicio, se intercambian los dispositivos inservibles por los nuevos con el mismo proveedor, dando así facilidad para la recolección de los residuos y certeza en su manejo ya sea para disposición final o su reciclaje al entregar los residuos a las empresas especializadas en reciclaje, haciendo más fácil la recuperación de materiales en un modelo de responsabilidad compartida entre las empresas productoras de la tecnología y las que lo reciclan. Este modelo promete ser uno de los más exitosos en el futuro (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

A su vez la empresa europea RECOLIGHT, en el Reino Unido, provee el servicio de recolección y reciclaje de lámparas, con el uso de contenedores plásticos en puntos de venta, técnica que los ha posicionado como los líderes del reciclaje de lámparas en el Reino Unido, en donde las regulaciones de RAEE establece un objetivo del 80% para las tasas de recuperación durante el reciclaje: este es



el porcentaje de materiales que puede ser reutilizado de las lámparas de desecho después del reciclaje. La tasa de recuperación en el reciclaje es más del 90% (Recolight, 2018).

En los países europeos donde ya están limitados en cuestiones de terreno y no se puede disponer los residuos en rellenos sanitarios, se revolucionó el sistema de reciclaje de los residuos en general debido a la necesidad de mitigar los impactos ambientales y los riesgos a la salud que esto significaba, no es de sorprender que países como Suiza, Noruega y Suecia muestren las prácticas y la tecnología más adelantada a nivel mundial, sobre todo en cuanto al tema de reciclaje de los RAEE, cabe destacar que su tasa de recolección de residuos es del 49% el más alto en el mundo (Baldé, 2017). Los países Nórdicos en general, son un ejemplo en la gestión de RAEE a nivel mundial, ya que tienen altos índices de recolección y reciclaje. Manejan por separado los sistemas de iluminación como las lámparas fluorescentes, pues contienen gas de mercurio en su interior lo que los hace residuos peligrosos y en su gestión logran separar el mercurio por medio de un sistema mojado que convierte el gas de mercurio en sal lo cual hace muy eficiente la recuperación de los materiales que componen estos dispositivos. Sin embargo, con el cambio a la tecnología LED los procesos para el reciclaje no serán los mismos, aunque al modelo de Responsabilidad Extendida del Productor con el que es posible la recolección tan alta (90 -100%) de este tipo de pequeños RAEE, no se esperarían grandes cambios (Richter, 2015).

El modelo de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) se originó por primera vez en Suecia y Alemania a principios de la década de los 90, con el cual se buscaba minimizar la carga financiera de los gobiernos en las operaciones para la gestión de los residuos y recargándolo en los consumidores y empresas (Rondon, 2017). En esencia, la REP obliga a los productores de estos dispositivos electrónicos a organizar y financiar la recolección, el tratamiento y el reciclaje de sus productos al final de su vida útil (Baldé, 2017). También se encarga de promover el diseño ecológico con el fin de facilitar el reciclaje y recuperación de los materiales con los que están compuestos los RAEE, ayudando a cerrar los ciclos de materiales que caracterizan a la economía circular. Ejemplos como estos ya se encuentran en gran parte de las industrias de todo el mundo (Richter, 2015).

En Bélgica, existe un solo esquema de recolección nacional, el cual es manejado por la organización sin fines de lucro, RECUPEL. En este esquema, una contribución financiera es requerida por cada producto electrónico puesto en el mercado, en el caso de las televisiones se paga una contribución de 1 Euro, el cual es pagado por los consumidores en el momento de la compra. Además, los minoristas tienen la obligación por ley de aceptar los productos que han llegado al fin de su vida útil, la población en general puede dejar sus RAEE en estos lugares o en las colectas permanentes por parte de los gobiernos municipales (Vanegas, 2017).

Sin embargo, en los países en desarrollo, la falta de instalaciones de tratamiento que cumplen con los estándares internacionales y la falta de infraestructura de recolección que canaliza los desechos electrónicos a estos sitios constituyen un gran obstáculo para que el productor adopte la responsabilidad. Esto puede abordarse mediante el aprovechamiento del apoyo del gobierno dirigido



a aumentar las instalaciones de tratamiento compatibles o mediante enfoques orientados al mercado que apuntan a aprovechar los recicladores compatibles para crear su caso comercial (Baldé, 2017).

En México, aunque la REP ha querido ser implementada, no se muestra como tal ante la ley, pues en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) y su reglamento, la responsabilidad del manejo adecuado de los residuos en general, es del generador de los mismos y no del productor. Los grandes consumidores corporativos (los que más generan) están obligados a presentar un plan de manejo especial, lo que significa que solo deben contratar a una empresa de reciclaje que se haga cargo de los residuos que genera (Michael Smith et al, 2016). Por lo que, en este esquema, la recolección de los residuos eléctrico y electrónicos, así como su manejo adecuado, no goza del mismo alcance que tienen los países más desarrollados.

Sin embargo, existen esfuerzos por el gobierno en cuanto a la recolección de residuos reciclables siendo estos el mercado de trueque y el RECICLATRON, este último más enfocado a los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE). Sin embargo, no reciben lámparas fluorescentes. Este es un esfuerzo conjunto del gobierno de la CDMX con las empresas de reciclaje en donde el gobierno ayuda a la recolección de residuos y se los entrega para su manejo adecuado a las empresas. El RECICLATRON está promocionado por la organización RESIDUOS COP, que es un esfuerzo en México para la divulgación de los peligros de la disposición incorrecta de los RAEE y las sustancias nocivas para la salud que contienen, tales como los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP). El RECICLATRON, tiene varias sedes y fechas en las que el público en general puede ir y entregar los RAEE y obtener beneficios por su buen comportamiento ambiental, una planta pequeña y bolsas de composta para plantar en jardines (Tsydenova, 2018). Esto ayuda a las empresas que reciben los residuos, a obtenerlos de forma separada, ya que en México no es común la separación de basura.

Por lo anterior, puede resumirse que en México los esfuerzos en cuanto a la gestión de residuos eléctricos y la REP, se traducen en una responsabilidad compartida por el gobierno, empresas recicladoras y consumidores (Rondon, 2017). Sin embargo, sigue siendo más atractivo para el público en general, vender su basura electrónica en los distintos puntos de acopio (legales o no) que intercambiarlo por plantas y composta.

Sumado a esto, los procesos de reciclaje completos no son comunes, por lo que la recuperación de materiales valiosos y críticos es pequeña. La infraestructura existente no puede hacer frente para reciclar grandes cantidades de RAEE, y la mayoría de las compañías que se dedican al reciclaje se concentran en la recuperación de los componentes valiosos, tales como: tarjetas electrónicas, tubos de rayos catódicos, pantallas LCD, etc. Dejando las otras partes a un lado sin pensar que pueden que generar un daño al medio ambiente todavía (Tsydenova, 2018).



2.2 RAEE

Son los residuos de aparatos eléctrico y electrónicos, (como televisiones, monitores, teclados, celulares, tabletas electrónicas, etc.) están considerados como uno de los flujos de residuos con crecimiento más rápido a nivel mundial, con una tasa de crecimiento estimada entre el 3-5% por año (Cucchiella, 2015) y se cree que puede incrementar y representar un problema en un futuro cercano por varios motivos por ejemplo: La inclusión de nuevos productos tecnológicos más complejos en el flujo de residuos pronto sustituirá a los residuos actuales, afectando el volumen de recolección, el tipo de materiales a recuperarse y los procesos de reciclaje de forma impredecible, un ejemplo serían los paneles solares, y los televisores LED, LCD y los casi extintos televisores de tubos de rayos catódicos (TRC). Tomando en cuenta lo anterior, se presentarán materiales innovadores en la composición de los RAEE que en la actualidad no son correctamente manejados durante el término de su vida útil (terminando en rellenos sanitarios) y que pueden convertirse en una fuente valiosa de materiales en el futuro cercano, como los plásticos de alta tecnología y compuestos de tierras raras (Punkinnen, 2017). Por lo tanto, se hace crucial el incremento de la capacidad de reciclaje de estos residuos en el mundo.

Además, los RAEE contienen metales preciosos como oro, plata, platino y paladio, pero también contienen materiales voluminosos como cobre, hierro y aluminio, junto con plásticos que pueden reciclarse. También contienen tierras raras, materiales peligrosos y escasos. Los materiales peligrosos que comúnmente se encuentran en los desechos electrónicos son: metales pesados (como mercurio, plomo, cadmio, etc.) y químicos (como los COP o los retardantes de flama), los cuales pueden provocar enfermedades como cáncer, esterilidad, entre otras (Residuos COP, 2018). No debe pasarse por alto que estas sustancias tóxicas pueden acumularse en el agua y en el suelo por muchos años, persistir pese al clima o la erosión y precisamente por este motivo no deben disponerse en un relleno sanitario como los residuos sólidos urbanos o al aire libre. Sin embargo, ese problema se presenta en todo el planeta, se conoce que el 70% de metales pesados en los rellenos sanitarios de Estados Unidos de Norteamérica proviene de la mala disposición de RAEE en estos lugares (Lee, 2017). A su vez, también debe recordarse que la mala disposición de estos residuos también causa pérdidas virtuales en cuanto a que se desperdician recursos que se podrían aprovechar para la creación de más productos y cerrar el círculo de productividad, importante para el modelo de economía circular y en este caso, estaríamos perdiendo la oportunidad de ser más responsables en el aspecto ambiental, social y económico. También deben establecerse sistemas adecuados de gestión de desechos electrónicos para permitir la recuperación del impresionante valor de los materiales valiosos que contienen los equipos desechados. Para explotar esta oportunidad y mitigar simultáneamente la contaminación, se necesitan buenas políticas para facilitar la creación de una infraestructura y fomentar la recuperación de materiales valiosos.

En general, se pueden encontrar hasta 60 elementos de la tabla periódica en dispositivos electrónicos complejos, y muchos de ellos son técnicamente recuperables, aunque existen límites económicos establecidos por el mercado. La Universidad de las Naciones Unidas estima que la perspectiva de



los recursos para las materias primas secundarias de los desechos electrónicos vale 55 mil millones de euros (63,800 millones USD) de materias primas (Baldé, 2017). Por lo que dejando de lado los efectos nocivos de su mala disposición pienso que vale la pena mirar el lado amable y lucrativo del reciclaje, sin embargo, antes tenemos que presentar las cantidades que se generan en el mundo para dimensionar esta problemática, antes de pensar en lucrar ayudando a resolverla.

Una cifra estimada de la generación de RAEE a nivel global muestra que fueron generados 40 millones de toneladas en el año 2009 (Lundgren, 2012), y se tiene que la generación en el 2016 fue de alrededor de 44.7 millones de toneladas, se espera que esa cifra incremente a 52.2 millones de toneladas de RAEE para el año 2021 (Baldé, 2017). Por lo que este tipo de residuos son un problema silencioso para todas las naciones en esta época de alto desarrollo tecnológico, ya que en particular el proceso de reciclaje es más laborioso que el de otros residuos por la cantidad de componentes que integran los distintos modelos y dispositivos.

En particular la gestión de los RAEE es un campo de mucho crecimiento técnico y profesional (Fernandez, 2013), pues tiene muchos temas que se pueden mejorar, por ejemplo: en el 2016 se tiene documentado que el reciclaje o disposición final de estos residuos formalmente recolectados fue de 8.9 millones de toneladas, es decir el 20% de la generación total de ese mismo año. Sin embargo, 34.1 millones de toneladas, el 80% de la generación anual global no tiene reportes de reciclaje o de disposición final formal. El destino del 76% de los RAEE es desconocido, se presume que pueden haber sido vendidos o simplemente arrojados en un predio abandonado. Se estima que alrededor de un 4% de los RAEE en los países desarrollados es tirado con los residuos sólidos municipales (Baldé, 2017).

En América en 2016, la generación total de RAEE fue de 11.3 millones de toneladas, sin embargo, sólo 1.9 millones de toneladas han sido documentadas para su recolección y su reciclaje por la vía formal. Estados Unidos y Canadá tienen leyes estatales para la gestión de los RAEE, y la mayoría de la información disponible. En el resto del continente la mayoría de los residuos son manejados por el sector informal. El principal generador de RAEE son los Estados Unidos con 6.3 millones de toneladas, el segundo lugar es Brasil con 1.5 millones de toneladas y México con 1 millón de toneladas, cifras de 2016 (Baldé, 2017).

En la tabla 2-1 se presenta la generación de basura electrónica en los principales países del continente americano, así como el porcentaje de recolección que se presenta en cada uno, respecto a la generación estimada en el mismo año. Cabe destacar la gran diferencia en los indicadores de generación y de recolección entre los países de Norteamérica y Sudamérica, si bien el principal país generador y reciclador es EE.UU., el porcentaje de recolección en México es mayor, es aquí donde se distinguen los esfuerzos de la responsabilidad compartida, ya que el país vecino del norte cuenta con 700 instalaciones de reciclaje certificadas (Baldé, 2017) mientras que en México se tienen 35 según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en su directorio de lugares de acopio 2010 (no existe uno más actualizado) y según la organización RESIDUOS COP



en su directorio hay 57 empresas con registro ambiental (Residuos COP, 2018). También se debe de tomar en cuenta que el porcentaje de recolección considera la cantidad recolectada y reciclada en el año en cuestión, por lo que la suma de las cantidades que aparecen en esta pequeña tabla suman 1.8 millones de toneladas (Mt), mientras que lo que se tiene registrado de basura electrónica recolectada y reciclada para América es un total de 1.9 Mt (Baldé, 2017) por lo que se muestra en esta simple tabla el panorama en cuanto a reciclaje legal en el continente americano sin la necesidad de presentar todos los países y se aprecia lo mucho que se tiene que recorrer en esta materia en América Latina.

Tabla 2-1 Generación de RAEE entre países americanos. (elaboración propia basada en datos de (Baldé,2017)

PAÍS	GENERACIÓN Mt	RECOLECCIÓN/ GENERACIÓN (Mt)	RECOLECCIÓN /GENERACIÓN (%)
EE.UU.	6.3	1.386	22%
BRASIL	1.5	0.045	3%
MÉXICO	1	0.358	36%
ARGENTINA	0.4	0.012	3%

El principal desafío con la gestión de residuos electrónicos en América Latina es la aceleración de todos los procesos legislativos. Para los pocos países que ya tienen leyes de desechos electrónicos en vigencia tales como Bolivia, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México y Perú es necesario también mejorar en el campo de la investigación. Sólo unos pocos estudios se han realizado hasta ahora para abordar el problema de los desechos electrónicos en América Latina, y todos ellos se llevaron a cabo hace muchos años (Baldé, 2017).

En nuestra nación, se tiene conocimiento de los riesgos de la problemática de los residuos electrónicos, aunque hasta el momento el mayor avance sea por la vía legislativa que determina legalmente a estos residuos como residuos de manejo especial por la LGPGIR y su reglamento, así como la norma oficial mexicana NOM 162 SEMARNAT 2011. Se han firmado convenios ambientales multilaterales con otros países para realizar esfuerzos conjuntos a la gestión medio ambiental y ayudar a preservar el planeta, tales como el convenio de Basilea y el convenio de Estocolmo, el primero regula las exportaciones de materiales peligrosos entre los países firmantes con el fin de evitar catástrofes ambientales y el segundo compromete a los países a la eliminación paulatina de los COPs, por los daños potenciales hacia la humanidad y el medio ambiente. Recordemos que EE. UU. no firmó el convenio de Basilea (Lee, 2017) por lo que los movimientos transfronterizos no son ilegales, aunque lleven materiales peligrosos, por lo que pueden exportar su basura electrónica a varias partes del globo terráqueo sin notificar a ningún organismo. Se puede



presumir que la mayor parte de los residuos que genera ese país se exportan a otros países por la vía ilegal.

El flujo de los RAEE en el mundo es un problema complejo, pues tiene muchas variables, estos residuos se han movido históricamente desde las zonas de disposición hacia las zonas más marginadas del globo, en el que algunas personas tienen suficientemente poder económico y político se benefician a través de la cadena de valor, donde la mano de obra barata y las pocas medidas de seguridad hacen más rentable la gestión de estos residuos. Sin embargo, no se tiene una cantidad exacta de su transportación debido a la falta de datos por los movimientos ilegales que se tienen hacia estos países (Malasia, Tailandia, China, etc.) lo cual dificulta las proyecciones y las estimaciones en cuanto a la cantidad de residuos reciclada o dispuesta correctamente. Se tiene el conocimiento que es aproximadamente 10 veces más barato exportar la basura electrónica hacia los países en desarrollo de Asia (Lundgren, 2012), que gestionar los residuos en territorio propio, tomando en cuenta que es una actividad ilegal en muchos casos y que por el tratado de Basilea en 1984 y que esta actividad se sigue realizando, se presume que las ganancias obtenidas por los involucrados deben ser ominosa pues el riesgo es mucho.

Hasta apenas el año pasado, con el proyecto Monitour por el MIT, se demostró con ayuda de dispositivos GPS incrustados en diferentes residuos electrónicos como televisores TRC, pantallas LCD y celulares; que los movimientos transnacionales de estos residuos desde EE.UU. pueden recorrer grandes distancias hasta alcanzar lugares tales como Canadá, México, República Dominicana, Hong Kong, Taiwán, Pakistán, Tailandia, Emiratos Árabes Unidos, Kenia, Camboya, Togo y China, las distintas rutas que tomaron los residuos de prueba pueden verse en su página de internet (Lee, 2017).

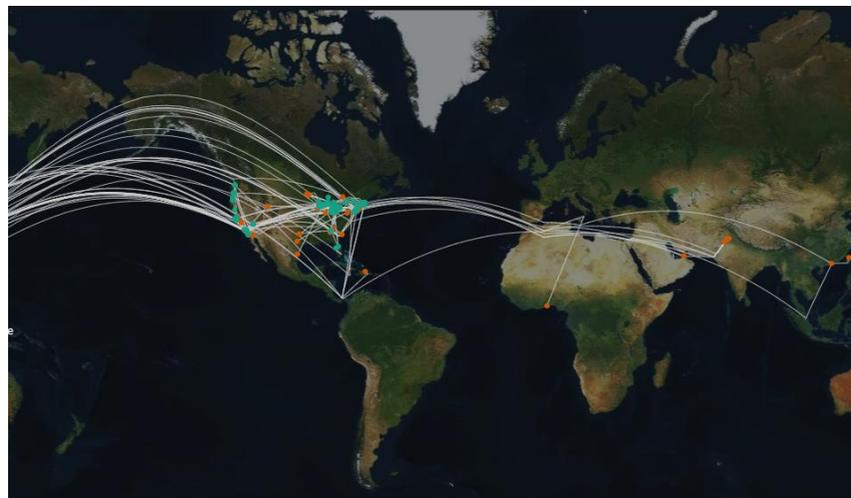


Figura 2-2 Movimientos intercontinentales de RAEE (Senseable City Lab Basel Action Network, 2018)



En la figura 2-2 se aprecia que la mayoría de las líneas van dirigidas hacia el continente Asiático y llama la atención que mientras los EE.UU. están generando 6.5 Mt de basura electrónica anual, reciclando oficialmente solo el 22% y el resto presumiblemente la exporta a otros países, como se demuestra en la Figura 2-2; China es el principal generador de RAEE en el mundo con 7.2 Mt anuales, sólo documenta el 18% de recolección y reciclaje (Baldé, 2017) y aun así importa basura electrónica desde otros países, entre ellos EE.UU. (Lee, 2017) ¿Cuál es la diferencia? ¿Qué explicación puede encontrarse en tan extraño comportamiento? ¿Qué beneficios obtiene China por importar la basura electrónica de otros países?

El gran motor que impulsa a las importaciones puede ser el mercado informal de reciclaje de RAEE, ya que miembros del BAN, gracias a la información del proyecto Monitour, investigaron personalmente las locaciones donde los rastreadores GPS dejaron de moverse, y encontraron por lo menos 48 lugares en donde reunieron evidencia de trabajadores informales desarmando los RAEE en condiciones inseguras de trabajo, lo cual está detallado en su reporte (Jim Puckett et al, 2016). La mayoría de las exportaciones terminaron en el área rural de Hong Kong llamado Nuevos territorios y donde se encontró mucha de la basura electrónica simplemente tirada en medio de terrenos baldíos. Este estudio continúa monitoreando las exportaciones que salen desde EE.UU. (Basel Action Network, 2018) Lamentablemente esto no garantiza que la disposición de estos productos sea la correcta o que el desmantelamiento y manejo se realice con las medidas de seguridad adecuadas por lo que se traduce en un daño potencial a la salud de los trabajadores y al ambiente.

Además, se debe tomar en cuenta que China firmó el convenio de Basilea que estipula que los envíos de residuos peligrosos efectuados sin consentimiento de las dos partes son ilícitos, y los envíos efectuados desde un Estado que no sea parte del Convenio son ilícitos, al igual que los envíos efectuados hacia un estado que no sea parte del convenio (Lee, 2017) (BAN, 2018). Los países firmantes del convenio están obligados a proporcionar datos a la Secretaría del Convenio de Basilea con estadísticas sobre importaciones y exportaciones de los RAEE. Sin embargo, las estadísticas no cubren el comercio de equipos desperdiciados, aunque funcionales, para su reúso. Por lo tanto, se ha presentado que a menudo la basura electrónica se clasifica como "Electrónica usada" debido a la posibilidad de reutilización, reacondicionamiento y reciclaje (Baldé, 2017).

Este flujo de residuos indica cosas sorprendentes y que remarcan los grandes retos que en nuestro país se tienen que enfrentar en este ámbito. También invita a la comparación entre México y China en el reciclaje, y lo que se importa de basura electrónica de forma ilegal. De acuerdo con el informe de BAN, 7% de la basura electrónica de EE. UU se dirige hacia México y Canadá (Basel Action Network, 2018). También, se sabe que muchos productos cruzan la frontera y gran parte de ellos sigue el camino de Texas hasta la colonia Renovación, en la Delegación Iztapalapa, donde hay empresas que se dedican al desmantelamiento de los equipos, ya sea con certificado ambiental o no, para vender usado o para su tratamiento final (Michael Smith et al, 2016).



En el reportaje de (Michael Smith et al, 2016) destacaron, entre otras cosas, los precios de la mano de obra del sector informal, con un promedio de 1500 MXN semanales, sin poner atención a los objetivos de la producción y siendo esta ganancia el doble de lo que se conseguiría el empleado en una fábrica. En el informe de (Jim Puckett et al, 2016) se enfatiza que los trabajadores informales llegan a desmantelar un promedio de 200 pantallas LCD al día, y que ganan 4 yuanes (0.6 USD) por cada pantalla desmantelada, por lo que terminarían ganando 120 dólares al día. Los dos escritos datan del 2016, uno de septiembre y otro de noviembre, al tipo de cambio de noviembre 2016 (20.17 MXN/USD) (<http://www.eldolar.info/es-MX/mexico/dia/20161116>). Esto significa una diferencia abismal de 13,000 MXN a la semana entre un empleado informal en Hong Kong y otro en Renovación en Iztapalapa, realizando prácticamente la misma labor y con nula o casi nula protección hacia los elementos y sustancias peligrosas que contienen los RAEE.

Lamentablemente esta diferencia se puede deber a muchos motivos, el salario promedio era igual en México y China en el 2012 (390 USD) (BBC mundo, 2012) y hasta el 2016 el salario promedio en China era equivalente a 835 USD mientras que en México equivalente a 307 USD (investing.com, 2018), sin embargo, en el IDH 2017 China tiene un valor de 0,748 (lugar 86) y el de México es de 0,774 (lugar 74) (Expansion, 2018) (Datos macro, 2018). En el mismo año 2016 el valor del PIB en China era equivalente a 11.29 billones USD mientras que el PIB mexicano llegaba a los 1.027 billones USD. China genera 7.2 millones de toneladas de RAEE anualmente, está documentado que formalmente se recicla el 18 % de la generación de RAEE anual. (Baldé, 2017) Pero también se estima que se importa 1.16 millones de toneladas de RAEE desde la unión europea (European union action to fight enviromental crime , 2015).

La industria informal del reciclaje en de RAEE en China está muy bien organizada y además representa la fuente de materia prima de las empresas recicladoras formales. Dado que las empresas formales de reciclaje cargan con los costos del procesamiento y deben realizar un tratamiento racional con tecnología moderna, no son capaces de competir con los precios que los recolectores informales pagan por los AEE obsoletos. Además, tampoco tienen la capacidad ni la viabilidad financiera para establecer un amplio sistema de recolección puerta a puerta comparable a aquellos creados por la red informal de recolectores. Este caso es generalizado en el mundo (Programme of safety and Health at Work an Enviroment, 2014).

Sin embargo, el ejemplo de China es un testimonio sobre lo que el manejo sin medidas básicas de seguridad representa para cualquier país, ahora pese a que el sector informal es responsable de la mayoría de los trabajos del este de China, se prepara la prohibición de importaciones de basura por motivos ambientales y de salud pública. Por mucho, China es el basurero electrónico del mundo (CNN, 2013).

Es difícil saber cuál es la repercusión real del reciclaje de RAEE en la economía China y el motivo de la agresiva acaparación de los RAEE a nivel mundial. Sin embargo, esta situación plantea una interrogante concreta: Siendo la importación de basura electrónica ilegal en China, la mano de obra



más barata en México que en China, ¿porque no hay más flujo de RAEE hacia México para su reciclaje?: Aunque es difícil de asegurar, puede que la tecnología China aproveche mejor los materiales incrustados en los RAEE y que esto refleje la diferencia en los ingresos de los trabajadores. Debemos recordar que China es un país pionero en la minería urbana y de sus procesos. Además, las investigaciones sobre el aprovechamiento de materiales críticos a partir de RAEE son en su mayoría hechos por universidades en China (Rahman, 2017).

Entre los materiales que componen a los RAEE se puede resaltar la importancia de los elementos críticos que son muy importantes para obtener una economía verde y que son vitales para los productos tales como los carros híbridos o eléctricos, imanes para discos duros, pantallas los paneles solares, lámparas fluorescentes y LED, etc. Las tierras raras (TR) forman parte de estos materiales críticos, son en total 17 elementos, los cuales están compuestos por 15 elementos químicos del grupo de los lantánidos más Ietrio (Y) y Escandio (Sc), los cuales solo necesitan tener poca presencia en los aparatos electrónicos para mejorar su funcionamiento; además, son escasos como recurso mineral, ya que no se encuentran concentrados en la naturaleza, lo que encarece su explotación. Sin embargo, cada elemento tiene propiedades específicas para la tecnología, las cuales impiden que puedan ser reemplazados fácilmente (Golev, 2014).

El más grande exportador de tierras raras es China, ya que provee el 97% de la demanda global de tierras raras, llegó a exportar de 259 ton en el año 1990 a 111,373 ton en el año 2004 (Allen H. Hu et al., 2017). Por lo que no solo se especializan en la extracción de tierras raras de los minerales, sino en las actividades posteriores como su refinación y procesamiento en metales, también la producción de magnetos permanentes de tierras raras y fósforos para lámparas (Binnemans, 2013). La reserva de tierras raras en China fue contabilizada por el 74% del total mundial en los setentas, y en los últimos 50 años las reservas han sido explotadas a tal grado que en el 2011 representaban el 23% (Yufeng Wu, et al. ,2014).

Las tierras raras son el grupo más crítico de materias primas con el más alto riesgo de suministro (Binnemans, 2013). En el 2011, el departamento de la energía de los EE. UU. delimitó un grupo de cinco elementos como los más críticos en el futuro, los cuales son: Neodimio, Europio, Terbio, Ietrio y Disproso (Golev, 2014). Cabe resaltar, que en ese mismo año el precio de las tierras raras se disparó debido a esta criticidad y la poca disponibilidad, ya que China prácticamente cuenta con el monopolio de su producción. Los precios llegaron a ser de \$234.4 /kg de Neodimio, \$2842.9/kg de Europio, \$2334.2/kg de Terbio y \$1449.8/kg de Disproso (precios en USD).

Por su riesgo tan grande de suministro , una tendencia mundial a no depender del mercado chino de tierras raras y de su inestabilidad en los precios, es precisamente la minería urbana (S. Peelman et al., 2018), que entre otras cosas ayuda a solventar problemas ambientales como el problema del balance, en el cual dado a las condiciones naturales de las tierras raras, para obtener cierta cantidad de un elemento se debe explotar más de otro elemento distinto, ya que las tierras raras no aparecen en cantidades iguales en la naturaleza. Se ha calculado que en los próximos 25 años la demanda de



Neodimio y Disproso incrementará hasta en un 700% y 2600% respectivamente (Binnemans, 2013). A continuación, se presenta una tabla en donde se muestran algunas de las aplicaciones más importantes de las tierras raras, se puede vislumbrar la importancia de estos elementos en la vida diaria de la mayoría de las personas de todo el mundo, inmersas en la época tecnológica.

Tabla 2-2 Tierras raras utilizadas en diversos productos EE (modificada de (Binnemans, 2013))

PRODUCTOS	TIERRAS RARAS UTILIZADAS	DEMANDA ESPERADA
LÁMPARAS FLUORESCENTES	Eu,Tb,Y,Ce,Gd,La	ESTABLE
LFC	Eu,Tb,Y,Ce,Gd,La	CRECIENTE
LEDs	Ce,Y	CRECIENTE
retro lámparas para pantallas LCD	Eu,Tb,Y,Ce,Gd,La	ESTABLE
pantallas de plasma	Eu,Tb,Y,Ce,Gd,La	ESTABLE
TRC	Eu,Y	DECRECIENTE
Automóviles (pequeños imanes en motores, interruptores, sensores etc.)	Nd,Dy,Tb,Pr	ESTABLE
Teléfonos móviles (bocinas, interruptores, micrófonos, etc.)	Nd,Dy,Tb,Pr	ESTABLE
Discos duros	Nd,Dy,Tb,Pr	DECRECIENTE
Bicicletas eléctricas	Nd, Dy,Tb,Pr	CRECIENTE
Vehículos Eléctricos	Nd, Dy,Tb,Pr	CRECIENTE
Generadores de turbinas de viento	Nd,Dy,Tb,Pr	CRECIENTE
Baterías recargables	La,Ce,Nd,Pr	CRECIENTE
Baterías de vehículos eléctricos e híbridos	La,Ce,Nd,Pr	CRECIENTE



A pesar de la creciente demanda de estos elementos, el reciclaje de tierras raras en el mundo para el 2012 apenas representaba menos del 1 % del total en los RAEE (Binnemans, 2013) (Golev, 2014) lo cual es una cantidad mucho más baja que otros materiales reciclables como el cobre o el hierro.

2.3 TECNOLOGÍA LED

Los LEDs son los diodos emisores de luz en sus siglas en inglés (Lighting Emitting Diode), un diodo es un dispositivo eléctrico con dos terminales que permite el paso de energía eléctrica en una sola dirección (Miglietta, 2012). Es tan sorprendente que un dispositivo tan simple y tan pequeño presente tantos beneficios en la vida diaria tales como la poca energía necesaria para su uso, su tiempo de vida de más de 50,000 horas, la poca energía térmica liberada por estos dispositivos, su resistencia a la vibración y a golpes de corrientes altas y finalmente, su capacidad de ser parte de nuevos diseños en sus positivos debido a su tamaño pequeño, han hecho de esta tecnología una que llegó para quedarse, un monstruo que se apoderará del mercado de la iluminación en poco tiempo (Matthias Buchert et.al., 2012).

Los LEDs están hechos de diversas capas fabricadas con un material semiconductor, una de esas capas tiene un exceso de electrones y el cual normalmente se conoce como capa N (Negativa), otra capa tiene varios huecos y la cual se le conoce normalmente como capa P (Positiva). El límite entre estas dos capas de materiales semiconductores se le conoce como junta positiva negativa (P-N), cuando se le aplica voltaje al dispositivo, la corriente eléctrica pasa a través del material semiconductor y los electrones fluyen de una capa a otra. En la junta positiva negativa los electrones en exceso caen en las brechas produciendo una parte de la energía en forma de luz. Este efecto de emisión de luz producida en los LEDs se conoce como el fenómeno de electroluminiscencia (Miglietta, 2012), también conocido como iluminación de estado sólido, ya que es un cuerpo sólido que emite luz. El color de la luz producida depende totalmente del material semiconductor utilizado y hay muchas combinaciones como se puede apreciar en la Figura 2-3 a continuación:

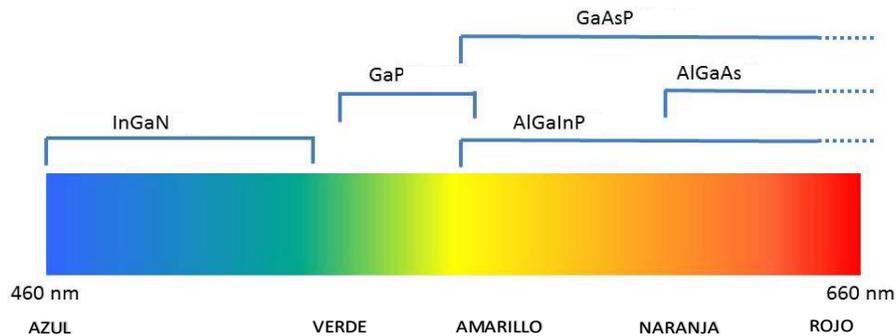


Figura 2-3 Colores producto de diferentes longitudes de onda emitidas por diversos materiales (Matthias Buchert et.al., 2012)

Todos los materiales en la figura son semiconductores creados por la combinación del Galio con otros elementos como (InGaN) Nitruro de galio indio (GaP) Fosforo de galio (GaAsP) Galio



arsénico y (AlGaInP) Fosfuro de indio y galio de aluminio: (AlGaAs) Arseniuro de galio-aluminio: Todos estos materiales son capaces de emitir luz si son atravesados por una corriente eléctrica. Aunque los materiales con Arsénico se empezaron a sustituir por otros debido al daño que hace este elemento a la naturaleza, esta acción se realizó luego de que la Restricción de Sustancias Peligrosas en RAEE, adoptada en febrero de 2003 por la Unión Europea exigiera que ningún producto eléctrico y electrónico puesto a la venta en el mercado tuviera sustancias peligrosas, o en su defecto tuviera una cantidad máxima permisible (Miglietta, 2012).

La luz de un LED es en su mayoría monocromática como la luz blanca para usar en la iluminación de la habitación. La luz de varios LED de colores puede ser superpuestos, mezclándolos en luz blanca (Matthias Buchert et.al., 2012). Este modelo tiene actualmente muchas aplicaciones, como lámparas de iluminación pública y doméstica, así como también la iluminación en los automóviles, en las pantallas planas LED, en los teléfonos inteligentes, en las computadoras portátiles y las tabletas electrónicas. Esta versatilidad y demanda creciente en gran variedad de aparatos se debe básicamente a su alta eficiencia energética y a su tamaño pequeño, aunque también tiene otros grandes aspectos como su larga vida útil y su baja emisión de calor (Miglietta, 2012).

La tecnología LED no es tan nueva como se piensa ya que la primera luz emitida en estado sólido se descubrió en 1907 y la primera patente de luz LED data de los años 60 (Holonyak, 1962), con una pequeña emisión de luz roja y desde ese momento ha pasado por varias modificaciones hasta llegar a los dispositivos que conocemos y utilizamos hoy en día (Miglietta, 2012).

Se han hecho estudios para evaluar el ciclo de vida de los LEDs, desde la etapa de extracción de metales para su producción, su manufactura, la distribución, el uso y disposición al final de su vida útil. Con el fin de analizar las afectaciones, tanto sociales como ambientales de minar y refinar los elementos requeridos para la fabricación de un LED, como los recursos que se desperdician o que se pueden aprovechar en cada etapa de la fabricación con el objetivo de encajar en una economía circular en cuanto a este producto en específico (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

La etapa que tiene menos datos disponibles es la minería de los materiales que componen los LEDs (en general de los RAEE), podemos saber los procesos que se requieren en función de los materiales que conforman los LEDs entre los cuales incluye metales preciosos como el oro y la plata, así como también tierras raras como (Yttrio, Europio, etc) y materiales cada vez más críticos como el Indio y Galio (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

Los impactos ambientales sobre la minería para la producción de los LEDs se pueden apreciar claramente en el caso del área minera de Bayan Obo, China, la cual es el depósito minero con más reservas de tierras raras en el planeta y donde los límites máximos permisibles de residuos peligrosos de la legislación local son muy laxos y por tanto se tiene una zona muy contaminada tomando en



cuenta los límites que dicta la EPA (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

Es importante resaltar que los elementos requeridos no son extraídos de la tierra individualmente, estos elementos se encuentran naturalmente como óxidos o combinados con otros elementos, por lo que se tienen que refinar antes de poderlos utilizar para la producción de los LEDs, por lo que una vez extraídos pasan por varias etapas químicas (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016). Estas etapas varían de acuerdo con el elemento en cuestión y en las cuales se pueden utilizar procesos como electrólisis, calentamiento y soluciones químicas. A su vez, esta condición ocasiona el llamado problema del balance, que consiste en la explotación aumentada de elementos que no son objetivo, para poder satisfacer la demanda de un elemento objetivo que se requiere para cierto producto. Tal es el caso del Neodimio, que se utiliza principalmente para los imanes permanentes y discos duros. Este elemento normalmente al ser extraído genera forzosamente la explotación y refinación de elementos como Ietro, ya que normalmente se encuentran en los mismos minerales; sin embargo, no tienen tanta demanda. Por consecuencia se explotan más recursos y se generan más residuos de la refinación del Neodimio y del Ietro, que lo que se generaría por la recuperación del Neodimio obtenido de la basura electrónica (Binnemans, 2013).

Los residuos producto del refinamiento de las tierras raras son considerablemente peligrosas. Se tiene estimado que, por cada tonelada de material final, se producen 2000 toneladas de jales. Estas sustancias son una fuente muy peligrosa de contaminación ya que no se degradan y por lo tanto se deben ser manejados adecuadamente para mitigar su impacto. Además, se tienen efectos en el agua, producir una tonelada de tierra rara crea 200 m³ de agua residual ácida (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016). Europa es el mercado más grande para los LEDs, ya que actualmente representa el 25% del mercado global en el sector de la iluminación (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016). Además, se calcula que al reemplazar la mayoría de las lámparas incandescentes para el 2030, las lámparas LED tendrán el 74% del mercado, lo que generará una reducción del consumo energético del 46%, teniendo un ahorro de energía de 30 billones de dólares comparado con el precio de la energía en 2012 en los EE. UU. (Rahman, 2017). Sin embargo, la heterogeneidad de los materiales que este producto conforma (plásticos, vidrio, cobre, metales, cerámica, etc.), acrecientan la dificultad y el tiempo de reciclaje en el fin de vida de los productos LEDs (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

Debido a que los LEDs contienen una variedad importante de materiales críticos como el Galio, Indio, tierras raras, entre otros (presentados en la tabla 2-3); hay un incentivo económico para reciclar estos residuos, sin embargo todavía se tienen varias investigaciones en curso y se trata de saber cuál es la manera más eficiente y económicamente viable de reciclar los LEDs residuales y recuperar esos materiales que son muy valiosos en esta época de gran demanda en la tecnología electrónica (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).



Tabla 2-3 Metales críticos que componen los fósforos semiconductores de las lámparas LEDs. Elaboración propia basado en los datos de (Isildar,Arda et al, 2017;Golev, Artem et al.,2014;Uebercaht et al,2017;Binnemans Koen et al.,2013;Punkkinen,Henna et al. , 2017)

METALES	DESCRIPCIÓN	DEMANDA EN EL FUTURO	CONTENIDO PROMEDIO %PESO
INDIO (In)	Metal menor	Estable	0.00113
GALIO (Ga)	Metal menor	Estable	0.0109
CERIO (Ce)	Tierra rara ligera	Creciente	0.00035
IETRO (I)	Tierra rara pesada	Creciente	0.01584
EUROPIO (Eu)	Tierra rara pesada	Creciente	0.00026
GADOLINIO (Gd)	Tierra rara pesada	Creciente	0.0003

Una de las empresas más importantes en cuanto a reciclaje de lámparas en el mundo, NORDIC RECYCLING AB, localizada en Suecia, actualmente trata todas las lámparas de Suecia y Noruega, con gran presencia en Dinamarca y Lituania, entre los tipos de lámparas a reciclar maneja tubos fluorescentes, LFC (las cuales contienen mercurio) y LEDs. El método utilizado actualmente es mediante el principio de oxidación o proceso húmedo, el cual consiste en la trituración de las lámparas dentro de una tina llena de un líquido que reduce la presión del gas de mercurio y lo oxida para producir sal de mercurio estable, lo cual permite separar por medios físicos el mercurio para reciclaje, el remanente es separado para la recuperación de vidrio, plásticos y metales conductores (VEOLIA, 2018). Los LEDs por otra parte contienen otros componentes los cuales no pueden ser recuperados usando estos procesos. Ya que, si terminan en el afluyente común de las lámparas fluorescentes, se contaminan con mercurio, lo cual hace que se requiera separar el mercurio de todo el afluyente, lo cual encarece el proceso y vuelve a los metales críticos imposibles de recuperar en este proceso (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

Aun así, por la cantidad de LEDs que llega a la planta, esto supone una pérdida, pero no una demasiado grande, ya que en octubre del 2015 se estimó que la cantidad de lámparas LEDs era el 0.8% del total. Sin embargo, en octubre 2016 se notó un incremento hasta el 3.5% (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016), sigue siendo una cantidad pequeña pero la tasa de incremento es muy alta en tan corto tiempo. Lo que hace suponer que en el futuro esta cifra aumentará, se estima que los LED representarán del 30-40% de los desechos en los próximos 10 años (LEDs Magazine, 2018) y entonces el manejo eficiente de estos residuos será vital para la recuperación de los materiales críticos que ofrecen lo LEDs.



3. MARCO JURÍDICO

3.1 MARCO INTERNACIONAL

En este capítulo se explica brevemente cada uno de los tratados a nivel mundial y las leyes a nivel nacional que ayudan a la preservación del medio ambiente y tienen que ver con la gestión de los RAEE.

México ha sufrido desastres naturales causados por la actividad humana en el pasado, por lo que en función de prevenir estos y preservar el medio ambiente y la salud humana se ha comprometido a nivel mundial a sumar esfuerzos con otros países para ayudar a mitigar el cambio climático, entre estos esfuerzos, se encuentran los siguientes:

El convenio de Basilea: en este convenio se pone de manifiesto la intención de controlar los movimientos transfronterizos de residuos con sustancias tóxicas para el medio ambiente y riesgosas para la salud, así como la disposición correcta de estas sustancias, es el convenio multilateral ambiental más antiguo e importante de todos. Fue elaborado en Basilea, Suiza el 22 de marzo de 1984 y fue ratificado por México hasta el 22 de febrero de 1991, adquiriendo formalmente los compromisos internacionales los cuales son: reducir la generación de residuos peligrosos en su fuente, promover y garantizar el medio ambiente gestión ambientalmente racional de residuos; promover el principio de proximidad, llevando a la disposición de residuos tan cerca de la fuente como sea posible; y monitorear los movimientos fronterizos de residuos peligrosos (Gurrola, 2017).

Con respecto a los materiales peligrosos que exigen un movimiento transfronterizo, el Convenio de Basilea impone una serie de restricciones comerciales con el objetivo de regular y monitorear. Los desechos pueden exportarse solo si el estado exportador no tiene una gestión ambientalmente racional o si los desechos se destinan a reciclaje y operaciones de recuperación (Lundgren, 2012).

En 1995 la convención adoptó la prohibición del envío de residuos peligrosos de la OCDE a países no pertenecientes a la OCDE para los fines de la disposición final. Sin embargo, durante muchos años hubo pocos signatarios de esta Enmienda y por lo tanto no ha entrado en vigor, faltan 12 países para ratificar la enmienda y pueda aplicarse (BAN, 2018).

La red de acción de Basilea (BAN, por sus siglas en inglés) ha ayudado a investigar el manejo inadecuado e ilegal de los RAEE a nivel mundial (BAN, 2018), ha hecho investigaciones en conjunto a otras organizaciones como el MIT para rastrear los envíos furtivos de los RAEE en EE.UU., usando la tecnología GPS e identificando un pasillo comercial que atraviesa el océano pacífico, el cual tiene como principales destinos Hong Kong, China continental, Taiwán y Pakistán. Encontrando también que los residuos que más se exportan hacia estos destinos actualmente son las pantallas LCD, no obstante, también encontraron casos en los que los residuos con tubos de rayos catódicos se mueven por este pasillo, estos residuos deben, por el convenio de Basilea, ser formalmente reportados para la exportación, sin embargo, las empresas que recibieron los residuos



para el experimento no están registradas en la lista de la EPA para exportación. Así que se presume que estos movimientos fueron secretos, ilegales y ocultados de las estadísticas oficiales. En la investigación incluso se viajó hasta los sitios finales que pudieron rastrear en China continental y se documentaron sitios en los que los trabajadores desarmen los residuos sin protección y en condiciones inseguras (Lee, 2017).

El convenio de Estocolmo: El objetivo de este convenio es controlar y tratar de manera eficiente los COPs los cuales se pueden encontrar en insecticidas y herbicidas. A su vez están presentes en los retardantes de flama dispuestos en las TCI y en las partes plásticas de los aparatos eléctricos y electrónicos, estos compuestos son peligrosos para la salud y se caracterizan por ser resistentes a la degradación, además pueden acumularse en el tejido adiposo de humanos y animales, incluso puede ser transportados por aire y agua (Lundgren, 2012) (Residuos COP, 2018).

Aunque el convenio inició con la prohibición de 12 sustancias, actualmente se enlistan 28 sustancias peligrosas para la supervisión de su eliminación progresiva por parte de los Estados. Fue firmado el 23 de mayo de 2001 y ratificado el 7 de enero del 2003, siendo México el primer país latinoamericano en firmarlo y entró en vigor el 17 mayo 2004. Hasta la fecha, 181 países son Parte de la Convención (SEMARNAT, 2018) (Residuos COP, 2018). Las sustancias en el convenio son agrupadas en 3 categorías con base en la atención que se les debe dar a nivel mundial: eliminación, restricción y producción no intencional. En la tabla 3-1 se presentan los COPs más probables de encontrarse en los RAEE junto con información de los efectos tóxicos de su exposición (Residuos COP, 2018).

Tabla 3-1 Principales COPs ubicados en los RAEE y su toxicidad. (Residuos COP, 2018)

COPs	APLICACIÓN	EXPOSICION	TOXICIDAD
PENTACLORO BENCENO (PeCB)	Aunque se utilizó mayormente como plaguicida, también se usó como piro retardante en plásticos.	Ingestión, inhalación y dermatológica	En humanos afectados se encontraron acumulados en la leche materna y en la placenta. En estudios con roedores, se encontraron afectaciones en el hígado, riñones cerebro, tejido adiposo y heces.
BIFENILOS POLICLORADOS (BPC)	Utilizado en interruptores, conectores y en otros dispositivos eléctricos como transformadores eléctricos, condensadores aislantes eléctricos, inductores eléctricos y reguladores de tensión	Ingestión, inhalación y dermatológica	La alta exposición puede causar daño al sistema nervioso. Puede provocar cloro acné en todo el cuerpo. Puede provocar irritación y ardor en los ojos. También dolor de cabeza mareos, depresión, trastornos de sueño, nerviosismo y fatiga.



Tabla 3-2 (CONTINUACION)



HEXABROMO DIFENILO (HBB)	Retardante de flama en plásticos de aparatos eléctricos y como aisladores de cables, su uso se discontinuó en 1975 por su toxicidad.	Ingestión, inhalación y dermatológica	Más tóxico de los bifenilos polibromados. En personas expuestas se presentaron cambios enzimáticos en el hígado, náuseas, dolor abdominal, dolores articulares, cambios en la piel y pérdida del cabello.
HEXABROMO CICLODODECANO (HBCD)	Retardante de flama en plásticos, los cuales se pueden encontrar en los RAEE.	Ingesta de pescado y huevo contaminado, así como inhalación de polvo contaminado.	Se ha encontrado HBCD en tejidos grasos, leche y sangre de seres humanos. Se puede transmitir a los bebés por medio de la leche materna y por la placenta, cuando es feto. No hay estudios que indiquen con certeza cuáles son los efectos que produce en seres humanos. En animales se produjeron efectos en el hígado y la tiroides, así como también disminución de la fertilidad.
NAFTALENOS POLICLORADOS	Usos muy parecidos a los bifenilos policlorados. Se utilizó mucho como aditivo en pinturas conservante de madera y aislante de cables y capacitores, por lo que es muy probable encontrarlos en los RAEE.	Ingesta de alimentos contaminados, sobre todo de pescado. Además, se pueden absorber por inhalación y por medio de la piel.	Personas expuestas a naftalenos pentaclorados y hexaclorados presentaron Cloro acné y pérdida de la glándula sebácea. Personas expuestas a naftalenos tetra clorados y Penta clorados por inhalación y vía cutánea presentaron dermatosis, dolor de cabeza, fatiga, anorexia y vértigo.
ETER DE TETRABROMO DIFENILO Y ETER DE PENTABROMO DIFENILO (TetraBDE y Penta BDE)	Se utilizó como pirotardante en aparatos eléctricos principalmente en computadoras, impresoras, televisiones gabinetes exteriores de plástico.	Tetra BDE por ingesta de pescado contaminado. PentaBDE por ingesta de alimentos, uso de productos, por contacto con el aire y polvo contaminado.	Se ha encontrado TetraBDE en tejidos grasos, leche y sangre de seres humanos. No se tiene información suficiente de su toxicidad en seres humanos. En experimentos con roedores, el PentaBDE afecta el hígado. También se encontraron casos con pérdida de habilidad motora, estrabismo, temblores, etc. Se cree que puede ocasionar cloro acné en animales y humanos.



Tabla 3-3 (CONTINUACION)



<p>ETER DE HEXABROMO DIFENILO Y ETER DE HEPTABROMO DIFENILO (ETER DE OCTABROMO BIFENILO COMERCIAL)</p>	<p>Se utilizó de forma masiva como piro retardante en plásticos de aparatos eléctricos.</p>	<p>Ingesta de pescados, carne, lácteos y huevo contaminados</p>	<p>Se ha clasificado como toxico para el sistema reproductor y para el desarrollo del feto. En personas expuestas, se ha encontrado la sustancia en la sangre. En ratones, produce efectos neurotóxicos y en aves causo aumento del hígado y baja de peso corporal.</p>
<p>ETER DE DECABROMO DIFENILO COMERCIAL (c-decaBDE)</p>	<p>Se utilizo como piro retardante en plásticos de aparatos eléctricos</p>	<p>Ingesta de pescados, carne, lácteos y huevo contaminados</p>	<p>Se ha clasificado como toxico para el sistema reproductor y para el desarrollo del feto. En personas expuestas, se ha encontrado la sustancia en la sangre. En ratones, produce efectos neurotóxicos y en aves causó aumento del hígado y baja de peso corporal.</p>
<p>PARAFINAS CLORADAS DE CADENA CORTA (PCCC)</p>	<p>Retardante de flama en plásticos, los cuales se pueden encontrar en los RAEE</p>	<p>Ingestión, inhalación y dermatológica</p>	<p>En experimentos con mamíferos, se han afectado el hígado, el sistema hormonal tiroideo y los riñones (causando inducción de enzimas hepáticas e hiperactividad tiroidea, a largo plazo puede causar carcinogénesis en estos órganos)</p>

El convenio de Rotterdam: Se aprobó en Rotterdam, Países bajos, el 11 de septiembre de 1998. Este convenio promueve la responsabilidad compartida entre los países exportadores e importadores para controlar 47 productos químicos entre los cuales figuran plaguicidas y productos químicos industriales como los Bifenilos Poli bromados (BPB) y Bifenilos Policlorados (BPC) los cuales son Contaminantes orgánicos persistente COPs y se pueden encontrar en muchos tipos RAEE (SEMARNAT, 2018) como se presenta en la tabla 3-1.

El Convenio de Rotterdam tiene condiciones en las que exige proporcionar a las partes información detallada sobre los riesgos medioambientales y para la salud humana de los productos, a manera de poder decidir sobre la autorización en las importaciones, o bien denegar la autorización a aquellos que no puedan ser manejados de manera segura (Gurrola, 2017).

El acuerdo de París: Tiene por objetivo mantener el incremento de temperatura global por debajo de los 2 grados Celsius, formando un compromiso sobre la reducción de los Gases de efecto Invernadero (GEI). En este acuerdo, cada 5 años todos los países adscritos deben reportar sus contribuciones a la reducción de GEI y se obliga a que cada nueva contribución deberá ser más



ambiciosa que la anterior. México se comprometió a bajar las emisiones del sector industrial creando el 35% de energía limpia para el 2024 y 46% para el 2030. Además, se comprometió a una reducción no condicionada de disminuir un 22% las emisiones de GEI para el año 2030 (IMCO, 2018).

Protocolo de Kioto: El protocolo fue creado para ayudar a reducir las emisiones de GEI que aumentan el calentamiento global, las obligaciones de reducción de GEI son mayores para los países desarrollados que para los países en desarrollo. Además, enfatiza el aumento de superficies verdes que ayudan a reducir la cantidad de dióxido de carbono emitido en el planeta, el protocolo es flexible ya que un país puede ayudar a plantar en otro país y este esfuerzo se le tomara en cuenta, ya que se considera el efecto a nivel global que tienen sobre las emisiones de GEI (Renovables Verdes, 2018).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático fue firmada por el Gobierno de México en 1992 y ratificada ante la Organización de las Naciones Unidas en 1993. El protocolo fue inicialmente adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kioto, Japón, pero entró en vigor el 16 de febrero de 2005 para las naciones que lo ratificaron, entre ellas México, que lo hizo en el año 2000 (SEMARNAT, 2018).

México en el 2013 emitió 665,304.92 Gg de CO₂, (1 Gg= 1000 toneladas) que es equivalente a 1.4% del total de emisiones globales de GEI. Posicionando al país como el segundo mayor generador de GEI en Latinoamérica. Las actividades económicas que más generan GEI son el transporte (26.2%), la generación eléctrica (19%), y las actividades industriales (17.3%) (IMCO, 2018).

No es difícil pensar que si en un país en desarrollo como México, el sector con mayor generación de GEI sea el transporte, en un país desarrollo también lo sea. Por lo que la eficiencia en la movilidad de carga y personas, así como las tecnologías que lo hacen posible son de gran importancia para disminuir sus emisiones. Por lo tanto, las tecnológicas verdes y limpias como los vehículos eléctricos e híbridos son cada vez más necesarios. Mismos que utilizarían materiales críticos como el Nd, así mismo la movilidad colectiva se verá beneficiada de los transportes eléctricos (Binnemans, 2013). Este simple hecho, acentúa la necesidad de asegurar las provisiones de estos materiales y ayudaría indirectamente a disminuir las emisiones de GEI.

Directiva de RAEE de la Unión Europea: En la unión europea, el manejo de RAEE es regulado uniformemente por la Directiva de RAEE (2012/19/EU) la cual regula la recolección, el reciclaje y la recuperación de materiales de la basura electrónica. Esta directiva exige a los países miembros promover el diseño y la producción de equipos electrónicos que cuenten con facilidades para el reciclaje y la recuperación de metales incrustados en ello y así facilitar su reutilización (Baldé, 2017).

Aunque esta directiva no tiene nada que ver con México ni con el continente americano, sienta las bases y los principios a nivel mundial de lo que se debería hacer en materia de gestión de residuos electrónicos, pues con esta norma regulatoria, la unión europea se ha consolidado como la región



que mejor realiza la gestión de los RAEE. Ya que alberga conceptos como la Responsabilidad Extendida del Productor, y fija objetivos claros de recolección, cosas que parecen imposibles en otras regiones, debido a la falta de datos, de leyes o de voluntad política.

3.2 MARCO NACIONAL

En el artículo 133 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, se indica la jerarquía jurídica de México, el cual dice: “Esta Constitución, las leyes del Congreso de la Unión que emanen de ella y todos los tratados que estén de acuerdo con la misma, celebrados y que se celebren por el presidente de la República con la aprobación del Senado, serán la Ley Suprema de toda la Unión. Los jueces de cada entidad federativa se arreglarán a dicha Constitución, leyes y tratados, a pesar de las disposiciones en contrario que pueda haber en las constituciones o leyes de las entidades federativas”. En esta jerarquía se pone a la constitución en el nivel más alto , seguido por las leyes federales, locales y sus reglamentos, los decretos, las normas oficiales mexicanas, las cuales son normas obligatorias en toda la república y que fijan niveles de calidad en diversos productos y servicios y en la que se aprecian las intenciones marcadas por los tratados internacionales (niveles de calidad, sustancias peligrosas y sus LMP, etc.); en el nivel más bajo se encuentran las normas mexicanas, las cuales son métodos propuestos pero no obligatorios para diversos productos y servicios (Gurrola, 2017).

Basado en la jerarquía jurídica de México, se presenta un recorrido a las leyes y disposiciones gubernamentales, las cuales son aplicables en la gestión de los RAEE y en las cuales se refleja la importancia y la intención de preservar el ambiente.

Constitución política de los estados unidos mexicanos: En el artículo 4 de la constitución, en su párrafo quinto, establece que “toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley”. En este simple párrafo está involucrado de forma tácita que la calidad del aire, la gestión integral de los residuos peligrosos, la generación de ruido en el entorno y el manejo de los residuos sólidos incluyendo los residuos de manejo especial como los RAEE deben ser aceptables para el bienestar de todas las personas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

Ley general del equilibrio ecológico y protección al ambiente (LGEEPA): Es la ley mexicana más antigua a lo que se refiere al aspecto ambiental y la base para las demás leyes y estipulaciones en este campo, publicada por el DOF el 22 de enero de 1988. Proporciona por primera vez el concepto legal de residuo como “Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo ,utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó así como también estipula la responsabilidad de cada nivel de gobierno en cuanto a la recolección de los Residuos, mencionados en los artículos 5 para el gobierno Federal , 7 para el gobierno Estatal y 8 para los gobiernos municipales. Además,



contempla la responsabilidad moral, ética y ambiental en el llamado “el que contamina paga”, que establece que quien genera los residuos debe responder de la gestión adecuada y disposición segura de los mismos, y de en su caso, la reparación ambiental que pueda causar el mal manejo de los mismos (Gurrola, 2017).

Ley general de prevención y gestión integral de residuos (LGPGIR): Fue publicado en el DOF el 8 de octubre del 2003. Tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano, además de propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, valorización y gestión integral de los residuos peligrosos, de manejo especial y urbanos, así como también prevenir la contaminación de sitios y en su defecto, su remediación, todo esto estipulado en el artículo 1 de la misma ley.

En esta ley se estipula, entre otras cosas, que son los gobiernos estatales los encargados de la gestión de los RAEE, ya que son residuos de manejo especial. Están facultados para establecer políticas y programas en la materia, así como identificar a los residuos que requieran planes de manejo.

Los planes de manejo son instrumentos que tienen por objeto, minimizar la generación de residuos y maximizar su valorización. Un aspecto por mejorar sobre los planes de manejo es que son solamente para químicos específicos, en los que a veces se encuentran en los RAEE y a su vez hay elementos que de manera legal no requieren planes de manejo y están contenidos en los RAEE, por lo que sería mejor que todos los RAEE por decreto tuvieran un plan de manejo nacional que pudiera incluir a los municipios facilitando así la recolección y el manejo de los mismos (Gurrola, 2017).

Reglamento de la LGPGIR: Publicado el 30 de noviembre 2006 en el DOF, su objetivo es gestionar el manejo sobre todo de los jales en la industria minera, así como también, implementar de forma legal, los conceptos de acopio, recolección y centro de acopio de residuos peligrosos puntualizando las responsabilidades en los 3 órdenes de gobierno para el manejo adecuado de los residuos. Establece los criterios básicos que las normas oficiales mexicanas tienen que seguir, cuando estén sujetas a planes de manejo para residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de determinar el plan de manejo más apropiado y la elaboración de listados de los residuos sujetos a estos planes, según las características de los desechos y sus mecanismos de control (Gurrola, 2017).

Determina la regulación de los Planes de Manejo en los RME de acuerdo a los sujetos que intervienen en su manejo, así como la relación de los sujetos obligados a su formulación y ejecución, su ámbito de aplicación, la corriente de residuos, y establece que se deben realizar de conformidad con las NOM referentes a la materia vigentes.



NORMAS OFICIALES MEXICANAS

NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos.

NOM-133-SEMARNAT-2000, Protección Ambiental-Bifenilos Policlorados (BPC's)-Especificaciones de manejo.

NOM-147-SEMARNAT/ SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

NOM-161-SEMARNAT-2011, En esta norma se estipula el criterio para clasificar los residuos de manejo especial RME, determinar cuáles de ellos requieren estar sujetos a un plan de manejo, también se presentan los elementos para formular los Planes de Manejo.



4. ACTUALIDAD DEL RECICLAJE DE RAEE Y LEDs

4.1 ETAPAS DEL RECICLAJE DE RAEE

Actualmente en la industria de la gestión adecuada de RAEE, se manejan una variedad de procesos de recuperación, como la separación, desmantelamiento y preprocesamiento (trituración) y procesamiento final (pirometalurgia, hidrometalurgia, entre otros) (Fulvio Ardente*, 2014). La mayoría de los componentes que integran los RAEE no sufre ningún cambio físico o químico al terminar su vida útil, por lo que en la industria se utiliza el concepto de desmantelamiento selectivo, ya que este proceso permite la extracción selectiva de los componentes dañinos y aumentar la calidad de los materiales reciclables valiosos, motivo por el cual la recuperación de materiales provenientes de esta fuente es redituable (Fernandez, 2013) (Fulvio Ardente*, 2014).

La composición de los aparatos eléctricos y electrónicos es un factor determinante para definir acciones de reciclaje, ya que existen diferencias en el contenido de materiales o compuestos dentro de cada tipo de residuo, esto obedece a las diferencias entre marcas productoras (Fernandez, 2013). Por este motivo, el proceso de desmantelamiento forma un gran parte de los costos del reciclaje por lo que es crucial que se minimice la cantidad de trabajo en esa área. Recordemos que la industria del reciclaje de los RAEE depende de los rendimientos de la recuperación de metales escasos y metales preciosos por lo que se necesita un mejor diseño de los aparatos para reducir tiempos en la etapa de desmantelamiento y cuidar la calidad de los materiales valiosos (Fulvio Ardente*, 2014).

Hay plantas de reacondicionamiento y plantas de reciclaje de RAEE, la diferencia está en que la primera se concentra en la valorización de los componentes para darles una segunda vida en el mercado de los compuestos usados, al ser utilizados para reemplazar piezas dañadas u obsoletas y la segunda se especializa en el despiece, desmontaje o destrucción de los RAEE, como se presenta en la figura 4-1, con el objetivo de encontrar materiales que puedan servir como insumos de nuevos procesos industriales (Fernandez, 2013).

La mayoría de las plantas de reciclaje de RAEE en el mundo son de preprocesamiento y utilizan mano de obra intensiva dedicándose básicamente a tareas de desmantelamiento y separación de los componentes (Fernandez, 2013). La razón por la que la mayoría de la industria utiliza mano de obra intensiva es porque se tiene estimado que el desmantelamiento manual es más eficiente en cuanto a recuperación de materiales que los procesos mecánicos como la trituración, los cuales presentan pérdidas de material; sin embargo, el tiempo en esta etapa se quiere reducir para obtener mejores rendimientos y ganancias. Se han hecho distintos estudios y propuestas para este fin, desde robots que desmantelan determinados tipos de pantallas o monitores hasta un proceso conceptual en el que se combina la mano de obra humana y mecánica para extraer los materiales valiosos de los RAEE y acelerar el proceso de reciclaje de los demás materiales por medio de la trituración (Fulvio Ardente*, 2014).

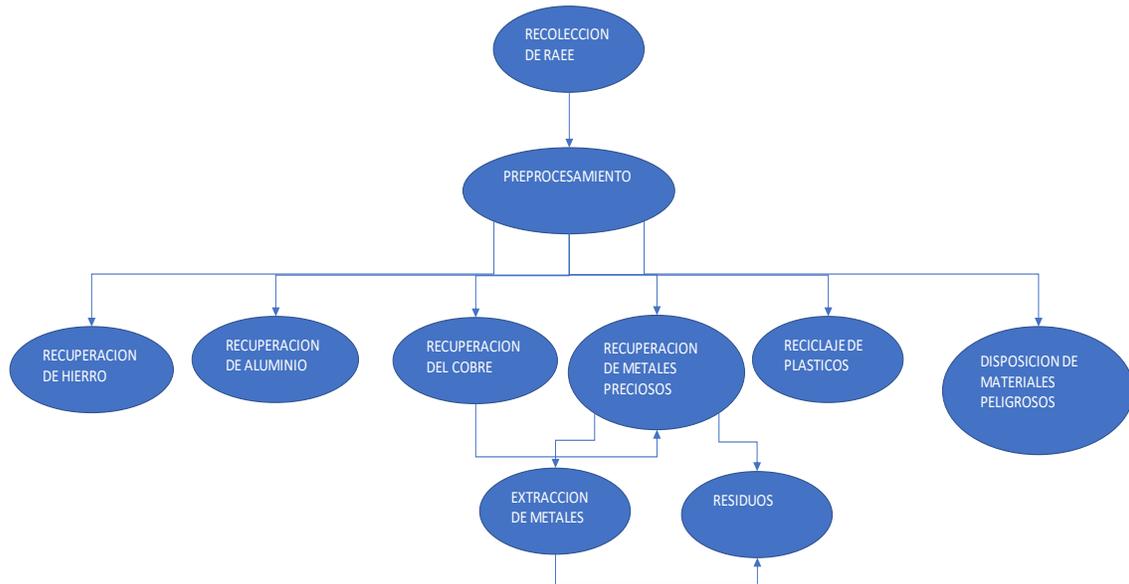


Figura 4-1 Cadena de reciclaje de RAEE, traducida de (Copenhagen Resource Institute, 2014)

Después de la clasificación y separación de los distintos materiales, estos se traspan a plantas de procesamiento final para su recuperación y por su cantidad como por su naturaleza se procesan de distintas formas, en el caso de los metales se utiliza la pirometalurgia o también la hidrometalurgia (Copenhagen Resource Institute, 2014), en el caso de los plásticos se utilizan los métodos de reciclado mecánico, reciclado químico y los plásticos que no se pueden reciclar se llevan a coprocesamiento, lo cual les otorga una segunda vida como aprovechamiento energético en fábricas de cemento por ejemplo para la realización del Clinker. La distinción de los plásticos se hace con base en los polímeros o monómeros que tienen añadidos, lo cual les da algunas propiedades, por ejemplo, retardantes de flama en la mayoría de los casos, lo que hace que un plástico se pueda o no reciclar es con base en la capacidad de retirar estas sustancias de los plásticos (Bueckens, 2014).



4.2 ACTUALIDAD DE PROCESOS DE RECICLAJE DE LEDs

A pesar de que la minería urbana es una actividad reconocida mundialmente como una solución a muchos problemas ambientales y que en la cual, todavía falta mucho por hacer, la comunidad científica no se ha enfocado en crear procesos para hacer más eficiente y económicamente atractivo el reciclaje de los LEDs, este asunto pone a México a la par de muchos países (Rahman, 2017). Aunque se espera que la tecnología LED sea la predominante para el 2020 y que pronto llegue a invadir los flujos de basura electrónica en todas sus presentaciones posibles (Celulares, tabletas, pantallas, lámparas, etc.) (Miglietta, 2012) se tienen actualmente pocas investigaciones sobre la materia.

El proyecto CycLED ha estado trabajando desde el 2012 en más tecnologías para optimizar las prácticas de reciclaje y es uno de los esfuerzos por un instituto más reconocidos a nivel mundial sobre el tema. liderado por el Instituto Fraunhofer, en Alemania, el proyecto tiene por objetivo facilitar el reciclaje de los metales críticos, a los que se refiere como los indispensables en nuevas tecnologías clave, tales como teléfonos celulares, paneles solares y LEDs, entre los que son indispensables estos metales objetivo: Galio, Indio, Cerio, Europio, Oro, Plata y Estaño (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

Las investigaciones en este instituto han permitido saber que la cantidad de estos materiales particularmente en los LEDs no es significativa, por lo que no sería económicamente viable recuperar esos materiales con el enfoque actual de triturar y separar mecánicamente los componentes. Es necesario “pretratar” los residuos de las lámparas LEDs, la prioridad es la separación de los diodos LED del resto de la lámpara, este procedimiento puede realizarse con mano de obra, sin embargo, sería extremadamente caro, por lo que se están buscando más alternativas para este proceso (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

Sin embargo, suponiendo que se alcanzara a resolver el problema de este pretratamiento se tienen aún más retos en cuanto a la forma de recuperar los metales críticos. Hasta el momento se tienen procesos conceptuales para reciclar los metales preciosos y las tierras raras que se utilizan en los LEDs, empleando métodos como la pirometalurgia o hidrometalurgia, ya probados en la industria de la minería urbana (Ruiz-Mercado, 2017).



4.3 RETOS Y VENTAJAS DEL RECICLAJE DE LOS LEDs EN EL MUNDO

Arsénico, Galio e Indio son los materiales que no son tierras raras más utilizados como materiales en la producción de los LEDs. Elementos como el Cerio, Europio; Gadolinio, Lantano; Itrio y Terbio son las tierras raras que se usan en las capas de los LEDs como dopantes o fósforos. Oro y Plata son usados como contactos metálicos en los dispositivos LED. Los LEDs contienen una cantidad muy pequeña de metales críticos haciendo que el coste de recuperación de estos materiales muy alto (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016). Sin embargo, se espera que los LEDs dominen el mercado de la iluminación a nivel global para el año 2030. La rapidez con la que crece la demanda por este tipo de producto viene acompañada de una necesidad por diseñar un plan de manejo efectivo cuando estos residuos terminan su vida útil (Rahman, 2017) (Sheng Fang et. al, 2018).

Actualmente pequeñas cantidades de LEDs entran al flujo de los RAEE, sobre todo porque tienen una larga vida productiva. No obstante, se estima que pronto lleguen a formar parte de una porción considerable de los residuos de iluminación (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

En estos días, los procesos de reciclaje y recuperación de materiales críticos utilizan mucha energía y grandes cantidades de químicos, además producen grandes cantidades de agua residual de los procesos químicos (Ruiz-Mercado, 2017). Hasta el momento no se ha encontrado un proceso económicamente eficiente para reciclar los materiales críticos de los RAEE y por el momento no se tiene un proceso definido por ninguna organización gubernamental o académica sobre la gestión adecuada de los LEDs y se tiene poca literatura que se tiene al respecto (Rahman, 2017).

En México las compañías de reciclaje existen, pero la mayoría limita sus operaciones al desmantelamiento del equipo, recuperación de partes útiles y la trituración y separación de los materiales, como resultado el reciclaje a nivel nacional se enfoca en procesar el plástico, el vidrio, cobre y el fierro, mientras que se dejan perder otros materiales como las tierras raras, mientras que en otros lugares se trabaja en la recuperación de metales preciosos o tierras raras (Lundgren, 2012). Sin embargo, se percibe a México como un país de oportunidad en el ramo del reciclaje, para introducir tecnologías del estado del arte en el tema de reciclaje ya que su sector en cuanto a los RAEE es todavía pequeño (Lundgren, 2012).

Los beneficios para implementar la minería urbana en un entorno mucho más especializado para poder manejar integralmente los RAEE traería muchos beneficios. En el ámbito ecológico, se racionaliza la cantidad de residuos destinados a disposición final (Baldé, 2017). En el ámbito económico, se presenta la oportunidad de creación de empleos debido al modelo de negocio de recuperación de materiales, la cual cada día aumenta su valor, debido a la escasez de materiales, es una forma más económica de obtenerlos y a la alta demanda de estos para producir cada vez más productos eléctricos y electrónicos (Binnemans, 2013) (Ellen MacArthur Foundation, 2015).



Es un hecho que por las intervenciones de la directiva de materiales riesgosos, la mayoría de los RAEE ya no representan ningún peligro a la salud humana, y mucho menos los LEDs (Miglietta, 2012), incluso su tamaño tan pequeño no supone un riesgo para la capacidad en volumen en los rellenos sanitarios, sin embargo el hecho de dejar desperdiciar materiales que pudieran servir mejor y más de una vez parece, en estos tiempos es algo impensable, por lo tanto el único motivo que debe impulsar su reciclaje es el de obtener una ganancia y se necesita hacer un estimado de la utilidad que se puede obtener de recuperar materiales de algo tan diminuto como lo es el LED (Copenhagen Resource Institute, 2014) (LED professional, 2016).



5. PROCESOS Y MÁQUINAS QUE SE UTILIZAN EN LA GESTIÓN DE LOS RAEE

5.1 CONMINUCIÓN DE RESIDUOS

En esta etapa se necesita desintegrar los componentes, reducir el tamaño de las partículas y homogeneizar el material. Para este objetivo, hay máquinas que se utilizan en gran medida en la trituración de rocas y agregados para el concreto. Además, hay varias tecnologías dependiendo el tipo de material que se maneja, suave, fibroso, duro, en condiciones secas o mojadas, con análisis de tamaño de partícula, su forma y densidad (Fraunhofer Institute, 2018).

5.1.1 CONMINUCIÓN O TRITURACIÓN MECÁNICA

Las máquinas convencionales, como las trituradoras que se basan en sistemas de corte son menos adecuadas para los RAEE, ya que generalmente no descomponen los materiales compuestos, sino que simplemente reducen su tamaño. Para el procesamiento de RAEE, por lo tanto, es necesario combinarlos con máquinas de trituración con otros principios como las trituradoras giratorias, las cuales son usadas usualmente en las primeras etapas para optimizar el tamaño y el comportamiento de la separación de los RAEE en las siguientes etapas del proceso. Dentro de la máquina un rotor vertical gira con dientes montados flexibles que están alineados con la fuerza centrífuga durante la operación del triturador, tal que las partes frágiles de los residuos son triturados por impacto, y los materiales compuestos son rotos por la fuerza cortante, el resultado es una mezcla de tamaños de materiales de un máximo tamaño de partícula definido en el que los metales y otros materiales son parcialmente liberados (Copenhagen Resource Institute, 2014).

Debe tomarse en cuenta que esta etapa es clave para la eficiencia de los procesos subsecuentes, por ejemplo, un tamaño de partícula pequeño puede promover una alta eficiencia de lixiviación de metal, pero una sobre trituración puede significar una pérdida de materiales críticos (Isildar, 2018).

5.1.2 CONMINUCIÓN ELECTROHIDRÁULICA

El objetivo principal del reciclaje de los LEDs es recuperar materiales valiosos, es cuestión de tiempo para que los que se dedican al reciclaje de los RAEE inicien a procesar el reciclaje de los LEDs y se necesita una forma, que separe las partes de las lámparas sin destruir las plaquetas LED y que no sea tan costosa como la tradicional separación por medios manuales; en este menester se han experimentado con varios procesos y parece que la respuesta más eficiente en la separación o conminución electrohidráulica, aunque aún se está experimentando con ella en el Fraunhofer Institute (Fraunhofer Institute, 2018).

El principio de la conminución electrohidráulica se basa en la separación gradual de las conexiones o juntas que tiene un aparato electrónico que mantienen unidas cada una de sus piezas, esto se logra a través de una serie de pulsaciones con choques eléctricos en el medio hidráulico con intensidad tal que logran separar incluso a nivel molecular. Cabe resaltar que este método de separación sirve para



cualquier tipo de aparato eléctrico y electrónico, no solamente lámparas LED, por lo que involucrar este proceso dentro del reciclaje de RAEE es de gran importancia (Fraunhofer Institute, 2018).

El proceso consiste en poner en una tina con agua los elementos a separar y con la ayuda de ondas de choque creadas por impulsos eléctricos se separan los componentes en sus puntos de ruptura, el nivel de separación es determinado por el número de pulsaciones sufridos por las estructuras internas de los aparatos eléctricos; después los componentes pueden ser reciclados por separado, sabiendo ya sus propiedades y tratando de optimizar la recuperación de los materiales que los constituyen (Fraunhofer Institute, 2018). En la tabla 5-1 se muestran las distintas máquinas que se pueden emplear en esta etapa de la gestión de los RAEE, así como las ventajas y desventajas de su uso. Dado que hay una gran variedad de máquinas que esencialmente sirven para el mismo procedimiento, pero con distintas características que pueden beneficiar a distintos proyectos, es necesario conocer la gran variedad que el mercado ofrece.

5.2 SEPARACIÓN DE MATERIALES

En esta etapa se separan los materiales unos de otros, para llevarlos a procesos que puedan continuar su recuperación, hay máquinas que se utilizan en gran medida en otras industrias como la minera. Como se presenta en la tabla 5-2, hay varias tecnologías que separan los materiales de acuerdo con sus propiedades físicas, como, por ejemplo, su diferencia electromagnética, su densidad, sus propiedades hidrofóbicas, etc. (Fraunhofer Institute, 2018)



Tabla 5-1 Diferentes tecnologías de conminación de materiales

PROCESO	MAQUINA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
TRITURACIÓN	Trituradora de impacto	Forma y tamaño de material de salida son ajustables. Bajo costo de mantenimiento.	Solo procesa material que no es tan duro. puede haber pérdida de materiales críticos y preciosos
TRITURACIÓN	Trituradora de mandíbula	Bajo y rápido mantenimiento. Largo periodo de servicio.	Puede haber pérdida de materiales críticos y preciosos.
MOLIENDA	Molino de martillo vertical	No hay riesgo de acumulación excesiva de material que obstruya el proceso.	Puede haber pérdida de materiales críticos y preciosos.
MOLIENDA	Molino de martillo	El tamaño del material de salida puede variarse según lo que se desea obtener. Bajo mantenimiento.	Puede haber pérdida de materiales críticos y preciosos. Ruidoso. Generación de calor.
MOLIENDA	Molino de bolas	Puede moler materiales de alta dureza, producto final fino aprox. de 0,075mm según modelo	Puede haber pérdida de materiales críticos y preciosos.
MOLIENDA	Molino criogénico	Pulverización del material. Separación de los materiales de los componentes. No se tiene degradación por calor. Se puede utilizar para muchos tipos de material como plásticos y metales.	Puede haber pérdida de materiales críticos y preciosos. Se requiere un alto costo de inversión.
CONMINUCIÓN ELECTRO-HIDRAULICA	Tina con agua con impulsos eléctricos	Permite la separación selectiva de los componentes. Es barato. No es toxico.	No procesa grandes cantidades. Se tiene que separar manualmente después del proceso.



Tabla 5-2 Diferentes tecnologías de separación de materiales empleadas actualmente en la gestión de RAEE

PROCESO	MAQUINA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
DIFERENCIA DE DENSIDAD	Hidrociclón	Alta capacidad y eficiencia, Bajo costo de inversión y operación, utiliza poco espacio.	Erosión y desgaste continuo, altos costos de mantenimiento. En hidrociclones de poco diámetro se pueden presentar taponamientos.
POR GRAVEDAD	Clasificador zig zag	Alta capacidad y eficiencia, Bajo costo de inversión y operación, utiliza poco espacio.	Debe estar después del proceso de trituración para separar las partículas ligeras de las pesadas.
POR CORRIENTES DE FOUCAULT	Separador por corrientes de foucault	Permite un trabajo continuo de separación de No metales, metales ferromagnéticos y metales No ferromagnéticos.	Se necesita un tamaño de partícula inferior a los 6 mm, no separa metales de sus aleaciones.
SEPARACIÓN MAGNETICA	Separador de tambor magnético	Operación de bajo costo. Fácil limpieza.	Son ineficientes para la gestión de LCDs y TCI. Es pobremente selectivo en cuanto a los metales y no los separa de sus aleaciones.
FLOTACIÓN	Celda de flotación	Bajo consumo de energía en operación. Se utiliza para la separación de varios metales	Solo sirve para metales hidrofóbicos.

5.3 RECUPERACIÓN DE MATERIALES

Actualmente las empresas refinadoras reciben contenedores llenos de tarjetas electrónicas, baterías o rezagos con metales no ferrosos como el cobre, bronce, aluminio y aleaciones. Para recuperar los metales objetivo son sometidos principalmente a dos tipos de tratamiento: los hidrometalúrgicos, cuando la escala de procesamiento es pequeña o mediana, o los pirometalúrgicos, cuando la escala es grande (Fernandez, 2013). Aunque últimamente tiene mucho auge la investigación de procesos



más ecológicamente amigables como la Biometalurgia, todavía no demuestra tener rendimientos tales para dejar alguna ganancia económicamente atractiva (Isildar, 2018).

Independientemente del tratamiento a la que se sometan los materiales, los factores que determinan la viabilidad del reciclaje de un metal, se encuentran principalmente en la pureza inicial de metales a recuperar, el valor del metal, los costos fijos para la recuperación del metal y el mercado de los productos de los procesos de recuperación (Fernandez, 2013).

Si bien la recolección de RAEE se lleva a cabo a nivel local y regional y el procesamiento previo a nivel regional a nacional, el procesamiento final de RAEE es un servicio globalizado, con solo unas pocas instalaciones en Europa. UMICORE en Bélgica recupera metales preciosos en una fundición integrada. AURUBIS, Alemania y BOLIDEN, Suecia, son fundiciones que recuperan metales preciosos (Copenhagen Resource Institute, 2014).

5.3.1 PIROMETALURGIA

La pirometalurgia incluye operaciones en las que se aplican tratamientos en hornos a temperaturas elevadas (en caso de los de arco plasma se superan los 3000° C), para separar los valores metálicos de la considerable cantidad de resinas y plásticos de desecho. En la mayoría de los casos se separa el producto de los desechos o escoria (Fernandez, 2013).

La información del cómo se reciclan los RAEE en todo el mundo es escasa, ya que es una industria donde la competencia por las mejores partes de los residuos electrónicos es voraz. Sin embargo, se sabe que la mayoría del reciclaje de los RAEE se realiza en fundiciones a lo largo del planeta (Lennartsson, 2018).

La fundición es la mejor tecnología disponible actualmente para reciclar RAEE en cantidades a gran escala, y se pueden disponer de distintas formas, por ejemplo, en la fundidora de Noranda, Canadá, se combina el afluente de RAEE con materia primas producto de la minería, en un sistema pensado para solamente procesar productos mineros, con el fin de ocupar las capacidades libres con respecto a la energía y refinación (Lennartsson, 2018).

La fundición y refinación en procesos adaptados en plantas mineras es muy común para extraer cobre y otros metales de los RAEE (Lennartsson, 2018). En la planta de BOLIDEN, Suecia, las tarjetas de circuito impreso descartadas alimentan directamente al convertidor de cobre para la recuperación de Cu, Ag, Au, Pd, Ni, y Zn (Isildar, 2018).

No todas las plantas fundidoras trabajan solamente con este tipo de tratamiento, también se pueden realizar combinaciones de procesos, como en la Planta de UMICORE, Bélgica: en su fundidora integrada, las tarjetas de circuito impreso son tratadas en un horno eléctrico para recuperar metales preciosos y posteriormente son refinados con tratamientos hidrometalúrgicos (Isildar, 2018), ha cambiado totalmente sus operaciones hacia el reciclaje procesando aproximadamente 350 mil toneladas anuales de materiales secundarios para obtener metales preciosos de todo tipo



(Lennartsson, 2018), recupera una gran variedad de metales como Oro, Plata y metales del grupo platino (Pd, Pt, Rh, Ir, Ru), metales especiales (Se, Te, In), metales secundarios (Sb, As, Bi) y metales base (Cu, Sn, Pb, Ni) (Diaz, 2017).

Existen varios retos en el tratamiento de los RAEE por medio de fundiciones, entre ellos está el alto consumo de energía que se requiere y los altos costos de inversión (Diaz, 2017). Además, las fundiciones han sido consideradas como importantes fuentes de gases tóxicos y metales pesados. Las dioxinas y otras emisiones gaseosas pueden ser encontradas en presencia de químicos retardantes de flama. (Isildar, 2018) Sin embargo, para poder remediar el impacto ambiental que generan las dioxinas se necesita una inversión extra en las instalaciones de la fundición (Diaz, 2017).

5.3.2 HIDROMETALURGIA

Este término se refiere a los procesos utilizados para el aislamiento y la recuperación de metales por medio de disoluciones acuosas (Fernandez, 2013). Estas involucran lixiviaciones oxidantes para la extracción de los metales, seguidos de procesos de separación y purificación (Isildar, 2018).

Normalmente se utiliza una cierta sustancia que tiene mayor efectividad para la recuperación de cierto elemento. Por eso se mantienen estudios para hacer cada vez más eficiente este tipo de procesos, en los que la sustancia utilizada, su concentración, la temperatura, el pH, el tiempo de exposición y la velocidad de agitación de la mezcla, son variables clave que deben cuidarse para obtener la mayor cantidad de material posible. Por ejemplo, se sabe que, para la obtención del cobre de una TCI, la lixiviación acida utilizando ácido sulfúrico genera una tasa de rendimiento mayor al 95%, mientras que utilizando ácido nítrico se obtendría de un 87-98% y usando hipoclorito de sodio se obtiene una tasa del 85% (Isildar, 2018).

Además se hacen experimentos con técnicas antes de los procesos hidrometalúrgicos para mejorar sus rendimientos, uno de los métodos que se practica con la hidrometalurgia para recuperar tierras raras, consiste en pretratar los residuos dentro de un molino de bolas de cierto tamaño y alcanzando un determinado tamaño de partícula y una velocidad de molienda promedio; parámetros que se determinarán mediante pruebas en laboratorio para obtener el mejor rendimiento en la lixiviación ácida después de la molienda de los residuos (Loy, 2017).

También se utilizan estrategias para la recuperación de metales usando rutas electroquímicas, ya que la corriente electroquímica puede ser manipulada para oxidar y reducir los metales en soluciones acuosas (Isildar, 2018). Esto se conoce como electro-beneficio y electro-refinación los cuales se utilizan para la purificación y obtención de los metales no ferrosos, tales como el aluminio y magnesio, el cobre y zinc. El proceso consiste en conectar dos electrodos a una fuente de voltaje y sumergirlos en una solución que contiene iones, los iones positivos emigran al electrodo que tiene el exceso de electrones (cátodo) y los iones negativos emigran hacia el electrodo deficiente de electrones (ánodo) (Fernandez, 2013).



Sin embargo, los procesos hidrometalúrgicos todavía representan una amenaza debido al uso de grandes cantidades de reactivos tóxicos, corrosivos e inflamables y a la generación de grandes volúmenes de efluentes y otros residuos sólidos (Isildar, 2018).

Aunque en la actualidad solo se tiene algunos procesos hidrometalúrgicos en uso industrial como ayuda a procesos pirometalúrgicos, se ha calculado que algunos procesos pueden competir a gran escala contra las plantas de procesos pirometalúrgicos y se ha demostrado que utilizando solo procesos hidrometalúrgicos se puede obtener un gran rendimiento económico (Diaz, 2017).

5.3.3 BIOMETALURGIA

La biometalurgia emplea a los microorganismos para procesar los metales, es una tecnología con alta eficiencia para producir metales de los minerales primarios. Se han obtenido metales como cobre, oro, cobalto, níquel, zinc, arsénico, cadmio e incluso uranio (Isildar, 2018).

Se utilizan principalmente bacterias acidófilas para recuperar selectivamente los metales del flujo de basura. Las bacterias acidófilas prosperan en medios con pH ácidos (2.0-4.0) y ayudan a disolver los metales del estado sólido a su fase líquida. Bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y *Sulfolobus* son muy comunes para la actividad de biolixiviación mientras que hongos como *Penicillium simplicissimum* y *Aspergillus niger* también ayudan en el proceso de lixiviación de metales (Harikrushnan, 2016).

Hay un interés creciente en el bioprocesamiento de los RAEE para recuperación de metales ya que tiene un perfil más ambientalmente amigable que las prácticas tradicionales. Y demuestra un alto potencial de mejoramiento en el futuro (Isildar, 2018). Aunque estos métodos no requieren una gran inversión inicial y son amigables con el ambiente, consumen mucho tiempo y por sí mismos no es posible una completa recuperación de los metales. Por este motivo se han presentado procesos compuestos en los que se combinan los tratamientos hidrometalúrgicos con los biometalúrgicos, aprovechando las fortalezas de cada uno, haciendo una recuperación rápida, económicamente eficiente y ambientalmente amigable en pequeñas escalas (Harikrushnan, 2016). Sin embargo, las operaciones a gran escala todavía requieren mucha investigación, optimización de las condiciones operativas y evaluación de costos (Isildar, 2018).

A continuación, se presenta una tabla 5-3 con los procesos más conocidos de cada tratamiento final para la recuperación de metales; además se encuentran las características generales de cada uno de los tratamientos metalúrgicos, con las ventajas y desventajas que su uso deriva.

Tabla 5-3 Diversos procesos metalúrgicos para la recuperación o aprovechamiento de materiales provenientes de los RAEE en la actualidad.

MÉTODO	PROCESO	EFICIENCIA	VENTAJAS	DESVENTAJAS	FUENTE:
Pirometalúrgica	Fundición de cobre negro	Au=96.5%, Ag=88.5%, Cu=99.9%	En grandes cantidades es eficiente, se puede obtener gran variedad de metales.	Se requiere una gran inversión de complejo industrial, gran consumo de energía, se requiere una inversión adicional para mitigar las emisiones tóxicas al aire.	(Díaz L. A., 2017)
Pirometalúrgica	Pirolisis	0%	Disminuye el volumen de los residuos. Puede tratar grandes cantidades de residuos en poco tiempo. Aprovecha la energía de los residuos que de otra manera quedarían a la intemperie.	Gasta mucha energía y puede haber emisiones peligrosas al ambiente, además imposibilita el reciclaje de los materiales de residuos. Desincentiva la reducción y reutilización de los residuos.	(Díaz L. A., 2017)
Pirometalúrgica	Incineración	0%	Disminuye el volumen de los residuos. Puede tratar grandes cantidades de residuos en poco tiempo. Aprovecha la energía de los residuos que de otra manera quedarían a la intemperie.	Gasta mucha energía y puede haber emisiones peligrosas al ambiente (dioxinas, las cuales son cancerígenas). No elimina totalmente los residuos, algunas cenizas pueden llegar a ser tóxicas. Desincentiva la reducción y reutilización de los residuos.	(Díaz L. A., 2017)
Pirometalúrgica	Fusión Alcalina para separación de tierras raras	Y=100%, Eu=100%, Ce=100%, Tb=100%	Puede destruir las estructuras químicas de los fósforos, algo que no pueden hacer ácidos inorgánicos	Utiliza mucha energía en la calcinación	(Yufeng Wu, 2014)
Hidrometalúrgico	Lixiviación ácida	ácido clorhídrico/ sulfúrico=>95%, ácido nítrico=87-98%, etc.	Proceso barato y que disuelve la mayoría de los metales básicos y se puede utilizar casi cualquier ácido.	Genera gran cantidad de agua residual. Hay variación en la selectividad en cuanto a los metales que reaccionan y en la temperatura de la reacción.	(Isildar, 2018)

Tabla 5-3 (CONTINUACION)

Hidrometalúrgico	Lixiviación Cianúrica de metales preciosos	Au=48%, Ag=52%, Cu=77%; medido en tratamiento de TCI	Proceso barato en minería industrial.	Concentración alta de cianuro en agua residual es letal para seres vivos.	(Isildar, 2018)
Hidrometalúrgico	Tiosulfato de lixiviación de oro	Au=98%	Alternativa no tóxica, las tasas de disolución del oro son más altas que las de la lixiviación cianúrica.	Es muy costosa, el reactivo lixivante se gasta muy rápido y es inestable en presencia del ion cúprico, su relación costo beneficio no es buena, no es un proceso selectivo.	(Isildar, 2018)
Hidrometalúrgico	Tiourea lixiviación de oro.	Au=90% , Ag=50%; medido en tratamiento de TCI	Es menos tóxica a comparación con el cianuro, es un proceso selectivo.	Es muy costoso , alto costo del reactivo.	(Isildar, 2018)
Hidrometalúrgico	Halogenuro lixiviación de oro.	Au=94-100%	Es un proceso selectivo y rápido.	Alto consumo de reactivos y alto costo de estos.	(Isildar, 2018)
Hidrometalúrgico	Extracción y precipitación de tierras raras	Nd=90%, Pr=90%, Dy=30%	No genera grandes cantidades de residuos, es un proceso selectivo		(Diaz L. , 2016)(Diaz L. A., 2017)(Isildar, 2018)
Hidrometalúrgico	Lixiviación acida de tierras raras.	Y=80.4% , Eu=82.2%,Ce=8 1.4%, Tb=80% (100C, 2 mol/L H2SO4 , 8Hrs)		Solo en fósforos de tubos de lámparas fluorescentes, las cantidades tan pequeñas de los metales objetivo no lo hacen económicamente viable.	(Yufeng Wu, 2014)

Tabla 5-3 (CONTINUACION)

Hidrometalúrgico	Extracción con fluido supercrítico de tierras raras.	Y=99.7, Eu=99.8%		Implica una combinación de dióxido de carbono supercrítico, fosfato de trinitobutilo, ácido nítrico y agua, utilizando una extracción estática por 120 min a una alta presión de 15MPa, temp=333K, la inestabilidad de las condiciones supercríticas puede afectar la eficiencia hasta llegar a 7%. Las condiciones deben ser controladas en extremo, lo que supone una inversión muy alta.	(Yufeng Wu, 2014)
Biohidrometalúrgico	Bioprocesamiento	Cu=50-100% en 7 días	Bajos costos de operación	Muy tardado.	(Isildar, 2018)
Biohidrometalúrgico	Proceso de 1 paso	Cu=94.8%, en 28 días	Inversión baja	Muy tardado, es muy sensible a cambios de temperatura y cantidad de oxígeno.	(Isildar, 2018)
Biohidrometalúrgico	Proceso Multi paso	Zn=80%, Al=64%, Cu=86%, Ni=74%; prelixiviación de 28 días y biolixiviación de 280 días	Inversión baja	Muy tardado, es muy sensible a cambios de temperatura y cantidad de oxígeno.	(Isildar, 2018)

Cada enfoque de tratamiento para la recuperación de los materiales críticos tiene sus ventajas y desventajas, los cuales se presentan de manera general en la siguiente tabla:

Tabla 5-4 Ventajas y desventajas de la operación cada enfoque metalúrgico (Isildar, 2018)

PARAMETROS	PIROMETALURGIA	HIDROMETALURGIA	BIOMETALURGIA
Escala de operación	Solo rentable a gran escala	Factible en pequeñas escalas y de fácil expansión	Solo a pequeñas escalas
Costos de inversión y de operación	Gran capital de inversión, poca generación de empleos	Baja inversión, altos gastos de operación	Baja inversión y bajos gastos de operación
Consumo de energía	Alto	Medio	Muy bajos
Impacto ambiental	Alto, debido a emisiones de gas	Moderado, debido a químicos tóxicos	Bajo
Aceptación social	Bajo	Medio	Alta
Residuos finales	Jales, gran cantidad	Poca cantidad, agua recirculada	Poca cantidad, agua recirculada
Condiciones de servicio	Duras condiciones térmicas	Ácidos corrosivos	Condiciones seguras



6. PROPUESTA CONCEPTUAL DE UNA PLANTA RECICLADORA DE TECNOLOGIA LED

En primera instancia se debe resolver el problema de la recolección, esto se puede mejorar adoptando el modelo de la iluminación como un servicio integral, que consiste, entre otras cosas, en que un especialista realiza el cambio de las lámparas cuando estas dejan de servir, quedándose con la lámpara residual; en vez de vender las lámparas como un producto de una sola vez, este modelo se tiene en Holanda y Noruega con grandes resultados para la recolección (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016) (Recolight, 2018).

Sin embargo, cabe resaltar que la tendencia mundial es la realización de plantas capaces de reciclar todos los tipos de RAEE, ya que conforme la tecnología va mejorando y cambiando los aparatos se necesita tener una rápida respuesta en los procesos de reciclaje y la versatilidad de este nuevo modelo de planta recicladora da confianza financieramente en cuanto al ingreso seguro de recursos para trabajar, cosa que sería más riesgoso si solamente se tratarán uno o dos tipos de RAEE (Cucchiella, 2015).

La puesta en marcha de una planta recicladora de tratamiento final de materiales en Latinoamérica beneficiaria en gran parte en los ámbitos logísticos, económicos y medioambientales de la región ya que el mercado de los RAEE se mueve principalmente hacia el continente europeo y asiático, donde están las fundidoras más importantes de recuperación de materiales crudos críticos (Lee, 2017).

Con un crecimiento anual mundial del 4-5% de basura electrónica (Rahman, 2017) y solo unas pocas fundidoras capaces de recuperar los metales críticos provenientes de sus residuos, se esperaría que la demanda por estos materiales se incremente y en cierto punto las plantas existentes terminen rebasadas, necesitando acortar los tiempos tanto de transporte como de procesamiento final. Teniendo plantas de reciclaje tan importantes en el continente europeo y asiático no se piensa tan descabellado que se instituye una gran planta en Latinoamérica que ayude a reciclar los RAEE que se generan en el continente y cerrando el ciclo de los materiales tecnológicos. El mayor generador de basura electrónica en este continente son los Estados Unidos y México también tiene una generación muy importante (Baldé, 2017), si a esto sumamos los efectos del manejo informal de los RAEE provenientes de Estados Unidos que vienen a ser desmantelados en México, se crea una cantidad impresionante de Residuos electrónicos que aseguraría la materia prima para esta planta recicladora (Michael Smith et al, 2016) (Basel Action Network, 2018).

Una de las razones por la que no se ha realizado aún una planta de tratamiento final de RAEE de gran capacidad en un país como México, es porque se practica, casi exclusivamente, la obtención de recursos económicos por medio del desmontaje y venta de componentes de los RAEE, dejando los tratamientos finales para otras partes interesadas, aun cuando la mayor ganancia económica se puede obtener en ese sector. Sin embargo, se necesitaría una gran inversión de dinero y sortear la dificultad, por ejemplo, de la recolección de la basura electrónica en México (Tsydenova, 2018).



Obviamente se debe hacer una Manifestación de Impacto Ambiental en el lugar donde presuntamente se instale, tomando en cuenta los procesos y los residuos de los procesos de recuperación que generará, la exposición de la gente a estos residuos y su tratamiento. Esto con el fin de poder ver si es ambientalmente amigable o bien calcular si la contaminación que la planta genere es sustancialmente menor a la contaminación regional si la planta no se hiciera. En el caso en el que la planta contamine aún más, no se debería realizar el proyecto, sin embargo, creo que vale la pena al menos diseñar y evaluar el proyecto (LGEEPA, 1988).

6.1 PLANTA DE TRATAMIENTO FINAL

La instalación de una gran planta de tratamiento final de los RAEE en Latinoamérica puede ayudar a disminuir las exportaciones ilegales y cerrar el ciclo de reciclaje en el mismo continente, gastando menos recursos en transporte, disminuyendo las emisiones de GEI y disminuyendo el tiempo de reinsertión de estos recursos para la actividad económica asegurando la disponibilidad de esos recursos.

A su vez, la planta se encargaría de la gestión de todo tipo de RAEE ya que la tendencia mundial así lo dicta por la demanda de tecnología nueva, pues los aparatos electrónicos se deprecian rápidamente y las compañías ofrecen modelos nuevos cada vez más rápido. Por lo que diseñar una planta de recuperación entorno a un tipo de aparato y modelo, parece un sin sentido. Sin embargo, en lo que compete a esta tesis, el enfoque se realizará en la línea de recuperación de materiales provenientes de la tecnología LED.

6.2 CONDICIONES DE LA PLANTA

6.2.1 ENFOQUE EN COMPONENTES

Cabe aclarar que en cuanto al pre-procesamiento de los RAEE, se propone un desmantelamiento selectivo manual, a pesar de que es el método más tardado y costoso, una pantalla LCD tarda en ser desmantelada entre 3.6 y 10 min por ejemplo; sin embargo, es el método más efectivo para recuperar los metales preciosos y críticos sin tener pérdidas significativa, de acuerdo con la información de varios autores con una efectividad del 95-100% de recuperación de materiales (Fulvio Ardente*, 2014) (Chancerel, Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment, 2009).

Continuando con este enfoque, se sabe gracias a varios estudios que las piezas de mayor valor son las TCI de todos los aparatos electrónicos y que están en la mayoría de los dispositivos con tecnología LED, además debido a la criticidad de sus materiales también tienen valor los imanes y las plaquetas LED. Por lo que las piezas que deben cuidarse en el proceso de desmantelamiento en componentes son las TCI, los imanes y LEDs (Singh, 2018).

Las TCI, no deben ser trituradas, en (Chancerel, Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment, 2009) se demuestra como el nivel de recuperación del Oro, Plata y Paladio de las TCI disminuye en función al tamaño de partícula a la



que es triturada. Las películas de las pantallas LCD, tampoco deben ser trituradas, ya que se ha demostrado en (Zhang, 2017) que para la obtención del Indio, no es necesaria la trituración, ya que el Óxido de Indio estaño, se encuentra en la superficie de las películas, por lo que se puede obtener sin comprometer la estructura de la película. Este proceso se presenta en la figura 6-1.

6.2.2 CANALIZACIÓN DE MATERIALES NO OBJETIVO

Los dispositivos contienen cables y plásticos que son materiales que se pueden reciclar, solo que las TCI, los imanes y LEDs cargaran con el valor financiero que mantendrá la operación debido a la cantidad de metales preciosos y críticos que contienen. Sin embargo, se propone trituración de los diferentes tipos de plásticos y posterior venta a recicladoras de plástico (Ruiz-Mercado, 2017) (Diaz, 2017). Además, se propone la separación del plástico de los cables para la recuperación del cobre, aunque se sospecha que esta recuperación de cobre será en poca cantidad, ya que es la forma de reciclaje de residuos electrónicos más famosa entre la población y es más fácil separar el cobre de los cables y venderlo a intermediarios que lo venden a las fundidoras de cobre más importantes del país para que se hagan distintos productos como cables o tubería. Este proceso se presenta en la figura 6-1.

Con los materiales remanentes de los procesos de recuperación a los que serán sometidos los distintos componentes, como por ejemplo las TCI que ya no tengan los materiales objetivo se propone la trituración y canalización para la creación de materiales de construcción, ya que su composición a base de fibra de vidrio y polímeros puede adquirir un mejor uso que la incineración o disposición al aire libre (Diaz L. A., 2017).

6.2.3 MODELO DE COOPERACIÓN Y PTAR

Se propone un modelo de compra venta al público en general, dando un precio por los RAEE íntegros y aumentando el precio por los componentes separados como los TCI y los LEDs, de esta forma ayudamos a las personas a concientizar sobre la importancia del reciclaje y se les enseña a separar este tipo de residuos. Con este modelo, se aceleraría el proceso de recuperación de materiales de los RAEE ya que la población desmantelaría los aparatos y recibiríamos los componentes objetivos. Esto brindaría un incentivo para que la población obtuviera valor mediante la venta de los componentes y no de tratar de obtener los metales de forma doméstica ya que esto implicaría riesgos para su propia salud y en impactos ambientales. Este proceso se presenta en la figura 6-2.

Este fenómeno es debido al gran alcance del internet en los últimos años, los conocimientos de metalurgia se han popularizado entre la población, y existen varios videos en Youtube que enseñan a las personas como extraer los metales preciosos de algunos tipos de RAEE, en el cual el proceso utilizado casi siempre es la hidrometalurgia, por sus características y su manejo práctico. Sin embargo, la cantidad de los residuos que generan los procesos hidrometalúrgicos es mayor a la cantidad de los metales recuperados (Isildar, 2018) y estas aguas residuales generadas de manera doméstica no se tratan, van a dar al drenaje municipal, lo que crea un impacto mayor si se generaliza la obtención de metales preciosos de manera informal en casas habitación. Por lo que es importante



que las aguas residuales que se generen por el proceso metalúrgico de la planta sean tratadas y reutilizadas en el proceso, formando parte del concepto de descarga cero y así asegurar que no se impactará de forma negativa en el consumo excesivo de agua potable que podrían utilizar los ciudadanos de las zonas aledañas ni en la descarga de estas aguas residuales industriales al ambiente.

6.2.4 VENTAS

Como todo negocio, no se puede sobrevivir sin las ventas por lo que se propone tener un equipo comercial que se encargue de las ventas a los fabricantes que pudieran utilizar los materiales recuperados, (joyería, manufactura de electrodomésticos, fundidoras, etc.) este equipo comercial no debe ser tan numeroso porque en realidad no hay muchos clientes potenciales para este mercado, sin embargo, pueden ser los más lucrativos. Se debe poner especial atención en el capital humano encargado en este departamento pues una sola venta, generalmente representa una gran cantidad de material y pudiera ser muy lucrativa.

6.3 RESIDUOS A TRATAR

A continuación, se exponen los aparatos electrónicos pertenecientes a la tecnología LED que es más probable encontrar en el efluente de residuos electrónicos, se realiza un análisis de los materiales que los componen y se proponen los mejores procesos para la recuperación de los materiales críticos según la literatura disponible. Con el fin de organizar un diagrama de flujo del proceso de recuperación de materiales a partir de un dispositivo, obteniendo así un proceso conceptual para una planta de recuperación final.

6.3.1 CELULARES

La tasa de reciclaje mundial de dispositivos móviles descartados es del 3%, en países en desarrollo es del 1%, a pesar de que se ha encontrado en distintos estudios que entre un 80-96% del material utilizado en la manufactura de un teléfono móvil puede ser efectivamente reciclado (Singh, 2018).

Para poder diseñar un proceso de reciclaje se necesita conocer las características de los residuos electrónicos que serán procesados, como se presenta en la tabla 6-1:



Tabla 6-1 Componentes promedio en celulares (Singh, 2018).

COMPONENTES	% DE PESO TOTAL	MATERIALES
Plásticos	42	
TCI	23	Au, Ag, Pd, Pt, Cu, Eu, Ce, La, Th, entre otros.
Tapa de Cubierta y tornillos	19	Fe
Pantalla	12	In, Sn
Imanes	2	Nd, Dy, Pr
Vibradores	~2	W
Luces LED	~1	Eu, Ce, Ga, Gd, Y

Tomando en cuenta los datos presentados, se pueden definir los componentes objetivos, así como los materiales más valiosos y en mayor cantidad, para que sean los materiales objetivos del proceso de recuperación. Por ejemplo, las TCI son los componentes más importantes en los equipos celulares desechados. Ya que contienen una gran variedad de materiales como MPs, se estima que en promedio un teléfono inteligente contiene \$0.63USD en oro, \$0.08 USD en plata y \$0.09USD en paladio, lo que significa una cantidad 100 veces mayor de MPs que lo que se consigue del mineral virgen. (Singh, 2018).

Basado en estudios hechos en la tecnología actual (Chancerel, 2015), deja como resultado que el oro es por mucho el material más importante a recuperar desde un punto de vista económico en todos los tipos RAEE.

A continuación, se presenta una tabla 6-2 que expone los procesos para recuperar los materiales objetivos que se han propuesto basados en su valor económico y en la complejidad de los procesos más eficientes hasta la fecha para su recuperación. En el caso puntual de las luces LED, a pesar de que se podrían obtener más TR tales como el Eu, y el Ce, los procedimientos para su extracción son muy caros a comparación de su valor en el mercado, por lo que a menos que haya algún incentivo por parte del gobierno para el reciclaje de estos materiales o se invente un nuevo proceso que haga el costo beneficio de su reciclaje más atractivo, no parece buena idea extraer esos elementos. (Ruiz-Mercado, 2017) (Chancerel, 2015) Incluso se propone que, de ser necesario, acaparar los LEDs que ya no sirvan puede ser una solución provisional para esperar cualquiera de las situaciones antes mencionadas, esto usando la certeza de que los LEDs aún forman una pequeña porción del efluente de residuos electrónicos. (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016)



Tabla 6-2 Tratamientos finales propuestos para la recuperación de los diferentes materiales objetivo que componen los celulares

COMPONENTE	MATERIALES OBJETIVO	PROCESOS	EFICIENCIA	FUENTES
Plásticos		Trituración y venta a reciclaje de plásticos.	100%	(Ruiz-Mercado, 2017) (Fulvio Ardense*, 2014)
TCI	Au, Ag, Pd, Cu	Proceso de reacción electroquímica en 3 etapas.	Au=96.5%, Ag=87%	(Diaz, 2017) (Diaz L. , 2016)
Tapa de Cubierta y tornillos	Fe	Trituración y venta para reciclaje de Fe	100%	(Fulvio Ardense*, 2014) (Ruiz-Mercado, 2017)
Pantalla	In	Lixiviación acida de alta temperatura con ácido sulfúrico	In=100%	(Isildar, 2018)
Imanes	Nd, Dy, Pr	Extracción, precipitación y recuperación de TR con ácido sulfúrico.	Nd=66.7%, Pr=91.7%, Dy=54.9%	(Diaz L. , 2016)
Vibradores	W	lixiviación acida del tungsteno con ácido clorhídrico	W=88.5%	(P.Navarro, 2005)
Luces LED	Y, Ga,	Proceso de reciclaje de óxidos de tierras raras; recuperación de Ga a través de la molienda de bolas, recocido y lixiviación presurizada.	Y ₂ O ₃ =109.19g después de procesar 10000 retro luces LED, Ga=73.68-98.45%	(Ruiz-Mercado, 2017) (Swain, 2015) (Chen, 2018)

6.3.2 PANTALLAS

Cabe destacar que la única diferencia (en cuanto a materiales) entre una pantalla LCD de una pantalla LED es la forma en que se retroilumina la pantalla, mientras que las pantallas LCD se retroiluminan mediante CCFL (lámparas Fluorescentes Compactas) y las últimas son retroiluminadas por luces LED. Esto significa una ventaja ambiental no solo en el ahorro de energía eléctrica sino en que las CCFL contienen mercurio el cual es tóxico (Fulvio Ardense*, 2014). Sabiendo esta principal diferencia, se infiere que al saber los distintos componentes que forman una pantalla LCD se pueden saber la mayoría de los componentes de una pantalla LED. A su vez se puede notar que en general los componentes de una pantalla no difieren mucho de los de un celular.

Cada pantalla tiene 3 TCI que sirven para distintos propósitos, una se encarga de la fuente de poder, otra es la tarjeta de control de tiempo (T-CON) que se encarga del display de cristal líquido y la tarjeta principal es la tarjeta de señal pequeña(SSB), que se encarga de los puertos auxiliares (como el HDMI) y del control de canales (Vanegas, 2017). Aunque estas tarjetas cumplen distintas



funciones que las de los celulares, los elementos objetivo siguen siendo los mismos debido a su valor y cantidad Au, Ag, Pd y Cu.

Además, en el proceso desmantelamiento selectivo, uno de los componentes es el módulo de la pantalla en sí, que puede ser LCD o LED, las dos están formadas por paneles de transistores de película delgada que contienen una gran proporción de Indio. Las recuperaciones altas de este elemento solo pueden ser logradas si las pantallas no son trituradas entrando en el proceso de reciclaje y más bien, son separadas cuidadosamente y antes que cualquier tratamiento mecánico (Fulvio Ardente*, 2014).

En el proceso lo que se persigue es la recuperación de los metales, sin embargo, cuando se obtiene metales base que ya tienen un proceso determinado como en el caso del cobre, el aluminio y el hierro, es mejor entregar los materiales a esas industrias para que puedan reintegrar esos materiales y cerrar el ciclo. Por lo que se triturarán las partes que no hayan sido separadas en la selección y se separarán mecánicamente, asegurando así que los materiales sean útiles para las industrias (Vanegas, 2017). A continuación, se presenta en la tabla 6-3 con los materiales objetivo que se planean recuperar y los procesos que se aplicaran a cada componente de las pantallas electrónicas.

Tabla 6-3 Principales componentes de Pantallas electrónicas LED, procesos y eficiencias con los que se propone recuperar los materiales objetivo.

COMPONENTES	MATERIALES OBJETIVO	PROCESOS	EFICIENCIA	FUENTES
Plásticos No reciclables		Trituración y envío a incineración	100%	(Vanegas, 2017)
Plásticos reciclables	Poliestileno, ABS	Trituración y venta a reciclaje de plásticos	100%	(Vanegas, 2017)
Soporte	Fe, Al	Trituración y venta a reciclaje de Fe y de Al	100%	(Vanegas, 2017)
Cables	Cu	Captación y venta a reciclaje de Cu	100%	(Vanegas, 2017)
TCI	Au, Ag, Pd, Cu	Proceso de reacción electroquímica en 3 etapas	Au=96.7%, Ag=87%	(Diaz, 2017)
TCI(T-CON)	Au, Ag, Pd, Cu	Proceso de reacción electroquímica en 3 etapas	Au=96.7%, Ag=87%	(Diaz, 2017)
TCI(SSB)	Au, Ag, Pd, Cu	Proceso de reacción electroquímica en 3 etapas	Au=96.7%, Ag=87%	(Diaz, 2017)
Pantalla	In	lixiviación acida de alta temperatura con HCl	In=100%	(Isildar, 2018)

Cabe aclarar que en el efluente de pantallas que se reciban, algunas sean pantallas LCD, por lo que en el desmantelamiento selectivo manual se debe contar en todo momento con la protección adecuada y la separación de los tubos compactos fluorescentes en este tipo de pantallas y que contienen mercurio debe hacerse con mucho cuidado. Una vez separados estos tubos se deben tratar



con una trituration mojada para evitar que se escape el gas de mercurio. (Vanegas, 2017) Sin embargo, este proceso escapa al propósito de la tesis.

6.3.4 LÁMPARAS LED

El rápido crecimiento de la cantidad de LEDs en el mercado de la iluminación y la tecnología del entretenimiento hacen que sea necesario una forma para su gestión adecuada. El porcentaje de mercado global paso del 9% en 2012 a 35% en 2016 y se prevé una captación del mercado de 63% para el 2020 (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016).

Sin embargo, las lámparas LED, las pantallas LED y los celulares, a pesar de ser dispositivos diferentes, están formados casi por los mismos materiales, por lo que el proceso de recuperación de los materiales que lo componen debería ser parecido, a continuación, presentamos el diagrama de flujo que compartirían estos dispositivos.

Tabla 6-4 Principales componentes de las lámparas LED y procesos de recuperación de los materiales objetivo

COMPONENTES	MATERIALES OBJETIVO	PROCESOS	EFICIENCIA	FUENTES
Cuerpo de enfriamiento	Al	Trituración y venta a reciclaje de Al	100%	
Manejador electrónico (TCI)	Au, Ag, Pd, Cu	Proceso de Reacción electroquímica en 3 etapas	Au=96.7%, Ag=87%	(Diaz, 2017)
Globo de cristal	vidrio	Captación y venta a reciclaje de vidrio	100%	
Conectores y tapa	plásticos, Cu	Captación y venta a reciclaje de Cu	100%	
Módulo LED	Y, Ga,	Proceso de reciclaje de óxidos de tierras raras; Recuperación de Ga a través de la molienda de bolas, recocido y lixiviación presurizada	Y ₂ O ₃ =109.19g después de procesar 10000 retro luces LED Ga=73.68-98.45%	(Ruiz-Mercado, 2017) (Swain, 2015)(Chen, 2018)

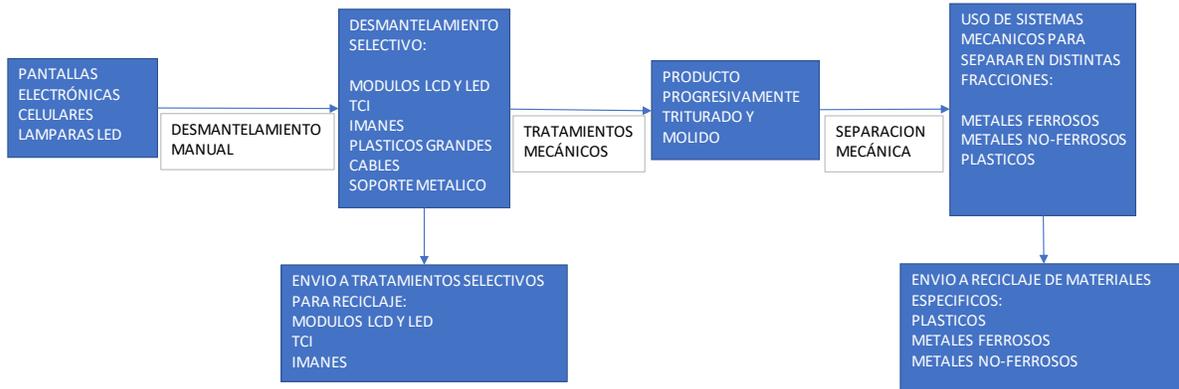


Figura 6-1 Diagrama de flujo propuesto para planta recicladora, modificado de (Fulvio Ardente, 2014)

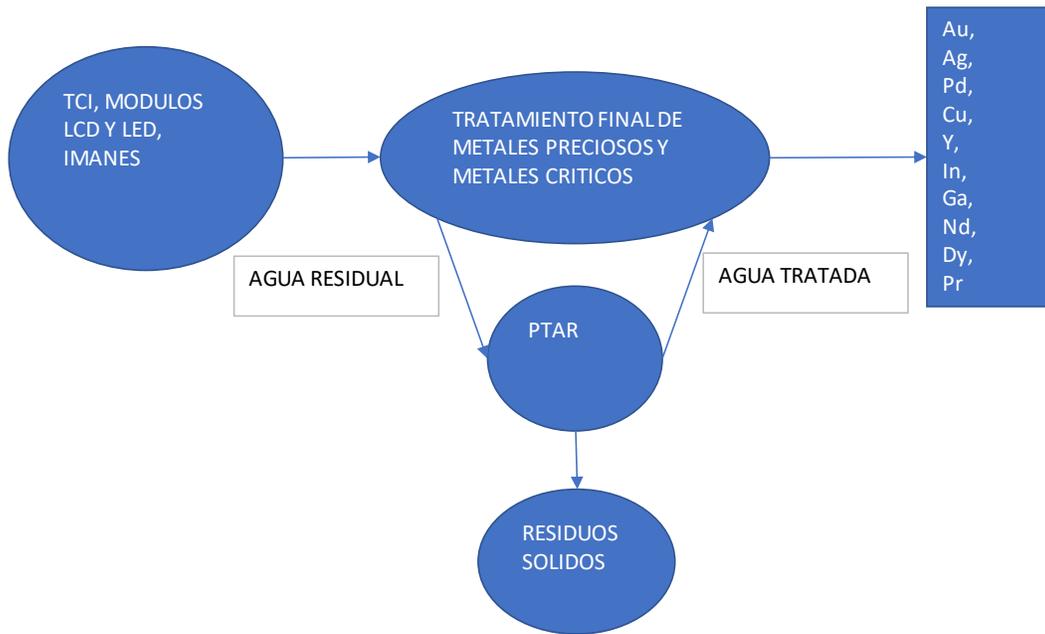


Figura 6-2 Diagrama conceptual del proceso después del desmantelamiento selectivo de las piezas objetivo.

Para saber la cantidad de agua residual que necesitará ser tratada primero se necesita estudiar muy bien los procesos y hacer un análisis de flujo de masas de cada uno, ya que se involucran sustancias corrosivas como el ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido fórmico el hidróxido de sodio, sulfato de sodio, entre otros. Además, se tendrá que realizar la caracterización de las aguas residuales para la elección de los procesos unitarios que manejará esta PTAR por lo que a continuación se explican los procesos de recuperación final al que se someterán los componentes objetivo.



6.4 PROCESOS A UTILIZAR

6.4.1 PROCESO DE RECUPERACIÓN ELECTROQUÍMICA DE METALES BASE Y METALES NOBLES EN 3 ETAPAS (TCI)

A diferencia de lo que propone (Diaz L. A., 2017) y a reserva de una experimentación más minuciosa, en el modelo conceptual del proceso de tratamiento para las TCI. Estas no se van a triturar como lo propone (Chancerel, Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment, 2009), se obtiene mayor beneficio de la recuperación de MP si no se trituran las TCI al inicio de este proceso.

Los materiales son encerrados en columnas de extracción y al mismo tiempo se genera un oxidante suave (Fe^{3+}) en el ánodo de un reactor electroquímico con una solución de 0.6M de FeCl_2 en 0.5M HCl. La solución es alimentada por el fondo de la columna, para oxidar los metales base sin atacar a los metales preciosos (Diaz L. A., 2017). Este proceso se presenta en la figura 6-3.

La solución extraída del ánodo se bombea a través de una columna de lixiviación y se devolvió a la sección del cátodo (Diaz L. , 2016). La solución rica en metales que deja las columnas es dirigida al lado catódico del reactor electroquímico donde el material extraído es electrodepositado (Diaz L. A., 2017).

La solución que sale de la columna se hace circular para llenar una celda electroquímica y una vez que está llena, se detiene la alimentación de la solución nueva y se inicia la recirculación de la solución de la celda electroquímica. Al mismo tiempo, se aplica una densidad de corriente a la celda electroquímica (Diaz L. , 2016).

Las reacciones galvánicas entre los metales de la basura electrónica definen los iones metálicos saliendo de la columna tal que los metales menos nobles son los primeros en salir (Diaz L. A., 2017). Las reacciones galvánicas definen no solo el orden en que los metales se agotarán sino también el orden en el cual los metales se recuperarán a través de electrodeposición (Diaz L. , 2016).

La zona de transferencia se mueve a través de la columna, por lo que, la primera columna en la serie puede ser remplazada por la siguiente columna después de que los metales base se hayan agotado en la primera y una nueva columna puede ser añadida para permitir una operación semi continua. (Diaz L. A., 2017). Las eficiencias de extracción de metales básicos totales son Cu (99.6%), Sn (100%), Zn (94.4%) y Pb (100%) (Diaz L. , 2016).

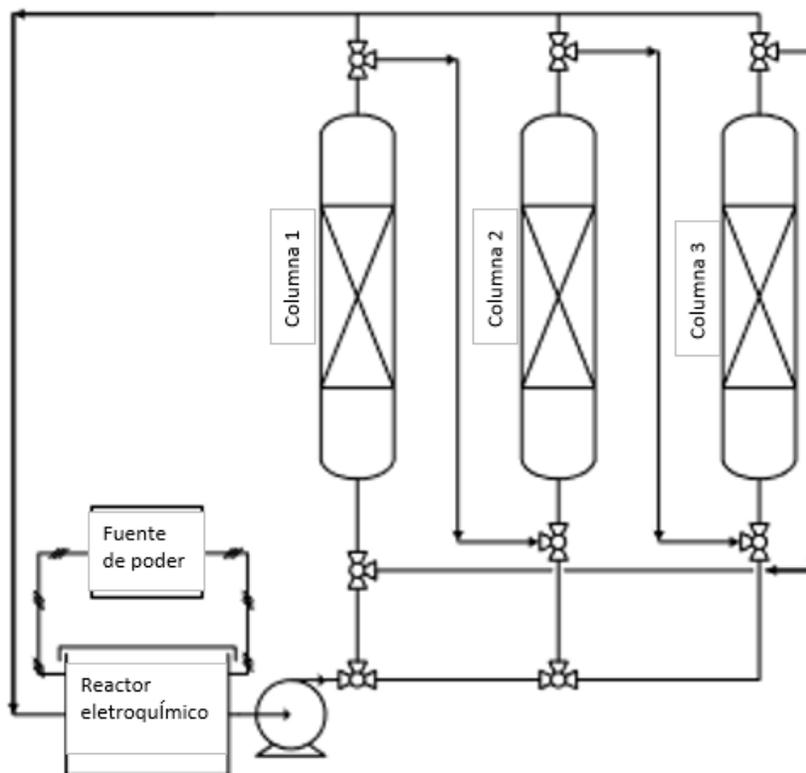


Figura 6-3 Detalle del modelo de columnas en serie para la extracción de MB (Diaz L. , Process development for the recovery of critical materials from electronic waste., 2016)

Una vez separados los metales básicos queda la extracción de los MP, la plata se puede obtener mediante complejación usando una solución a 0.1M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (tiosulfato de sodio) con una relación sólido: líquido 1:1. Después, la plata es cementada con la aplicación de polvo de Zinc, posteriormente la plata cementada es digerida con 1 M HCl para obtener Plata pura. Este proceso es presentado en la figura 6-4. Las eficiencias de recuperación llegan a estar por arriba del 80% (Diaz L. , Process development for the recovery of critical materials from electronic waste., 2016).

El proceso para la recuperación del Oro y Paladio está todavía en investigación. Aunque se está probando con varios métodos hidrometalúrgicos, se ha encontrado que la lixiviación con tiourea ácida en el proceso electroquímico incrementa las eficiencias de extracción de metales preciosos (Diaz L. , 2016).

Para el análisis técnico y económico se asumirá una eficiencia de recuperación del 100% basados en los resultados obtenidos por (Cheng, 2013) y propuesto por (Diaz L. , Process development for the recovery of critical materials from electronic waste., 2016).

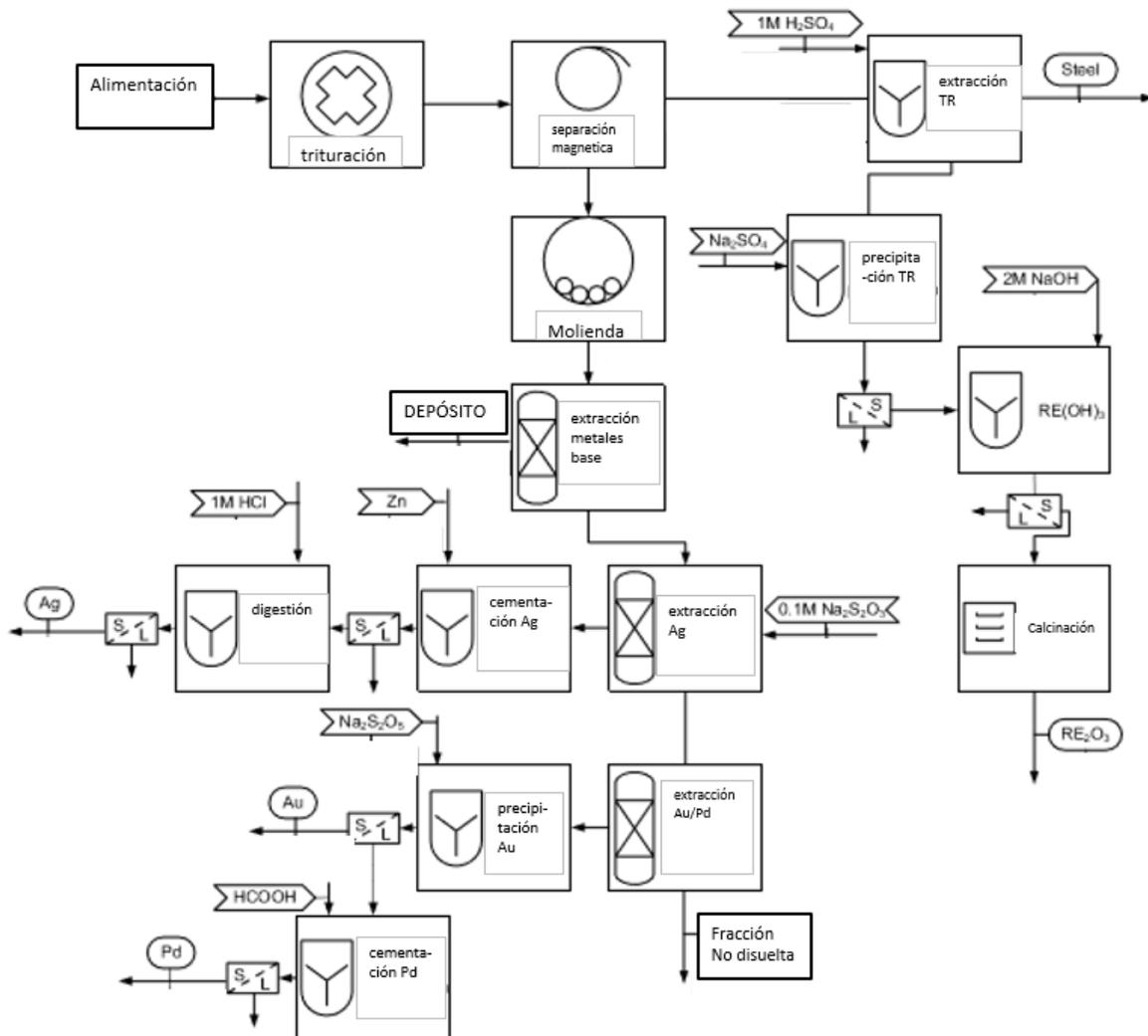


Figura 6-4 Modelo de recuperación electroquímica de MB y MP, traducido de (Diaz L., Process development for the recovery of critical materials from electronic waste., 2016)

La fracción no disuelta es el material pulverizado que queda como remanente en el proceso, está formado casi en su mayoría por polímeros y fibra de vidrio, puede aprovecharse como relleno de agregados de polímero para la creación de material de construcción como el concreto. (Diaz L. A., 2017). Recordemos que en la propuesta no se trituran los TCI por lo que este material no disuelto son las TCI estructuralmente íntegras, pero sin MB ni MP, por lo que se pueden triturar y canalizar para su aprovechamiento en la industria de la construcción.

En estudios de sensibilidad económica, se calcula que este proceso puede competir con el proceso de fundición de cobre negro, con menos capital de inversión, menor daño al medio ambiente y mayor eficiencia de recuperación en el caso de algunos metales (Diaz L. A., 2017).



6.4.2 LIXIVIACIÓN ÁCIDA DEL INDIO ASISTIDA POR ONDAS ULTRASÓNICAS (PANTALLAS)

El indio es un metal escaso, ha sido explotado por sus características semiconductoras, en particular el óxido de indio combinado con óxido de estaño forma óxido de Indio Estaño el cual es empleado en los filtros de paneles LCD de televisores, computadoras, laptops, etc. Esta aplicación alcanza el 80% del consumo total de indio. En vez de ser dispuestos como basura municipal, los paneles LCD inservibles pueden significar un recurso importante de indio y según cubrir la mitad de la demanda total de Indio en el 2035. Por estas razones la recuperación del Indio ha sido largamente investigado. Sin embargo, los estudios hechos se han enfocado en encontrar el tamaño óptimo de partícula, producto de la molienda de las pantallas, con el que se pueda lixiviar la mayor cantidad de Indio, incluso se ha encontrado que la molienda excesiva puede causar pérdidas del metal.

Considerando que la capa de óxido de Indio Estaño es de 125 nm de espesor, el porcentaje que contiene de In es del 3% y que la ubicación del metal está en la superficie del vidrio, se tomó como alternativa el uso de ondas ultrasónicas. El método depende en gran medida de 3 factores; la concentración de HCl, el tiempo de lixiviado y el poder del ultrasonido. Alcanzando un nivel óptimo con 0.8M HCl, 60 min y 300W lixiviando el 95.69% del Indio del vidrio de óxido de Indio Estaño (Zhang, 2017). Este proceso se presenta en la figura 6-5.

La adición de un compuesto permite que los iones disueltos en la solución precipiten mediante la formación de compuestos que no son solubles en ciertos valores de pH. La precipitación del indio está en un rango de pH comprendido entre 3.0 y 12.2. En (Vargas, 2017) se propone añadir una solución con 6M de NaOH, para asegurar la precipitación del indio, como la lixiviación asistida por ondas ultrasónicas ha sido selectiva, no hay necesidad de separar el indio de algún otro contaminante (Zhang, 2017). Después de la precipitación, se procede a la calcinación a una temperatura de 700°C por 2 horas para obtener óxido de Indio (Vargas, 2017).



Figura 6-5 Proceso para la recuperación del Indio proveniente de pantallas de cristal líquido descartadas (Celulares y TVs)



6.4.3 EXTRACCIÓN, PRECIPITACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TR. (IMANES)

La extracción selectiva de REE de la fracción ferromagnética de los materiales de teléfonos celulares, se realiza en 1 M H₂SO₄ desaireado durante 72 horas. El imán NdFeB, puede disolverse espontáneamente en medios ácidos (Diaz L. , 2016).

Después de la extracción, las TR son precipitados del lixiviado como sulfato doble de tierras raras (NaTR (SO₄)₂ x H₂O) agregando Na₂SO₄. El efecto de Sulfato de Sodio es de 1 hora a 8.5 veces la cantidad estequiométrica para una eficiencia de precipitación de 99.2% según (Renata D. Abreu, 2010). Finalmente, la sal doble precipitada se convierte en hidróxido de TR (TR (OH)₃). por adición de un exceso del 10% de NaOH 2 M y reacción durante 2 horas a 70°C, como producto intermedio para que la futura calcinación a 500°C por 3 horas forme óxidos de tierras raras (Diaz L. A., 2017). Este proceso está representado en la figura 6-6.

La eficiencia de recuperación de materiales críticos fue de 91.7%, 66.7% y 54.9% para Pr, Nd y Dy, respectivamente (Diaz L. , 2016).

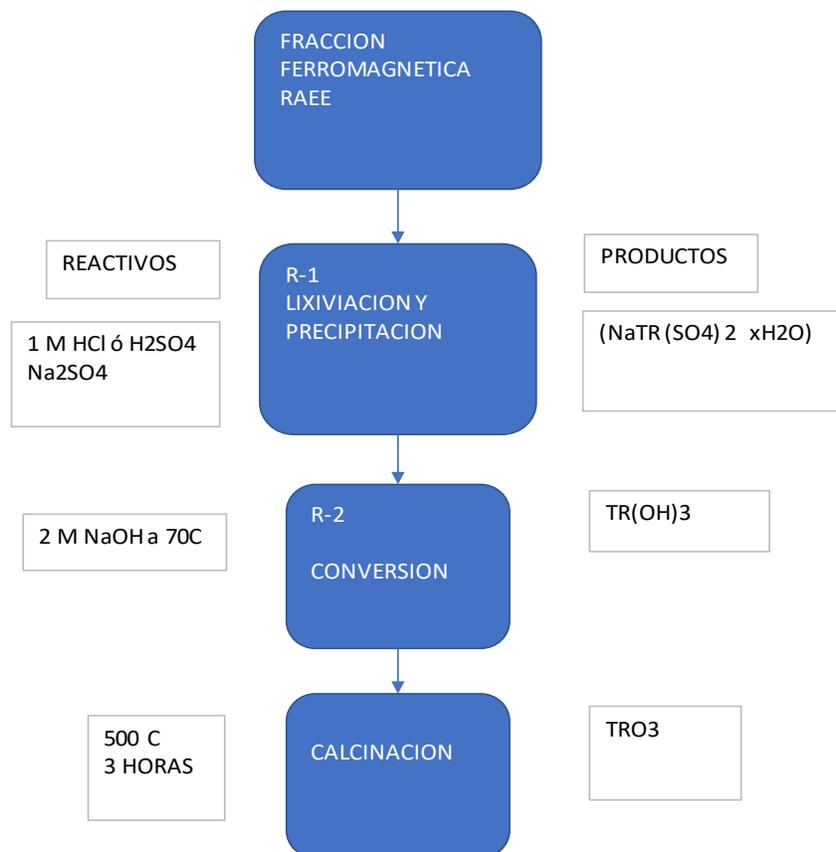


Figura 6-6 Esquema de proceso de extracción selectiva de Tierras Raras (Diaz L. A., 2017)



6.4.4 LIXIVIACIÓN ÁCIDA PRESURIZADA PARA LA EXTRACCIÓN DE GALIO (MODULOS LED).

El Galio es un metal escaso, que tiene propiedades semiconductoras que lo hacen un ingrediente crucial en el desarrollo de tecnologías como los LEDs, los teléfonos inteligentes, las celdas fotovoltaicas, las TCI, etc. Además, tiene usos como en termómetros, barómetros de alta resistencia los cuales se usan en los satélites. En el 2016 la producción total fue de 375 ton para una pureza de 99.99% y de 185 para una pureza de 99.9999%. Menos del 1% de los dispositivos electrónicos desechados que contienen grandes cantidades de Galio son reciclados a nivel mundial (Chen, 2018).

La extracción selectiva del Ga en los módulos LED, se tiene que hacer con HCl a alta temperatura y a una presión determinada, ya que las estructuras del GaN son muy resistentes. El proceso representado en la figura 6-7 Se pretrata los LEDs en una trituración y molienda para obtener un tamaño máximo de partícula de 100 micras para que la lixiviación ácida obtenga el mejor rendimiento. Las condiciones óptimas a las que la lixiviación ácida del Ga son una concentración de 0.25M HCl con una relación líquido-sólido 30 ml/g a una temperatura de 200°C, una presión equivalente a 15 atm y un tiempo de reacción de lixiviado de 180 min. Obteniendo una eficiencia de 98.46% de lixiviación del Galio puro (Chen, 2018). Después de la extracción a base de la lixiviación ácida, se precipita el Galio con una variación de pH alrededor de 5.25. En algunas fuentes se indica que se puede utilizar limones para este propósito (Dreisinger, 2015). Se calcula un promedio de 3.38% de Ga contenido en los residuos de LED, por lo que la cantidad de Galio que se puede recuperar con este proceso es de 33.28 kg Ga/ton de LEDs (Chen, 2018).

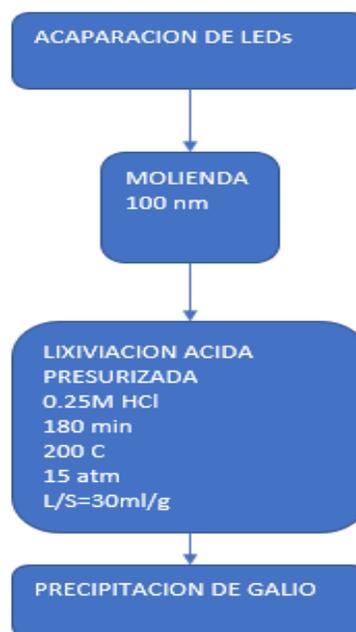


Figura 6-7 Proceso de reciclaje del Galio a partir de los módulos LED (Chen,2018)



7. ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

Recientemente se ha hecho un estudio económico para la implementación industrial de una planta de recuperación de metales basada en la combinación de los procesos hidrometalúrgicos y electroquímicos. El estudio compara las ganancias y costos en el modelo tradicional de fundición con las ganancias y los costos esperados de la implementación de una planta electroquímica. A su vez, demuestra que esta nueva alternativa puede ser competitiva para la recuperación del valor de la basura electrónica pues puede procesar 2.9 kg de RAEE por dólar de capital invertido contra 1.3 kg en el proceso de fundición. Se obtienen 18.4% de ingresos más altos en el proceso de fundición, sin embargo, en el proceso electroquímico se necesitan costos de operación 30% más bajos y capital de inversión más bajo requerido, lo que le da una ventaja competitiva (Diaz L. A., 2017).

Los factores que determinan la viabilidad económica del reciclaje de un material se encuentran principalmente en su pureza inicial, el valor del mercado, los costos fijos para la recuperación del metal y el mercado de los productos de los procesos de recuperación (Fernandez, 2013).

Se deben tener registrados los precios de los materiales que queremos recuperar, los precios se fijan a diario en el mercado bursátil por eso se debe monitorear el comportamiento de los precios de mercado. La tabla 7-1 muestra los precios recientes de los materiales que se pueden recuperar en dólares por kilo.

Tabla 7-1 Precios de Mercado de los materiales objetivo

ELEMENTO	USD\$/KG	FUENTE	FECHA CONSULTA
ITRIO	\$ 32.55	(Mineral prices, 2018)	01/11/18
OXIDO EUROPIO	\$ 42.68	(Mineral prices, 2018)	01/11/18
OXIDO NEODIMIO	\$ 45.58	(Mineral prices, 2018)	01/11/18
OXIDO DISPROSIO	\$ 184.20	(Mineral prices, 2018)	01/11/18
CERIO	\$ 6.37	(Mineral prices, 2018)	01/11/18
TERBIO	\$ 423.18	(Mineral prices, 2018)	01/11/18
OXIDO PRASEODIMIO	\$ 58.23	(Mineral prices, 2018)	01/11/18
INDIO	\$ 341.60	(Mineral Prices , 2018)	01/11/18
GALIO	\$ 260.00	(Alibaba, 2018)	11/09/18
TUNGSTENO	\$ 43.40	(Mineral Prices , 2018)	01/11/18
COBRE	\$ 6.07	(Precio Oro, 2018)	31/10/18
ALUMINIO	\$ 1.99	(Mineral Prices, 2018)	01/11/18
ORO	\$39,620.22	(Bullion by post, 2018)	01/11/18
PLATA	\$ 473.91	(Bullion by post, 2018)	01/11/18
PALADIO	\$35,169.71	(Bullion by post, 2018)	01/11/18



Tomamos un ejemplo de producción de 20 mil ton de RAEE procesadas al año, a partir de los datos presentados en (Diaz L. , Process development for the recovery of critical materials from electronic waste., 2016) (Diaz L. A., 2017) y tomando varias de las suposiciones que se presentan en la tabla 7-2 a continuación, se hizo un análisis de sensibilidad del proyecto.

Tabla 7-2 Suposiciones realizadas para el análisis económico del proyecto basadas en las hechas por (Diaz L. A., 2017)

SUPOSICIONES	VALOR ASUMIDO
Deuda financiamiento de planta	100% Inversiones de capital + 40% primer año costo operacional
Termino de financiamiento de deuda	5 años
Interés del financiamiento de deuda	10% anual
Periodo de evaluación	10 años
Termino de depreciación	10 años
Impuestos	35%
Inventario	10% reactivos y materia prima
Periodo de inicio	6 meses
Ingresos y costos durante inicio	ingresos=50% Costos operativos =50% costos administrativos=100%

Tabla 7-3 Gastos operacionales de la planta recicladora (USD) (Diaz L. A., 2017)

RUGRO	COSTO	% COSTO
Alimentación RAEE	\$ 160,887,733.29	90.03%
Reactivos	\$ 2,514,438.80	1.41%
Operación Mo	\$ 6,646,783.00	3.72%
Gastos Op. general	\$ 2,060,502.70	1.15%
Utilidades	\$ 958,073.70	0.54%
Otros	\$ 5,235,983.90	2.93%
Mantenimiento	\$ 396,166.60	0.22%
	\$ 178,699,681.99	100.00%

Para la recuperación de los MP, se tomaron en cuenta los rendimientos de los procesos descritos por (Diaz L. , Process development for the recovery of critical materials from electronic waste., 2016). Para la recuperación del indio de las pantallas LCD, se prevé una cantidad promedio de 120 mg/kg de RAEE procesado. Tomando en cuenta la efectividad de recuperación del método de 96%, a continuación, se presenta la tabla 7-4 con los ingresos que se pueden obtener de la venta de Indio



(Zhang, 2017). En el proceso se obtiene óxido de Indio, sin embargo el precio en internet fluctúa entre los 200 y 500 USD el cual es un promedio aproximado al precio del Indio.

Poniendo por supuesto que solo se procesan imanes, donde el porcentaje de Nd, Pr y Dy es aproximadamente de 80% ,15% y 5% respectivamente a manera general en todos los productos vendidos a nivel mundial (Chancerel, Estimating the quantities of critical metals embedded in ICT and consumer equipment, 2015) y considerando que el rendimiento que entrega el proceso de TR es 1.7kg/tonelada de RAEE procesada, se presentan las ganancias que se obtendrían por cada tonelada procesada, mediante este método.

Cabe aclarar que, aunque se percibirían ingresos por la recuperación de los MB en el proceso Electroquímico, en la canalización de la fracción no disuelta y del acero en la separación manual selectiva y de TR, no se tomaron en cuenta para el análisis económico.

Tabla 7-4 ingresos esperados por la recuperación de metales objetivo.

ELEMENTO	KG/TON RAEE	TON RAEE/AÑO	KG/AÑO	USD/KG	INGRESO	% INGRESO
Au	0.48	20000.00	9600.00	\$ 39,620.22	\$380,354,112.00	81.08%
Ag	2.4	20000.00	48000.00	\$ 473.91	\$ 22,747,680.00	4.85%
Pd	0.08	20000.00	1600.00	\$ 35,169.71	\$ 56,271,536.00	12.00%
In	1.152	20000.00	23040.00	\$ 341.60	\$ 7,870,464.00	1.68%
Nd₂O₃	1.36	20000.00	27200.00	\$ 45.58	\$ 1,239,721.60	0.26%
Pr₂O₃	0.255	20000.00	5100.00	\$ 58.23	\$ 296,973.00	0.06%
Dy₂O₃	0.085	20000.00	1700.00	\$ 184.20	\$ 313,140.00	0.07%
TOTAL					\$469,093,626.60	100.00%

En la tabla 7-3 de gastos de operación como en la tabla 7-4 de ingresos anuales, se puede apreciar que las cargas monetarias más significativas son los gastos por alimentación de materia prima de RAEE y las ganancias por la recuperación del Oro (Chancerel, Estimating the quantities of critical metals embedded in ICT and consumer equipment, 2015), por lo que nuestro análisis de sensibilidad se refiere a los límites en que estos dos precios pueden afectar el proyecto. Para iniciar se formó un flujo de efectivo del proyecto, para poder obtener el Valor Actual Neto (VAN) la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la relación Beneficio Costo, como se presenta en la tabla 7-5. Además de ver el comportamiento del proyecto a lo largo del tiempo y la recuperación de la inversión, los cuales se muestran en las siguientes figuras 7-1 y 7-2.



Tabla 7-5 Criterios económicos resultantes del análisis del proyecto propuesto.

CRITERIO	VALOR
VAN	\$776,705,927.04
TIR	110.91%
B/C	2.20

Como puede verse en la tabla 7-4 que tanto las TR como el Indio, no representan mucha carga económica para el funcionamiento del proyecto, sin embargo, dado a su creciente importancia y demanda en el futuro, es recomendable la recuperación e incluso el almacenamiento de estos materiales ya que en muchas fuentes se prevé que su valor aumente debido a al problema de su suministro a nivel mundial.

El mismo caso se presenta con el almacenamiento de los módulos LEDs, pertenecientes a diversos aparatos eléctricos. Pues, aunque la separación selectiva propuesta permite recolectar estas piezas, no se puede prever la tasa de recolección en un periodo de tiempo, por lo que se recomienda el almacenamiento de estas piezas hasta tener una cantidad determinada que permita abaratar los costos del proceso y entonces realizar el procesamiento final para la recuperación del Galio. Por lo que no es un proceso continuo al menos en un futuro cercano, ya que la tasa de LEDs en el efluente de RAEE es muy pequeña todavía (International Institute for Industrial Environmental Economics, 2016) y por ende debe tomarse como un ingreso extra ocasional, por lo que no se tomará en cuenta para el análisis económico del proyecto. Asimismo, por el volumen tan pequeño a manejar tampoco se tomarán en cuenta los beneficios ambientales de la recuperación del Galio por esta vía. Sin embargo, en la literatura se maneja que los ahorros ambientales de producción evitada son del orden de 0.0185 kg CO₂/kg Ga recuperado por la minería urbana (Bakas, 2016). Los impactos ambientales de las distintas prácticas de obtención de metales se presentan en las tablas 7-6, 7-7 y 7-8, así como en las figuras 7-3 y 7-4.

Se realizó un análisis de flujo de efectivo del proyecto, notando que con una inversión inicial menor a lo propuesto por (Diaz L. A., 2017), se puede poner en marcha una planta competitiva de reciclaje de materiales de los RAEE, esto obedece a que no se persigue aumentar la capacidad de procesamiento de RAEE sino mantenerla a través del tiempo de análisis. Además, se realizó un análisis de sensibilidad para determinar los límites rentables de la operación de la planta, ya que el precio de la materia prima (RAEE) y el precio del producto más caro (Oro) conforman la mayoría de la carga económica de una planta de reciclaje. En este análisis se determinó que es más importante el precio de alimentación, ya que no importa a qué precio pueda crecer el valor del oro, si el precio del kg de RAEE supera los 16 USD, el negocio presentará una pérdida económica. La inversión total es considerablemente menor a lo que se requeriría para instalar una fundidora especializada como las que operan en el viejo mundo (UMICORE, HOBOKEN), obteniendo la misma capacidad de procesamiento; por lo que la libertad de operación en los precios es mayor en este proyecto, que en una fundidora metalúrgica.

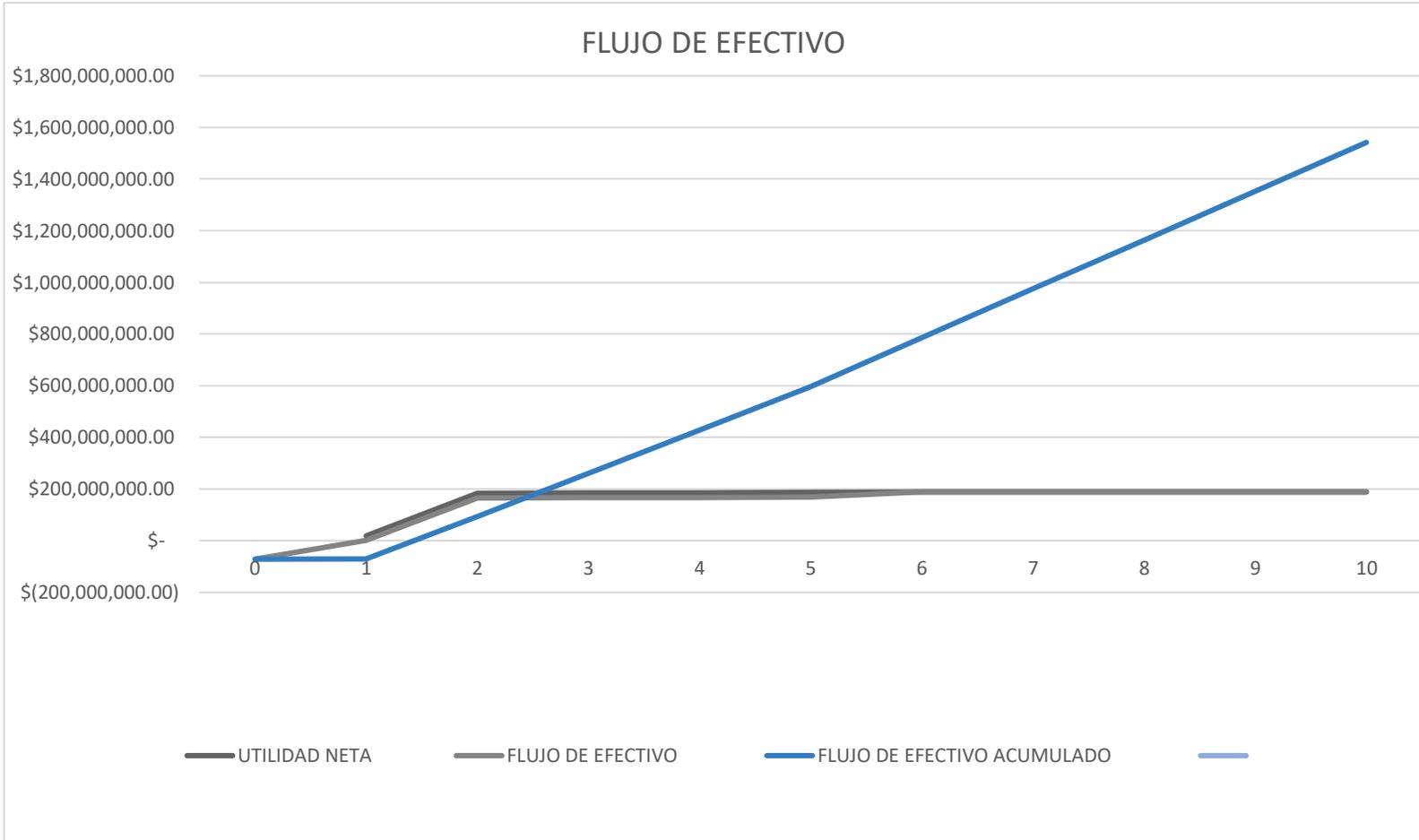


Figura 7-1 Flujo de efectivo de la MUP

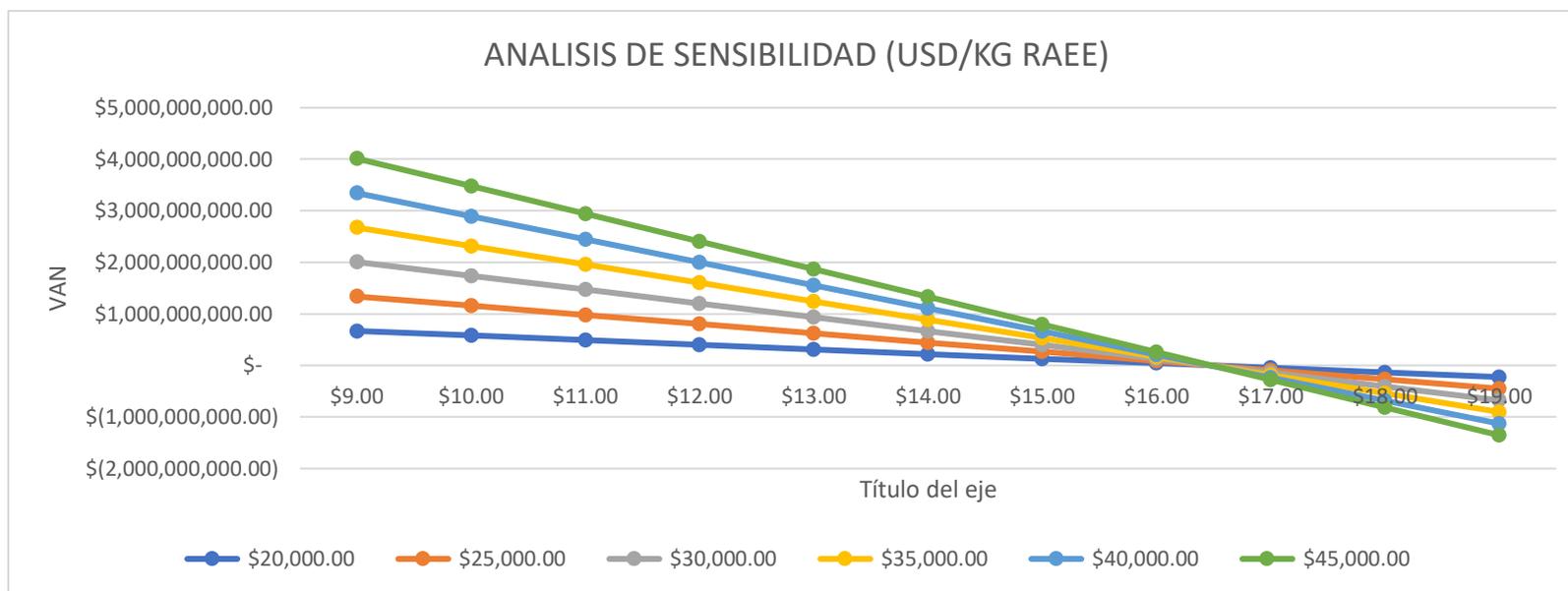


Figura 7-2 Análisis de sensibilidad al precio de los insumos (RAEE) vs el precio del producto más rentable

Tabla 7-6 Rendimientos e impactos generados en la producción de un kilogramo de material, basado en datos de (Angel, 2016) (Copa, 2015) (Darmouth.edu, 2018) (Deng, 2016) (Haque, 2014) (Koltun, 2014) (Usapein, 2016) (Tost, 2018)

ELEMENTO	kg/ton tierra	AGUA (l/kg)	GEI kg CO2/kg	ENERGIA (MJ/kg)
Au	0.003	378000	26500	265000
Ag	0.019	3460	110.57	1550
Pd	0.000009	206000	8500	165000
In	0.358	15000	500	11400
Nd₂O₃	0.00089	75940	66.09	358.45
Pr₂O₃	0.0000937	93690	81.53	442.25
Dy₂O₃	0.0008	957180	738.45	4153.93

Tabla 7-7 Rendimientos e impactos generados en la recuperación de un kilogramo de material por medio del proceso propuesto, mediante los datos en (Chancerel, 2015) (Diaz L., 2016) (Diaz L., 2017)(Zhang, 2017)(BOREL HORNOS, 2017)

ELEMENTO	kg/ton RAAE	AGUA (l/kg)	GEI kg CO ₂ /KG	ENERGIA (MJ/kg)
Au	0.48	2437.417655	67.30445323	533.691
Ag	2.4	619.1432396	17.09641232	135.566
Pd	0.08	26811.5942	740.3489855	5870.608
In	1.152	139.946	3.859	91.44
Nd₂O₃	1.36	1185.355392	5.5842	88.56
Pr₂O₃	0.255	6321.895425	5.5842	88.56
Dy₂O₃	0.085	18965.68627	5.5842	88.56

Tabla 7-8 Diferencias entre rendimientos y recursos utilizados para la producción de un kilogramo de material por la MT y la MU, así como las relaciones Beneficio-Costo de la producción con la MUP.

ELEMENTO	kg/ton	AGUA (l/kg)	GEI kg CO ₂ /kg	ENERGIA (MJ/kg)	B/C AGUA	B/C GEI	B/C ENERGIA
Au	0.0030	378000.75	26500.08	265000.00	154.082	392.734	495.541
Au	0.4800	2437.42	67.30	533.69			
Ag	0.0190	3460.01	110.57	1550.00	4.588	5.467	10.434
Ag	2.4000	619.14	17.10	135.57			
Pd	0.0000	206000.08	8500.00	165000.00	6.683	10.481	27.106
Pd	0.0800	26811.59	740.35	5870.61			
In	0.3580	15000.00	500.00	11400.00	106.184	128.567	123.672
In	1.1520	139.95	3.86	91.44			
Nd₂O₃	0.0009	75940.00	66.09	358.45	63.065	10.835	3.048
Nd₂O₃	1.3600	1185.36	5.58	88.56			
Pr₂O₃	0.0001	93690.00	81.53	442.25	13.820	13.600	3.994
Pr₂O₃	0.2550	6321.90	5.58	88.56			
Dy₂O₃	0.0008	957180.00	738.45	4153.93	49.469	131.239	45.905
Dy₂O₃	0.0850	18965.69	5.58	88.56			

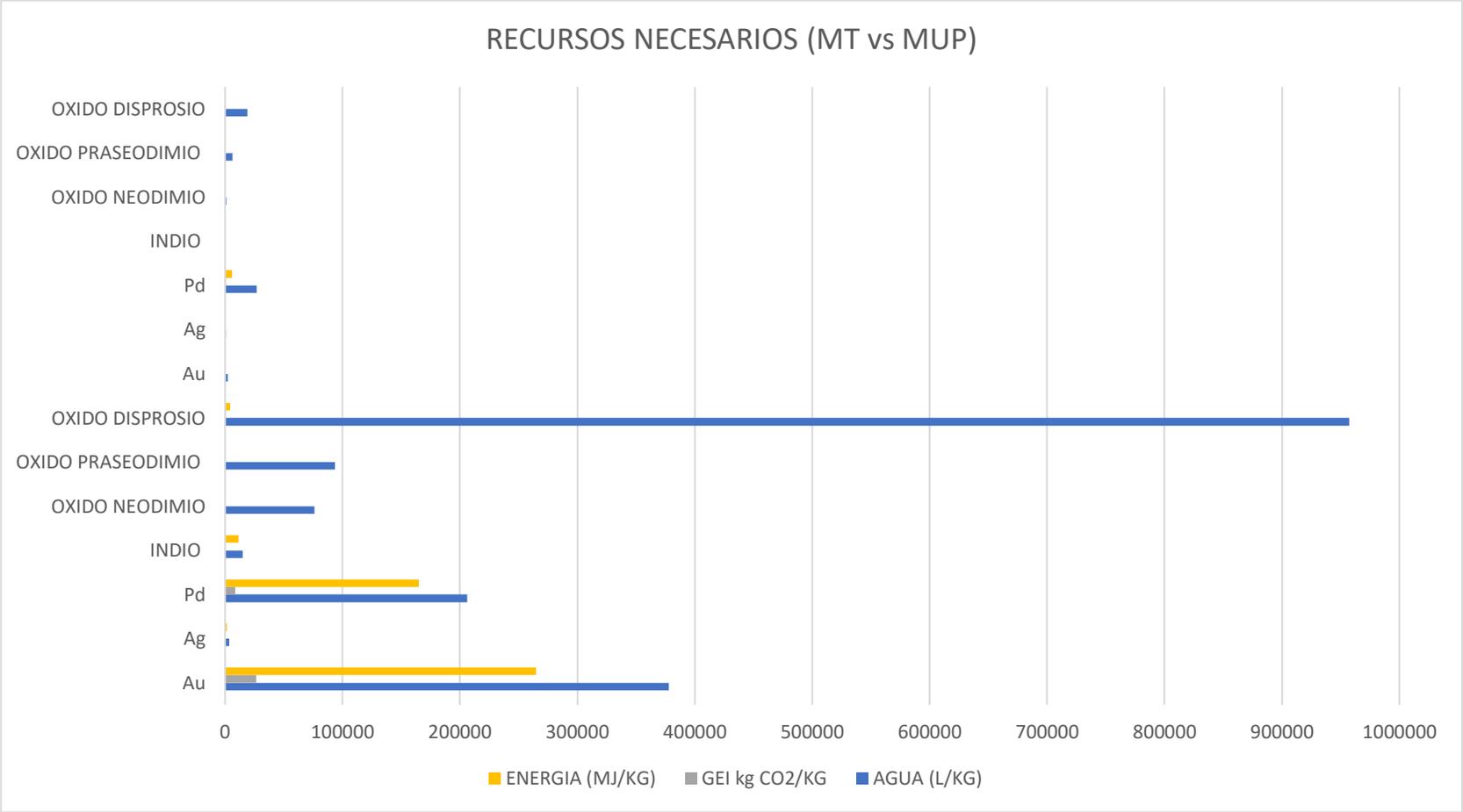


Figura 7-3 Cantidad relativa entre los recursos necesarios para la obtención de 1 kilogramo de material, diferencia entre MT y MUP

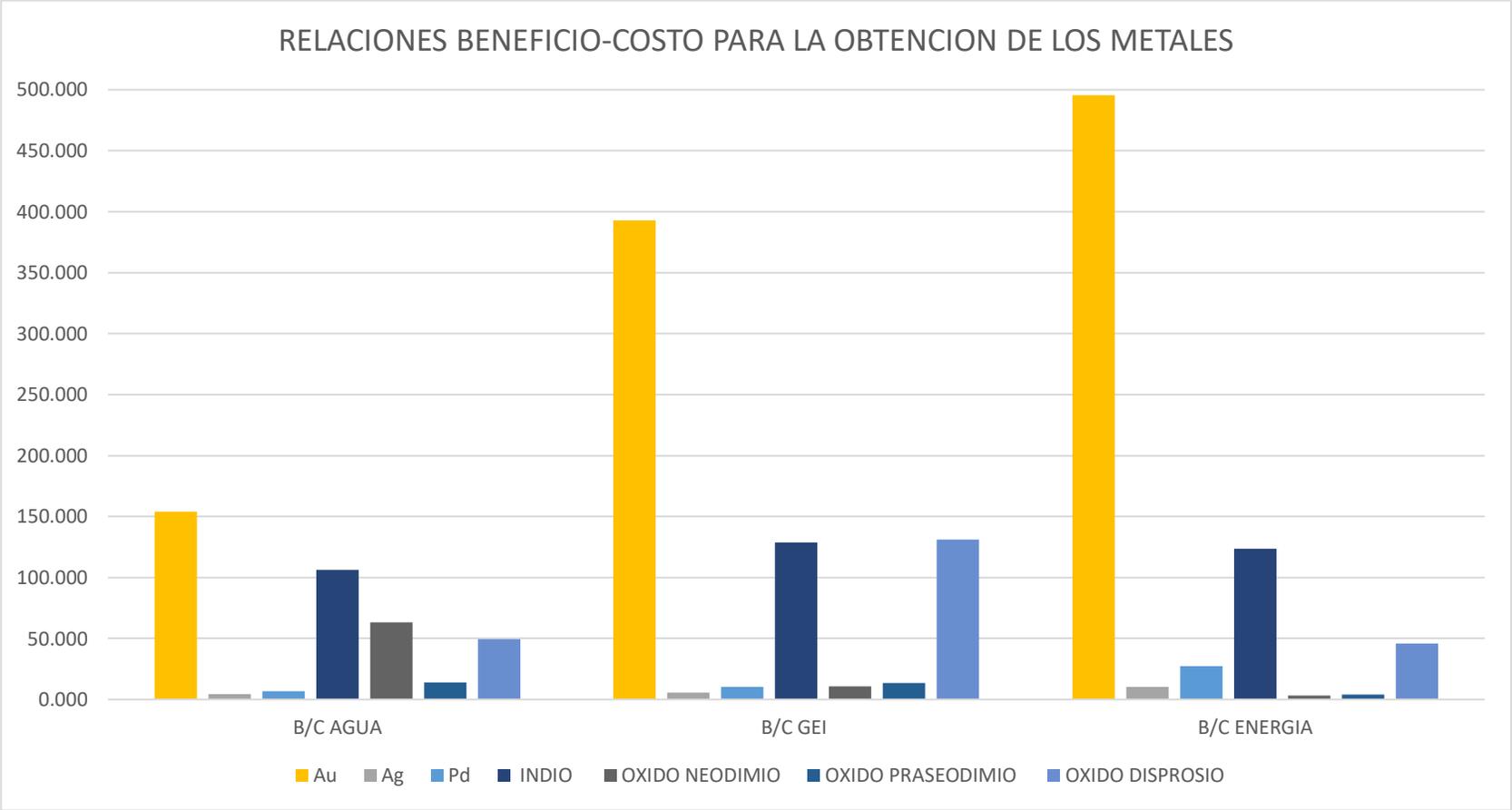


Figura 7-4 Dimensiones de las relaciones B/C que se pueden obtener en la aplicación del proceso propuesto



Con base en el análisis del flujo de efectivo (figura 7-1) y el análisis de sensibilidad financiero del proyecto (figura 7-2), se obtuvieron indicadores financieros muy buenos, sin embargo, la prioridad del proyecto es que sea ecológicamente amigable, por lo que se hizo un estudio de beneficio contra costo ambiental (tabla 7-8) en el que se miden los ahorros de recursos utilizados contra los recursos efectivamente utilizados para la producción de un producto. En la tabla 7-6 se presentan los recursos necesarios para la producción de 1 kilogramo de material en la minería tradicional, cabe señalar que los datos se obtuvieron de pocas fuentes, ya que no hay mucha información de la huella energética, hídrica ni de emisión de GEI de la producción minera a nivel mundial por cada elemento extraído. En el caso del elemento Indio, se tuvo que hacer la suposición, basado en que el indio se obtiene como un subproducto de la refinación del Zinc y que se encuentran alrededor de 10mg/kg de indio en los minerales de Zinc, entonces los recursos necesarios para la producción del Zinc se deben multiplicar por un factor de 10000 para obtener los recursos necesarios para la producción del Indio. No se hicieron estas suposiciones cuando las fuentes expresaban de forma explícita los recursos necesarios.

Con base a este estudio ambiental, se presenta en la tabla 7-8 y en la figura 7-4, que las cantidades utilizadas en la MT son considerablemente más grandes que las requeridas para la obtención de los mismos materiales con la MUP, considerando que los precios de ambos materiales en el mercado son los mismos, no se puede entender que se siga invirtiendo en la minería tradicional, cuando la minería urbana tiene más bondades económicas, energéticas, ambientales e incluso de seguridad de personal de trabajo. Además, como la tabla así lo manifiesta, se puede ver que el uso de los recursos es más eficiente con el proceso propuesto, por lo que las ventajas medioambientales son muchas, llegando casi a una relación B/C de 500 (figura 7-4), lo que puede representar también una ventaja económica si este tipo de proyectos ingresan al mercado de bonos de carbono, el cual es un tema que va teniendo cada vez más importancia en el sector empresarial.

Las empresas mineras en México tienen la gran oportunidad de invertir en prácticas más amigables ecológicamente como la MU y obtener beneficios económicos, ya que un proyecto como el propuesto en este trabajo entraría en la categoría de “Proyecto Verde” en el área de manejo de residuos, ya que permite el reciclaje de recursos, además reduce las emisiones de GEI, reduce la carga energética necesaria para la producción y reduce los contaminantes emitidos al agua, aire y el suelo. Por lo que puede estructurarse como un activo de inversión en el mercado de bonos de carbono, el cual es un mercado muy demandado actualmente (sobredemanda de 6 a 1) y será de mayor importancia conforme pase el tiempo, por lo que el mejor momento para dar apoyo y difusión a las tecnologías limpias es ahora. En un futuro cercano, las empresas que más contaminan se verán forzadas a comprar bonos de carbono a las empresas que contaminen menos, para compensar las emisiones de GEI permitidas, por lo que ser una empresa con un margen de acción en este sentido puede significar, entre otras cosas, un gran negocio en el futuro próximo (BMV, 2017).



8. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de esta tesis se presentaron los conceptos principales de la gestión del reciclaje y la recuperación de materiales de los RAEE, de acuerdo a la experiencia internacional y se encontró que la industria del reciclaje tiene mucho potencial de desarrollo, ya que dado al increíble crecimiento y evolución constante de los aparatos que deben reciclarse, se crea una sinergia en la que se debe emplear mano de obra calificada y aparte se deben contratar investigadores para innovar nuevos procesos que sean eficientes para reciclar los productos fabricados con tecnologías emergentes. Además, se encontró que hay muchas posibilidades para el reciclaje de la tecnología LED en el futuro. Los esfuerzos continuos en investigación encontrarán maneras eficientes y procesos óptimos para recuperar los metales críticos que los AEE contienen, apoyado en gran parte por el diseño al fin de vida útil que preparan las empresas productoras de tecnologías.

Por otro lado, se puso de manifiesto la importancia de la tecnología LED en la actualidad considerando la necesidad de su gestión al fin de vida útil, incluso se prevé un cambio en la relación empresas/usuarios para vender la iluminación como un servicio y no como un producto aislado, entre otras cosas. El mayor reto para una disposición de RAEE de manera formal, es la recolección de los residuos electrónicos, ya que hay un gran sector a nivel mundial que opera de manera informal y que obtiene ganancias con altos riesgos para el personal y para el ambiente. Es recomendable, hacer hincapié en la eliminación de intermediarios, ya que hay varios modelos de REP alrededor del mundo, en los que los usuarios finales entregan sus desechos directamente a las empresas responsables de su gestión, con diversas tarifas o facilidades que funcionan de manera específica, en cada lugar. Sería altamente benéfico probar un sistema de incentivos en la compra de nuevos dispositivos electrónicos, cuando se entregan dispositivos inservibles, midiendo el beneficio tanto económico como ambiental, de este modelo de captación de recursos u otros más que funcionan en países desarrollados, pero deben dirigirse los esfuerzos hacia el aspecto de la gestión de residuos para incrementar considerablemente la tasa de recolección.

Las prácticas actuales del reciclaje y el aprovechamiento de materiales de los RAEE se investigaron, analizando básicamente los pros y contras de la aplicación de la metodología de reciclaje de la tecnología LED, exponiendo que la recuperación y aprovechamiento de elementos, se concentra principalmente en el hierro, el cobre, el aluminio y el oro. Hoy por hoy existen tecnologías que pueden reutilizar más sustancias como las TR, que son necesarias para los cambios tecnológicos que se vislumbran en el futuro cercano, en todos los sectores de la industria, desde el transporte privado (coches eléctricos e híbridos), transporte colectivo (trenes de levitación magnética), tecnologías de entretenimiento (bocinas, teléfonos inteligentes y drones). También se debe de considerar la generación de energías limpias (turbinas eólicas y paneles solares); todas estas tecnologías necesitan materiales que pueden encontrarse en los residuos electrónicos y que actualmente gran cantidad no se aprovecha, desperdiciando su potencial de reciclaje y contaminando al ambiente.



Las alternativas de tratamiento de tecnología LED, se propusieron con base en los fundamentos de la economía circular, ya que es una de las formas para ayudar a combatir el cambio climático, el cual ya es un factor a considerar en la toma de decisiones de la iniciativa privada, por lo que hay un interés general por el sector empresarial hacia las nuevas formas de hacer negocios y las prácticas innovadoras, ambientalmente amigables, por lo que la oportunidad de entrar al mercado de reducciones de carbono, puede ser beneficioso para cualquier empresa mexicana y es de vital importancia no sólo aportar en términos monetarios, sino también con propuestas creativas y cuantificables para la mitigación de dicho cambio climático en el futuro.

Posteriormente, se midieron los beneficios tanto económicos como ambientales de la propuesta de tratamiento de tecnología LED, los cuales son muy grandes, por lo que pueden ser una alternativa para la captación de riqueza en las empresas mineras, ya que en particular los procesos hidrometalúrgicos que se utilizan en la minería urbana propuesta vienen de la experiencia de la minería tradicional. Además, se tiene una gran área de oportunidad en las nuevas tecnologías de reciclaje a nivel mundial y en particular, el sector mexicano de investigación debe continuar estudios para el mejoramiento de este tipo de procesos, ya que es un problema que ha captado la atención de varios países como China y Alemania, entre otros. A parte del enfoque hidrometalúrgico, el desarrollo de la bio-metalurgia es prometedor para conseguir una verdadera tecnología limpia.

Finalmente, se puede concluir que se llevó a cabo como objetivo general de esta tesis, la propuesta conceptual de reciclaje de tecnología LED, considerando su factibilidad técnica y económica en México, la cual sugiere que es posible la obtención de materiales mediante un ahorro significativo de materias primas y abriendo la oportunidad a las empresas interesadas en proteger la salud de los seres humanos y el ambiente.



• REFERENCIAS

- European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. (2016). *Analysis of the WEEE value chain*.
- Alibaba. (30 de octubre de 2018). *Galio puro 99.99%*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/pure-gallium-99-99-for-semiconductor-material-ga-ingot-price-60341773294.html?spm=a2700.8699010.normalList.1.4f30443eqJ1jWO>
- Allen H.Hu et al. (2017). *Carbon footprint asesment of recycling technologies for rare earth elements*.
- Angel, H. (2016). *Water and carbon footprints of mining and producing Cu, Mg and Zn: A comparative study of primary and secondary sources*. Suecia: Lund University.
- Bakas, I. (2016). *Critical metals in discarded electronics*.
- Baldé, C. F. (2017). *The Global Monitor WEEE 2017*. Bonn/Geneva/Vienna: United Nations University , International Telecommunication Union & International Solid Waste Association .
- BAN . (16 de OCTUBRE de 2018). Obtenido de Basel Advocacy: <http://www.ban.org/advocacy>
- Basel Action Network. (2018). *The Scam recycling continues. E waste exportation form US to developing countries*.
- BBC mundo. (10 de Mayo de 2012). *México y China empatados en la batalla de los salarios*. Obtenido de https://www.bbc.com/mundo/noticias/2012/05/120509_china_mexico_salarios_an
- Binnemans, K. (2013). RECYCLING OF RARE EARTHS : A CRITICAL REVIEW.
- BMV. (3 de marzo de 2017). *Tendencias ambientales :Mercado de carbono y bonos verdes*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=DSzzPEDnEJI>
- BOREL HORNOS. (12 de Diciembre de 2017). Obtenido de <http://pdf.directindustry.es/pdf/solo-swiss-borel-swiss/hornos-carga-vertical-1280-c-th-1280/18259-611783.html#open>
- Bueckens, A. (2014). Recycling of WEEE plastics: A review . *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 415-434.
- Bullion by post. (30 de octubre de 2018). *Precio de la plata kilogramo*. Obtenido de <https://www.bullionbypost.co.uk/silver-price/month/kilograms/USD/>
- Bullion by post. (30 de octubre de 2018). *Precio del oro kilogramo*. Obtenido de <https://www.bullionbypost.co.uk/gold-price/month/kilograms/USD/>



- Bullion by post. (30 de octubre de 2018). *Precio del paladio kilogramo*. Obtenido de <https://www.bullionbypost.co.uk/palladium-price/month/kilograms/USD/>
- Campos, M. F. (2015). *Rare earths from the extraction to the application* .
- Chancerel, P. (2009). Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. *Journal of industrial ecology*.
- Chancerel, P. (2015). Estimating the quantities of critical metals embedded in ICT and consumer equipment. *Resources, Conservation and Recycling.*, 9-18.
- Chaverra, E. (2014). *Extracción de cobre a partir de tarjetas de circuito impreso de residuos electronicos*. Tesis. Medellin.
- Chen, W.-S. (2018). Recycling of GaN Waste from LED industry by Pressurized Leaching Method. *METALS*.
- Cheng, Y. (2013). Fast and Effective Gold Leaching from a Desulfurized Gold Ore Using Acidic Sodium Chlorate Solution at Low Temperature. *Industrial & Engineering Chemistry Research* .
- CNN. (31 de mayo de 2013). Obtenido de China: The electronic wastebasket of the world: <https://edition.cnn.com/2013/05/30/world/asia/china-electronic-waste-e-waste/index.html>
- Copa, W. L. (2015). Las bajas concentraciones metalíferas: reto de la actividad minero-metalúrgica cubana. *VI Congreso Cubano de Minería, Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Laferitas*.
- Copenhagen Resource Institute. (2014). *Present and potential future recycling of critical metals in WEEE*. Copenhagen Resource Institute.
- Cucchiella, F. e. (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and sustainable energy reviews*.
- Dartmouth.edu. (16 de octubre de 2018). *Materials*. Obtenido de <http://www.dartmouth.edu/~cushman/books/Numbers/Chap1-Materials.pdf>
- Datos macro. (5 de noviembre de 2018). Obtenido de ranking IDH: <https://datosmacro.expansion.com/idh>
- Deng, Z. (2016). Acid leaching Zinc and Indium with reduction ferric simultaneously from marmatite and high iron neutral leaching residue. *Rare Metal Technology* .
- Diaz, L. (2016). *Comprehensive Process for the Recovery of Value and Critical Materials from Electronic Waste*. IDAHO NATIONAL LABORATORY.
- Diaz, L. (2016). Process development for the recovery of critical materials from electronic waste.



- Díaz, L. A. (2017). Economic evaluation of an electrochemical process for the recovery of metals from electronic waste. *Waste Management*, 384-392.
- Dreisinger, D. (2015). Hydrometallurgical extraction of precious rare and base metals using an oxidizing acid chloride heap leach. *Rare Metal Technology*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Hacia una economía circular: Motivos económicos para una transición acelerada*.
- European Union action to fight environmental crime. (2015). *Illegal e-waste shipments from EU to China*.
- Expansion. (05 de noviembre de 2018). Obtenido de IDH CHINA:
<https://datosmacro.expansion.com/idh/china>
- Fernández, G. (2013). *Minería Urbana y la Gestión de Residuos Electrónicos*. Buenos Aires: Grupo Uno.
- Fraunhofer Institute. (2015). *Economic LED recycling*.
- Fraunhofer Institute. (15 de agosto de 2018). Obtenido de SEPARATION AND SORTING TECHNOLOGIES:
https://www.iwks.fraunhofer.de/content/dam/iwks/en/documents/Abteilungsflyer/Abteilungsflyer_Trenn-%20und%20Sortiertechnologien_EN_Druck%20PDF_01_17.pdf
- Fraunhofer Institute. (15 de agosto de 2018). *FRAUNHOFER IWKS*. Obtenido de ELECTRO-HYDRAULIC FRAGMENTATION EHF SELECTIVE SEPARATION OF COMPOSITE MATERIALS:
https://www.iwks.fraunhofer.de/content/dam/iwks/en/documents/SeparationandSortingTechnologies/2016_EHF_Flyer_klein_EN.pdf
- Fraunhofer Institute. (15 de agosto de 2018). *Fraunhofer Project Group Materials Recycling and Resource Strategies*. Obtenido de Electrohydraulic fragmentation EHF:
<https://www.iwks.fraunhofer.de/en/competencies/Separation-and-Sorting-Technologies/Physical-Separation-and-Sorting-Technologies/Electrohydraulic-Fragmentation-EHF.html>
- Fulvio Ardente*, F. M. (2014). *Recycling of electronic displays: Analysis of pre-processing and potential ecodesign improvements*. Italy: European Commission–Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability.
- GEI Mexico. (s.f.). Obtenido de
http://www.geimexico.org/image/2015/aviso_factor_de_emision_electrico%202014%20Semarnat.pdf
- Golev, A. e. (2014). Rare Earths supply chains: Current status, constraints and opportunities.
- Gurrola, C. (2017). *Tesis: Propuestas al marco Jurídico sobre los RAEE*. CDMX: UNAM.



- Haque, N. (2014). Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact. *Resources*.
- Harikrushnan, B. (2016). Recovery of metals from printed circuit boards (PCBs) using a combination of hydrometallurgical and. *International Journal of Environmental Research*.
- Holonyak. (1962). Coherent Visible Light Emission from Ga(As_{1-x}-Px) Junctions. *Applied Physics Letters*.
- Hu Liu, e. a. (2014). Rare earth elements from waste phosphor by dual hydrochloric acid dissolution. *Journal of Hazardous Materials*, 96-101.
- IMCO. (16 de OCTUBRE de 2018). Obtenido de Acuerdo de Paris: https://imco.org.mx/medio_ambiente/mexico-ratifica-el-acuerdo-de-paris-sobre-el-cambio-climatico/
- International Institute for Industrial Environmental Economics. (2016). *Circle of Light. The impact of the LED lifecycle*. Lund: IIEE.
- investing.com. (7 de nov de 2018). Obtenido de historical data CNY UDS: <https://mx.investing.com/currencies/cny-usd-historical-data>
- Isildar, A. (2018). Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, 296-312.
- Jim Puckett et al. (2016). *Scam recycling. e Dumping on Asia by US recyclers*. Basel Action Network.
- Koltun, P. (2014). Life Cycle Impact of Rare Earth Elements. *Metallurgy*.
- LED professional. (2016). *LED lamps Recycling technology for a circular economy*. LpR.
- LEDs Magazine. (16 de mayo de 2018). *LED lamp waste: there good news and bad*. Obtenido de <https://www.ledsmagazine.com/articles/2018/05/led-lamp-waste-theres-good-news-and-bad.html>
- Lee, D. e. (2017). Monitour: Tracking global routes fo electronic waste. *Waste Management*.
- Lennartsson, A. (2018). Large Scale WEEE Recycling Integrated in an Ore- Based Cu-Extraction System. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 222-232.
- LGEEPA. (1988).
- Lixandru, A. (2017). *Identification and recovery of rare-earth permanent magnets from waste electrical and electronic equipment*. Waste Management.
- Loy, S. V. (2017). Recycling of rare earths from a lamp phosphor waste: enhanced dissolution of LaPO₄:Ce³⁺, Tb³⁺ by mechanical activation. *Journal of Cleaner Production Vol. 156*, 226-234.



- Lundgren, K. (2012). *The global impact of e-waste: addressing the challenge*. international labour office , Programme of safety and Health at Work an Enviroment.
- Matthias Buchert et.al. (2012). *Recycling critical raw materials from waste electronic equipment*. Commissioned by the North RhineWestphalia State Agency for Nature, Environment and Consumer Protection.
- Michael Smith et al. (14 de Noviembre de 2016). Encontramos su ultimo smartphone , junto a su VCD. *Bloomberg Bussinessweek*.
- Miglietta, P. p. (2012). *Trade balance of LED technology* .
- Mineral Prices . (30 de octubre de 2018). *Precio de metales menores*. Obtenido de <https://mineralprices.com/minor-metals/>
- Mineral Prices. (30 de octubre de 2018). *Precio de metales base*. Obtenido de <https://mineralprices.com/base-metals/>
- Mineral prices. (30 de octubre de 2018). *Precios de tierras raras*. Obtenido de <https://mineralprices.com/rare-earth-metals/>
- Nakajima, K. (2007). Substance Flow Analysis of Indium for Flat Panel Displays in Japan. *Materials transactions*, 2365-2369.
- Nakajima, K. (2013). *Quantifying, reducing and improving mine water use / tesis*. Vancouver: University of British Columbia.
- P.Navarro. (2005). Lixiviación acida de concentrados de scheelita. *Revista de metalurgia Madrid* 41, 107-110.
- Precio Oro. (30 de octubre de 2018). *precio del cobre*. Obtenido de <https://www.preciooro.com/cobre-hoy.html>
- Programme of safety and Health at Work an Enviroment. (2014). *Tackilng informality in e-waste management: the potential of cooperative enterprices*. international labour office , Programme of safety and Health at Work an Enviroment.
- Punkinnen, H. (2017). *Critical metals in End of life products. Recovery Potential and opportunities for removal of bottlenecks of recycling*. Nordic Council of Ministers.
- Rahman, S. M. (2017). *Missing research focus in end of life management of light emitting diode LED lamps* . Resources, Conservation and Recycling.
- Recolight. (16 de octubre de 2018). *How we recycle*. Obtenido de <https://www.recolight.co.uk/resource-centre/#howwecycle>



- Renata D. Abreu, C. A. (2010). Purification of rare earth elements from monazite sulphuric acid liquor and the production of high purity ceric oxide. *Minerals Engineering*.
- Renovables Verdes. (30 de OCTUBRE de 2018). *Todo sobre el protocolo de Kioto*. Obtenido de <https://www.renovablesverdes.com/protocolo-de-kioto/>
- Residuos COP. (16 de octubre de 2018). Obtenido de Legislacion RAEE: <http://www.residuoscop.org/wp-content/uploads/2017/04/Polidiptico-RAEE.pdf>
- Residuos COP. (16 de octubre de 2018). Obtenido de que son los COP: <http://www.residuoscop.org/que-son-cop/>
- Residuos COP. (16 de octubre de 2018). *Empresas que realizan Manejo de Residuos de Aparatos Electrónicos y Eléctricos (RAEE)*. Obtenido de <http://www.residuoscop.org/empresas/>
- Richter, J. e. (2015). *Extended producer responsibility for lamps in Nordic countries: best practices and challenges in closing material loops*. journal of Cleaner Production.
- Rondon, E. (2017). Analisis comparativo de la responsabilidad del productor en MExico y Chile como estrategia para alcanzar la economia circular. *Memorias del VII Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos: hacia una Economía Circular*. Santander, España.
- Ruiz, E. (2018). *Cerrar el círculo. El business case de la economía circular*. FORETICA.
- Ruiz-Mercado, G. J. (2017). *A conceptual chemical process for the recycling of Ce, Eu and Y from LED flat panel displays*. Resources, Conservation and Recycling.
- S.Peelman. (2018). Hydrometallurgical recovery of rare earth elements from mine tailings and WEEE. *Journal of Sustainable Metallurgy* , 367–377.
- Schalk, A. V. (2016). Recycling incides visualizing the performance of the circular economy. *World of metallurgy* .
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (30 de octubre de 2018). *Constitucion politica mexicana y leyes ambientales*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/constitucion-politica-mexicana-y-leyes-ambientales-144882>
- SEMARNAT. (15 de Octubre de 2015). *CO2/MWh*. Obtenido de http://www.geimexico.org/image/2015/aviso_factor_de_emision_electrico%202014%20Semarnat.pdf
- SEMARNAT. (16 de OCTUBRE de 2018). Obtenido de Convenio de Basilea: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convenio-de-basilea>



- SEMARNAT. (16 de OCTUBRE de 2018). Obtenido de Convenio de Estocolmo:
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convenio-de-estocolmo>
- SEMARNAT. (16 de OCTUBRE de 2018). Obtenido de Convenio de Rotterdam:
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convenio-de-rotterdam>
- SEMARNAT. (16 de OCTUBRE de 2018). Obtenido de Protocolo de Kyoto:
<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-sobre-cambio-climatico?idiom=es>
- SEMARNAT. (16 de octubre de 2018). *Secretaría del medio ambiente y recursos naturales* . Obtenido de Acciones y programas: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convenio-de-rotterdam>
- Senseable City Lab Basel Action Network. (30 de octubre de 2018). *Monitour e-trash transparency project*. Obtenido de <http://senseable.mit.edu/monitour-app/#>
- Sheng Fang et. al. (2018). Evaluation of end-of-life LEDs by understanding the criticality and recyclability for metals recycling. *Journal of Cleaner Production* .
- Singh, N. (2018). Characterizing the materials composition and recovery potential from waste mobile phones: a comparative evaluation of cellular and smart phones. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* .
- Swain, B. (2015). Recycling process for recovery of gallium from GaN an e-waste of LED industry through ball milling, annealing and leaching. *Environmental Research* , 401-408.
- Tost, M. (2018). Metal Mining's Environmental Pressures: A Review and updated estimates on CO2 emissions, water use and land requirements. *Sustainability* .
- Tsydenova, N. (2018). Formal and Informal E waste collection in Mexico City. *Cascade Use in Technologies 2018*, 30-37.
- Uebercaht. (2017). *Assesing recycling strategies for critical raw materials in WEEE*.
- Usapein, P. (2016). Greenhouse Gas Emission in Jewelry Industry: A Case Study of Silver Flat Ring. *Applied Environmental Research*.
- Vanegas, P. (2017). Improvement potential of today WEEE recycling performance: The case of LCD TVs in Belgium . *Frontiers of Enviromental Science & Enginerig*.
- Vargas, M. E. (2017). *Estudio de la recuperacion de Indio a partir de pantallas de cristal liquido descartadas*. Quito: Escuela Politecnica Nacional, Tesis.
- VEOLIA. (15 de octubre de 2018). *Metodo de oxidacion o proceso humedo CFL*. Obtenido de <http://www.hansandersson.se/tjanster/specialtjanster/ljuskallor/>



Vikrant Bhakar. (2015). *Life Cycle Assessment of CRT, LCD and LED Monitors*. Birla Institute of Technology and Science, Pilani,.

Yufeng Wu, e. a. (2014). *The recycling of rare earths from waste tricolor phosphors in flourescent lamps: A review of processes and technologies*. .

Zhang, K. (2017). Recycling of Indium from waste LCD: A promising non-crushing leaching with the aid of ultrasonic wave. *Waste Management*, 236-243.