

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE
ALIMENTOS



CURSO DE ESPECIALIZACIÓN:

**ECOEFICIENCIA DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES
EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN,
TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LÁMPARAS
FLUORESCENTES COMPACTAS PARA EL SALVADOR.**

PRESENTADO POR

KLEIDY MAGDANY IRAHETA PALMA

STEFANY MARIELA PINEDA AYALA

JOSÉ ANÍBAL QUIÑONEZ CASTRO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAUL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE
ALIMENTOS**

DIRECTORA INTERINA:

INGA. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE
ALIMENTOS

CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN: ECOEFICIENCIA DE LOS
PROCESOS INDUSTRIALES

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN,
TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LÁMPARAS
FLUORESCENTES COMPACTAS PARA EL SALVADOR.**

Para optar al título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

KLEIDY MAGDANY IRAHETA PALMA

STEFANY MARIELA PINEDA AYALA

JOSÉ ANÍBAL QUIÑONEZ CASTRO

Docente asesor:

ING. NELSON MAURICIO VAQUERO

ANDRADE

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO 2025

TRABAJO DE GRADO APROBADO POR

DOCENTE ASESOR:

ING. NELSON MAURICIO VAQUERO ANDRADE

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios por darme la oportunidad para llegar a este punto y los conocimientos que he recolectado de mis seres queridos, tanto aquellos que aún siguen a mi lado como de aquellos que ya partieron.

A mi madre que cuidó de mí, enseñándome los valores en los cuales he basado mis esfuerzos y estudios y que me impulsó para lograr mis metas.

A mi hermana por su apoyo incondicional y su actitud ante los problemas.

A mis compañeros de trabajo, Kleidy Iraheta y Aníbal Quiñonez, por su apoyo y su diligencia en la ejecución de los proyectos que realizamos en conjunto.

A los docentes que me inculcaron tanto curiosidad por la ingeniería como pilares para poder sostener mis logros académicos, en especial a mi docente Asesor, Ing. Nelson Mauricio Vaquero Andrade, quien fue paciente y comprometido con sus alumnos, demostrando su pasión por la educación.

Stefany Mariela Pineda Ayala

Quiero agradecer primeramente a Dios por sostenerme a lo largo de toda mi carrera y permitirme llegar hasta este momento. Reconozco que únicamente Él da la sabiduría, la inteligencia y las oportunidades, por eso creo que la mejor decisión que se puede tomar es confiar en Él. Le agradezco grandemente por todo lo que ha hecho por mí, porque hasta aquí me ha ayudado y no tengo duda que lo seguirá haciendo en el futuro.

También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes siempre me han brindado su incondicional apoyo en cada paso de mi vida. En todo momento, estuvieron a mi lado, ofreciendo su respaldo, comprensión y amor. Cada vez que enfrentaba un reto o necesitaba algo, encontraba en ellos la ayuda y el aliento necesarios para seguir adelante. Su confianza en mí ha sido una fuente constante de motivación y fortaleza, y sin su apoyo, no habría sido posible llegar hasta aquí.

Agradezco también a mis hermanos que han estado siempre a mi lado para respaldarme y ayudarme en lo que necesitaba y darme ánimos a seguir adelante

A mis compañeros de trabajo, Stefany Pineda y Kleidy Iraheta. Gracias por su apoyo en cada una de las etapas del proyecto, fue de gran bendición poder trabajar con personas como ustedes. Son grandes profesionales y no dudo que tienen un gran futuro.

Agradezco profundamente a los docentes de toda la FIA, y especialmente a los de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería en Alimentos, por compartir sus valiosos conocimientos conmigo, así como por brindarme la oportunidad de desarrollarme académicamente y establecer las bases para mi futuro profesional.

José Aníbal Quiñonez Castro

A mis padres, Mauricio y Verónica, por mantener esa luz encendida con palabras de aliento y apoyo, gracias, por el esfuerzo dedicado estos años, este logro no es solo mío, es de nosotros, de nuestra familia, porque ustedes supieron plantar en mi la curiosidad de conocer el mundo desde otra perspectiva, gracias por su amor incondicional y Fe.

A mi hermana, Brendalys, por su apoyo y paciencia en mostrarme el camino en una ciudad desconocida a la que nos aventuramos con la certeza de que íbamos a triunfar.

A mis abuelos, Teresa, Alonso y Santos, gracias por su amor, oraciones y apoyo.

A mis primos, y tíos por siempre sacarme una sonrisa y carcajadas en los días de cansancio y agotamiento, gracias por tener la certeza que todo el esfuerzo algún día valdría la pena.

A mi perrito Pepe, gracias por ser mi compañero en las noches de desvelos, por siempre estar juntito a nosotros.

A mis amigos, Isaac y Ricardo, gracias por hacer amenas esas tardes interminables de espera de clases, por ser propias nuestros fracasos y tristezas, y más de una vez alentarnos en que vale la pena apostar por las causas imposibles.

A Rafael por su apoyo, cariño, amor y paciencia

A mis compañeros de investigación, Anibal y Stefany, gracias por ser tan buen equipo, gracias por su apoyo y el tiempo compartido. Con especial admiración a nuestro asesor, Ing. Nelson Vaquero, por inculcar en nosotros la curiosidad y criticidad al momento de desarrollarnos como profesionales.

Mi gratitud se extiende a la Universidad de El Salvador, alma mater de la excelencia académica, y a los docentes que nos guiaron en este viaje académico.

A todas aquellas personas que fueron refugio, tiempo, apoyo, dedicación, soporte y techo que de una o de otra manera no dudaron en extender su mano para alentarme a seguir.

Y finalmente a Dios, por permitir que todas estas almas y ángeles aparecieran en el lugar y momento indicado, para hacerme ver que la bondad aún existe y solo debemos abrir los ojos para conocerla.

Kleidy Magdany Iraheta Palma

RESUMEN

La siguiente investigación es una recopilación de información sobre el manejo de desechos peligrosos haciendo énfasis en el mercurio proveniente de las lámparas fluorescentes de uso industrial como domiciliario. Se establece un marco referencial tomando en cuenta la evolución y fabricación de las lámparas, para comprender de una manera íntegra, como estas terminaron siendo uno de los problemas más grandes en la actualidad, los elementos que lo componen y la forma en la que estos también pueden ser aprovechados.

La problemática del manejo correcto de desechos de Mercurio en la actualidad es un problema a escala global, tanto por la desinformación del manejo correcto de los desechos como por la necesidad de renovar tecnologías, lo que nos provoca pasivos enormes dentro de empresas y domicilios, El Salvador, no es un caso aislado, el uso de estas lámparas en los últimos 25 años ha sido muy común en empresas y residencias, por lo que la cantidad solo aumenta, pero, ¿Por qué son considerados peligrosos sus desechos?, luego de ver los componentes de estas veremos que además de aluminio y vidrio, las lámparas fluorescentes contienen mercurio, un metal pesado el cual al contacto con el ser humano puede causar graves afectaciones en la salud, además de ser capaz de contaminar agua a gran escala con una baja concentración. La problemática escala a nivel mundial, por lo que en la actualidad tenemos ciertos convenios que nos instruyen de manera clara las consideraciones a tener al presentarse estos desechos.

Para ofrecer una posible solución a esta situación se realizó una investigación donde se toma en cuenta reglamentos y guías tanto nacionales como internacionales, los lineamientos sobre la Gestión de Residuos, tanto peligrosos como RAEEs, evaluando por supuesto el ciclo de vida y la frecuencia de compra de los mismos.

Lo que nos lleva a la siguiente pregunta ¿cuál es la manera correcta de realizar la disposición de las mismas? Ya teniendo una base legal y normativa, se analizan las posibles opciones en el caso de disposición y reutilización, evaluando impactos ambientales, de las mismas, como también insumos y la forma en la que se lleva a cabo el proceso, eligiendo la más completa y acorde a nuestros requisitos, se verifica de igual manera la evaluación

económica de estas, evaluando tasa de recuperación y ganancias de esta alternativa para que sea ecoeficiente.

En el documento presentamos los resultados mediante un pequeño esquema de las partes que componen las lámparas fluorescentes y la explicación de su funcionamiento, una breve, pero relevante investigación acerca de los protocolos internacionales para el tratamiento de residuos de estas lámparas mediante los convenios de Basilea, Minamata y los regionales de América Latina y El Caribe y dos clases de estudio para la alternativa más conveniente que es la trituración de las lámparas. Se demuestra así que el impacto ambiental del tratamiento de las lámparas es de 0.01587 Toneladas de Dióxido de Carbono y el estudio económico demuestra que el proyecto es rentable con un valor actual neto de USD\$3,380.00.

En un futuro ambicionamos, realizar propuestas ya sea para reducir el uso de las lámparas fluorescentes a un mismo rango económico o para ofrecer un servicio de disposición integral, donde contemple transporte, trazabilidad y certificación de manejo correcto, todo esto con la finalidad de reducir la contaminación derivada de los desechos peligrosos

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL	3
1.1 Descripción del trabajo de aplicación.....	3
1.2 Objetivos:	4
1.2.1 OBJETIVO GENERAL DEL TRABAJO DE APLICACIÓN:	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL TRABAJO DE APLICACIÓN:	4
1.3 Justificación	5
1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	5
1.5 Hipótesis	6
1.6 Marco de Referencia.....	6
1.6.1 ¿QUÉ ES UNA LÁMPARA?.....	6
1.6.2 HISTORIA DE LAS LÁMPARAS:	6
1.6.3 ¿QUÉ ES UNA LÁMPARA FLUORESCENTE (Y SUS PARTES)?... 9	
1.6.4 ¿POR QUÉ SE USAN ESTA CLASE DE LÁMPARAS?.....	11
1.6.5 ¿POR QUÉ SON PELIGROSOS SUS DESECHOS?	11
1.6.6 ¿CÓMO SE TRATAN SUS DESECHOS?	12
1.6.7 REGLAMENTO PARA TRATAR LOS DESECHOS DE LÁMPARAS FLUORESCENTES EN EL SALVADOR	19
1.6.8 CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN EL SALVADOR	20
1.6.9 Empresa privada, acciones a replicar	22
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	23
2.1 Generalidades del mercurio	23
2.1.1 Propiedades químicas:.....	24

2.2	Fuentes de Emisión de Mercurio:.....	25
2.2.1	Fuentes Naturales de Emisiones de mercurio:	26
2.2.2	Fuentes antropogénicas de emisiones de mercurio:	27
2.3	Efectos del Mercurio en la Salud.....	29
2.3.1	Efectos del Mercurio en niños	30
2.3.2	Efectos del Mercurio en los adultos	31
2.3.3	Efectos del Metilmercurio.....	32
2.3.4	Efectos del Mercurio Elemental.....	32
2.3.5	Efectos del Mercurio Inorgánico.....	33
2.3.6	Contaminación Acuática	33
2.4	Marco Legislativo y Reglamentario	34
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y ANÁLISIS.....		36
3.1	ALTERNATIVAS PARA GESTIÓN LÁMPARAS FLUORESCENTES DESECHADAS	36
3.1.1	Manejo del Mercurio de acuerdo con el convenio de Basilea y Minamata 37	
3.1.2	Alternativas de disposición para lámparas fluorescentes.....	45
3.1.3	Análisis de factibilidad e impacto ambiental	52
3.1.4	Evaluación amplia de alternativas y desarrollo.....	56
3.1.5	Empresas que contribuyen a la reducción de la contaminación ambiental 71	
METODOLOGÍA PRELIMINAR O DESPLIEGUE DE OBJETIVOS.....		74
CONCLUSIONES		76
RECOMENDACIONES.....		78
ANEXO 1		79

ANEXO 2	81
ANEXO 3	81
BIBLIOGRAFÍA	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de las partes de una Lámpara Fluorescente	10
Figura 2 Cadena de valor de RAEE.....	18
Figura 3 Consumo por tipo de luminarias en hogares del AMSS	22
Figura 4 Fuentes de extracción y contaminación del mercurio	26
Figura 5 Ciclo Bioquímico del Mercurio.....	27
Figura 6 Emisiones de mercurio (totales) distribuidas geoespacialmente al aire procedentes de fuentes antropogénicas en 205 (g/km ² /a) de los sectores.....	28
Figura 7 Ruta de Mercurio en desechos.....	35
Figura 8 Jerarquía de gestión de residuos.....	36
Figura 9 Ejemplo de máquina para trituración de lámparas fluorescentes.	47
Figura 10 Partes de la máquina y controles integrados.	50
Figura 11 Partes de la maquinaria	52
Figura 12 Maquinaria de trituración esquema básico.....	58
Figura 13 Especificaciones técnicas teóricas para un triturador de lámparas fluorescentes	59
Figura 14 Filtro de máquina de trituración	60
Figura 15 Circuito de Control y Pruebas de funcionamiento.	61
Figura 16 Proceso de recolección de Zartex.....	72
Figura 17 Jerarquía de Gestión de Residuos.....	73

Figura 18 Ruta a seguir entre la Recicladora La Centroamericana y Mr. Bodeguitas.	81
--	----

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Precios generales de luminarias.....	21
Tabla 2 Propiedades físicas del Mercurio.....	23
Tabla 3 Fuentes de emisiones de mercurio a nivel mundial.	28
Tabla 4 Criterios para selección de las alternativas de tratamiento de lámparas fluorescentes	52
Tabla 5 Escala de clasificación de las alternativas	53
Tabla 6 Costos de tratamiento por cementación.....	53
Tabla 7 Evaluación económica de trituración.....	55
Tabla 8 Datos para los cálculos de emisión de CO2 por transporte	62
Tabla 9 Resumen de emisiones de CO2 evitadas por reciclar	64
Tabla 10 Análisis de rentabilidad para el proyecto mediante el método del flujo de caja.....	67
Tabla 11 Datos de Inversión	70
Tabla 12 Calculo de la cuota de amortización para un préstamo	70
Tabla 13 Indicadores Económicos.....	71
Tabla 14 Desechos peligrosos	79

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años, las lámparas fluorescentes han sido una opción clave para la iluminación tanto en espacios abiertos como cerrados. Su popularidad en hogares, oficinas e industrias se debió, en su momento, a su eficiencia energética y larga vida útil. No obstante, con el avance de nuevas tecnologías más eficientes y amigables con el medio ambiente, estas lámparas han sido progresivamente reemplazadas por alternativas modernas como los LED. Este cambio ha dado lugar a un problema significativo: la acumulación de lámparas fluorescentes desechadas, lo que plantea un serio riesgo para la salud pública y el medio ambiente debido a su contenido de mercurio.

El mercurio es un elemento químico altamente tóxico que, al liberarse de las lámparas desechadas, puede contaminar el suelo, el aire y los cuerpos de agua, afectando gravemente los ecosistemas. Uno de los mayores peligros del mercurio es su capacidad de bioacumularse en los organismos vivos, lo que dificulta su eliminación del entorno natural y supone un riesgo a largo plazo para la salud humana. La exposición al mercurio puede causar daños severos en diferentes sistemas del cuerpo humano, como el sistema nervioso, inmunológico y respiratorio, según han advertido diversos organismos internacionales.

En este trabajo se exploran los peligros que representa el mercurio para la salud humana y el medio ambiente. Se realiza una revisión de la legislación tanto nacional como internacional relacionada con la disposición adecuada de residuos que contienen mercurio, destacando acuerdos internacionales como el Convenio de Minamata y el Convenio de Basilea. Estos tratados subrayan la importancia de establecer directrices claras para el manejo, transporte y disposición final de estos desechos, con el fin de minimizar su impacto ambiental y proteger la salud pública.

Además, se examinan distintas alternativas para la recuperación, tratamiento y disposición final de las lámparas fluorescentes en El Salvador, un país que actualmente carece de un método establecido para su eliminación segura. El análisis incluye la viabilidad económica y los posibles impactos ambientales de cada una de estas alternativas, con el objetivo de ofrecer soluciones que puedan implementarse de manera eficaz y sostenible en el contexto local.

Finalmente, se presentan conclusiones basadas en la evaluación de las alternativas propuestas, destacando la opción más adecuada desde una perspectiva tanto económica como ambiental. Este estudio tiene como fin contribuir a la búsqueda de soluciones viables para la correcta gestión de las lámparas fluorescentes que contienen mercurio, ayudando a mitigar los riesgos asociados a su disposición inadecuada.

CAPÍTULO I: MARCO CONTEXTUAL REFERENCIAL

Para poder comprender de manera adecuada el problema al que nos enfrentamos en lo referente a la recuperación, aprovechamiento, tratamiento y disposición final de las lámparas fluorescentes necesitamos identificar y exponer los antecedentes de las lámparas y las regulaciones y lineamientos que estas deben de seguir para su futuro.

De esta manera, presentamos una breve descripción de las lámparas fluorescentes, así como su historia, sus partes, demostrando las ventajas de sus usos y los peligros de sus desechos, las medidas para su tratamiento implementados internacionalmente, el uso del término RAEE, el ciclo de vida de las luminarias en el país y los reglamentos para tratar desechos de lámparas fluorescentes en El Salvador.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE APLICACIÓN

A lo largo de los años, hemos implementado el uso de las lámparas fluorescentes como fuente de luz en espacios, dado que la industria energética se ha ido modernizando estos elementos han sido reemplazados inevitablemente por instrumentos más eficientes, por lo que la sustitución de estas ha sido inevitable. Las lámparas fluorescentes inservibles fueron declaradas por la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) como desechos peligrosos que deberían tener un manejo más riguroso debido al contenido de mercurio y otros 17 elementos peligrosos según la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos. En la actualidad no se tiene una forma clara de disposición final de dichas lámparas, pues para ello debe estudiarse sus componentes, algunos de ellos pueden ser destruidos, pero en el caso del Mercurio un componente químico alojado en el interior de la lámpara, no puede ser destruido solamente se debe aislar y tratar mediante convenios internacionales de disposición final.

El 15% de los hogares de la zona metropolitana de El Salvador utiliza lámparas fluorescentes, por un periodo mayor a un año. El uso de estas representa el 85% de toda la problemática de contaminación de desechos de mercurio.

El mercurio puede convertirse en un gran problema de contaminación pues este tiene la capacidad de acumularse en organismos y concentrarse en la cadena alimentaria acuática,

que de ser ingerida por el ser humano causa graves deterioros en el sistema nervioso e inmunitario. Por lo que no puede simplemente desecharse, ya que pone en peligro a poblaciones numerosas contaminando recursos hídricos y el aire.

Esta problemática ha sido ampliamente estudiada por lo que se han establecidos convenios para proteger la salud humana y medio ambiente de las emisiones y liberaciones de mercurio.

1.2 OBJETIVOS:

1.2.1 OBJETIVO GENERAL DEL TRABAJO DE APLICACIÓN:

- Evaluar alternativas de recuperación, aprovechamiento, tratamiento y disposición de lámparas fluorescentes en El Salvador, garantizando el cumplimiento de convenios internacionales en el transporte, almacenamiento y recolección de estas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL TRABAJO DE APLICACIÓN:

- Realizar una investigación bibliográfica a nivel regional sobre protocolos y convenios establecidos para el tratamiento, recuperación y disposición de lámparas fluorescentes

- Definir una propuesta de gestión y recuperación del mercurio proveniente de lámparas fluorescentes que cumpla con los convenios internacionales de Basilea y Minamata.

- Especificar los aspectos técnicos de los componentes internos y externos de las lámparas fluorescentes

- Evaluar la factibilidad económica y el impacto ambiental de las alternativas de tratamiento, recuperación y disposición final del mercurio en lámparas fluorescentes.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, cada edificio en El Salvador cuenta con lámparas para evitar cualquier clase de riesgos que se podrían dar por no poder ver adecuadamente alrededor. Esto significa que en cada institución pública o privada, vivienda, etc. habrá luminarias para evitar riesgos a la salud humana.

Las lámparas fluorescentes son una de las fuentes de iluminación disponibles más eficientes en el uso de energía. Los tubos de lámparas fluorescentes contienen una pequeña cantidad de mercurio mezclado con argón en forma de vapor (gases), el cual dirige el flujo de la corriente eléctrica dentro del tubo.

Debido a esto, la vida útil de las mismas se ve acortada de manera acelerada por su uso (al encenderse y apagarse con frecuencia) y por las nuevas tecnologías descubiertas para ahorrar energía eléctrica y otros recursos, pero no muchas veces por las medidas medioambientales adecuadas. Con esto nos referimos a que en El Salvador no lleva mucho tiempo de utilizar medidas que puedan evitar la catástrofe medioambiental que puede suceder cuando se rompe una lámpara fluorescente por la cantidad de mercurio que se reparte entre el gas y el polvo que recubre el vidrio de la lámpara.

La presente investigación se enfocará en evaluar alternativas y desarrollar propuestas en el tratamiento, disposición y recuperación de lámparas fluorescentes en El Salvador, garantizando el cumplimiento de convenios internacionales en el transporte, almacenamiento y recolección de estas.

De esta manera presentamos nuestro resultado mediante un informe de factibilidad económica y del impacto ambiental de las alternativas de tratamiento, recuperación y disposición final del mercurio contenido en las lámparas fluorescentes, siguiendo siempre los convenios internacionales de Basilea y Minamata.

1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el impacto ambiental del desecho inadecuado de lámparas fluorescentes?

¿Cómo afecta el mercurio contenido en las lámparas fluorescentes los ecosistemas acuáticos y la salud humana?

¿Cuál es la normativa existente a nivel nacional e internacional para el manejo y disposición de lámparas fluorescentes como desechos peligrosos?

¿Cuáles son las alternativas para la recuperación, aprovechamiento de lámparas fluorescentes?

¿Qué tan eficaces son las alternativas para la recuperación, aprovechamiento de lámparas fluorescentes que existen actualmente?

¿Qué beneficios ambientales, sociales y económicos produce la implementación de estas alternativas?

1.5 HIPÓTESIS

La falta de un sistema efectivo de disposición y tratamiento de lámparas fluorescentes desechadas en El Salvador contribuye significativamente a la contaminación por mercurio en el medio ambiente, lo cual, representa un riesgo grave para los ecosistemas acuáticos locales y para la salud pública. Implementar alguna de las alternativas de recuperación, aprovechamiento, tratamiento y disposición de lámparas fluorescentes basada en prácticas internacionales podría reducir la liberación de mercurio, producir beneficios económicos y mitigar sus efectos nocivos.

1.6 MARCO DE REFERENCIA

1.6.1 ¿QUÉ ES UNA LÁMPARA?

Las lámparas son dispositivos que transforman una energía eléctrica incluso química en energía lumínica. Desde un punto de vista más técnico, se distingue entre dos objetos: la lámpara es el dispositivo que produce la luz, mientras que la luminaria es el aparato que le sirve de soporte.

1.6.2 HISTORIA DE LAS LÁMPARAS:

Las lámparas fluorescentes han revolucionado la forma en que iluminamos nuestro mundo, ofreciendo alternativas energéticamente eficientes y duraderas a las bombillas incandescentes tradicionales (Svetilla, 2017). Este viaje a través de la historia desvela los hitos fundamentales y las innovaciones que han impulsado las lámparas fluorescentes desde sus inicios hasta las avanzadas soluciones de iluminación de las que disfrutamos hoy en día.

La chispa inicial: El inicio de la fluorescencia

1852

La historia comienza con Sir George Stokes, un físico irlandés que observó por primera vez el fenómeno de la fluorescencia en 1852. Observó que ciertos materiales emitían un tenue resplandor cuando se exponían a la luz ultravioleta. Aunque este descubrimiento no condujo inmediatamente a aplicaciones prácticas de iluminación, sentó las bases para futuros desarrollos.

Los tubos de Geissler

1860

Heinrich Geissler, un soplador de vidrio alemán, creó tubos de vacío llenos de gases enrarecidos que emitían brillos de colores cuando se electrificaban. Estos tubos, conocidos como tubos de Geissler, eran más una curiosidad científica que una solución viable de iluminación, pero mostraron el potencial de la iluminación basada en descargas de gas.

Lámpara de Cooper Hewitt

1901

En 1901, el inventor estadounidense Peter Cooper Hewitt patentó la lámpara de vapor de mercurio, precursora de la lámpara fluorescente. Esta lámpara utilizaba una descarga de vapor de mercurio para crear luz ultravioleta, que luego estimulaba el vidrio recubierto de fósforo para emitir luz visible. Aunque no era tan eficiente como las lámparas fluorescentes modernas, supuso un paso importante hacia la iluminación fluorescente práctica.

El tubo de Moore

1935

A mediados de la década de 1930, Edmund Germer, Friedrich Meyer y Hans Spanner presentaron el tubo de Moore, un prototipo de la lámpara fluorescente moderna. Este diseño utilizaba una descarga de vapor de mercurio a baja presión y un revestimiento fluorescente en el interior del tubo de vidrio para mejorar la eficiencia y producir una luz blanca más agradable.

Avance Comercial

1938

La primera lámpara fluorescente de éxito comercial fue introducida por General Electric en 1938. Denominada "Fluorescent Cool White", esta lámpara utilizaba una mezcla de fósforos para producir una luz más natural y atractiva que los modelos anteriores. Su eficiencia y mayor vida útil la convirtieron rápidamente en una opción popular para diversas aplicaciones de iluminación.

Mejora de la reproducción cromática

1950 -

1960

A lo largo de las décadas de 1950 y 1960, los investigadores lograron avances significativos en la mejora de la capacidad de reproducción cromática de las lámparas fluorescentes. La introducción de revestimientos de trifósforo permitió producir una gama más amplia de colores, lo que hizo que la iluminación fluorescente fuera más adecuada para una variedad de entornos, incluidos los espacios comerciales y los hogares

Lámparas fluorescentes compactas

1980

En la década de 1980 surgieron las lámparas fluorescentes compactas (CFL), diseñadas para adaptarse a los enchufes incandescentes estándar. Las bombillas fluorescentes compactas aportaron las ventajas de la iluminación fluorescente a los hogares de todo el mundo, ya que ahorran energía y tenían una vida útil más larga. Sin embargo, su adopción se vio obstaculizada por problemas como el coste inicial y la presencia de pequeñas cantidades de mercurio.

El reto de los LED

2000

En el siglo XXI, las lámparas fluorescentes se enfrentaron a la dura competencia de los diodos emisores de luz (LED). Los LED ofrecían una mayor eficiencia energética y una vida útil más larga, desafiando el dominio de la iluminación fluorescente. Esta competencia estimuló una mayor innovación en ambas tecnologías, dando lugar a opciones de iluminación más avanzadas y respetuosas con el medio ambiente.

Avances modernos y sostenibilidad (actualidad)

Las lámparas fluorescentes modernas siguen evolucionando con mayor eficiencia, menor impacto ambiental y mejor calidad del color. Además, los avances en el reciclaje y la contención del mercurio han resuelto algunos de los problemas medioambientales asociados a la iluminación fluorescente.

1.6.3 ¿QUÉ ES UNA LÁMPARA FLUORESCENTE (Y SUS PARTES)?

Las lámparas fluorescentes son lámparas de vapor de mercurio a baja presión (0.8 Pa). En estas condiciones, en el espectro de emisión del mercurio predominan las radiaciones ultravioletas en la banda de 253.7 nm (Salaverría, 2015). Para que estas radiaciones sean útiles, se recubren las paredes interiores del tubo con polvos fluorescentes que convierten los rayos ultravioletas en radiaciones visibles. De la composición de estas sustancias dependerán la cantidad y calidad de la luz, y las cualidades cromáticas de la lámpara. En la actualidad se usan dos tipos de polvos; los que producen un espectro continuo y los trifósforos que emiten un espectro de tres bandas con los colores primarios. De la combinación de estos tres colores se obtienen una luz blanca que ofrece un buen rendimiento de color sin penalizar la eficiencia como ocurre en el caso del espectro continuo.

El tubo contiene una pequeña cantidad de vapor de mercurio y un gas inerte, habitualmente argón o neón, sometidos a una presión ligeramente inferior a la presión atmosférica.

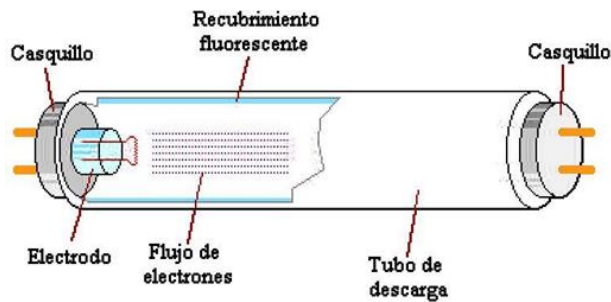


Figura 1 Esquema de las partes de una Lámpara Fluorescente

Fuente: Imagen obtenida de “Informe Final EA y PMA programa EE México: Anexo B Mercurio efectos en la salud y el ambiente” (Salaverría, 2015).

Las lámparas fluorescentes funcionan mediante la inyección de energía eléctrica a los casquillos, que están hechos de metal, y a los electrodos dentro del tubo de descarga hecho de vidrio. El electrodo sirve de contacto entre el flujo de electrones y el gas de vapor de mercurio a baja presión generando la energía lumínica que se ve incrementada debido al recubrimiento fluorescente que genera la luz blanca con mayor eficiencia. Es de tener en cuenta que también el material de vidrio usado en el tubo de descarga funciona como un eficiente contenedor del vapor de mercurio.

Las lámparas fluorescentes se caracterizan por carecer de ampolla exterior. Están formadas por un tubo de diámetro normalizado, normalmente cilíndrico, cerrado en cada extremo con un casquillo de dos contactos donde se alojan los electrodos. El tubo de descarga está relleno con vapor de mercurio a baja presión y una pequeña cantidad de un gas inerte que sirve para facilitar el encendido y controlar la descarga de electrones.

Asimismo, en los extremos del tubo se encuentran dos filamentos hechos de tungsteno. Los tubos fluorescentes se usan en muchas ocasiones en aplicaciones de visión artificial, aunque debido a su limitada variedad de formas, también es restringida su utilización.

Los tubos fluorescentes estándar no presentan un balance de color uniforme, incorporando longitudes de onda mayoritariamente azules. Para aplicaciones de visión artificial es necesario utilizar fluorescentes con espectro conocido. Así es habitual utilizar en según qué aplicaciones, fluorescentes casi monocromáticos: ultravioletas, amarillos, verdes, azules.

Para aplicaciones donde se requiere una gran intensidad de iluminación y una larga longitud, se utilizan fluorescentes de apertura, en estos fluorescentes la luz se emite sólo en una dirección y con un ángulo muy estrecho, esto permite que la intensidad lumínica pueda ser hasta 10 veces superior a la de un fluorescente estándar.

Las fuentes de alimentación que proporcionan electricidad a los fluorescentes pueden venir equipadas con fotodiodos, que permiten controlar y regular automáticamente la estabilidad de la luz en todo momento, de forma que cuando la intensidad de la luz del fluorescente disminuye, la fuente hace que se compense la potencia hasta volver a la intensidad anterior.

1.6.4 ¿POR QUÉ SE USAN ESTA CLASE DE LÁMPARAS?

Su gran ventaja frente a otro tipo de lámparas, como las incandescentes, es su eficiencia energética.

Para las aplicaciones industriales es importante que los fluorescentes funcionen a alta frecuencia, al menos a 25 kHz (Lummi, 2022). En aplicaciones de visión no pueden utilizarse fluorescentes estándar debido a su efecto de parpadeo, que dependiendo de la velocidad a la que funcione la cámara, puede verse reflejado en la intensidad de la imagen capturada.

La duración de estas lámparas se sitúa entre 5,000 y 7,000 horas. Su vida termina cuando el desgaste sufrido por la sustancia emisora que recubre los electrodos, impide el encendido al necesitarse una tensión de ruptura superior a la suministrada por la red, hecho que se incrementa con el número de encendidos. Además de esto, debe de considerarse la depreciación del flujo provocada por la pérdida de eficacia de los polvos fluorescentes y el ennegrecimiento de las paredes del tubo donde se deposita la sustancia emisora.

Han aparecido lámparas fluorescentes compactas que llevan incorporado el balastro y el cebador. Son lámparas pequeñas con casquillo de rosca o bayoneta pensadas para sustituir a las lámparas incandescentes con ahorros de hasta el 70% de energía.

1.6.5 ¿POR QUÉ SON PELIGROSOS SUS DESECHOS?

El mercurio es un elemento que existe en la naturaleza bajo diferentes modalidades, ya sea en forma metálica (de color plateado y líquido), de vapor o gas, combinado con otros

elementos (como cloro, sulfuro u oxígeno) para formar sales orgánicas, o bien formando compuestos orgánicos (como el metilmercurio o el fenilmercurio), los cuales también pueden presentarse en forma de sales (Acuerdo de Cooperación USAID-CCAD, 2010). A través de procesos naturales, en lo que pueden intervenir microorganismos, el mercurio inorgánico puede ser transformado lentamente en mercurio orgánico.

En los residuos urbanos es común encontrar mezclados residuos de lámparas fluorescentes con contenido de mercurio, los cuales históricamente han sido dispuestos en los rellenos sanitarios en el mejor de los casos o en los tiraderos al aire libre donde se llevan a cabo emisiones a la atmósfera por la volatilización del mercurio y la infiltración de lixiviados de este tipo de residuos a los depósitos de agua subterránea, una de las características de este elemento es su condición bioacumulable en la cadena trófica.

La contaminación del suelo y de los cultivos agrícolas ocurre tanto por el depósito de las partículas del aire, como de la irrigación de cultivos o su fertilización con aguas o con lodos de plantas de tratamiento de agua residual contenido concentraciones elevadas de mercurio de origen industrial.

1.6.6 ¿CÓMO SE TRATAN SUS DESECHOS?

Los desechos de las lámparas fluorescentes pueden ser difíciles de tratar debido a que son considerados peligrosos, más sin embargo se han creado convenios internacionales y regionales para lidiar con los desechos de aparatos eléctricos y electrónicos, entre los cuales entran las lámparas. Estos convenios son:

1.6.6.1 Convenio de Basilea:

De acuerdo al Convenio de Basilea (INFORMEA, 2015) se tiene como objetivo reducir al mínimo la generación de desechos peligrosos y su movimiento transfronterizo, así como asegurar su manejo ambientalmente racional, para lo cual promueve la cooperación internacional y crea mecanismos de coordinación y seguimiento.

Fue adoptado por la Conferencia de Plenipotenciarios el 22 de marzo de 1989, mediante la firma de 116 países; El Salvador formalizó en la Conferencia de las Partes del Convenio de Basilea, realizada en Piriápolis, Uruguay en 1992, su interés en ser sede del

Centro Regional para la subregión de Centroamérica, incluyendo a México, habiendo quedado registrado ese interés en el informe de la misma.

Es mediante este convenio (PNUMA, 2014) que se deberá exigir que se proporcione información a los Estados interesados sobre el movimiento transfronterizo de desechos peligrosos y otros desechos propuesto, para que se declaren abiertamente los efectos del movimiento propuesto sobre la salud humana y el medio ambiente y el impedimento de la importación de desechos peligrosos y otros desechos si tiene razones para creer que tales desechos no serán sometidos a un manejo ambientalmente racional.

El Convenio de Basilea reglamenta los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y otros desechos obliga a sus partes a asegurar que esos desechos se gestionen y eliminen de manera ambientalmente racional. El Convenio abarca desechos tóxicos, venenosos, explosivos, corrosivos, inflamables, eco tóxicos e infecciosos. Las partes también tienen la obligación de reducir al mínimo las cantidades que se transportan, tratar y eliminar los desechos lo más cerca posible de su lugar de generación, y prevenir o reducir al mínimo la generación de desechos en su fuente. (PNUMA, 2014)

I. Alcance del convenio

Serán “desechos peligrosos” a los efectos del presente Convenio los siguientes desechos que sean objeto de movimientos trasfronterizos:

- Los desechos no incluidos en el apartado inicial pero definidos o considerados peligrosos por la legislación interna de la parte que sea estado de exportación, de importación o de tránsito

Los desechos que sean radiactivos, estén sometidos a otros sistemas de control internacional, incluidos instrumentos internacionales que se apliquen específicamente a los materiales radiactivos, quedarán excluidos del ámbito del presente convenio

Los desechos derivados de las operaciones normales de los buques cuya descarga está regulada por otro instrumento internacional, quedarán excluidos del ámbito del presente Convenio. (PNUMA, 2014)

1.6.6.2 Convenio de Minamata:

El Convenio tiene por objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y compuestos de mercurio, y en él se recogen diversas medidas para cumplir dicho objetivo (Naciones Unidas, 2018). De entre esas medidas cabe destacar el control del suministro y el comercio de mercurio, con cuyo fin se imponen limitaciones a determinadas fuentes de mercurio, como la extracción primaria del mineral. En virtud de otras medidas se controlan los productos con mercurio añadido y los procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio, y se fiscaliza también la extracción de oro artesanal y en pequeña escala. Las emisiones y liberaciones de mercurio son recogidas cada una en artículo aparte, y se busca reducir los niveles de mercurio, pero de manera flexible y teniendo presentes los planes de desarrollo del país. Hay igualmente medidas que tienen por objeto el almacenamiento provisional ambientalmente racional del mercurio, así como los desechos de mercurio y los sitios contaminados. En el texto se provee apoyo financiero y técnico a los países en desarrollo y los países con economías en transición, además, se define un mecanismo financiero para proporcionar adecuados, predecibles y oportunos recursos financieros.

En el Convenio de Minamata se estipula que el Convenio entrará en vigor el nonagésimo día contado a partir de la fecha en que haya sido depositado el quincuagésimo instrumento de ratificación, aceptación, aprobación o adhesión (ONU Programa de Medio Ambiente, 2021). El cumplimiento de esa condición se alcanzó el 18 de mayo de 2017, lo que hizo posible la entrada en vigor del Convenio el 16 de agosto de 2017 y la convocación de la primera reunión de su Conferencia de las Partes del 24 al 29 de septiembre de 2017 en Ginebra.

Como resultado de las diferentes evaluaciones, y ante la necesidad urgente de adoptar medidas a nivel internacional, en febrero de 2009 (Virginia Santana, 2014) el entonces Consejo de Administración del PNUMA decidió iniciar el proceso de negociación hacia un instrumento vinculante sobre el mercurio (Decisión 25/5). La elaboración de dicho instrumento se encomendó al Comité Intergubernamental de Negociación (CIN) con el apoyo de la Subdivisión de Productos Químicos, División de Tecnología, Industria y Economía (DTIE), del PNUMA. Todos los gobiernos fueron invitados a participar en el CIN; las

organizaciones intergubernamentales y organizaciones no gubernamentales participaron como observadores.

La labor del CIN se llevó a cabo mediante cinco sesiones durante un periodo de tres años. Los lugares y fechas de las mismas fueron las siguientes:

- CIN 1: 7-11 junio 2010, Estocolmo, Suecia.
- CIN 2: 24-28 enero 2011, Chiba, Japón.
- CIN 3: 31 octubre - 4 noviembre 2011, Nairobi, Kenia.
- CIN 4: 27 junio - 2 julio 2012, Punta del Este, Uruguay.
- CIN 5: 13-18 enero 2013, Ginebra, Suiza.

En la región de América Latina y el Caribe, para la preparación de las reuniones del CIN, se realizaron cinco consultas regionales:

- Kingston, Jamaica, 10 -11 de marzo de 2010.
- Ciudad de Panamá, Panamá, 23-26 noviembre de 2010.
- Ciudad de Panamá, Panamá, 19-23 de septiembre de 2011.
- Brasilia, Brasil, 21-25 mayo de 2012.
- Bogotá, Colombia, 26-29 noviembre de 2012.

Se prevé que gracias al cumplimiento coordinado de las obligaciones del Convenio se logre con el correr del tiempo una reducción generalizada de los niveles de mercurio en el medioambiente y, así, el cumplimiento del objetivo del Convenio de proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y compuestos de mercurio.

1.6.6.3 Convenios Regionales de América Latina y El Caribe:

Para lograr una estrategia que pudiera ser implementada por los países de América Latina y El Caribe, se creó la Estrategia de Iluminación Eficiente por el Proyecto de Integración y Desarrollo MESOAMERICA.

La Estrategia de Iluminación Eficiente en Centroamérica (Proyecto Integración y Desarrollo Mesoamérica, 2014) llevará a cabo las siguientes acciones a nivel regional: establecimiento de Estándares Mínimos de Eficiencia Energética (MEPS, por sus siglas en inglés) que regularán el uso de luminarias en la región a nivel del sector residencial, empresarial y público; homologación de lámparas cumpliendo dichos estándares mínimos; prohibición de la importación y comercialización de lámparas que no estén homologadas; implementación de un Sistema de Etiquetado Regional Armonizado Obligatorio en las luminarias; aplicación del Sello Mesoamérica de Eficiencia y Calidad en luminarias; implementación de un sistema de control, verificación y fiscalización de las luminarias; desarrollo de una campaña de comunicación para concientizar sobre el manejo de los residuos que contienen mercurio en las Lámparas Fluorescentes Compactas; establecimiento de sistemas de recolección y almacenaje de las Lámparas Fluorescentes Compactas por país y de una planta de tratamiento a nivel regional; y la aprobación de un Reglamento Técnico Centroamericano sobre Iluminación Eficiente.

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) se reducirían anualmente en unas 942,000 toneladas y el sistema de recolección y reciclaje de las lámparas eficientes con pequeño contenido de mercurio impedirían que fueran al ambiente 16.9 Kg de mercurio. Además, a nivel regional se disminuirá en 4.8% el consumo eléctrico y en 34.6% el consumo para iluminación. Estos porcentajes representan un ahorro energético de 2,575.8 millones de KWh/año en la generación de electricidad. La demanda de electricidad en hora punta se reduciría en 360 MW², evitando inversiones en nuevas capacidades de generación de unos 450 MW. Todo lo anterior se traduce en ahorros por el orden de los 406.5 millones de dólares.

1.6.6.4 Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos:

El termino RAEE se refiere a los aparatos y equipos dañados, descartados, obsoletos o en desuso que utilizan electricidad o una fuente de energía para su funcionamiento en esta definición se incluye equipos electrónicos de consumo como computadoras hasta electrodomésticos, lámparas fluorescentes, celulares, que ya no tienen utilidad alguna para quien los posee. En El Salvador se conoce como chatarra electrónica (RAEE, 2019).

Objetivos de RAEE:

1) Alianzas:

Establecer alianzas con organismos internacionales, sector público, sector privado, universidades, entre otros, con el objetivo de coordinar actividades relacionadas a RAEE

2) Transferencia tecnológica:

Implementar transferencia tecnológica y desarrollo de infraestructura ambientalmente segura para el aprovechamiento de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

3) Educación y Desarrollo de capacidades:

Sensibilizar y educar hacia el Consumo Responsable de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, como la disposición final de RAEE y fortalecer los conocimientos de las instituciones académicas, empresas privadas y sector público de la gestión responsable de los RAEE.

4) Normativas y Reglamentos:

Desarrollar y establecer instrumento, normativas y/o regulatorios para la recolección y gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

PROCESO DE SEPARACIÓN DE LOS RAEE:

Paso 1: Recogida y transporte hasta la planta de gestores.

Paso 2: Recepción y almacenamiento.

Paso 3: Clasificación de los equipos.

Paso 4: Desmontaje manual y separación de componentes.

Paso 5: Trituración de materiales valorizables.

Paso 6: Separación de materiales y valorización externa.



Figura 2 Cadena de valor de RAEE

Fuente: Obtenido del sitio web de RAEE

Gestor de residuos: persona natural o jurídica, pública o privada que realiza cualquiera de las operaciones de manejo de residuos propios o de terceros y que se encuentra autorizada de conformidad a la normativa vigente.

Gestores: ZARTEX y AUTOCONSA.

Universidades: Universidad Francisco Gavidia, Universidad de El Salvador, ESEN.

Gobierno: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Organizaciones No Gubernamentales: FIAES y FUSADES

Sector Privado: TIGO y Geocycle.

Dentro de las leyes que rigen los lineamientos a seguir para el trato de los residuos electrónicos, como lo son las lámparas fluorescentes, la RAEE presenta los siguientes documentos:

- Legislación nacional y normativa internacional en materia ambiental
- Ley de gestión integral de residuos y fomento al reciclaje.
- Ley de Medio Ambiente.

- Lineamientos para la Gestión de Desechos Electrónicos CSJ El Salvador.
- Guía Técnica para Generadores de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos en El Salvador.
- Guía técnica para la gestión integral de los RAEE en El Salvador.
- Guía de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

1.6.7 REGLAMENTO PARA TRATAR LOS DESECHOS DE LÁMPARAS FLUORESCENTES EN EL SALVADOR

El Salvador tiene sus propios reglamentos para tratar con los desechos que se producen para todo tipo de aparatos eléctrico y electrónicos, entre los cuales están:

1.6.7.1 Productos eléctricos. Luminarias. Especificaciones de eficiencia energética. (Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica, 2006)

El objetivo de este Reglamento Técnico Salvadoreño es el de establecer los rangos de desempeño energético mínimo, el método de ensayo, el etiquetado y el procedimiento de evaluación de la conformidad, que deben cumplir las lámparas y luminarias descritas en este reglamento, que se fabriquen, importen de manera definitiva, utilicen y comercialicen dentro del territorio salvadoreño. Aplicando este reglamento a todas las lámparas para iluminación general, luminarias LED para interiores, luminarias LED para exteriores y para el alumbrado público, en tensiones eléctricas de alimentación de 100 V a 480 V c. a. a 60 Hz, que se fabriquen o importen para ser comercializadas dentro del territorio nacional. También aplica a módulos LED.

1.6.7.2 Guía técnica para la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en El Salvador (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2017)

Este documento se constituye en una herramienta de orientación para todos los actores, especialmente para quienes manejan e intervienen en las diferentes etapas de la gestión de los RAEE, siendo una fuente de consulta para profesionales, personal técnico especializado en el área, investigadores, personal vinculado al sector, estudiantes y público en general.

1.6.7.3 Lineamientos para la Gestión de Residuos de Electrónicos y Eléctricos CSJ. Documento Técnico (CORTE SUPREMA DE JUSTICIA, 2017)

Este documento trata de los conceptos generales necesarios para el tratamiento de residuos electrónicos, la composición de los RAEE, algunas normativas y la responsabilidad extendida del productor.

1.6.7.4 Eficiencia Energética de Lámparas fluorescentes de dos bases, requisitos de desempeño energético y etiquetado (NORMA SALVADOREÑA, 2004)

Esta norma especifica los rangos de desempeño y las características de la etiqueta informativa en cuanto a la eficacia energética de las lámparas fluorescentes de hasta dos bases y de los balastos con que ellas operan. Esta norma aplica a lámparas fluorescentes de tipo T-8, con potencias hasta 59W y a los balastos electrónicos que operan con tensiones de red entre 110v y 227v, frecuencia nominal de 60Hz.

1.6.8 CICLO DE VIDA DE LAS LUMINARIAS EN EL SALVADOR

A lo largo del tiempo, las tecnologías de las luminarias han venido evolucionando a nivel mundial, y El Salvador no se ha quedado atrás, teniendo actualmente en uso una gran variedad de tipos y tecnologías. Dentro de las más comunes para uso residencial e industrial se encuentran: (Aparicio Coto & Martínez, 2018)

Focos incandescentes, los cuales emiten luz mediante el calentamiento de un filamento metálico por el paso de corriente eléctrica. (Aparicio Coto & Martínez, 2018)

Lámparas Fluorescentes, poseen una tecnología que utiliza pequeñas cantidades de mercurio. Hasta hace unos años, contenían hasta 40mg de mercurio; hoy e, día poseen menos de 10mg de mercurio, su ventaja es que producen más luz sin emitir calor, utilizan balastos para calentar los gases y que éstos emitan luz, son utilizados sobre todo en la industria, instituciones y grandes empresas. (Aparicio Coto & Martínez, 2018)

En el concepto de adquisición en el mercado salvadoreño, este puede variar dependiendo de establecimiento y marca, los precios generales investigados se presentan en el cuadro

Tabla 1 Precios generales de luminarias

Tipo de luminaria	Costo de Adquisición en USD
Focos incandescentes	\$1.00
Lámparas Fluorescentes	\$1.50
Focos Ahorradores	\$3.27
Focos LED	\$20.95

Fuente: Elaboración propia.

Según los datos del Diagnóstico sobre el ciclo de vida de luminarias en el Área Metropolitana de San Salvador (Aparicio Coto & Martínez, 2018) observados en la figura 1 “Consumo por tipo de luminarias en hogares del AMSS”, se realizó una encuesta de la cual el 86% de estos fueron hogares y el 14% empresas del sector privado pertenecientes al AMSS, con el fin de establecer preferencias y consumos de los tipos de luminarias en hogares y empresas del Área Metropolitana.

Lo que nos hace concluir que si bien los hábitos de consumo de los salvadoreños han cambiado en relación al tiempo y costumbre, la adquisición y el valor de los consumibles sigue siendo un aspecto importante a la hora de adquirir un bien, como vemos los focos ahorradores tienen un precio razonable y ofrecen un rendimiento bueno, mientras que los focos LED si bien ganan en rendimiento, estos no presentan un precio accesible para la población, en el caso de lo que nos interesa las Lámparas Fluorescentes, aunque podemos decir que es un recurso bastante viejo, sigue siendo importante para el mercado salvadoreño por lo que la disposición final de estas resulta un problema importante para el medio ambiente.

PREFERENCIAS DE LUMINARAS EN AMSS

■ Focos Ahorradores ■ Focos Led ■ Otros ■ Focos Incandescentes ■ Lamparas Fluorescentes

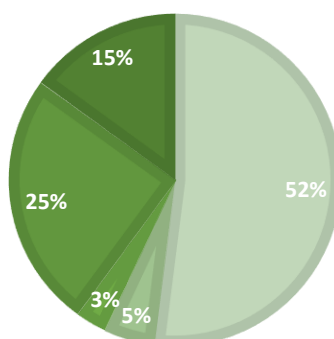


Figura 3 Consumo por tipo de luminarias en hogares del AMSS

Fuente: Imagen extraída de “La gestión de desechos de luminarias, análisis de los casos de Brasil y España. Perspectivas para El Salvador, según diagnóstico de uso y disposición” (Aparicio Coto & Martínez, 2018).

1.6.9 Empresa privada, acciones a replicar

Algunas empresas han tomado de lleno el cambio y renovación de toda su flota de luminarias, lo que les ha acarreado gran cantidad de desperdicio de estos insumos, para lo cual han implementado ciertas medidas para contener estos elementos mientras se establece una mejor manera para la disposición final, uno de estos ejemplos, es CEL (Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Rio Lempa), ellos han tomado a bien las siguientes acciones.

-Desde hace más de 15 años, se han almacenado luminarias que se encuentran en desuso, totalizando alrededor de 3.8 toneladas a junio del 2023, entre lámparas fluorescentes, ahorradores y halógenos.

-Desde el año 2005, se implementó la política de “Evaluación de peligrosidad”, con lo cual se compran luminarias ahorradoras con etiqueta verde

-Realización de revisión de luminarias cada tres meses, para cambiar las que hayan llegado a su fin de la vida útil.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Habiendo hablado de la necesidad del mercurio dentro de las lámparas fluorescentes en el capítulo I, en este capítulo nos dedicaremos a hablar de las generalidades del mercurio, cuáles son sus más comunes fuentes de emisión, sus efectos en la salud humana, tanto para diferentes grupos de personas como en sus diferentes formas y el marco legislativo y reglamento usados por El Salvador. De esta manera podemos entender con mayor facilidad la relevancia de este elemento.

2.1 GENERALIDADES DEL MERCURIO

El mercurio es un metal pesado de color blanco plateado. Se encuentra en la roca de la corteza terrestre, como en los depósitos de carbón, cinabrio y en menor concentración en algunas rocas terrestres. Es líquido a temperatura y presión estándar. En la tabla periódica es representado mediante el símbolo de Hg, el cual viene del griego “hydrargyrum” que significa “plata líquida”, y su número atómico es 80 (EPA, 2024).

Según (ATSDR, 2022) el Mercurio existe en las siguientes formas:

- Metilmercurio y otros compuestos orgánicos
- Mercurio elemental (metálico)
- Compuestos de mercurio inorgánico.

Las propiedades físicas del mercurio son las siguientes:

Tabla 2 Propiedades físicas del Mercurio.

Formula química	Hg
Masa Atómica	200.6 g/mol.
Punto de ebullición	357°C
Punto de fusión	39°C
Densidad relativa (agua = 1g/ml)	13.5
Presión de vapor, (Pa a 20°C)	0.26
Densidad relativa de vapor (aire = 1g/ml)	6.93
Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1g/ml)	1,009
Solubilidad en agua	Ninguna.

Fuente: Obtenido de Registro Estatal de emisiones y fuentes contaminantes (PRTR, 2007)

2.1.1 Propiedades químicas:

El mercurio, en su estado puro y a temperatura ambiente, no se oxida, sin embargo, al calentar cerca de su punto de ebullición, si lo hace, aunque lentamente, formando HgO. Forma aleaciones con muchos metales, excepto hierro (solo a temperaturas muy altas) y con azufre se combina a temperatura ambiente. Reacciona con HNO₃ y H₂SO₄ caliente, sin embargo, no lo hace con HCl, ni con H₂SO₄ frío o álcalis. Reacciona con disoluciones de amoníaco en presencia de aire para generar Hg₂NOH (base de Millón). Reacciona explosivamente con tetracarbonil-niquel (con agitación); ácido peroxifórmico; dióxido de cloro (con agitación); 3-bromo-propino; metil-silano y oxígeno (con agitación) y disoluciones concentradas de perclorato de plata con 2-2pentino o 3-hexino. El óxido de etileno puede contener trazas de acetileno como contaminante, con el cual, el mercurio forma acetiluros capaces de detonar. El mercurio entra en ignición en presencia de una corriente de cloro a 200-300 C. Lo mismo sucede con el diyodo-fosfuro de boro en presencia de vapores de mercurio. Este metal, reacciona violentamente con bromo o acetiluro de sodio. Con sodio, rubidio y potasio la reacción es violenta y exotérmica. La formación de amalgamas con calcio, también es violenta. Algunos metales como Cu, Fe o Zn precipitan el metal de disoluciones neutras o ligeramente ácidas de sales de mercurio. Las sales mercúricas en presencia de NaOH, generan un precipitado amarillo de HgO y con disolución alcalina de yodo, dan HgI₂. Las sales mercurosas, por su parte, dan un precipitado negro con hidróxidos alcalinos y un precipitado blanco de calomel con HCl o cloruros solubles. Mezclas de mercurio con acetileno, amoníaco, dióxido de cloro, metil-azida, cloratos, nitratos y ácido sulfúrico caliente pueden resultar explosivas. En general es incompatible con halógenos y agentes oxidantes fuertes. (UNAM, 2024)

2.1.1.1 Niveles de Toxicidad (UNAM, 2024)

México:

- CPT (Concentración Ponderada en el Tiempo): 0.05 mg/m₃ como Hg vapor (absorción por la piel de todas sus formas).
- CPT: 0.01 mg/m₃ como Hg (absorción por la piel para derivados alquilados).
- CCT: 0.03 mg/m₃ como Hg (absorción por la piel para derivados alquilados)

Estados Unidos:

- TLV TWA: 0.05 mg Hg /m₃ (como Hg).
- TLV: 0.01 mg Hg/m₃ (para derivados alquilados)

Reino Unido

- Periodos largos: 0.05 mg/m₃
- Periodos cortos: 0.15 mg/m₃

Alemania:

- MAK: 0.1 mg/m₃ (0.01 ppm)

Francia:

- VME: 0.05 mg/m₃ (vapor).

Suecia:

- Nivel límite: 0.05 mg/m₃ (vapor)

2.2 FUENTES DE EMISIÓN DE MERCURIO:

El mercurio emitido al aire puede viajar miles de kilómetros en la atmósfera antes de volver a depositarse en la Tierra en forma de lluvia o en forma gaseosa seca (EPA, 2024).

El mercurio se encuentra naturalmente en la corteza terrestre y existen emisiones naturales de mercurio, tanto los volcanes como los incendios forestales envían mercurio a la atmósfera. Sin embargo, las actividades humanas han sido las responsables de la mayor cantidad de mercurio emitido a la atmósfera en las últimas décadas.

En el año 2018 se calcula que los niveles de mercurio en la atmósfera eran de un 500% superiores a los niveles naturales y se estima que en los océanos eran de un 200% superiores a los niveles naturales (Marnane, 2018).

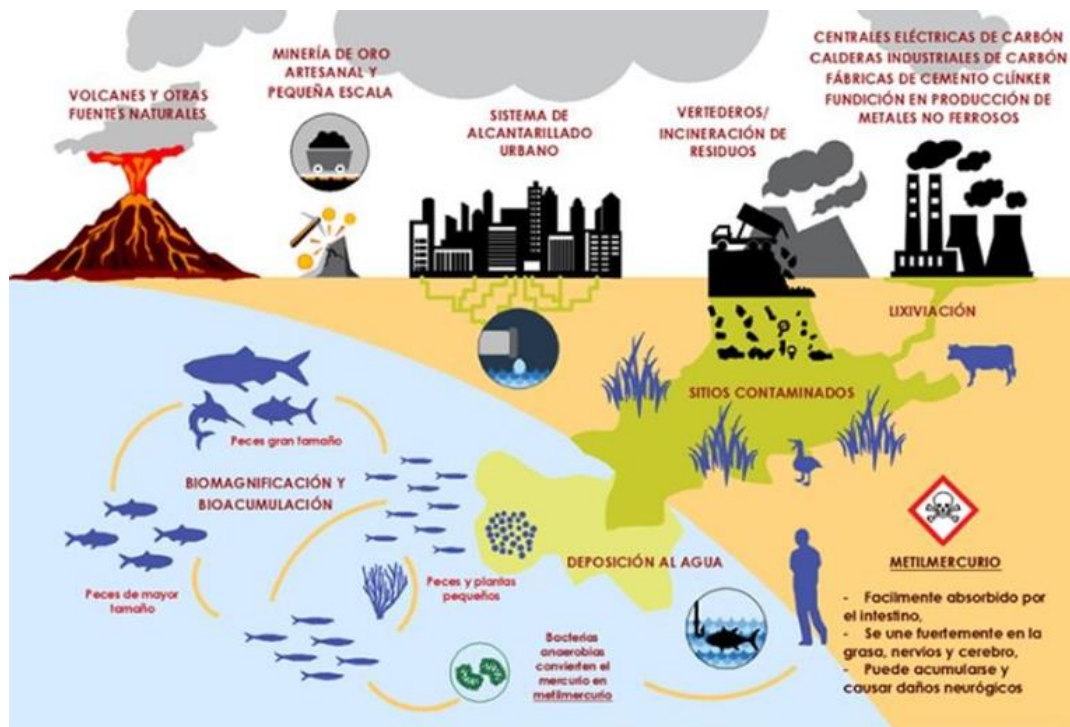


Figura 4 Fuentes de extracción y contaminación del mercurio

Fuente: Obtenido del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Gobierno de España, 2021).

2.2.1 Fuentes Naturales de Emisiones de mercurio:

Las fuentes naturales de mercurio incluyen las erupciones volcánicas y las emisiones del océano.

El ciclo biogeoquímico del mercurio comienza con su liberación al medio a partir de la erosión de rocas que contienen dicho metal. Luego pasa tanto a las aguas superficiales como subterráneas llegando finalmente a los océanos. Tanto en la corteza terrestre como en los océanos, tienen lugar reacciones de desgasificación y volatilización del mercurio, pasando de este modo a la atmósfera. El mercurio una vez que se encuentra en la atmósfera puede recorrer grandes distancias, transformándose durante el trayecto mediante procesos de foto-oxidación en compuestos solubles que precipitan pudiendo pasar de este modo a la biosfera. Además, existe una deposición seca de partículas y mercurio gaseoso sobre los suelos y vegetación (M.A. Lominchar, 2010)

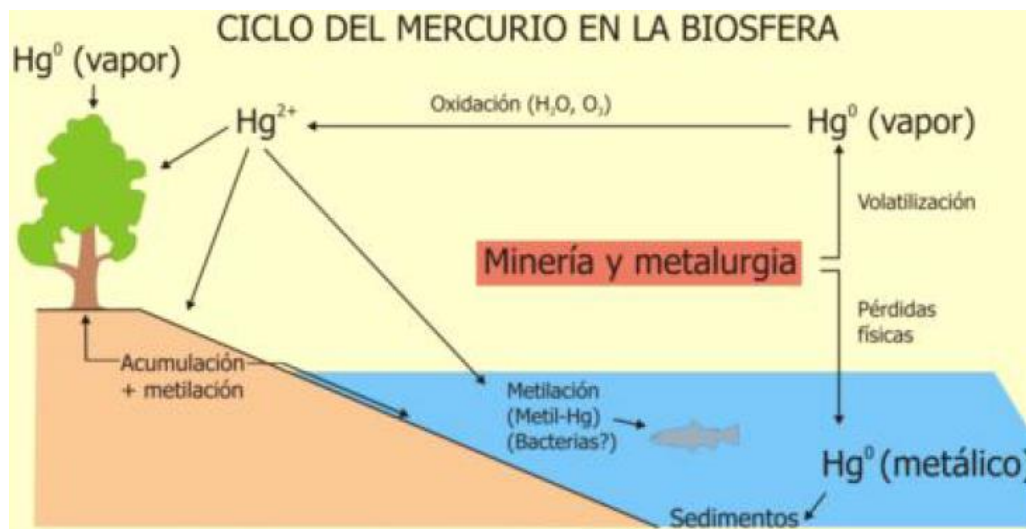


Figura 5 Ciclo Bioquímico del Mercurio

Fuente:

http://www.ucm.es/info/crismine/HTML_Almaden/Almaden_contaminacion.htm

El mercurio liberado al medio por actividades antropogénicas es absorbido también por ciertas bacterias que pueden transformarlo en metilmercurio. Este se acumula entonces en peces y mariscos. El metilmercurio pasa también por un proceso de bioamplificación. Los grandes peces depredadores, por ejemplo, tienen más probabilidades de presentar niveles elevados de mercurio por haber devorado a muchos peces pequeños que a su vez lo habrán ingerido al alimentarse de plancton.

2.2.2 Fuentes antropogénicas de emisiones de mercurio:

Las fuentes antropogénicas incluyen mercurio liberado por combustibles o materias primas o de usos en productos o en procesos industriales.

A nivel mundial, la minería de oro artesanal y en pequeña escala (ASGM) emite el 37.5% de mercurio a la atmósfera, siendo la mayor fuente de emisiones antropogénicas de mercurio, seguida de la combustión estacionaria de carbón (21%). Otras grandes fuentes de emisiones son la producción de metales no ferrosos (15%), la producción de cemento (11%) y los residuos de productos (6.6%). Emitiéndose un aproximado de 2,220 toneladas anualmente (EPA, 2024).

Tabla 3 Fuentes de emisiones de mercurio a nivel mundial.

Fuente	Cantidad (kg)
Minería Artesanal y de Pequeña Escala	837.658
Combustión estacionaria de carbón	473,777
Producción de metales no ferrosos	326.657
Producción de cemento	233,168
Residuos de productos	146,938
Monómero de cloro vinílico	58.268
Quema de biomasa	51.860
Producción de metales ferrosos	39,903
Producción de cloro-álcali	15.146
Incineración de residuos	14,944
Refinación de petróleo	14.377
Combustión estacionaria de petróleo y gas	7.130

Fuente: Datos obtenidos de la agencia de protección ambiental de Estados Unidos. (EPA, 2024)

En el siguiente mapa se proporciona información de la distribución mundial de las emisiones antropogénicas de mercurio:

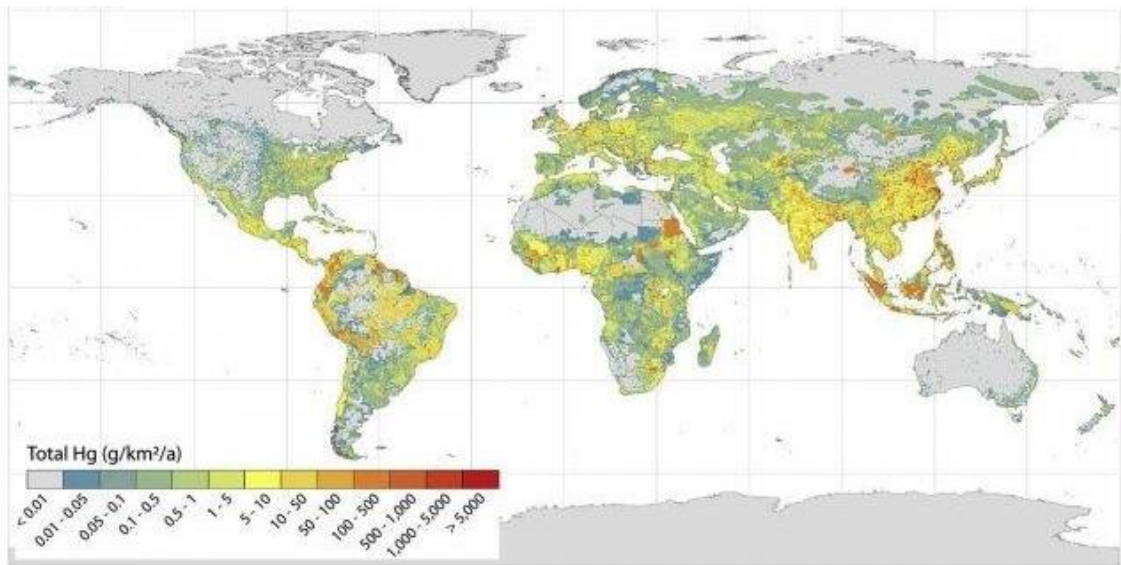


Figura 6 Emisiones de mercurio (totales) distribuidas geoespacialmente al aire procedentes de fuentes antropogénicas en 205 (g/km²/a) de los sectores.

Fuente: Diagrama obtenido de la agencia de protección ambiental de Estados Unidos.
(EPA, 2024)

“El mercurio debe ser gestionado con un enfoque circular que tiene como objetivo proteger la salud de las personas y el medio ambiente de los efectos del mercurio y sus compuestos”

Rossana Silvia Repetto

Secretaria ejecutiva del convenio de Minamata.

2.3 EFECTOS DEL MERCURIO EN LA SALUD

Los efectos nocivos del mercurio se conocen desde los primeros siglos después de Cristo. Así lo describe el romano Plinio, el cual afirmaba que el envenenamiento con mercurio era una enfermedad de los esclavos que trabajaban en las minas donde inhalaban vapor de mercurio (Weinberg, 2010).

Sin embargo, hubo dos incidentes que resaltaron la toxicidad del mercurio y sus efectos nocivos sobre la salud humana. Uno de ellos fue la intoxicación masiva que se produjo debido a consumo de pescado contaminado en la bahía de Minamata (Japón). Una empresa química vertía directamente en el agua de la bahía el mercurio que empleaba como catalizador para la producción industrial de acetaldehído provocando muchos afectados e incluso la muerte de algunos de ellos.

Otro incidente ocurrió en Iraq, en el año 1911. Iraq importó gran cantidad de semillas de cebada y trigo tratadas con un fungicida a base de metilmercurio (MeHg) y las distribuyó para su siembra en la primavera de 1912. A pesar de las advertencias oficiales, el grano fue molido y la harina se usó para hacer pan. Murieron 500 personas y más de 6500 fueron hospitalizadas (Lagos, 2014).

El mercurio es una neurotoxina, es decir, una sustancia tóxica que inhibe o altera gravemente las funciones del sistema nervioso. La forma en que afecta la salud depende de los siguientes factores:

- Forma del Mercurio (elemental, orgánico o inorgánico)
- Concentración de Mercurio al que la persona se expone
- Edad de la persona expuesta al mercurio
- Duración de la exposición
- Forma de la exposición (Inhalación, consumo, contacto)
- Salud de la persona

En este sentido, los efectos de la exposición al mercurio pueden ser muy severos, sutiles o pueden no manifestarse en absoluto. Todas las personas están expuestas a cierto nivel de mercurio. En la mayoría de los casos se trata de niveles bajos (OMS, 2017). Esto demuestra lo expandido que se encuentra el mercurio en el medio ambiente.

La exposición al mercurio (incluso a pequeñas cantidades) puede causar graves problemas de salud y es peligrosa para el desarrollo intrauterino y en las primeras etapas de vida. Puede ser tóxico para los sistemas nervioso e inmunitario, el aparato digestivo, la piel y los pulmones riñones y ojos, por tal motivo, para la OMS, el mercurio es uno de los diez productos o grupos de productos químicos que plantean especiales problemas de salud pública (OMS, 2017).

De acuerdo con (Lagos, 2014) algunos de los efectos del Mercurio en los diferentes sistemas del cuerpo humano en niños y adultos son los siguientes:

2.3.1 Efectos del Mercurio en niños

Bajo peso al nacer y prematuridad: Algunos estudios han demostrado que existe una relación entre la concentración de mercurio en sangre del cordón y el bajo peso al nacer y también con la prematuridad.

Alteraciones neurológicas: En el accidente de Minamata por la contaminación de Mercurio, se observó que los efectos del MeHg en los cerebros en desarrollo eran más difusos y extensos que en los adultos, debido a la afectación de los procesos de formación de microtúbulos, migración neuronal y división celular. Los niños afectados intraútero presentaban un cuadro análogo a una parálisis cerebral grave, con un importante retraso en el desarrollo, ceguera, sordera, y alteraciones del tono muscular y de los reflejos tendinosos profundos.

Otros efectos: Se han observado efectos negativos del Mercurio en el sistema cardiovascular. La exposición al MeHg afecta la variabilidad de la frecuencia cardiaca, mientras que los efectos sobre la presión arterial son inconsistentes.

2.3.2 Efectos del Mercurio en los adultos

Efectos Neurológicos: En adultos el daño provocado por MeHg se dirige a estructuras cerebrales específicas como la capa de células granulares de cerebelo y la corteza visual. Los signos clínicos más comunes que se observan en los adultos son parestesias periorales y distales, ataxia, estrechamiento del campo visual, problemas de audición, trastornos del habla y temblores de manos y pies. En los casos graves se produce una encefalopatía grave que conducía al coma y a la muerte.

Efectos sobre la reproducción: Últimos estudios han postulado que la exposición a mercurio puede contribuir a la esterilidad e infertilidad. La toxicidad del mercurio sobre la reproducción humana está demostrada con concentraciones elevadas.

Efectos sobre la inmunidad: Existen numerosos estudios que han mostrado efectos sobre la inmunidad en población expuesta a mercurio inorgánico y elemental. En grandes consumidores de pescado del Amazonas brasileño, la exposición al MeHg se ha asociado a un aumento de anticuerpos antinucleares.

Efectos Cardiovasculares: En el año 2010, la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) de EE. UU. convocó a un panel de expertos en Washington para revisar el impacto cardiovascular debido a la exposición al MeHg en la población general. Los miembros del panel en sus conclusiones recomendaron que, en relación a la exposición al MeHg y el infarto de miocardio, se desarrollara una función dosis-respuesta para su uso en futuras regulaciones sobre emisiones de mercurio.

La exposición al MeHg puede causar estrés oxidativo lo que puede llevar al desarrollo de la enfermedad cardiovascular por su contribución en las arritmias, hipertensión arterial y en el desarrollo de la placa aterosclerótica.

2.3.3 Efectos del Metilmercurio

El metilmercurio es una neurotoxina altamente tóxica para el cuerpo humano, especialmente para el sistema nervioso central y el periférico (OMS, 2017). Tras la inhalación o ingestión de distintos compuestos de mercurio o tras la exposición cutánea a ellos se pueden observar trastornos neurológicos y del comportamiento, con síntomas como temblores, insomnio, pérdida de memoria, efectos neuromusculares, cefalea o disfunciones cognitivas y motoras.

Otros síntomas del envenenamiento del mercurio pueden incluir:

- Pérdida de la visión periférica
- Sensaciones de cosquilleo en manos, pies y alrededor de la boca
- Falta de coordinación de movimientos
- Disfunción del habla, audición y capacidad de caminar
- Debilidad muscular

La exposición al metilmercurio ocurre con más frecuencia a través del consumo de pescado y mariscos que contienen altos niveles de metilmercurio en sus tejidos (EPA, 2024). Cuando una persona ingiere alimentos contaminados con metilmercurio, el estómago y los intestinos lo absorben y transportan rápidamente hasta el torrente sanguíneo. Desde allí entra de inmediato en el cerebro de un adulto, de un niño o de un feto en desarrollo. El metilmercurio se acumula en el cerebro y se va convirtiendo lentamente en mercurio inorgánico (elemental).

2.3.4 Efectos del Mercurio Elemental

El mercurio metálico principalmente afecta a la salud cuando se inhala como un vapor que puede absorberse hacia los pulmones. Los síntomas de exposiciones prolongadas y/o agudas incluyen:

- Temblores
- Cambios emocionales (como irritación, nerviosismo, timidez excesiva).
- Cambios neuromusculares

- Dolores de cabeza
- Perturbaciones en las sensaciones
- Disfunción en capacidades mentales

Mayores exposiciones también pueden afectar a los riñones, causar insuficiencia respiratoria y la muerte.

Las exposiciones más frecuentes ocurren cuando el mercurio metálico se derrama, o los productos que contienen mercurio metálico se rompen, de esa manera el mercurio queda expuesto en el aire.

2.3.5 Efectos del Mercurio Inorgánico

La alta exposición al mercurio inorgánico puede causar daños en el tracto gastrointestinal, el sistema nervioso y los riñones. Tanto el mercurio inorgánico como el orgánico son absorbidos hasta el tracto gastrointestinal y afectan a otros sistemas en el camino.

Los síntomas de las altas exposiciones al mercurio inorgánico incluyen:

- Erupciones en la piel y dermatitis
- Cambios de humor
- Pérdida de memoria
- Trastornos mentales
- Debilidad muscular.

Además de afectar al ser humano, el mercurio también afecta a especies animales que ingieren pescados o mariscos. Estudios de la EPA han encontrado mercurio en águilas, nutrias y panteras y animales en peligro de extinción.

2.3.6 Contaminación Acuática

El consumo de pescado con niveles muy altos de Metilmercurio provocó en los años 1950 una catástrofe ambiental y sanitaria de grandes dimensiones en la bahía de Minamata

(Japón), en la que los pescadores y sus familias desarrollaron una enfermedad grave que se conoció como “enfermedad de Minamata”. (Minamata, 2021)

Los problemas de salud pública que plantea el Metilmercurio en los pescados y mariscos son complejos, las diferentes variedades de estos productos pueden diferir en al menos 100 veces en su contenido promedio de mercurio.

Las consecuencias del mercurio para la pesca en pequeña escala y los medios de vida locales van más allá de los efectos en la salud e incluyen otros costos sociales, ambientales y económicos significativos, y las pruebas sugieren que la contaminación por mercurio repercute en el esfuerzo por unidad de captura a través de una disminución general de las poblaciones de especies comerciales de pescado, lo que puede afectar de manera sustancial a la rentabilidad de la pesca en pequeña escala. (acción, 2013)

Para abordar estas cuestiones, el estudio sugiere que se sigan desarrollando marcos como el Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica (SCAE) que ayuden con un enfoque sistemático a cartografiar los efectos naturales y monetarios de la contaminación por mercurio. La colaboración con plataformas como el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM), los convenios relacionados con la diversidad biológica y la iniciativa La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad (TEEB) puede contribuir a la gestión sostenible del medio ambiente mediante la incorporación de enfoques basados en los servicios de los ecosistemas y el capital natural.

“El mercurio es un potente neurotóxico y puede causar daños en el sistema nervioso central, temblores, problemas de coordinación motora, insomnio y puede provocar la muerte en casos agudos”

Anne Hélène Fostier

Investigadora científica biomédica.

2.4 MARCO LEGISLATIVO Y REGLAMENTARIO

La Ley de Medio Ambiente de 1998 (MARN, Cambio Climático, 2015) abarca las cuestiones generales relacionadas con los desechos; el Reglamento Especial en materia de

Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos (2000) se ocupa de estos últimos (MARN, 2000).

El Reglamento Especial considera que los desechos que contienen mercurio son peligrosos y hace referencia al Convenio de Basilea al indicar que las categorías contenidas en sus anexos también se consideran desechos peligrosos, así como las que se mencionan en los demás instrumentos jurídicos internacionales ratificados por el país. Asimismo, establece que quienes generen desechos peligrosos deben tomar medidas para minimizar la producción de desechos, para lo que deben aplicar las mejores tecnologías disponibles y desarrollar actividades y procedimientos que les permitan gestionar los residuos de forma sostenible.



Figura 7 Ruta de Mercurio en desechos

Fuente: Imagen obtenida de “Evaluación mundial de los desechos de mercurio” del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y ANÁLISIS

3.1 ALTERNATIVAS PARA GESTIÓN LÁMPARAS FLUORESCENTES DESECHADAS

Las lámparas fluorescentes desechadas son consideradas residuos peligrosos debido a la presencia de componentes que pueden ser altamente contaminantes para el medio ambiente y los ecosistemas acuáticos, causando graves problemas en la salud humana. Uno de estos componentes es el mercurio, un metal tóxico que estas lámparas contienen. Por esta razón, es fundamental que estos desechos sean gestionados de manera adecuada mediante procesos de recuperación, tratamiento y disposición final que minimicen el riesgo de contaminación para prevenir la liberación de mercurio y otros contaminantes en el entorno, protegiendo así la salud pública y el equilibrio ecológico.

Para una correcta gestión de residuos de lámparas fluorescentes es importante tener en cuenta la jerarquía de gestión integral de residuos.



Figura 8 Jerarquía de gestión de residuos

Fuente: Imagen obtenida de “Jerarquía de la gestión de residuos de construcción y demolición” (Admin Maat, 2018).

Por lo tanto, siguiendo el orden de prioridades de la jerarquía mostrada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los desechos de las lámparas fluorescentes deben ser gestionados de la siguiente manera:

Prevención: Reducir al mínimo la generación de residuos mediante la adopción de tecnologías más eficientes, como lámparas LED que tienen una vida útil más larga y no contienen mercurio

Reutilización: En este caso no es recomendable la reutilización de las lámparas fluorescentes debido a que no sería eficiente energéticamente, pues consumirían más energía y emitirían menos luz con el tiempo, además presentan un riesgo por contener mercurio.

Reciclaje: Recoger y reciclar las lámparas desechadas para recuperar materiales valiosos como el vidrio y el metal, así como para manejar de manera segura el mercurio contenido en ellas.

Recuperación de Energía: Como último recurso, si no es posible reciclar, los residuos pueden ser utilizados para generar energía, aunque este paso no es recomendable debido al potencial de liberar contaminantes.

Disposición Final: Solo cuando no se puede aplicar ninguna de las opciones anteriores, los residuos deben ser depositados en vertederos seguros y controlados, asegurándose de que el mercurio y otros contaminantes no se filtren al medio ambiente.

3.1.1 Manejo del Mercurio de acuerdo con el convenio de Basilea y Minamata

El manejo del mercurio comprende: Manipulación, Separación, Recolección, Empaque, Etiquetado, Transporte y Almacenamiento. (PNUMA, 2015)

- **Manipulación**

Según (PNUMA, 2015) los responsables de manipular desechos de mercurio deberán prestar especial atención a la prevención de la evaporación y el derrame de este material en el medio ambiente. Los desechos de mercurio deben almacenarse en contenedores herméticos al gas y estancos, que estén claramente identificados con una etiqueta que indique que contienen mercurio tóxico.

Para el almacenamiento del mercurio existen materiales de acero especialmente diseñados para este fin, debido a que el mercurio se amalgama con diferentes metales y que algunos plásticos son permeables a vapores de mercurio, por lo que se deben evitar. (PNUMA, 2015)

Los usuarios finales deben manipular de manera segura los productos de desecho de mercurio añadido e impedir su rotura o daño. No deben mezclarse con otros desechos y si se derraman debe aplicarse una limpieza adecuada.

- **Separación**

La separación y recogida de desechos de mercurio son factores fundamentales porque, si esos desechos son eliminados simplemente como desechos sólidos urbanos sin separarlos de ningún modo, el mercurio contenido en los desechos puede ser liberado al medio ambiente a causa del vertimiento o la incineración.

De acuerdo a (PNUMA, 2015) Los desechos de mercurio industriales se deben manejar como desechos peligrosos separadamente de otros desechos generados en las instalaciones industriales, de conformidad con la legislación nacional aplicable. El manejo por separado de estos desechos posibilita el tratamiento adecuado o bien para extraer el mercurio que contienen o para estabilizar los desechos para su debida eliminación sin diluir su contenido de mercurio.

(PNUMA, 2015) establece que, al constituir y ejecutar programas de recogida de desechos de mercurio, en particular de productos con mercurio añadido de desecho generados por hogares y entidades comerciales o institucionales, se deberán tomar en consideración los siguientes aspectos:

- ✓ Dar a conocer los programas, los lugares de depósito y el calendario de recogida a todos los posibles poseedores de desechos de mercurio.
- ✓ Dar tiempo suficiente para la ejecución de los programas de recogida a fin de completar la recogida de todos los desechos de mercurio incluidos en los programas.
- ✓ Incluir en los programas de recogida, siempre y cuando sea práctica, todos los desechos de mercurio.

- ✓ Poner a la disposición de los poseedores de los desechos de mercurio que requieran reempaque o aplicación de medidas de seguridad para el transporte los contenedores aprobados y materiales para el transporte seguro.
- ✓ Establecer mecanismos de recogida simples y de bajo costo.
- ✓ Velar por la seguridad tanto de los que llevan los desechos de mercurio a los depósitos como de los trabajadores de dichos depósitos.
- ✓ Asegurarse de que los operadores de los depósitos estén utilizando el método de eliminación aceptado.
- ✓ Velar por que los programas y las instalaciones cumplan todos los requisitos legislativos aplicables.
- ✓ Cerciorarse de que los desechos de mercurio queden separados de las demás corrientes de desechos.

El etiquetado de los productos que contienen mercurio puede contribuir a asegurar la debida separación. Los productores deberán establecer sistemas de etiquetado para los productos con mercurio añadido durante el proceso de fabricación de dichos productos para facilitar la identificación de los productos que contienen mercurio. Los sistemas de etiquetado de los productos con mercurio añadido también pueden exigir que las etiquetas incluyan instrucciones sobre el uso adecuado de dichos productos, así como instrucciones sobre la manipulación de desechos que alienten el reciclado y la eliminación adecuados. (PNUMA, 2015)

- **Recogida**

El mercurio a granel debe ser cuidadosamente empacado en contenedores adecuados antes de su envío a las instalaciones de almacenamiento o evacuación designadas.

Después de convertirse en desechos, los productos con mercurio añadido deberían recogerse separadamente de otros desechos y se deberá tratar de evitar la facturación o la contaminación lo más posible.

Ya que la cantidad de desechos generados por los hogares, por un lado, y por otras entidades que generan desechos (como empresas, gobiernos, escuelas y otras organizaciones)

por otro lado, son diferentes, se recomienda que los desechos generados por estos dos grupos sean recogidos por separado. (PNUMA, 2015)

(PNUMA, 2015) presenta tres opciones para la recogida de productos de desecho con mercurio añadido procedentes de los hogares:

- Puntos de recogida o de entrega de desechos

Los desechos que contienen mercurio se deberán descartar en contenedores diseñados especialmente en los puntos de recogida o depósitos para esos desechos a fin de evitar que se mezclen con desechos de otro tipo.

Se deberá poner a disposición del público cajas o contenedores para los desechos que contienen mercurio en los puntos de recogida de desechos. Los desechos que contienen mercurio, como lámparas fluorescentes y termómetros y pilas con mercurio añadido se deberán colocar solamente en contenedores de colores que indiquen que son para desechos.

Se deberá evitar la rotura de lámparas fluorescentes y termómetros, entre otras cosas, mediante el diseño adecuado de las cajas y la información por escrito sobre los procedimientos de recogida. Se deberán utilizar contenedores diferentes para las bombillas y las lámparas fluorescentes compactas. En el caso de las lámparas fluorescentes compactas, es importante minimizar la “caída libre” de las lámparas instalando deflectores o rebordes blandos en cascada. Otra posibilidad es que en una pequeña caja abierta se podría pedir a los usuarios que coloquen con cuidado sus bombillas gastadas dentro de la caja sin romperlas. Otra opción para reducir al mínimo la rotura de lámparas sería pedir a los consumidores que entreguen las lámparas fluorescentes a miembros calificados del personal del punto de recogida.

- Recogida en lugares públicos o puestos de venta

Los desechos que contienen mercurio podrán ser recogidos por vehículos de recogida diseñados especialmente o depositados en lugares públicos o en puestos de venta siempre y cuando se utilicen contenedores apropiados para la recogida. En los lugares públicos donde se depositarán solo deberán utilizarse contenedores destinados a desechos que contienen

mercurio y que hayan demostrado su capacidad para contener los vapores de mercurio de las lámparas rotas.

Las cajas y los contenedores para los desechos que contienen mercurio se deberán inspeccionar para garantizar que no se depositen otros tipos de desechos en ellos. Las cajas y los contenedores deberán llevar una etiqueta y colocarse en zonas donde se puedan inspeccionar

- Recogida en los hogares por los recolectores

Los operadores autorizados podrán recoger en los hogares ciertos dispositivos de desecho que contienen mercurio, como los desechos electrónicos que contienen mercurio. Para asegurar la eficacia de la recogida de estos desechos, frecuentemente hará falta establecer arreglos especiales o mecanismos legales que amparen a los operadores locales encargados de recogerlos.

- **Empaque y etiquetado**

Los desechos de mercurio que se transporten de los locales de los generadores o de los puntos de recogida pública hasta las plantas de tratamiento de desechos, habrá que empacarlos y etiquetarlos debidamente. El empaque y el etiquetado para el transporte suelen estar sujetos a controles establecidos en la legislación nacional, en caso de que no se cuente con legislación nacional o no aporte de la orientación suficiente se deberán consultar

los materiales de referencia publicados por los gobiernos nacionales, la IATA, la OMI y la CEPE. Se han elaborado normas internacionales sobre cómo etiquetar e identificar debidamente los desechos, por parte de la ONU se tiene el “Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos”. Y por parte del OCDE se cuenta con el “Sistema armonizado integrado de clasificación de peligros ambientales y para la salud humana de sustancias y mezclas químicas”.

- **Transporte**

Los desechos de mercurio deberán ser transportados evitando el derrame de mercurio. También se deberá llevar el debido control durante su transporte hasta que hayan llegado a su destino final.

Antes del transporte, se deberán preparar planes de emergencia para reducir al mínimo los efectos ambientales derivados de derrames, incendios y otras situaciones de emergencia potenciales. Durante el transporte, se deberán seleccionar, empaçar y transportar los

desechos de mercurio de conformidad con las Recomendaciones de las Naciones Unidas sobre el Transporte de Mercancías Peligrosas: Reglamento Modelo.

Las empresas que transportan desechos dentro de sus propios países deberán tener certificación como transportadores de materiales y desechos peligrosos y contar con personal calificado y facultado para manipular materiales y desechos peligrosos de conformidad con la legislación nacional o local aplicable. Los transportadores deberán manipular los desechos de mercurio de manera tal que impida roturas, liberaciones al medio ambiente y exposición a la humedad.

- **Almacenamiento**

Los desechos que contienen mercurio deberán ser almacenados temporalmente en los locales de los generadores de desechos hasta que sean recogidos para su evacuación. Los desechos que contienen mercurio se deberán almacenar en condiciones de seguridad y se mantendrán aparte de los demás desechos hasta que sean llevados a los puntos o instalaciones de recogida o hasta que sean recogidos por los programas de devolución o los contratistas.

Los generadores de desechos deberán almacenarlos por un tiempo limitado, como establecen las normas o reglamentaciones nacionales y, en todo caso, deberán enviarlos para su debida evacuación fuera del lugar tan pronto sea viable.

Los desechos domésticos que contengan mercurio, principalmente lámparas fluorescentes y otras lámparas, pilas con mercurio añadido y termómetros, deberán ser empacados debidamente y almacenados temporalmente. Todo mercurio derramado de dispositivos que se rompan durante la manipulación deberá limpiarse y todo material de

limpieza deberá ser mantenido en exteriores hasta que sean recogidos para su tratamiento ulterior.

Los usuarios de mercurio en gran escala, como los gobiernos, las empresas y las escuelas, tendrán también que elaborar planes para almacenar grandes cantidades de desechos que contienen mercurio. Cuando no se disponga de las cajas o envases originales, se deberán adquirir contenedores que estén diseñados especialmente para almacenar desechos que contienen mercurio. Los contenedores o las cajas para almacenar desechos que contienen mercurio se marcarán y fecharán para ser almacenados en un lugar seco dentro de un edificio se recomienda utilizar un lugar o local separado de las áreas de trabajo o áreas prohibidas al acceso público. Esas áreas no deben compartir sistemas de ventilación central con áreas de trabajo o de acceso público, y deben tener sus propios sistemas de ventilación o ventilarse directamente del exterior.

3.1.1.1 Deficiencias del Convenio de Basilea

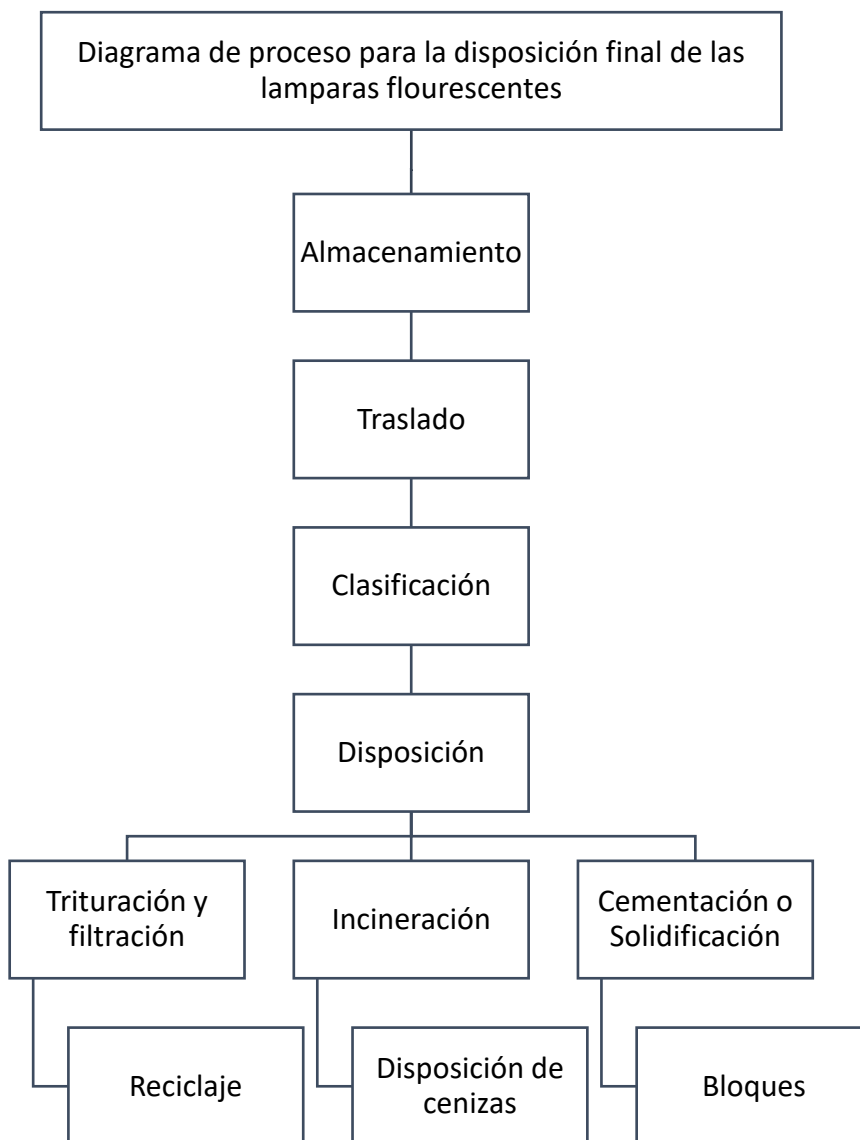
Las deficiencias del Convenio de Basilea se reducen principalmente a la influencia y dominio posiblemente injusto que los países desarrollados tienen sobre los países en desarrollo, y al desconocimiento de los países desarrollados del impacto que tienen en estas naciones más pobre (Shukla, 2020).

El lenguaje ambiguo permite a los exportadores identificar lagunas en el Convenio de Basilea y continuar exportando desechos tóxicos a países en desarrollo sin que sea técnicamente ilegal. Debido a la falta de uniformidad en las definiciones de terminología como "peligroso" y "residuo", los requisitos se dejan a la interpretación de cada Estado nación. Esto da a los exportadores la flexibilidad de explotar esto de manera que puedan continuar exportando residuos a países en desarrollo bajo el pretexto de que son "commodities". De esta manera, más desechos tóxicos terminan en los países en desarrollo, donde los trabajadores locales los separan, afectando su salud y la del medio ambiente circundante.

Como se mencionó anteriormente, gran parte de lo que se llama "residuos" tiene valor en otros lugares y se reutiliza y recicla. Por lo tanto, a los exportadores se les permite enviar sus desechos a países en desarrollo diciendo que se envían allí para ser reciclados en lugar

de simplemente ser vertidos. Esto se denomina reciclaje "falso" y es otra forma de comercializar legalmente residuos peligrosos. Incluso cuando los desechos se reciclan, muchos países en desarrollo carecen de las instalaciones y la tecnología para eliminar de manera segura las sustancias tóxicas, lo que nuevamente genera impactos adversos en la salud humana y el medio ambiente.

3.1.2 Alternativas de disposición para lámparas fluorescentes



3.1.2.1 Almacenamiento

El almacenamiento controlado de residuos peligrosos supone una vía de gestión, cuando su estado actual no permite una eliminación completa de estos o involucra mayores costos de operación.

Sin embargo, es una herramienta de gestión útil cuando no existe, o no es económicamente viable la adopción de otro tipo de alternativas

3.1.2.2 Incineración.

Este tipo de tratamiento sirve para determinados propósitos destrucción de residuos acompañada de una significativa reducción de la masa y el volumen de los mismos, generación de energía e incorporación de materiales a productos industriales. Asimismo, se debe destacar que la incineración también produce emisiones gaseosas conteniendo partículas, gases ácidos y otras sustancias cuya formación dependerá del tipo de residuos que se esté incinerando. (PNUMA PROTOCOLO , 2014)

Los factores que determinan la eficiencia de la incineración son: temperatura, tiempo y turbulencia

La problemática relacionada con este tipo de tratamiento radica en que las características del residuo; al contener Mercurio y ser este un metal pesado, lo hacen especialmente peligroso al momento de la incineración y se requerirían controles especiales para su manejo, los costos además de la implementación del incinerador se verían reflejados en las medidas ambientales que se tomarían, igualmente el remanente de cenizas, lodos y los efluentes líquidos provenientes de lavado tendría que ser tratado mediante otro sistema de tratamiento y disposición.

3.1.2.3 Cementación o Solidificación

Es un método de estabilización de residuos peligrosos que consiste en encapsular o inmovilizar los contaminantes dentro de una matriz sólida, generalmente utilizando cemento. Este proceso se emplea para evitar que sustancias peligrosas se liberen al medio ambiente. Para el caso de las lámparas fluorescentes primer es necesario hacer un tratamiento previo luego de la recolección a fin de separar el mercurio de los otros componentes y mezclarlo con el cemento.

- **Trituración (secundario)**

Las lámparas fluorescentes se trituran en un ambiente controlado para romperlas y liberar el mercurio. Esto se hace en sistemas cerrados diseñados para evitar la liberación de

mercurio al ambiente. Para ello las lámparas se introducen en una máquina trituradora equipada con sistemas de succión y filtración de aire. Al triturarse, los componentes de la lámpara se separan en tres partes principales: vidrio, metales (como los terminales de aluminio) y polvo de fósforo que contiene mercurio. El sistema de filtración captura los vapores de mercurio liberados durante la trituración. (R.M., 2001) (Habegger, 2008)



Figura 9 Ejemplo de máquina para trituración de lámparas fluorescentes.

Fuente: Extraído del manual de usuario “TERRACYCLE REGULATED WASTE: Triturador de Lámparas/Acero-Plástico” (GRAINGER, 2022).

- **Separación**

Después de la trituración los materiales pasan por una serie de tamices o cribas para separar los fragmentos de vidrio de los metales. Los metales, como el aluminio y otros ferrosos, se separan utilizando imanes o separadores electromagnéticos que atraen los metales y los separan del vidrio. El vidrio y los metales pueden ser reciclados (Abreo & Romero Restrepo, 2006)

- **Preparación y Cementación**

El mercurio recuperado se almacena en contenedores seguros, listos para ser estabilizados o tratados mediante cementación. El mercurio (en forma líquida o amalgamada)

y los materiales triturados se mezclan con cemento, agua y otros aditivos que ayudan a formar una matriz sólida y estable. (Abreo & Romero Restrepo, 2006)

La mezcla de cemento y mercurio se vierte en moldes o recipientes especiales para permitir su fraguado. Durante este proceso, la matriz de cemento solidifica, encapsulando las partículas de mercurio y evitando su liberación al medio ambiente. Finalmente, los bloques son transportados para disponerse en un relleno industrial. Los estándares para disponerse en el relleno industrial que se deben de cumplir según (Abreo & Romero Restrepo, 2006) son los siguientes:

- Se debe usar cemento hidráulico como agente de solidificación. Se necesitan más de 150kg de cemento por 1m³ de producto final.
- El producto final debe ser resistente a la fuerza de compresión libre por lo menos 10kg/cm²

- **Exportación de desechos de Mercurio**

La exportación de residuos de mercurio para su eliminación de forma amigable con el medio ambiente se presenta como una alternativa adecuada especialmente para los países como El Salvador donde no existe una infraestructura necesaria para la correcta disposición de estos desechos. Esta puede considerarse una solución provisional, hasta que se disponga de instalaciones adecuadas para el tratamiento, estabilización y disposición final de los residuos de mercurio. (ISWA, 2015)

Consideraciones legales

De acuerdo a (ISWA, 2015) las exportaciones de desechos peligrosos como el mercurio deben ser de acuerdo al convenio de Minamata, así como a las normas y procedimientos del convenio de Basilea. Bajo el convenio de Basilea las partes adoptarán las medidas apropiadas para garantizar que el movimiento transfronterizo de desechos peligrosos y otros desechos sólo se permita en las siguientes circunstancias:

- Transporte a través de fronteras internacionales bajo el convenio de Minamata Art. 11, 3C.

Cada parte tomará las medidas adecuadas que los desechos de mercurio requieren. (c) Para las partes en el Convenio de Basilea no debe exportarse a través de fronteras internacionales a excepción de fines de eliminación ambientalmente racional de conformidad con el presente artículo y convenio. En circunstancias que el convenio de Basilea no sea aplicable para la exportación, una parte deberá permitir dicho transporte teniendo en cuenta normas y directrices internacionales pertinentes. (Minamata, 2021)

- Transporte transfronterizo bajo el Convenio de Basilea, Art.9 (PNUMA PROTOCOLO , 2014)

Las partes tomarán las medidas apropiadas para asegurar que el movimiento transfronterizo de desechos peligrosos y otros desechos solo se permita si:

- a) El Estado de exportación no cuenta con la capacidad técnica ni las instalaciones necesarias o lugares de eliminación adecuados a fin de disponer de los desechos de una manera ambientalmente racional.
- b) Los desechos en cuestión son requeridos como materia prima para reciclaje o recuperación en industrias de importación del Estado.
- c) Los movimientos transfronterizos es en acuerdo con criterios dados de ambas partes, proveer estos criterios no difiere de los objetivos de este convenio.

El país importador debe contar con la infraestructura necesaria para gestionar los residuos de manera ambientalmente racional de acuerdo con su legislación nacional. Si el movimiento transfronterizo no se realiza de conformidad con los requisitos, podría considerarse un envío ilegal y podría ser devuelto al propietario.

Costos: Los costos de la posibilidad de exportación pueden variar de acuerdo a diversos factores, como, por ejemplo, el volumen de los desechos de mercurio, el precio del seguro, el embalaje, las aduanas, los gastos de transporte y envío, los costos de tratamiento, almacenamiento y eliminación en el país de destino.

Impactos ambientales positivos:

- ✓ Reducción de emisiones de Mercurio
- ✓ Se evita contaminación de mantos acuáticos y de suelos

- ✓ Se evita riesgo de exposición humana

Impactos ambientales negativos:

- Emisiones de CO₂ por transporte y operación en plantas de tratamiento.

3.1.2.4 Trituración y filtración sistema Bulb Eater 3L

El sistema Bulb Eater no solo tritura lámparas fluorescentes gastadas, sino que también captura más del 99.99% de los vapores liberados. El sistema, que está montado en un tambor de 55 galones, puede contener hasta 1350 lámparas fluorescentes de 4'. (Habegger, 2008)

Un proceso de filtrado de cuatro etapas elimina las partículas y vapores peligrosos. Un estudio reciente mostró niveles no detectables de vapor de mercurio emitido después de aplastar 1700 lámparas. Un panel de control digital brinda al operador mayor seguridad al monitorear varios aspectos de la máquina para garantizar mejor la seguridad del operador.



Figura 10 Partes de la máquina y controles integrados.

Fuente: Extraído del manual de control de Bulb Eater™ (BULB EATER, 2024)

Múltiples puntos de detección que ayudan con el diagnóstico de la máquina y el mantenimiento/ cambios de filtros

- (1) Motor CC aplasta lámparas de 1´ a 8´ de largo en menos de un segundo
- (2) Los tubos de entrada extraíbles se adaptan a todas las longitudes y diámetros de las lámparas lineales. El ángulo más bajo y la altura de entrada mejoran la comodidad del operador
- (3) Panel de control digital con pantalla LCD y códigos de falla de autodiagnóstico
- (4) El conducto extraíble de tubo CF/U que permite lámparas de cualquier tamaño
- (5) Nuevo sistema de filtro de 4 etapas.
 - a. El filtro de cartucho mejorado atrapa cualquier partícula fina (1º etapa)
 - b. El filtro HEPA reemplazable de doble acción eliminó las partículas (2º y 3º etapa)
 - c. El filtro de carbón se activa de la 3ra etapa captura y neutraliza los vapores de mercurio liberados durante la trituración controlada de las lámparas.
- (6) El tambor de 55 galones (se vende por separado) tendrá capacidad para aproximadamente 1,350 lámparas trituradas T8 de cuatro pies para reducir los requisitos de almacenamiento y manejo antes del reciclaje.

Reciclaje:

El sistema Bulb Eater 3L cuenta con un programa de reciclaje y disposición del mercurio alojado en los tambores llenos, pues la empresa propietaria cuenta con un servicio de recolección de TerraCycle Regulated Waste mediante un formulario podemos establecer fechas y acuerdos para su recolección

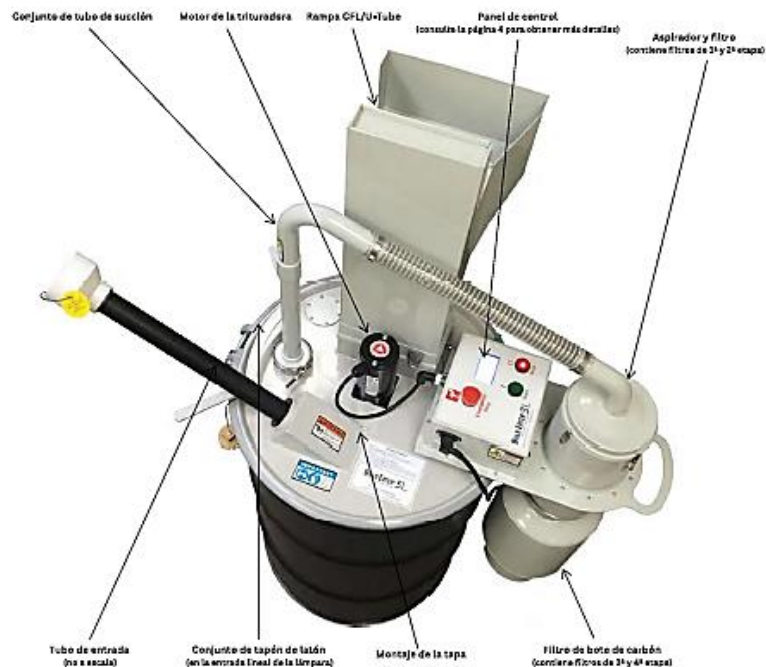


Figura 11 Partes de la maquinaria

Fuente: Imagen obtenida del manual de usuario “TERRACYCLE REGULATED WASTE: Triturador de Lámparas/Acero-Plástico” (GRAINGER, 2022).

3.1.3 Análisis de factibilidad e impacto ambiental

La siguiente tabla, muestra la calificación que se le da a cada tipo de tratamiento, relacionado con los factores que se verían afectados en el proceso de implementación de los tratamientos propuestos.

Tabla 4 Criterios para selección de las alternativas de tratamiento de lámparas fluorescentes

Criterios	Alternativas Propuestas			
	A1	A2	A3	A4
Ruido debido al proceso	1	2	1	3
Daños a especies animales	0	2	0	0
Dimensiones físicas de la alternativa	2	3	2	1
Impacto en la calidad del aire	0	4	0	1
Contaminación del agua	0	2	1	0

Monto de los costos de implementación	4	3	5	5
Total	7	16	9	8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5 Escala de clasificación de las alternativas

Escala de clasificación		Donde: A1: Solidificación A2: Incineración A3: Almacenamiento A4: Trituración
Valor	Nivel de Impacto	
0	No aplica	
1	Bajo	
2	Medio	
3	Medio Alto	
4	Alto	
5	Muy Alto	

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, las dos alternativas que son descartadas por sus grandes impactos ambientales son, la Incineración y el Almacenamiento, por lo que estas no serán consideradas en las siguientes evaluaciones, avanzaremos ahora con la evaluación económica de la alternativa de Trituración y Solidificación (Cementación)

3.1.3.1 Evaluación Económica de la cementación

Tabla 6 Costos de tratamiento por cementación

Costos iniciales	
	Costo (\$)
Equipos y Maquinaria	
Trituradora de Lámparas	\$50,000.00
Sistemas de captura y filtración de mercurio	\$280,000.00
Preparación del sitio	\$100,000.00
Equipo para cementación	\$50,000
Total	\$480,000.00
Costos Operativos	
Mano de Obra (suponiendo 5 operadores especializados)	\$37,500.00
Equipo de protección personal	\$20,000.00

Cemento y Aditivos	\$200,000
Mantenimiento y servicios básicos	\$25,000
Transporte y Almacenamiento	\$25,000
Total	\$307,500.00
Ingresos Anuales	
Tarifa por Tonelada de lámpara procesada	\$1000
Volumen anual de 500 TM	\$ 500,000.00

Fuente: Elaboración propia.

Las ganancias anuales y el tiempo de recuperación se calculan de la siguiente manera:

$$Ganancia_{anual} = Ingresos - Costos Operativos$$

$$T_{de\ recuperacion} = \frac{Inversión\ inicial}{Ingresos}$$

Por lo tanto:

Ganancias anuales	\$ 192,500.00
Tiempo de recuperación de Inversión inicial	4.09 años

- **Impactos ambientales**

Positivos:

- ✓ Inmovilización del Mercurio
- ✓ Diminución de emisiones de Mercurio
- ✓ Se evita contaminación de mantos acuáticos.

Negativos:

- ✓ Generación de residuos sólidos
- ✓ Alto consumo de energía y CO2

1.6.9.2 Evaluación Económica de la trituración

Realizando la cotización para el sistema Bulb Eater se tiene:

Costo de maquina completa: \$4,240.000 tanto para sistema de 120V como 240V

(Ver Cotización en ANEXO 2) esta se realiza en función del filtro para absorber el mercurio, que tiene la capacidad para 1350 lámparas, por lo tanto:

Tabla 7 Evaluación económica de trituración

Costos iniciales	
Equipos y Maquinaria	Costo (\$)
Trituradora de Lámparas con sistema de captura y filtración de mercurio	\$4,240.00
Preparación del sitio	\$1,000.00
Total	\$5,240.00
Costos Operativos	
Mano de Obra (suponiendo 2 operadores especializados)	\$800.00
Equipo de protección personal mantenimiento	\$1,000.
Transporte y Almacenamiento	\$2,000
Total	\$3,800.00
Ingresos Anuales	
Tarifa por unidad neta	\$2.43
Tarifa con ganancia (60%)	\$3.90
Volumen de 1360 UN	\$5,304.0

Fuente: Elaboración propia.

Calculando ganancia: $Ganancia (60\%) = 2.43 + (2.43 * 0.60) = \$ 3.90$

Calculando la ganancia con:

$$Ganancia_{Para\ 1\ filtro} = Ingresos - Costos\ Operativos$$

Por lo tanto: Ganancias por filtro \$ 3,723.00

Conclusiones de la evaluación económica:

Aunque la Cementación es una buena alternativa, requiere de una gran inversión inicial y de un espacio amplio para la realización del sistema, en cambio la trituración es una alternativa manejable transportable y no se requiere de una inversión muy grande

3.1.4 Evaluación amplia de alternativas y desarrollo

Se optó por la alternativa de trituración sobre incineración y solidificación, debido a que es el tratamiento más factible de acuerdo al análisis de propuestas de tratamiento de desechos realizado.

Se descarta la alternativa de solidificación, teniendo en cuenta que la solidificación demanda un volumen mayor al momento de su disposición, ya que 1/3 de la solidificación es el estabilizante, y solamente 2/3 corresponden a los desechos de lámparas fluorescentes. Se descarta la alternativa de incineración, debido a que el residuo de lámparas fluorescentes generaría una mayor contaminación teniendo que tratar además de las lámparas fluorescentes desechadas, los remanentes de la incineración o cenizas y las emisiones al medio ambiente, además el tratamiento por incineración implicaría costos elevados.

Para cualquiera de los tratamientos es necesaria la disposición final controlada de sus remanentes, por lo tanto, el almacenamiento controlado de desechos es obligatorio. El análisis de alternativas para el manejo de desechos de lámparas fluorescentes se basa en que sean aplicables técnicamente, ambientalmente y económicamente como fundamento para la elección de la alternativa.

En conclusión, los desechos de lámparas fluorescentes se pueden tratar por dos de las alternativas propuestas: La primera de ellas es la trituración para minimizar el volumen de las lámparas fluorescentes y la segunda alternativa es el almacenamiento controlado para la posterior disposición final.

3.1.4.1 Etapas del proceso a implementar.

El proceso se llevará a cabo a través de tres etapas fundamentales:

1) Recepción de los desechos a procesar: Esta será la primera etapa del proceso, se recibirán todas las lámparas que entrarán al proceso de tratamiento de desechos.

2) Separación de componentes: Los componentes de los tubos fluorescentes serán separados para ser procesados.

3) Recuperación de Mercurio: En esta última etapa del proceso el Mercurio será sometido a un proceso químico por medio del cual podrá ser recuperado y purificado.

3.1.4.2 Descripción del funcionamiento del sistema

El orden de las etapas del proceso será el siguiente:

1. Las lámparas fluorescentes serán introducidas al sistema
2. Los tubos fluorescentes serán calentados por un quemador lineal de gas, el cual estará ubicado de forma paralela a la banda, el quemador de gas calentará los extremos de los tubos para ablandarlos.
3. Una vez que los extremos de los tubos sean calentados por el quemador, dos discos de diamante cortarán los casquillos metálicos de los tubos fluorescentes.
4. Los casquillos metálicos serán recolectados por contenedores ubicados cerca de la banda transportadora.
5. Los tubos fluorescentes sin casquillos metálicos y sin polvo de fósforo serán triturados por una trituradora industrial de 4 rodillos.
6. Luego de que los tubos sean triturados, los residuos serán transportados por una banda transportadora en la cual estará instalado un separador magnético, el cual atraerá los residuos metálicos y los arrastrará hacia un contenedor para residuos metálicos, y los residuos que no sean arrastrados por el separador viajarán hasta el final de la banda transportadora en donde estará ubicado un contenedor para residuos no metálicos.
7. El vapor de Mercurio que salga en el proceso de trituración será capturado a través de un sistema de filtros HEPA y filtros de carbón activado.
8. El polvo de vidrio con Mercurio obtenido de los tubos fluorescentes en el proceso de succión por vacío y el vapor de Mercurio capturado en los filtros serán enviados a una retorta para ser procesados y luego pasar a ser destilado para su purificación y reutilización.

3.1.4.3 Características del triturador

Facilidad de operación, Funcionamiento seguro para los operarios, Versatilidad, Confiabilidad, Portabilidad, Fácil instalación de sus elementos, Ocupación de un mínimo espacio, Ergonómico, De larga vida útil, Repuestos fáciles de conseguir, Mantenimiento sencillo.

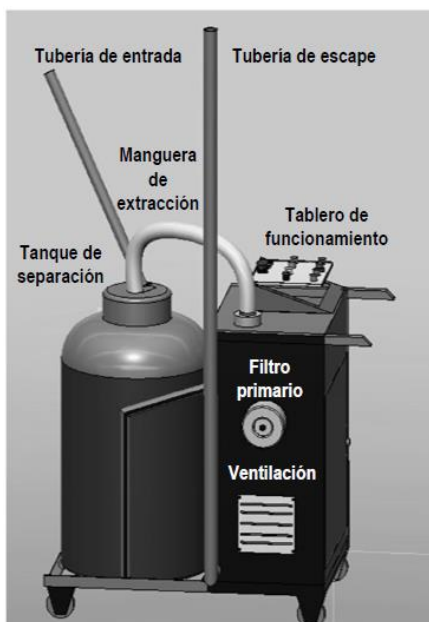


Figura 12 Maquinaria de trituración esquema básico

Fuente: Obtenido de la revista tecnológica “Triturador de Tubos y Lámparas fluorescentes en desuso”, (Chimin, 2016).

Especificaciones Técnicas:

<p>Procesamiento: Tasa de: 0,4 a 0,8 lámparas/minuto, variable con el tipo de lámpara y práctica del operador.</p> <p>Capacidad de trabajo: 960 unidades por día.</p> <p>Capacidad del triturador de 200L:</p>
<p>1360 lámparas (Tubo fluorescentes 1220 mm, diámetro 25,4 mm).</p>
<p>2700 lámparas (Tubos fluorescentes 501 mm, diámetro 25,4 mm).</p>
<p>1400 Focos ahorradores.</p>
<p>Unidad de trituración: Motor del triturador - 1 HP -220v Monofásico.</p>
<p>Bomba de vacío: 1 Hp 220v monofásico.</p>

Figura 13 Especificaciones técnicas teóricas para un triturador de lámparas fluorescentes

Fuente: Obtenido de la revista tecnológica “Triturador de Tubos y Lámparas fluorescentes en desuso”, (Chimin, 2016).

- Filtro de Partículas (Rodríguez & RM, 2001)

Los filtros HEPA están compuestos por una malla de fibras de vidrio dispuestas al azar y con diámetros entre 0,5 y 2,0 μm . Los factores más importantes a tener en cuenta en un filtro HEPA son el diámetro de las fibras, el espesor del filtro y la velocidad de las partículas. El espacio entre las fibras es mucho mayor de 0,3 μm , pero eso no significa que las partículas con un diámetro menor puedan pasar. A diferencia de los filtros de membrana los filtros HEPA están preparados para retener contaminantes y partículas mucho más pequeñas, que son atrapadas (se adhieren a una fibra) mediante una combinación de los siguientes mecanismos:

- Intercepción: Donde las partículas que siguen un flujo de aire rozan las fibras y se adhieren a ella.
- Impacto: Donde las partículas grandes no son capaces de evitar las fibras mientras siguen al flujo de aire y son obligadas a impactar directamente con una de ellas. Este efecto aumenta con la disminución de la separación entre fibras y el aumento de velocidad en el flujo de aire.
- Difusión: Partículas muy pequeñas de 0,1 μm , colisionan con las moléculas de gas lo que impide y retrasa su paso por el filtro. Este comportamiento es

similar al movimiento browniano y aumenta la probabilidad de que una partícula sea detenida por uno de los dos mecanismos anteriores. Es la más dominante cuando el flujo de aire es lento. La difusión predomina en partículas inferiores a $0,1 \mu\text{m}$ de diámetro. La intercepción y el impacto predominan en partículas mayores de $0,4 \mu\text{m}$. Para partículas con un tamaño intermedio, $0,3 \mu\text{m}$ es el tamaño de partícula más penetrante (en inglés: Most Penetrating Particle Size), la difusión y la intercepción son bastante ineficientes. Las especificaciones de los filtros HEPA utilizan la retención de estas partículas intermedias para definir el tipo de filtro.

- Filtro de carbón activado

Son útiles para separar de cualquier fluido, polvos y residuos. El carbón puede activarse mediante procesos térmicos o químicos.

- Disposición de los filtros

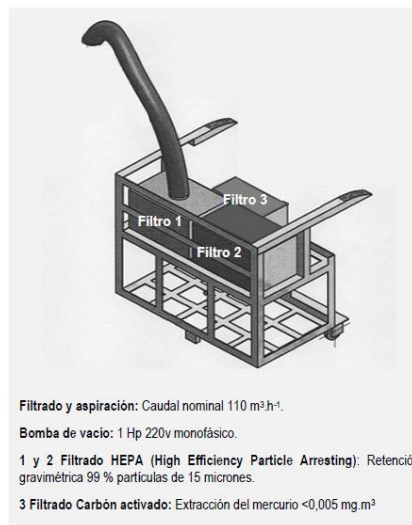


Figura 14 Filtro de máquina de trituración

Fuente: Imagen obtenida de la revista tecnologica TRITURADOR DE TUBOS Y LÁMPARAS FLUORESCENTES EN DESUSO Chimín, M. D. (2016).

- Circuito de control

El circuito de mando del arrancador se compone de un cuadro de botones (arranque) y (stop), que conecta la bobina del interruptor magnético el bloque de contacto y los bloques

de la protección térmica, el circuito de mando sirve para gobernar todo el circuito propiamente dicho. Está compuesto por un botón de emergencia y de dos botones (star) (stop), donde el botón de emergencia está conectado a L1 por mediación del fusible y del mismo a (star) y (stop), de la misma conexión se conecta al contacto auxiliar (CA), y a un transformador, también las luces en paralelo con (A1, A2) del contactor 1 y del contactor 2. Las luces de emergencia se encenderán solo si se para la bomba o el motor. (R.M., 2001)

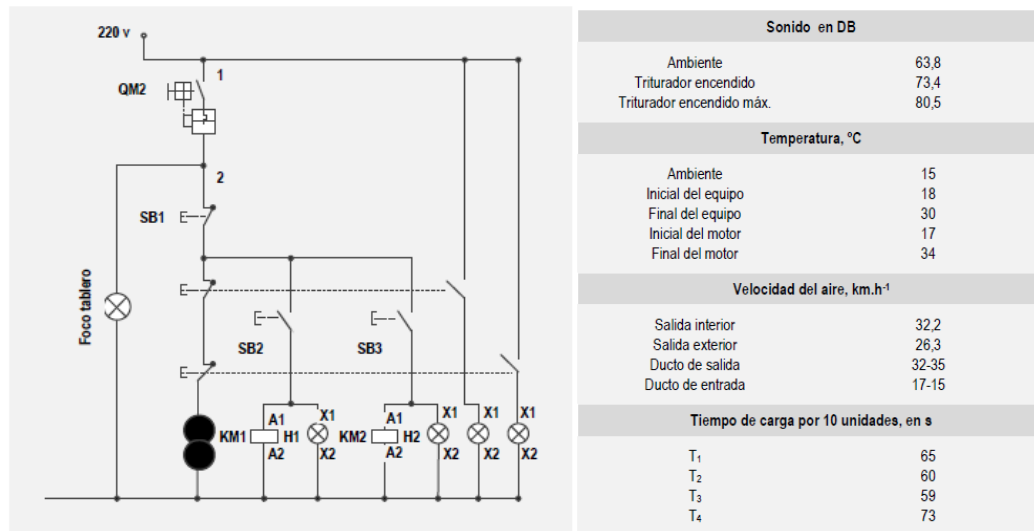


Figura 15 Circuito de Control y Pruebas de funcionamiento.

Fuente: Imagen obtenida de la revista tecnologica TRITURADOR DE TUBOS Y LÁMPARAS FLUORESCENTES EN DESUSO Chimin, M. D. (2016).

3.1.4.4 Impacto Ambiental:

- **Cálculo de emisión de CO₂ durante el proceso de trituración:**

El uso de la maquina será de 7 horas diarias seguidas (turnos de 9 A.M a 4 P.M), 5 días a la semana (semana laboral normal), 48 semanas al año.

De las especificaciones sabemos que tratamos con 1Hp de potencia. Por lo que el cálculo será:

$$1.4 \text{ Hp} * 0.7457 \frac{\text{kWh}}{\text{Hp}} * \left(7 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} * 5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} * 48 \frac{\text{semana}}{\text{año}} \right) = 1,252.78 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Sabiendo que el factor de emisión es de $0.000747 \frac{\text{ton CO}_2}{\text{kWh}} \approx 0.6779 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}}$

$$1,252.78 \frac{kWh}{año} * 0.6779 \frac{kg CO_2}{kWh} = 849.26 \frac{kg CO_2}{año} = 0.9361 \frac{Ton CO_2}{año}$$

Se espera que el uso anual de la máquina trituradora de lámparas fluorescentes genere 0.9364 Toneladas de CO2 anuales para un promedio de 1,350 lámparas trituradas por día.

- **Cálculo de Emisión de CO₂ por transporte:**

Para obtener el precio por viaje, se calcula con los siguientes datos para un vehículo pick up:

Tabla 8 Datos para los cálculos de emisión de CO2 por transporte

Capacidad máxima:	650 kg
Capacidad de gasolina del tanque:	0.16 Lt/km
Distancia a recorrer:	7.2 km de recorrido hasta Recicladora La Centroamericana
Factor de emisión (gasolina):	69.3Ton CO ₂ /TJ
Poder Calorífico de la gasolina:	44.3 MJ/kg
Densidad de la gasolina:	0.748 kg/Lt

Fuente: Elaboración propia.

$$Emisión = 44.3 \frac{MJ}{kg} * 0.748 \frac{kg}{lt} * 10^{-6} \frac{TJ}{MJ} * 69.3 \frac{Ton CO_2}{TJ} = 0.002296 \frac{Ton CO_2}{lt}$$

Para obtener la emisión por recorrido:

$$0.16 \frac{lt}{km} * 7.2 km * 0.002296 \frac{Ton CO_2}{lt} = 0.002645 Ton CO_2$$

Como el cálculo para la emisión esta presentado anualmente:

$$0.002645 \frac{Ton CO_2}{bimestre} * 6 \frac{bimestre}{año} = 0.01587 \frac{Ton CO_2}{año}$$

Notas adicionales:

Para realizar los cálculos del impacto ambiental por uso de ruta de transporte de residuos, se asumieron las ubicaciones de trayectoria de ruta, donde el punto de salida sería Mr. Bodeguitas, cuya ubicación es en Alameda Juan Pablo II, San Salvador, hasta la Recicladora La Centroamericana, cuya ubicación es en la Alameda Juan Pablo II y Calle Concepción #835, esquina opuesta del Colegio Divina Providencia, San Salvador.

De no realizar este tratamiento y solo desechar las lámparas en, por ejemplo, el basurero “Bella Vista de Monserrat”, asumiendo el punto de partida sea la Universidad Nacional (esto para comprobar la emisión por un trayecto de 5.4 km.) y según estadísticas de la RAEE, para el año 2023 se generaron 36,896.86 ton/año y de esta cantidad 8.5% fueron lámparas fluorescentes.

$$36,896.86 \frac{\text{ton}}{\text{año}} * 8.5\% = 3,136.23 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

$$3,136.23 \frac{\text{ton}}{\text{año}} * 0.16 \frac{\text{lt}}{\text{km}} * 5.4 \text{ km} * 0.002296 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{lt}}$$

$$= 6.2214 \frac{\text{Ton } CO_2}{\text{año}} * \text{Ton lámpara}$$

Como podemos observar, generamos menor emisión de CO₂ al reciclar los residuos individuales que al desecharlas directamente.

- **Cálculo de emisiones de CO₂ que se evitan al reciclar:**

- Aluminio:

Según datos de RESURJA (RESURJA, 2019):

1 kg de perfil de aluminio anodizado (utilizado en la fabricación de las lámparas fluorescentes) lleva asociado 11,8kg de CO₂ desde el inicio del proceso de extracción hasta que el producto está listo para entrega; mientras que su reciclado supone una reducción de 4,0 kg de CO₂, dando un valor neto de 7,8 kg de CO₂ si se tiene en cuenta el ciclo de vida completo del perfil.

$$7.8 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg Al}} * 26.9953 \text{ kg de Al} = 210.536 \frac{\text{kg de } CO_2}{\text{mensualmente}}$$

Por lo que al reciclar 26.9953 kg de aluminio se va evitan 210.563 kg de CO₂ cuando se vuelvan a utilizar.

- Vidrio:

Cada tonelada de desechos de vidrio que se recicla evita que 315 kilogramos de dióxido de carbono se liberen a la atmósfera durante la fabricación de vidrio (WASTE ONLINE, 2011)

$$315 \frac{kg CO_2}{Ton vidrio} * 0.001102 \frac{Ton vidrio}{kg vidrio} * 242.957 \frac{kg vidrio}{mes} = 84.3376 \frac{kg CO_2}{mes}$$

Por lo que al reciclar 242.957 kg de vidrio se evitan 84.3376 kg de CO₂ cuando se vuelvan a utilizar.

Tabla 9 Resumen de emisiones de CO₂ evitadas por reciclar

Emisión de reciclaje de aluminio	210.536 $\frac{kg CO_2}{mes}$
Emisión de reciclaje de vidrio	84.3376 $\frac{kg CO_2}{mes}$
TOTAL	294.8736 $\frac{kg CO_2}{mes}$

Fuente: Elaboración propia.

Al reciclar el aluminio y el vidrio de las lámparas fluorescentes estamos evitando la emisión de 294.8736 kg de CO₂ mensuales o 3,538.4832 kg de CO₂ anuales.

Por lo que podemos inferir que tratar las lámparas fluorescentes con el método de trituración genera una menor cantidad de kg de CO₂ que sin tratarlas.

3.1.4.5 Evaluación económica

- **Cálculo de costos e ingresos por la venta de aluminio y metal reciclado:**

La lámpara tiene una masa de 200 gramos, de los cuales 0.035 gramos corresponden al mercurio utilizado. Por lo que:

$$200 g - 0.035g = 199.965 \text{ gramos}$$

De este resultado, el 10% es de aluminio y el 90% de vidrio:

$$199.965 \text{ gramos} * 10\% \text{ aluminio} = 19.9965 \text{ gramos de aluminio}$$

$$199.965 \text{ gramos} * 90\% \text{ vidrio} = 179.969 \text{ gramos de vidrio}$$

No se esperan pérdidas significativas de vidrio dentro del triturador, por lo que la cantidad de vidrio y aluminio que entra es la misma que sale:

$$\text{Masa de vidrio a la entrada} = \text{Masa de vidrio a la salida} = 179.969 \text{ gramos}$$

$$\text{Masa de aluminio a la entrada} = \text{Masa de aluminio a la salida}$$

$$= 19.9965 \text{ gramos}$$

Según el manual de usuario de Bulb Eater, se espera que el equipo triture 1350 lámparas mensualmente, lo que significa que estamos recuperando:

$$179.969 \text{ gramos de vidrio} * 1350 \text{ lamparas} = 242,957 \text{ gramos}$$

$$= 242.957 \text{ kg de vidrio}$$

$$19.9965 \text{ gramos de Al} * 1350 \text{ lamparas} = 26,995.3 \text{ gramos} = 26.9953 \text{ kg de Al}$$

En total, mensualmente, los residuos generados son 269.952 kg de residuos combinados.

Para establecer los ingresos, seleccionamos a la Recicladora “La Centroamericana”, cuya ubicación es en la Alameda Juan Pablo II y Calle Concepción #835, esquina opuesta del Colegio Divina Providencia. San Salvo. Según precios cotizados por en esta recicladora, el kilogramo de aluminio está en \$0.88 y el vidrio a \$0.31.

$$26.9953 \text{ kg de aluminio} * \frac{\$0.88}{\text{kg de aluminio reciclado}} = \$23.76$$

$$242.957 \text{ kg de vidrio} * \frac{\$ 0.31}{\text{kg de vidrio reciclado}} = \$75.32$$

Por lo que, al decidir vender los residuos generados durante el proceso de trituración, se espera un ingreso mensual de USD\$23.76 por el aluminio y USD\$75.32 por el vidrio, generando una ganancia total de USD\$ 99.07 mensuales.

3.1.4.6 Flujo financiero

En el caso hipotético de usar un filtro por mes, podemos establecer este flujo de caja lo que muestra que en la compra del segundo filtro se puede obtener la recuperación total de la compra de la máquina inicial (considerando un margen de error de -10).

Análisis de presupuesto de flujo financiero

Tabla 10 Análisis de rentabilidad para el proyecto mediante el método del flujo de caja.

Mes	0	1	2	3	4	5	6	7
Precio de venta		\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90
Unidades en total		1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Ingresos por venta		\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00
Venta de activos		\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07
Ingresos totales	\$ 4,192.00	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07
Costos								
Costos de insumo		\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00
Costos iniciales	\$ 5,240.00							
Costos operativos		\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00
TOTAL		\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00
Intereses		\$ 24.45	\$ 23.50	\$ 22.54	\$ 21.58	\$ 20.61	\$ 19.64	\$ 18.66
Utilidad antes de impuesto		\$ 1,080.24	\$ 1,081.19	\$ 1,082.15	\$ 1,083.11	\$ 1,084.08	\$ 1,085.05	\$ 1,086.03
Depreciación		\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38
ISR		\$ 140.43	\$ 140.55	\$ 140.68	\$ 140.80	\$ 140.93	\$ 141.06	\$ 141.18
Amortización		\$ 163.23	\$ 164.19	\$ 165.14	\$ 166.11	\$ 167.08	\$ 168.05	\$ 169.03
Utilidad después de impuesto		\$ 939.81	\$ 940.63	\$ 941.47	\$ 942.31	\$ 943.15	\$ 944.00	\$ 944.85
Flujo de efectivo	-\$ 1,048.00	\$ 940.95	\$ 940.83	\$ 940.70	\$ 940.58	\$ 940.45	\$ 940.33	\$ 940.20

Tabla 10 Análisis de rentabilidad para el proyecto mediante el método del flujo de caja (Continuación).

Mes	8	9	10	11	12	13	14	15
Precio de venta	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90
Unidades en total	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Ingresos por venta	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00
Venta de activos	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07
Ingresos totales	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07
Costos								
Costos de insumo	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00
Costos iniciales								
Costos operativos	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00
TOTAL	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00
Intereses	\$ 17.67	\$ 16.68	\$ 15.68	\$ 14.68	\$ 13.67	\$ 12.65	\$ 11.63	\$ 10.61
Utilidad antes de impuesto	\$ 1,087.02	\$ 1,088.01	\$ 1,089.01	\$ 1,090.01	\$ 1,091.02	\$ 1,092.04	\$ 1,093.06	\$ 1,094.08
Depreciación	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38
ISR	\$ 141.31	\$ 141.44	\$ 141.57	\$ 141.70	\$ 141.83	\$ 141.96	\$ 142.10	\$ 142.23
Amortización	\$ 170.02	\$ 171.01	\$ 172.01	\$ 173.01	\$ 174.02	\$ 175.03	\$ 176.05	\$ 177.08
Utilidad después de impuesto	\$ 945.71	\$ 946.57	\$ 947.44	\$ 948.31	\$ 949.19	\$ 950.07	\$ 950.96	\$ 951.85
Flujo de efectivo	\$ 940.07	\$ 939.94	\$ 939.81	\$ 939.68	\$ 939.55	\$ 939.42	\$ 939.29	\$ 939.15

Tabla 10 Análisis de rentabilidad para el proyecto mediante el método del flujo de caja (Continuación).

Mes	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Precio de venta	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90	\$ 3.90
Unidades en total	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Ingresos por venta	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00	\$ 5,265.00
Venta de activos	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07	\$ 99.07
Ingresos totales	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07	\$ 5,364.07
Costos									
Costos de insumo	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00	\$ 295.00
Costos iniciales									
Costos operativos	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00	\$ 3,800.00
TOTAL	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00	\$ 4,095.00
Intereses	\$ 9.57	\$ 8.53	\$ 7.49	\$ 6.44	\$ 5.38	\$ 4.32	\$ 3.25	\$ 2.17	\$ 1.09
Utilidad antes de impuesto	\$ 1,095.12	\$ 1,096.16	\$ 1,097.20	\$ 1,098.25	\$ 1,099.31	\$ 1,100.37	\$ 1,101.44	\$ 1,102.52	\$ 1,103.60
Depreciación	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38	\$ 164.38
ISR	\$ 142.37	\$ 142.50	\$ 142.64	\$ 142.77	\$ 142.91	\$ 143.05	\$ 143.19	\$ 143.33	\$ 143.47
Amortización	\$ 178.11	\$ 179.15	\$ 180.20	\$ 181.25	\$ 182.31	\$ 183.37	\$ 184.44	\$ 185.52	\$ 186.60
Utilidad después de impuesto	\$ 952.75	\$ 953.66	\$ 954.57	\$ 955.48	\$ 956.40	\$ 957.33	\$ 958.26	\$ 959.19	\$ 960.13
Flujo de efectivo	\$ 939.02	\$ 938.88	\$ 938.75	\$ 938.61	\$ 938.47	\$ 938.33	\$ 938.20	\$ 938.06	\$ 937.92

Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia Análisis de presupuesto inicial

Tabla 11 Datos de Inversión

Concepto	Total	Préstamo	Capital propio
Inversión	\$ 5,240.00	\$ 4,192.00	\$ 1,048.00
Préstamo	80% de la inversión		
Periodo	24 Meses		
Tasa de interés	0.07	0.01	Mensual
Deuda inicial	\$ 4,192.00	80% de inversión	
Cuota	\$ 187.69	\$ 187.69	Mensual

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12 Calculo de la cuota de amortización para un préstamo

Deuda	Cuota	Interés	Amortización	Mes
\$ 4,192.00	\$ 187.69	\$ 24.45	\$ 163.23	1
\$ 4,028.77	\$ 187.69	\$ 23.50	\$ 164.19	2
\$ 3,864.58	\$ 187.69	\$ 22.54	\$ 165.14	3
\$ 3,699.44	\$ 187.69	\$ 21.58	\$ 166.11	4
\$ 3,533.33	\$ 187.69	\$ 20.61	\$ 167.08	5
\$ 3,366.26	\$ 187.69	\$ 19.64	\$ 168.05	6
\$ 3,198.21	\$ 187.69	\$ 18.66	\$ 169.03	7
\$ 3,029.18	\$ 187.69	\$ 17.67	\$ 170.02	8
\$ 2,859.16	\$ 187.69	\$ 16.68	\$ 171.01	9
\$ 2,688.15	\$ 187.69	\$ 15.68	\$ 172.01	10
\$ 2,516.14	\$ 187.69	\$ 14.68	\$ 173.01	11
\$ 2,343.14	\$ 187.69	\$ 13.67	\$ 174.02	12
\$ 2,169.12	\$ 187.69	\$ 12.65	\$ 175.03	13
\$ 1,994.08	\$ 187.69	\$ 11.63	\$ 176.05	14
\$ 1,818.03	\$ 187.69	\$ 10.61	\$ 177.08	15
\$ 1,640.95	\$ 187.69	\$ 9.57	\$ 178.11	16
\$ 1,462.83	\$ 187.69	\$ 8.53	\$ 179.15	17
\$ 1,283.68	\$ 187.69	\$ 7.49	\$ 180.20	18
\$ 1,103.48	\$ 187.69	\$ 6.44	\$ 181.25	19
\$ 922.23	\$ 187.69	\$ 5.38	\$ 182.31	20
\$ 739.92	\$ 187.69	\$ 4.32	\$ 183.37	21
\$ 556.55	\$ 187.69	\$ 3.25	\$ 184.44	22

\$	372.11	\$	187.69	\$	2.17	\$	185.52	23
\$	186.60	\$	187.69	\$	1.09	\$	186.60	24
\$	0.00	\$	187.69	\$	0.00	\$	187.69	25

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13 Indicadores Económicos

TMAR	15%
TIR	90%
VAN	\$ 3,380.00

Fuente: Elaboración propia.

1.6.9.7 Conclusiones sobre análisis económico

Puesto que la $TIR > TMAR$ se concluye que el proyecto es viable, para una tasa mínima aceptable de retorno del 15% generando un retorno adicional de \$1609.85

3.1.5 Empresas que contribuyen a la reducción de la contaminación ambiental

3.1.5.1 ZARTEX

La empresa ZARTEX ofrece una recolección integral de residuos electrónicos o equipos en desuso.

Los procesos llevados a cabo por ZARTEX han sido diseñados según las normas laborales y ambientales tanto locales como internacionales. ZARTEX ofrece una solución de recolección según las necesidades de cada cliente. Todo equipo recolectado por ZARTEX, es posteriormente procesado para que sus partes puedan ingresar en la cadena de producción como materia prima de nuevos productos.

Procesos de recolección






- 1** La empresa que solicita el servicio nos envía un inventario de los equipos que les interesa entregar. 
- 2** ZARTEX realiza una inspección para evaluar el estado de dichos equipos. 
- 3** ZARTEX envía una oferta. si es aceptada se procede a la programación de la recolección del equipo. 
- 4** Los equipos son pesados en nuestras bodegas, y se entrega un comprobante, al encargado de la empresa para que realice su verificación. 
- 5** Se procede a realizar el pago, por medio de cheque o depósito a una cuenta bancaria. 

Figura 16 Proceso de recolección de Zartex

Fuente: Imagen obtenida del sitio web ZARTEX

1.6.9.1 Geocycle

Geocycle es una compañía líder que ofrece soluciones innovadoras a los retos de gestión de residuos de nuestros clientes y comunidades. Ofrecemos Soluciones Circulares en la gestión de residuos industriales y convencionales alrededor del mundo estando presentes en más de 50 países en los cinco continentes. Cuenta con la experiencia tecnológica y colaboradores altamente calificados en nuestros sistemas y procesos, ofrece soluciones eficaces de gestión de residuos.

¿Qué es el coprocesamiento?

Se refiere al proceso de aprovechamiento de los residuos sólidos o líquidos y de su poder calorífico, como materia prima o combustibles alternos al uso de minerales y combustibles fósiles en procesos industriales que requieren altas temperaturas, principalmente en aquellos que utilizan la energía en forma intensiva, tales como la industria del cemento, acero, vidrio y la generación de energía, rebajando a su vez su potencial de contaminación a niveles mínimos respetando la Jerarquía de gestión de residuos.



Figura 17 Jerarquía de Gestión de Residuos

Fuente: Imagen obtenida de GEOCYCLE.

METODOLOGÍA PRELIMINAR O DESPLIEGUE DE OBJETIVOS

Objetivo específico	Estrategia/Herramienta/ Metodología de obtención	Técnicas	Instrumentos
Realizar una investigación bibliográfica a nivel regional sobre protocolos y convenios establecidos para el tratamiento, recuperación y disposición de lámparas fluorescentes	-Revisión bibliográfica referente a históricos y protocolos utilizados para realizar el manejo adecuado de los residuos de Mercurio, técnicas de recuperación y Tratamiento	-Análisis cualitativo y cuantitativo de eficacia y eficiencia	-Informes técnicos -Tesis, en especial manera en ámbitos de recuperación y reutilización del mercurio -Protocolos teóricos
Definir una propuesta de gestión y recuperación del mercurio proveniente de lámparas fluorescentes que cumpla con los convenios internacionales de Basilea y Minamata.	-Recopilación bibliográfica de requisitos y requerimientos legales y de índole ambiental para	-Cuadros comparativos -Realización de manual que contemple todos los requerimientos	-Documentación de tratados internacionales de Basilea y Minamata
Especificar los aspectos técnicos de los componentes internos y externos de las lámparas fluorescentes	-Revisión de fichas técnicas de diferentes proveedores	-Análisis cualitativo y comparativo de características básicas	-Fichas técnicas

<p>Evaluar la factibilidad económica y el impacto ambiental de las alternativas de tratamiento, recuperación y disposición final del mercurio en lámparas fluorescentes.</p>	<p>-Análisis de toda la investigación realizada tomando en cuenta cada fase del proceso y comparar los resultados de viabilidad técnica y económica</p>	<p>-Revisión de fuentes bibliográficas -Cuadros comparativos de las diferentes opciones que se alcancen a investigar -Listados de pros y contras en base a la viabilidad del proyecto -Análisis económico de alternativas PSRI</p>	<p>-Tesis relacionadas al tema -Fichas técnicas -Manual de manejo de residuos. -Artículos científicos</p>
--	---	---	--

CONCLUSIONES

Este proyecto tuvo como objetivo general la evaluación de posibles alternativas para la gestión de lámparas fluorescentes en El Salvador que ya no se utilizan por cualquier razón, garantizando el cumplimiento de los convenios internacionales en su transporte, almacenamiento y recolección.

A medida avanzamos en la investigación, presentamos los siguientes resultados:

- Una investigación bibliográfica acerca de los temas relevantes para este proyecto como lo son el significado de las lámparas y su historia e importancia para la humanidad.
- Las razones por las que es necesario saber de los peligros de sus componentes, más en específico el mercurio. En especial tanto sus fuentes como sus efectos en la salud humana.
- Los convenios internacionales que refieren las normas necesarias para el tratamiento, recuperación y disposición de los residuos de las lámparas fluorescentes, como lo son el Convenio de Basilea, el de Minamata y los Convenios Regionales de América Latina y El Caribe, junto con los lineamientos que el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales ofrece para la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
- Los reglamentos que El Salvador utiliza para la gestión de las luminarias, estos establecidos por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Corte Suprema de Justicia.
- Las propuestas de gestión y recuperación del mercurio proveniente de lámparas fluorescentes que cumpla con los convenios internacionales de Basilea y Minamata, como lo son la cementación, incineración, almacenamiento y trituración.
- La evaluación del análisis económico y del impacto ambiental de la alternativa más conveniente que es la trituración.

- Según el estudio de impacto ambiental podemos inferir que la emisión de Ton de CO₂ anuales al tratar diariamente la cantidad de 1,350 lámparas es de 0.01587 Ton de CO₂, que es mucho menor que sin el tratamiento (6.2214 Ton de CO₂).
- La tasa interna de retorno (90%) es mayor que la tasa mínima de retorno (15%) y que el valor actual neto (\$3380.00) es positivo, por lo que el proyecto es rentable y si se recomienda para aquellos empresarios que deseen invertir en la tecnología.

Es con estos resultados que podemos concluir que hemos cumplido los objetivos propuestos dentro del proyecto con la investigación bibliográfica y la propuesta de una alternativa de trituración para la recuperación, aprovechamiento, tratamiento y disposición de lámparas fluorescentes en El Salvador.

RECOMENDACIONES

Debido a que nuestra investigación se llevó a cabo de forma teórica, es recomendable que este proyecto sea de interés para posibles trabajos de investigación que necesiten bases a cerca de la recuperación, aprovechamiento, tratamiento y disposición de lámparas fluorescentes en El Salvador. Especialmente tanto en los temas de investigación bibliográfica de protocolos a nivel internacional, como lo son el convenio de Basilea y de Minamata, o de nivel regional, como lo es la Estrategia de Iluminación Eficiente por el Proyecto de Integración y Desarrollo MESOAMERICA y en la evaluación económica y ambiental por parte de alternativas diferentes a la trituración de las lámparas. Ya sea porque a futuro, nuevas tecnologías serán descubiertas para la gestión de estos desechos de manera ambientalmente sostenible o que las opciones económicas que presentamos ya no sean viables debido al aumento en precios en el mercado para el equipo, locación u otros insumos necesarios.

Dentro de la metodología a implementar, vale la pena indagar en las diferentes alternativas e identificar posibles mejoras para que estas sean ecoeficientes, abriendo el abanico de posibilidades para que la forma de disposición sea correcta y accesible a todos los sectores involucrados, de igual manera, la reparación previa y la clasificación es fundamental para asegurar que estas tendrán un proceso cerrado y correcto, abrir el esquema del reciclaje al asegurar la mínima trazabilidad de mercurio en sus componentes.

Se recomienda elaborar un plan de emergencias que contemple procedimientos específicos para abordar posibles incidentes relacionados con la liberación de mercurio, derivados de la rotura de lámparas fluorescentes. Este plan debe incluir acciones inmediatas para la contención y limpieza del área afectada, así como protocolos de seguridad que protejan a las personas involucradas y minimicen los riesgos de exposición al mercurio. Es fundamental contar con el equipo adecuado, como guantes, mascarillas y materiales absorbentes, además de asegurar una ventilación adecuada en el lugar. También se debe considerar la capacitación del personal sobre cómo manejar este tipo de situaciones, estableciendo un mecanismo claro para la disposición segura de los residuos.

ANEXO 1

Tabla 14 Desechos peligrosos

#	Corrientes de desechos
1	Desechos clínicos resultantes de la atención médica prestada en hospitales, centros médicos y clínicas
2	Desechos resultantes de la producción y preparación de productos farmacéuticos
3	Desechos de medicamentos y productos farmacéuticos
4	Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de biocidas y productos fitofarmacéuticos
5	Desechos resultantes de la fabricación, preparación y utilización de productos químicos para la preservación de la madera
6	Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de disolventes orgánicos
7	Desechos, que contengan cianuros, resultantes del tratamiento térmico y las operaciones de temple
8	Desechos de aceites minerales no aptos para el uso a que estaban destinados
9	Mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua
10	Sustancias y artículos de desecho que contengan, o estén contaminados por bifenilos policlorados (PCB), terfenilos policlorados (PCT) o bifenilos polibromados (PBB)
11	Residuos alquitranados resultantes de la refinación, destilación o cualquier otro tratamiento pirolítico.

-
- 12** Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices
-
- 13** Sustancias químicas de desechos no identificadas o nuevas, resultantes de la investigación y el desarrollo o de las actividades de enseñanzas y cuyos efectos en el ser humano o el medio ambiente no se conozcan
-
- 14** Desechos de carácter explosivo que no estén sometidos a una legislación diferente
-
- 15** Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de productos químicos y materiales para fines fotográficos.
-
- 16** Desechos resultantes del tratamiento de superficie de metales y plásticos
-
- 17** Residuos resultantes de las operaciones de eliminación de desechos industriales
-

ANEXO 2

Cotización, maquinaria para trituración

You had requested pricing for a bulb Eater 3L. The price on that unit would be \$ 4,240 and it comes in 120V or 240V. If you buy these, we stock all replacement parts and the unit will come with a one year warranty. I have attached both the brochure and manual for this unit.

Optional Parts for Bulb Eater 3L:

5. 55 gallon drum to mount the Bulb Eater on - \$ 139,00 per drum
6. CFL Chute for CFL, U-Bend and Incandescent bulbs - \$ 500,00
7. Replacement Filter Kit – (4) Cartridge filters, (1) HEPA filter and (1) spinner - \$ 295,00
8. Drum Dolly – to help move full drums - \$ 262,00

Please let me know which voltage you would like quoted and what accessories (if any) you want quoted with the Bulb Eater. I would also need to know which airport you would like this shipped to unless you plan on picking up the unit yourself. Once you provide this information, I will issue you a formal quote that includes shipping.

I will send you a ProForma Invoice with wire transfer information after you have approved the purchase.

ANEXO 3

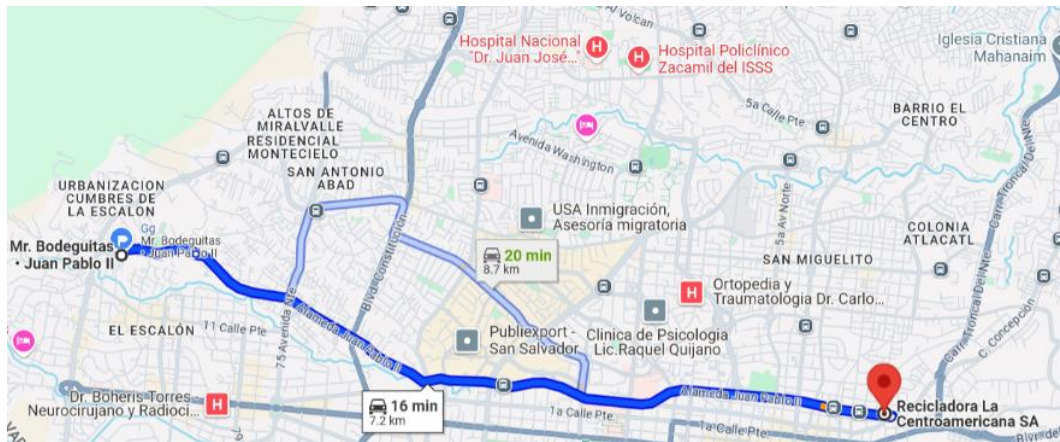


Figura 18 Ruta a seguir entre la Recicladora La Centroamericana y Mr. Bodeguitas.

Fuente: Imagen obtenida de Google Maps.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Abreo, L. A., & Romero Restrepo, M. (2006). *Análisis de alternativas para el manejo de lámparas fluorescentes de tubo desechadas*. Bogota .
- 2) acción, E. e. (13 de Mayo de 2013). *Contaminación por mercurio, exposición y riesgo*. Obtenido de Contaminación por mercurio, exposición y riesgo.: <https://www.ecologistasenacción.org/25804/cóntaminación-pór-mercurió-expósición-y-riesgó/>
- 3) Acuerdo de Cooperación USAID-CCAD. (2010). *Manejo responsable de los Tubos Fluorescentes*. --: --.
- 4) Admin Maat. (11 de Abril de 2018). *MAAT*. Obtenido de LAJERARQUÍA DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD'S): <https://www.maat.com.co/la-jerarquia-de-la-gestion-de-residuos-de-construccion-y-demolicion-rcds/>
- 5) Alemán, U. (15 de enero de 2024). *EL MUNDO*. Obtenido de EL MUNDO: <https://diario.elmundo.sv/economia/distribuidores-preve-un-aumento-de-15-en-la-venta-de-vehiculos-nuevos-en-2024>
- 6) Andrade, M. G. (04 de Octubre de 2023). *BBC NEWS MUNDO*. Obtenido de Medellín, la ciudad colombiana que logró reducir el calor con un entramado de corredores verdes : <https://www.bbc.com/mundo/articles/cp3d1v0rryro>
- 7) Aparicio Coto, Y., & Martínez, A. (2018). *La gestión de desechos de luminarias, análisis de los casos de Brasil y España. Perspectivas para El Salvador, según diagnóstico de uso y disposición*. . San Salvador : Universidad Don Bosco, El Salvador
- 8) ATSDR. (1 de Marzo de 2022). *Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades*. Obtenido de Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades: https://www.atsdr.cdc.góv/es/tóxfaqs/es_tfacts46.html#:~:text=El%20mercurió%20se%20usa%20en,ódóntól%C3%B3gicós%20se%20est%C3%A1n%20eliminandó%20gradualmente.

- 9) Banco Interamericano de Desarrollo. (31 de Octubre de 2019). *Banco Interamericano de Desarrollo*. Obtenido de FIRA de México emite primer bono verde para el sector agroalimentario con apoyo del BID: <https://www.iadb.org/es/noticias/fira-de-mexico-emite-primer-bono-verde-para-el-sector-agroalimentario-con-apoyo-del-bid>
- 10) BULB EATER. (2024). *BULB EATER*. Obtenido de BULB EATER: <https://tcrwusa.com/pages/bulb-eater?srsId=AfmBOorqsYhpRUiSjwBdZk6oAm7xlgXiTkA8zUswnqtkWDI2Ibc eVZF>
- 11) Chimin, M. D. (2016). TRITURADOR DE TUBOS Y LÁMPARAS FLUORESCENTES EN DESUSO. *Revista Tecnológica*, 2-3.
- 12) Conexión Reciclado. (s.f.). *Conexión Reciclado*. Obtenido de Precios Reciclables: <https://www.conexionreciclado.com.ar/recursos>
- 13) CORTE SUPREMA DE JUSTICIA. (2017). *Gestión de Desechos Electrónicos y Eléctricos*. San Salvador: CSJ Unidad de Medio Ambiente.
- 14) Datosmacro. (2022). *Datosmacro.com*. Obtenido de <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/el-salvador?anio=2020>
- 15) EPA. (13 de Marzo de 2024). *Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos*. Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.: <https://español.epa.góv/español/infórmación-basica-sóbre-el-mercurió#airemisións>
- 16) GEOCYCLE. (2024). *Geocycle*. Obtenido de Soluciones Geocycle: <https://www.geocycle.com.co/soluciones>
- 17) Gobierno de España. (2021). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Obtenido de MERCURIO: <https://www.mitecó.gób.es/es/calidad-y-evaluación-ambiental/temas/próductós-quimicós/mercurió.html>
- 18) GRAINGER. (2022). *GRAINGER*. Obtenido de Triturador d/Lámparas,Acero/Plástico:

<https://www.grainger.com.mx/producto/TERRACYCLE-REGULATED-WASTE-Triturador-d-L%C3%A1mparas,Acero-Pl%C3%A1stico/p/401M81>

- 19) Habegger, L. e. (2008). *Technology demonstration for reducing mercury emissions from small- scale gold refining facilities*. Lemont, Illinois: Argonne National Laboratory .
- 20) INFORMEA. (18 de Mayo de 2015). *INFORMEA*. Obtenido de Acceso a la información sobre los acuerdos ambientales multilaterales: <https://www.informea.org/es/treaties/convenio-de-basilea>
- 21) ISWA, U. (2015). *PRACTICAL SOURCEBOOK ON MERCURY WASTE STORAGE AND DISPOSAL*.
- 22) Juan Luis Ordaz, D. R. (Agosto de 2010). *Repositorio Nepal*. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/bitstreams/fe35ba34-4ff5-4708-a523-410b233d4e02/download>
- 23) Lagos, M. (2014). *Efectós sóbre la salud del metilmercurió en nin ós y adultós; estudiós nacionales e internacionales*. Nutrición Hospitalaria.
- 24) Lummi. (19 de agosto de 2022). *Importaciones Mustri S.A. de C.V. .* Obtenido de LÁMPARAS FLUORESCENTES Y SUS USOS: <https://www.lummi.com.mx/blogs/noticias/lamparas-fluorescentes-y-sus-usos>
- 25) M.A. Lominchar, M. S. (2010). *Estudio del Comportamiento y Distribución del Mercurio Presente en Muestras de Suelo Recogidas en la Ribera del Río Valdeazogues*. Informes Técnicos Ciemat 1215.
- 26) MARN. (2000). *Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos*. San Salvador: MARN.
- 27) MARN. (2014). *Estrategia Nacional del Medio Ambiente*. San Salvador: MARN.
- 28) MARN. (2015). *Cambio Climático*. San Salvador: MARN.
- 29) MARN. (11 de Enero de 2024). Obtenido de <https://www.ambiente.gob.sv/2023-fue-el-octavo-ano-mas-seco-en-las-ultimas-tres-decadas-en-el-salvador/>

- 30) Marname, I. (2018). *El mercurio, una amenaza persistente para el medio*. --: EEA Newsletter.
- 31) Minamata, C. d. (2021). *ONU programa de medio ambiente*. Obtenido de ONU programa de medio ambiente: <https://minamataconvencion.org/es/news/un-nuevo-estudio-revela-los-efectos-de-la-contaminacion-por-mercurio-en-la-diversidad>
- 32) Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (14 de Mayo de 2005). *Decreto No. 233. -Ley de Medio Ambiente 1998*. San Salvador: MARN. Obtenido de MARN.
- 33) Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Guía técnica para la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos de El Salvador*. San Salvador: MARN.
- 34) Ministerio de Salud de El Salvador. (05 de Agosto de 2019). *Dirección de Vigilancia Sanitaria*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/344762205_Impacto_del_cambio_climatico_en_la_salud_de_El_Salvador
- 35) Naciones Unidas. (24 de Agosto de 2018). *Observatorio del Principio 10 de America Latina y El Caribe*. Obtenido de <https://observatoriop10.cepal.org/es/media/414>
- 36) NORMA SALVADOREÑA. (2004). *EFICEINCIA ENERGÉTICA DE LÁMPARAS FLUORESCENTE DE DOS BASES, REQUISITOS DE DESMPENÑO ENERGÉTICO Y ETIQUETADO*. San Salvador: NORMA SALVADOREÑA.
- 37) OMS. (31 de Marzo de 2017). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
- 38) ONU Programa de Medio Ambiente. (25 de Julio de 2021). *Convenio de Minamata*. Obtenido de Efectos de la contaminación por Mercurio : <https://minamataconvencion.org/es/news/un-nuevo-estudio-revela-los-efectos-de-la-contaminacion-por-mercurio-en-la-diversidad>
- 39) Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica. (2006). *PRODUCTOS ELÉCTRICOS. LUMINARIAS. ESPECIFICACIONES DE EFICEINCIA*

ENERGETICA RTS 29.02.01:21. San Salvador: Organismo Salvadoreño de Reglamentación Técnica.

- 40) PNUMA. (2014). Artículo 4: Obligaciones Generales. En PNUMA, *Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación* (pág. 16). Suiza: International Environment House.
- 41) PNUMA. (2015). *Directrices técnicas sobre el manejo ambientalmente racional de desechos consistentes en mercurio o compuestos de mercurio, que los contengan o estén contaminados con ellos*. Ginebra: UNEP.
- 42) PNUMA PROTOCOLO . (Agosto de 2014). *Convenio de Basilea* . Obtenido de Convenio de Basilea : <https://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-s.pdf>
- 43) Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2022). *Evaluación mundial de los desechos de mercurio*. ONU Medio Ambiente.
- 44) Proyecto Integración y Desarrollo Mesoamérica. (2014). *Estrategia Regional de Iluminación Eficiente en Centroamérica*. San Salvador: --
- 45) PRTR. (-- de Noviembre de 2007). *Registro Estatal de emisiones y fuentes contaminantes*. Obtenido de Registro Estatal de emisiones y fuentes contaminantes: <https://prtr-es.es/Hg-Mercurio-y-compuestos,15608,11,2007.html#:~:text=El%20mercurio%20es%20un%20elemento,es%20soluble%20en%20soluciones%20oxidantes>.
- 46) R.M., R. (2001). *El carbón activado en procesos de descontaminación* . Alicante: Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Alicante.
- 47) RAEE. (-- de -- de 2019). *MARN*. Obtenido de LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA EL ADECUADO MANEJO DE LOS RAEE: <http://www.residuoselectronicos.com.sv/>
- 48) RAEE. (2019). *RAEE*. Obtenido de RAEE: <http://residuoselectronicos.com.sv/>

- 49) RESURJA. (05 de Febrero de 2019). *Residuos Urbanos de Jaén S.A.* Obtenido de El aluminio, entre los materiales más reciclables del mundo: <https://resurja.com/el-aluminio-entre-los-materiales-mas-reciclables-del-mundo/>
- 50) Rodriguez, & RM. (2001). *El carbón activado en procesos de descontaminación*. Alicante : Departamento de Química Inorgánica, Universidad de Alicante .
- 51) Salaverría, D. P. (2015). *Informe Final EA y PMA programa EE México: Anexo B Mercurio efectos en la salud y el ambiente*. Mexico DF: --.
- 52) Shukla, N. (30 de Marzo de 2020). *EARTH°ORG*. Obtenido de How The Basel Convention has Harmed Developing Countries: <https://earth.org/how-the-basel-convention-has-harmed-developing-countries/>
- 53) Svetilla. (26 de abril de 2017). *Svetilla.com*. Obtenido de Iluminando la historia: Hitos en el desarrollo de las lámparas fluorescentes: <https://www.svetila.com/es/content/97-hitos-en-el-desarrollo-de-las-lamparas-fluorescentes>
- 54) TERRACYCLE. (28 de Abril de 2023). *TERRACYCLE REGULATORY WASTE*. Obtenido de BULB EATER: <https://tcrwusa.com/pages/bulb-eater?srsltid=AfmBOoqT8BIWo9GSGFdpuyfEc4zQJ6LxyT6O0cAYYb2Fx7PAbRGDk-bU>
- 55) UNAM. (2024). *Hoja de seguridad de Mercurio*. Obtenido de Hoja de seguridad de Mercurio: <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2008/05/21HG.pdf>
- 56) USEPA. (13 de Febrero de 2016). *USEPA*. Obtenido de USEPA: <https://www.epa.gov/mercury/compact-fluorescent-light-bulbs-cfls>
- 57) Virginia Santana, G. M. (2014). *El Convenio de Minamata sobre el Mercurio y su implementación en la región de América Latina y El Caribe*. --: PNUMA.
- 58) WASTE ONLINE. (06 de Febrero de 2011). *WASTE ONLINE*. Obtenido de Glass Recycling Information Sheet: <http://www.wasteonline.org.uk/resources/information sheets/Glass.htm>

59) Weinberg, J. (2010). *Introducción a la contaminación por mercurio para las ONG.*
IPEN.

60) Zartex. (14 de Octubre de 2007). *Zartex.* Obtenido de Zartex:
<https://zartexsv.com/servicios/>