



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LÁMPARAS FLUORESCENTES PARA LA
SEPARACIÓN DEL MERCURIO MEDIANTE UN EQUIPO DE TRATAMIENTO INDUSTRIAL**

Eddy Alessandro Pérez Moir

Asesorado por el MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
y por el MSc. Ing. Pablo César Aníbal Saravia Solares

Guatemala, octubre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LÁMPARAS FLUORESCENTES PARA LA
SEPARACIÓN DEL MERCURIO MEDIANTE UN EQUIPO DE TRATAMIENTO INDUSTRIAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EDDY ALESSANDRO PÉREZ MOIR

ASESORADO POR EL MSC. ING. PEDRO CIPRIANO SARAVIA CELIS
Y POR EL MSC. ING. PABLO CÉSAR ANÍBAL SARAVIA SOLARES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
EXAMINADOR	Ing. Carlos Vinicio Godínez Miranda
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DEL LÁMPARAS FLUORESCENTES PARA LA SEPARACIÓN DEL MERCURIO MEDIANTE UN EQUIPO DE TRATAMIENTO INDUSTRIAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, en julio de 2017.



Eddy Alessandro Pérez Moir

Guatemala, 8 de julio de 2019

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Álvarez:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al Informe Final del Trabajo de Graduación titulado "EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LÁMPARAS FLUORESCENTES, PARA LA SEPARACIÓN DEL MERCURIO MEDIANTE UN EQUIPO DE TRATAMIENTO INDUSTRIAL", del estudiante de Ingeniería Ambiental, Eddy Alessandro Pérez Moir quien se identifica con el carné universitario número 2012-13143 y DPI 2331 14297 0101.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,



Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
Asesor

PEDRO C. SARAVIA C.
INGENIERO CIVIL MSG
COLEGIADO 1838

Guatemala, 8 de julio de 2019

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Álvarez:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al Informe Final del Trabajo de Graduación titulado "EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LÁMPARAS FLUORESCENTES, PARA LA SEPARACIÓN DEL MERCURIO MEDIANTE UN EQUIPO DE TRATAMIENTO INDUSTRIAL", del estudiante de Ingeniería Ambiental, Eddy Alessandro Pérez Moir quien se identifica con el carné universitario número 2012-13143 y DPI 2331 14297 0101.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,



Ing. Pablo Cesar Arribal Saravia Solares
Asesor

Ing. Pablo Cesar Saravia Solares
Ingeniero Industrial. Colegiado No. 10924



Guatemala, 09 de septiembre de 2019.
Ref. EIQ.TG-IF.032.2019.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez Mejía:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **034-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-

Solicitado por el estudiante universitario: **Eddy Alessandro Pérez Moir.**
Identificado con número de carné: **2331142970101.**
Identificado con registro académico: **201213143.**
Previo a optar al título de **INGENIERO AMBIENTAL.**

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LÁMPARAS FLUORESCENTES, PARA LA SEPARACIÓN DEL MERCURIO MEDIANTE UN EQUIPO DE TRATAMIENTO INDUSTRIAL

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por: **Ingeniero Civil Pedro Cipriano Saravia Celis y el Ingeniero Industrial Pablo César Anibal Saravia Solares.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



"ID Y ENSEÑADA A TODOS"

(Handwritten Signature)
Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo






Ref.EIQ.TG.059.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del **Trabajo de Graduación** de la carrera de **Ingeniería Ambiental** del estudiante, **EDDY ALESSANDRO PÉREZ MOIR** titulado: **"EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LÁMPARAS FLUORESCENTES PARA LA SEPARACIÓN DEL MERCURIO MEDIANTE UN EQUIPO DE TRATAMIENTO INDUSTRIAL"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Williams G. Alvarez Mejia; M.I.Q., M.U.I.E
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, septiembre de 2019

Cc: Archivo
WGAM/ale



Agencia Guatemalteca de Acreditación de Instituciones de Educación Superior





La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LÁMPARAS FLUORESCENTES PARA LA SEPARACIÓN DEL MERCURIO MEDIANTE UN EQUIPO DE TRATAMIENTO INDUSTRIAL**, presentado por el estudiante universitario: **Eddy Alessandro Pérez Moir**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, Octubre de 2019

AACE/asga
cc

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Eddy Armando Pérez y Lorena Moir, por siempre creer en mí sin importar la situación.
Mi hermano	Diego Pérez, por estar pendiente y apoyarme en cada logro.
Mis abuelos	Roberto Moir y Senovia Salazar, por siempre estar al pendiente mío y apoyarme en todas las situaciones.
Familia Pérez Roldán	Mi padrino Giovanni Pérez, Johana Roldán y mis primos Allan y Sebastián, por su apoyo incondicional.
Familia Pérez Gómez	Mi tío Nelson Pérez, Mara Gómez y mis primas Karen y Betzabe, por apoyarme en cualquier situación.
Mis abuelos (q. e. p. d.)	Armando Pérez y Evidalia Álvarez, por todo el apoyo y cariño que me brindaron.

AGRADECIMIENTOS A:

Mi padre	Por todo su cariño, ejemplo y enseñanza que me ha brindado durante todos estos años.
Mi madre	Por todo su amor y cariño que me ha dado y siempre creer en mi más que nadie.
Mi hermano	Por acompañarme en cada uno de los logros obtenidos.
Familia Pérez Salazar	Todo el apoyo que me brindaron y por estar siempre pendientes.
Familia Saravia Solares	A mis tíos Álex, Mayra, Pedro y Elda Pérez, por haberme apoyado en todo este proceso de mi vida.
Mis primos	Mayra y Christian Saravia, Allan, Sebastián, Betzabé, Karen y Sebastián Pérez, a quienes agradezco el apoyo y ayuda que me han brindado.
Mi asesor	Pablo Saravia, por apoyarme y asesorarme en este trabajo de graduación.

Mis amigos

Raúl Jo, Luis Hernandez, Sofía Garcia y Beatriz Ortiz, por el apoyo, el esfuerzo, desvelo y retos que superamos juntos durante nuestros estudios.

Mis amigos

José Mora, Luis Cardoza, Billy y Christopher Arteaga, Allan Montenegro, Andrés Almorza, Kewin Juarez y Eduardo De Paz, por estar en los mejores y en los peores momentos de esta etapa.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVI
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Lámparas incandescentes.....	5
2.1.1. Lámparas no halógenas	6
2.1.2. Lámparas halógenas de alta y baja presión	6
2.2. Lámparas de descarga	7
2.2.1. Lámparas de vapor de sodio	7
2.2.1.1. Vapor de sodio a baja presión	8
2.2.1.2. Vapor de sodio a alta presión	9
2.2.2. Lámparas de vapor de mercurio (alta presión)	10
2.3. Lámparas fluorescentes (baja presión).....	11
2.3.1. Componentes de las lámparas fluorescentes	13
2.4. Funcionamiento	15
2.5. Desechos sólidos	17
2.5.1. Mercurio.....	18
2.5.1.1. Ciclo de mercurio.....	19

2.5.1.2.	Efectos del mercurio en el ambiente	20
2.5.1.3.	Metilmercurio.....	21
2.5.1.4.	Exposición y efectos en la salud humana del mercurio y sus compuestos.....	21
2.5.1.5.	Bioacumulación y biomagnificación.....	21
2.5.2.	Tratamientos para el mercurio.....	22
2.5.2.1.	Trituración de lámparas.....	22
2.5.2.2.	Incineración.....	23
2.5.2.3.	Confinamiento en rellenos sanitarios de seguridad.....	23
3.	METODOLOGÍA	25
3.1.	Variables	25
3.1.1.	Variables independientes	25
3.1.2.	Variables dependientes	26
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	26
3.2.1.	Obtención de las muestras.....	26
3.3.	Recursos humanos disponibles	28
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	28
3.5.	Técnica cuantitativa y cualitativa	29
3.5.1.	Diseño experimental.....	29
3.5.2.	Procedimiento para realizar el tratamiento de lámparas fluorescentes para la separación del mercurio	30
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	32
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	34
3.8.	Análisis estadístico.....	37

3.8.1.	Modelo para un análisis de la varianza de un factor.....	37
3.8.2.	Supuestos para la aplicación del ANOVA.....	37
3.8.3.	Bases del ANOVA	38
3.8.4.	Procedimiento para el análisis de varianza ANOVA	38
3.8.5.	Datos del ANOVA	39
4.	RESULTADOS	43
4.1.	Evaluación de la separación del mercurio de los residuos triturados de lámparas fluorescentes.....	43
4.2.	Evaluación del porcentaje de polvo separado en el tratamiento de lámparas fluorescentes.....	43
4.3.	Evaluación del porcentaje de vidrio triturado obtenido de cada tipo de lámpara fluorescente después del tratamiento....	44
4.4.	Evaluación del porcentaje de aluminio obtenido de cada tipo de lámpara fluorescente después del tratamiento	46
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	47
	CONCLUSIONES	51
	RECOMENDACIONES.....	53
	BIBLIOGRAFÍA.....	55
	APÉNDICES	57
	ANEXOS.....	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Lámpara incandescente	6
2.	Lámpara de descarga	8
3.	Lámpara de alta presión de vapor de sodio	10
4.	Lámpara de alta presión de vapor de mercurio	11
5.	Tubo de descarga	13
6.	Casquillos unidos a filamentos de tungsteno	14
7.	Balastro	15
8.	Funcionamiento de lámpara fluorescente	16
9.	Ciclo del mercurio.....	20
10.	Determinación del número de muestras a través del programa Decision Analyst STATS 2,0	27
11.	Esquema del proceso de tratamiento.....	32
12.	Porcentaje de polvo obtenido de cada tipo de lámpara fluorescente después del tratamiento	44
13.	Porcentaje de vidrio triturado obtenido después del tratamiento.....	45
14.	Porcentaje del aluminio obtenido después del tratamiento	46

TABLAS

I.	Elementos encontrados en las lámparas fluorescentes	12
II.	Variables independientes para tratamiento de lámparas fluorescentes.....	25

III.	Variables dependientes para el tratamiento de lámparas fluorescentes	26
IV.	Muestras	28
V.	Instrumentos de medición, equipo y cristalería	28
VI.	Equipo de seguridad	29
VII.	Peso total de lámparas por cada tipo de tratamiento	33
VIII.	Peso total de lámparas por cada tipo después del tratamiento	33
IX.	Cantidad de polvo obtenido de las lámparas fluorescentes T12 con bajo contenido de mercurio.....	34
X.	Cantidad de subproductos obtenidos de las lámparas fluorescentes T12 ecológicas.....	34
XI.	Cantidad de polvo obtenido de las lámparas fluorescentes T12 normales	34
XII.	Cantidad de subproductos obtenidos de las lámparas fluorescentes T12 normales.....	35
XIII.	Cantidad de polvo obtenido de las lámparas fluorescentes T8 ecológicas.....	35
XIV.	Cantidad de subproductos obtenidos de las lámparas fluorescentes T8 ecológicas.....	35
XV.	Cantidad de polvo obtenido de las lámparas fluorescentes T8 normales	36
XVI.	Cantidad de subproductos obtenidos de las lámparas fluorescentes T8 normales.....	36
XVII.	Balance de masa (libras)	36
XVIII.	Resumen estadístico para la cantidad de polvo separado después del tratamiento	40
XIX.	ANOVA para la cantidad de polvo separado después del tratamiento.....	40

XX.	Resumen estadístico para la cantidad de vidrio triturado obtenido después del tratamiento	41
XXI.	ANOVA para la cantidad de vidrio triturado después del tratamiento ..	41
XXII.	Resumen estadístico para la cantidad de aluminio obtenido después del tratamiento	41
XXIII.	ANOVA para la cantidad de aluminio obtenido después del tratamiento	42
XXIV.	Resultado del análisis del mercurio en residuos triturados de lámparas fluorescentes	43
XXV.	Porcentaje de polvo obtenido de cada tipo de lámpara fluorescente después del tratamiento	44
XXVI.	Porcentaje de vidrio triturado obtenido después del tratamiento.....	45
XXVII.	Porcentaje de aluminio obtenido después del tratamiento	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Celsius
lb	Libra
lm	Lúmenes
m³	Metro cúbico
Hg	Mercurio
mm	Milímetro
%	Porcentaje
W	Watts

GLOSARIO

Desecho	Cualquier tipo de material producido por un proceso u operación destinado al desuso.
FIUSAC	Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.
Gravimetría	Análisis de una sustancia por medio del pesaje.
Lámparas	Son dispositivos que transforman una energía eléctrica o química en energía lumínica.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
PCB's	Bifenilos Policlorados.
Reciclaje	Proceso que se utiliza para transformar y elaborar un material útil a partir de residuos.
Recuperación	Obtener nuevamente una sustancia después de un proceso.
Residuo	Todo aquel material o resto que tiene un valor comercial para su reuso o reincorporación al ciclo de vida productivo.

Tratamiento

Procedimiento de trabajo para los desechos, con el fin de transformarlos y reducir su impacto ambiental negativo.

Valorización

Asignar un valor económico a un residuo para obtener un beneficio monetario.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación tuvo como objetivo evaluar el tratamiento de lámparas fluorescentes para la separación del mercurio utilizando un equipo de tratamiento industrial. La muestra de lámparas fluorescentes y el equipo industrial se obtuvo de la empresa REPELSA.

El procedimiento consistió en selección de 4 tipos de lámparas fluorescentes, T12 ecológica, T12 normal, T8 ecológica y T8 normal. Las lámparas T12 y T8 son de las mismas dimensiones respectivamente. Se procedió a realizar el tratamiento, este se hace realizando una trituration de las lámparas, al momento de triturarlas el mercurio es liberado y es absorbido y encapsulado en filtros de carbono activado dentro del equipo de tratamiento. Se realizó el proceso 3 veces utilizando 8 lámparas por cada tipo, para realizar un total de 12 tratamientos.

Se determinó la cantidad de subproductos que se generó en cada tratamiento por tipo de lámpara, para obtener la cantidad de polvo fluorescente con mercurio que se logró extraer. Se validaron los resultados mediante un balance de masas y se determinó el porcentaje de vidrio triturado y aluminio generado.

Para evaluar el tratamiento se tomó una muestra compuesta por todas las lámparas de vidrio pulverizado, esta muestra se llevó a un laboratorio especializado. Se utilizó un método espectrofotométrico arrojando un resultado que era menor del límite detectable bajo esta metodología, validando la

separación del mercurio de los subproductos generados en el tratamiento de trituración de lámparas fluorescentes.

OBJETIVOS

General

Evaluar el tratamiento de lámparas fluorescentes para la separación del mercurio utilizando un equipo de tratamiento industrial.

Específicos

1. Validar la separación del mercurio de las lámparas después del tratamiento de separación.
2. Determinar el porcentaje de vidrio triturado que se genera al finalizar el tratamiento de 4 tipos de lámparas fluorescentes.
3. Determinar el porcentaje de aluminio que se genera al finalizar el tratamiento de 4 tipos de lámparas fluorescentes.

HIPÓTESIS

- Hipótesis de trabajo

Es posible evaluar el tratamiento de lámparas fluorescentes utilizando el equipo de la empresa REPELSA.

Es posible obtener una eliminación total del mercurio en los desechos sólidos de las lámparas para disponer de ellos de manera segura.

- Hipótesis estadísticas

H_{01} : sí hay diferencia significativa en la cantidad de polvo fluorescente obtenido en el tratamiento de separación para cada tipo de lámpara.

H_{n1} : no hay diferencia significativa en la cantidad de polvo fluorescente obtenido en el tratamiento de separación para cada tipo de lámpara.

H_{02} : sí hay diferencia significativa en la cantidad de vidrio triturado generado después del tratamiento de separación de mercurio de cada tipo de lámpara.

H_{n2} : no hay diferencia significativa en la cantidad de vidrio triturado después del tratamiento de separación de mercurio de cada tipo de lámpara.

H_{03} : sí hay diferencia significativa en la cantidad de casquillos de aluminio generados después del tratamiento de separación de mercurio de cada tipo de lámpara.

H_{n3} : no hay diferencia significativa en la cantidad de vidrio triturado después del tratamiento de separación de mercurio de cada tipo de lámpara.

INTRODUCCIÓN

Las lámparas son la fuente de luz artificial más utilizada en la actualidad, están hechas de vidrio, plástico, metales y componentes electrónicos, materiales que pueden reciclarse y reutilizarse, pero muchas de ellas también contienen mercurio, una sustancia peligrosa que debe recuperarse para evitar que contamine el ambiente. Existen varios tipos de lámparas: lámparas incandescentes, de descarga y tecnología led, cada una tiene distintos principios de funcionamiento y componentes, las incandescentes y led no tienen mercurio entre sus componentes.

Las lámparas de descarga se clasifican en vapor de mercurio y vapor de sodio, y estas se diferencian según la presión a la que estos vapores se encuentren. Para esta tesis se analizaron las lámparas de vapor de mercurio a baja presión: lámparas fluorescentes tubulares de diferentes diámetros. Muchas instalaciones (hogares, oficinas, instituciones, hospitales, comercios y centros educativos) generan intermitentemente un gran número de lámparas fluorescentes desechadas con contenido de mercurio, debido a la inevitable y creciente dependencia del consumo energético, las cuales, al no ser manejadas adecuadamente, pueden representar un riesgo para el ambiente y la salud pública.

Las lámparas fluorescentes son muy utilizadas debido a que se obtiene una iluminación de alta calidad. La eficiencia del material fluorescentes es de tres a cuatro veces mayor que las lámparas incandescentes que no contienen mercurio, lo que se traduce en un ahorro de energía y por ende económico. Al momento de finalizar su vida útil las lámparas fluorescentes implican una nueva

problemática, puesto que se transforman en residuos peligrosos, lo que demanda una atención para su correcta gestión. Anteriormente las lámparas fluorescentes eran consideradas como un residuo sólido no peligroso que podía ser fácilmente dispuesto según el protocolo de desechos comunes. En 1990, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), emitió la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos, mediante la cual se identificó a las lámparas fluorescentes como desechos peligrosos que deberían tener un manejo más estricto y riguroso.

REPELSA es una compañía guatemalteca, especializada en la gestión integral y tratamiento de residuos peligrosos industriales, con el objetivo de contribuir al cuidado y la protección del ambiente, evitando así la contaminación. Cuenta con un equipo de última tecnología para el tratamiento de lámparas fluorescentes, el mismo consta de una trituradora, filtros de 5 micrones y filtros de carbón activado con azufre, el cual permite el adecuado tratamiento y disposición final de las lámparas fluorescentes. En Guatemala no existe una legislación específica para regular la eliminación de las lámparas fluorescentes y cada año el consumo de este tipo de lámparas, y el riesgo de contaminación del medio ambiente, también tienden a aumentar.

Por lo tanto, para esta tesis se desarrolló lo siguiente: se realizó el tratamiento de 96 lámparas fluorescentes de 4 diferentes tipos. Se realizaron 3 repeticiones del tratamiento para cada tipo de lámpara fluorescente. Se procedió a analizar y determinar la cantidad de subproductos obtenidos (vidrio triturado y aluminio) y la cantidad de polvo fluorescente con contenido de mercurio que se separó de las lámparas. Se analizó una muestra de vidrio triturado para evaluar si el mercurio fue separado de los residuos de lámparas fluorescentes generados.

1. ANTECEDENTES

La empresa REPELSA se dedica a brindar asesoría ambiental a diferentes empresas e industrias, dentro de sus líneas de trabajo está la gestión de residuos no peligrosos y peligrosos, en la línea de residuos peligrosos es posible mencionar: luminarias fluorescentes (mercurio, sodio), PCB's, asbesto, pesticidas, material contaminado con mercurio, residuos electrónicos, entre otros que por sus características se consideren peligrosos.

Para el tratamiento de lámparas, REPELSA cuenta con un equipo del tipo industrial, siendo la primera empresa de su tipo en Guatemala y Centro América, el proceso que realiza es a través de una predestrucción controlada de las lámparas y encapsulamiento de polvo de mercurio y plomo, así como vapores de fósforo. Este proceso está autorizado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Por otra parte, El Fondo para el Desarrollo Científico y Tecnológico (FODECYT), que es una línea específica de financiamiento del Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACYT), orientada a financiar proyectos de investigación científica y desarrollo tecnológico en forma competitiva, en áreas que son definidas de acuerdo a su importancia por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT), financió el proyecto de investigación FODECYT 19-2010: Determinación, evaluación y propuesta del manejo de los desechos sólidos del alumbrado público en el Departamento de Guatemala.

Dentro de este proyecto se formaron dos trabajos de graduación, uno enfocado en la evaluación de la recuperación del mercurio metálico y del

tratamiento de este, perteneciente al ingeniero químico Héctor Rolando Méndez Rossal. El otro tenía como objetivo principal elaborar un procedimiento técnico para el manejo de desechos de las lámparas de alta presión de vapor de mercurio utilizadas en los sistemas de iluminación pública del Municipio de Mixco, perteneciente a la ingeniera química Carolina Theissen Herrera.

El estudio realizado por el Ing. Héctor Rolando Méndez Rossal se basó en la recuperación del mercurio metálico y la inmovilización mediante un método de tratamiento térmico en el cual se recuperaba una gota de mercurio de cada lámpara para luego inmovilizarla con una amalgama de cobre a partir de una reacción *redox* con zinc elemental. Los resultados determinaron que no se recupera la totalidad del mercurio y los tubos de descarga se consideran tóxicos aún después del tratamiento térmico.

Actualmente en el país existen proyectos de sustitución de importantes cantidades de lámparas de mercurio de alta presión, en un corto o mediano plazo las municipalidades generarán un impacto ambiental relevante, que es el relacionado con la generación de residuos sólidos provenientes de esas tareas. A partir de reconocer la existencia de esos residuos generados, el desafío será lograr un sistema nacional que permita el tratamiento primario adecuado y eficiente de las lámparas fluorescentes con mercurio.

En mayo del 2010, el ingeniero industrial Alex Suntecún Castellanos realizó un estudio de postgrado: *Tratamiento primario de desechos de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión del alumbrado público en las municipalidades de Guatemala*, que tiene como objetivo evaluar una técnica de separación primaria que consiste en la separación de todos los componentes de las lámparas de alta presión, y cuantificar los componentes, determinando eso

se podría establecer el impacto que tienen sobre el ambiente al desecharlos a los vertederos municipales.

El estudio dio como resultados que en el 2010 estaban instaladas 320,000 lámparas, donde se pesó y clasificó cada componente de las lámparas.

En Guatemala se tienen iniciativas para la sustitución de las lámparas de mercurio para el ahorro energético y mayor eficiencia de las lámparas de vapor de sodio, sin embargo, esto generará una gran cantidad de desechos sólidos.

En abril de 2005, en el gobierno del presidente Óscar Berger, se crea un Acuerdo Gubernativo No. 111-2005: Política Nacional para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos, en el que se describe una política para todas las empresas que generen desechos sólidos, sin embargo el acuerdo no cuenta con parámetros ni sanciones para comparar la generación de los desechos sólidos, por lo que no se podría acusar a ninguna empresa de la generación de los mismos, ya que no cuenta con estudios técnicos que avalen toda esa información.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Lámparas incandescentes

Estas lámparas fueron la primera forma de generar luz a partir de la energía eléctrica. Son un dispositivo que produce luz mediante el calentamiento por efecto Joule de un filamento metálico, hechos de wolframio hasta ponerlo al rojo blanco con el paso de corriente eléctrica. Su principio de funcionamiento es mediante el paso de una corriente eléctrica por un filamento hasta que este alcanza tan alta temperatura que emite radiaciones visibles por el ojo humano.

Se puede obtener la incandescencia de dos maneras: la primera cuando se combustiona alguna sustancia, ya sea sólida como la madera o líquida en una lámpara de aceite. La segunda se obtiene a través del paso de una corriente eléctrica sobre un hilo conductor muy delgado. En ambos casos la eficiencia es muy baja, ya que toda la energía obtenida se convierte en calor. Sin embargo, la luz emitida por la incandescencia garantiza una buena reproducción de los colores en los objetos iluminados, ya que la luz contiene un espectro de emisiones continuo.

Estas lámparas están formadas por un hilo de wolframio que al calentarse a temperaturas muy elevadas emite luz visible, este hilo está rodeado con una ampolla de vidrio a la que se le ha hecho el vacío o se ha rellenado de gas. Los demás elementos tienen funciones de soporte y conducción de la corriente eléctrica.

Figura 1. **Lámpara incandescente**



Fuente: Citcea. *Lámparas*. <http://recursos.citcea.upc.edu/llum/lamparas/lincan.html>. Consulta: 12 de marzo de 2019.

Existen dos tipos de lámparas incandescentes:

2.1.1. Lámparas no halógenas

Estas lámparas han sido rellenas con un gas inerte a partir del vacío en su interior. El gas inerte crea un incremento en la eficacia luminosa de la lámpara evitando la evaporación del material de filamento, pudiendo trabajar a mayores temperaturas. Estas tienen una vida útil de aproximadamente 1000 horas y generan una potencia de 25 y 2000 W. La eficiencia de las lámparas al vacío está entre 7.5 y 11 lm/W y rellenas de gas inerte está entre 10 y 20 lm/W.

2.1.2. Lámparas halógenas de alta y baja presión

El funcionamiento de estas lámparas requiere de temperaturas muy altas para que pueda realizarse el ciclo del halógeno. Estas son más pequeñas y

compactas, la ampolla es fabricada con un cristal especial de cuarzo para evitar su deterioro. Con el paso del tiempo se produce un ennegrecimiento de la ampolla por culpa de la evaporación de partículas de wolframio del filamento y se condensan sobre la ampolla, esto genera una disminución notable del flujo luminoso.

La eficacia luminosa de estas lámparas es de 22 lm/W con un intervalo de potencias de trabajo que van desde 150 a 2000 W, que dependen del funcionamiento final al que estén destinadas. Estas se utilizan generalmente en iluminación doméstica.

2.2. Lámparas de descarga

Las lámparas de descarga generan la luz por excitación de un gas sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos. Las lámparas difieren según el gas contenido en la lámpara y la presión a la que esté sometido. Estas se clasifican según el gas utilizado (vapor de mercurio o sodio) o la presión a la que este se encuentre (alta o baja presión).

Las lámparas obtienen diferentes propiedades, varían unas de otras según el tipo de gas y presión que utilicen, esto hace cada una adecuada para diferentes usos.

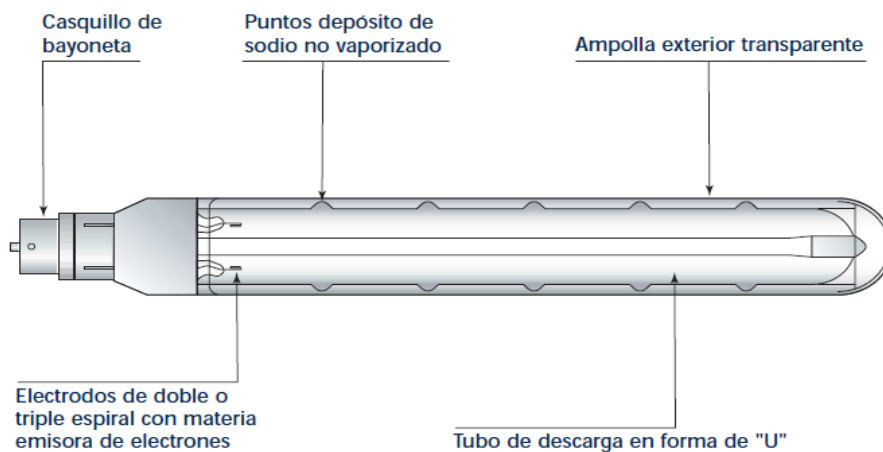
2.2.1. Lámparas de vapor de sodio

Es un tipo de lámpara de descarga de gas que utiliza vapor de sodio para producir luz. Actualmente son de las fuentes de iluminación más eficientes, por su gran cantidad de lúmenes por vatio producidas. El color es amarillo brillante al producir la luz.

2.2.1.1. Vapor de sodio a baja presión

La descarga eléctrica en un tubo con vapor de sodio a baja presión produce una radiación monocromática, de color amarillo, está muy próxima al máximo de sensibilidad del ojo humano (555 nm). Tiene una eficiencia muy elevada ya que genera más de 140 lum/w. La vida media de las lámparas es muy elevada, de unas 15,000 horas. Sufre de una depreciación de flujo luminoso a lo largo de su vida, por lo que su vida útil en estado óptimo es de entre 6000 y 8000 horas. En estas lámparas el tubo de descarga tiene forma de U, esto con el fin de disminuir pérdidas por calor y se reduce considerablemente el tamaño de la lámpara. El sodio es muy corrosivo, por lo que tiene que estar conformada por materiales muy resistentes y con pequeñas hendiduras que facilitan la concentración y vaporización del sodio con menor temperatura.

Figura 2. Lámpara de descarga



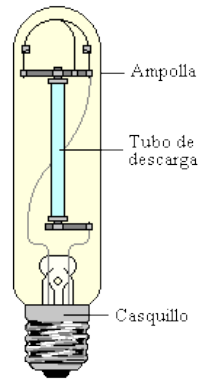
Fuente: *Manual de sistemas de iluminación. Fuentes de luz y equipos auxiliares.*
<http://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz-LamparasDeDescarga-LamparaVaporSodioBajaPresion.php>. Consulta: 12 de marzo de 2019.

2.2.1.2. Vapor de sodio a alta presión

Estas lámparas tienen una distribución espectral que abarca casi todo el espectro visible, dando una luz blanca dorada que garantiza una mayor reproducción de colores en los objetos reflejados que las lámparas de vapor de sodio a baja presión.

La vida media de estas lámparas es aproximadamente de 20 000 horas, pero la depreciación del flujo y fallas por fugas en el tubo de descarga impiden su funcionamiento correcto dejando una vida útil de entre 8 000 a 12 000 horas. Este tubo de descarga debe ser muy resistente ya que las presiones y las altas temperaturas ($1\ 000\ ^\circ\text{C}$) son muy agresivas. Estas lámparas son de las más utilizadas para el alumbrado público por la reproducción de colores, sin embargo no funcionarían para iluminar algo que requiera excelente reproducción cromática. El rendimiento es menor que el de lámparas a baja presión, siendo aproximadamente de 100 lm/W. En su interior se mezclan gases de sodio, vapor de mercurio que actúa como amortiguador y finalmente el xenón que sirve para reducir las pérdidas térmicas. La presión de encendido de estas lámparas es muy elevada pero su tiempo de arranque es breve.

Figura 3. **Lámpara de alta presión de vapor de sodio**



Fuente: Citcea. *Clases de lámparas de descarga.*

<http://recursos.citcea.upc.edu/llum/lamparas/ldesc2.html>. Consulta: 18 de marzo de 2018.

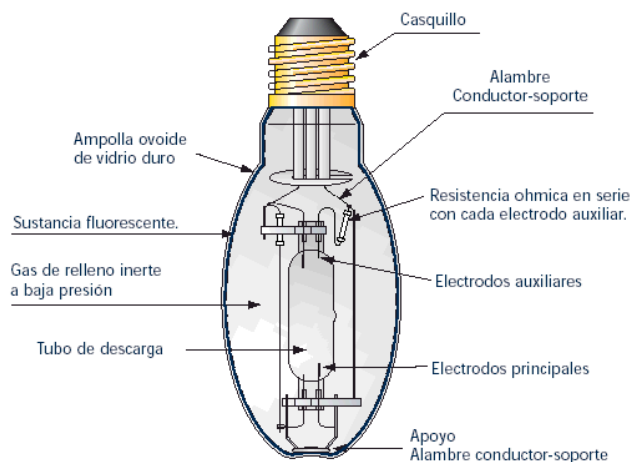
2.2.2. Lámparas de vapor de mercurio (alta presión)

Consisten en un tubo de descarga de cuarzo relleno de vapor de mercurio, que posee dos electrodos principales y uno auxiliar que facilita el arranque. Estas lámparas necesitan balastro para que puedan operar de manera correcta. Tienen una vida útil muy larga llegando a ser de 25 000 horas sin considerar la depreciación lumínica, por lo que el tiempo de vida se reduce considerablemente llegando a una vida útil óptima de 8 000 horas. La eficacia se encuentra en un rango de 40 y 60 lm/W y aumenta con la potencia. Se le puede añadir un recubrimiento de polvos fosforescentes para incrementar la eficacia ya que convierten la luz ultravioleta en luz visible.

Las lámparas requieren de una tensión de encendido de 150 a 180 V, que permite conectarlas a una red de 220 V sin ningún problema. Para el arranque se utiliza el electrodo auxiliar que empieza a ionizar el gas inerte contenido en el tubo para facilitar la descarga entre los electrodos principales. Aquí se produce

la vaporización del mercurio y el incremento de la presión de vapor. Cuando este proceso se normaliza el flujo luminoso alcanza valores normales. En caso de que ocurra algún inconveniente y la lámpara se apagara no se puede encender inmediatamente hasta que se encuentre fría, ya que la presión del mercurio requiere una ruptura muy alta para volver a normalizar el proceso y generar el flujo luminoso. La mayor desventaja es su rotura, ya que libera vapor de mercurio que genera un riesgo de envenenamiento por mercurio.

Figura 4. **Lámpara de alta presión de vapor de mercurio**



Fuente: Grlum. *Fuentes de luz y equipos auxiliares.*

<http://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz-LamparasDeDescarga-LamparaVaporMercurioAltaPresion.php>. Consulta: 18 de marzo de 2018.

2.3. Lámparas fluorescentes (baja presión)

Estas son lámparas de vapor de mercurio a baja presión (0,8 Pa). Son fuentes luminosas originadas como consecuencia de una descarga eléctrica en la atmósfera de vapor de mercurio a baja presión, en las que la luz se genera por el fenómeno de fluorescencia. Esta luz se genera al excitar ciertas

sustancias por radiación ultravioleta del vapor de mercurio y transforma la longitud de onda en una más larga que se encuentra dentro del espectro visible.

Una lámpara fluorescente se compone de un tubo de cristal sellado con gas argón en su interior a una presión baja (2,5 torr, 0,00329 atm), así como una presión baja de vapor de mercurio. Los polvos fluorescentes que recubren el tubo están compuestos por varios agregados provenientes del fósforo.

Tabla I. **Elementos encontrados en las lámparas fluorescentes**

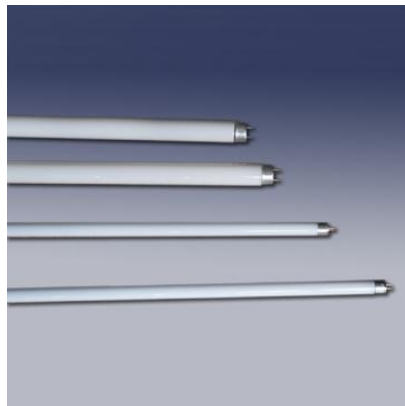
Elemento	Concentración (mg elemento/kg polvo fosfatado)
Aluminio	3
Antimonio	2,3
Bario	61
Cadmio	1
Calcio	170
Cromo	9
Cobalto	2
Cobre	70
Hierro	1,9
Plomo	7,5
Magnesio	1
Manganeso	4,4
Mercurio	4,7
Níquel	13
Potasio	140
Sodio	1,7
Zinc	48

Fuente: elaboración propia.

2.3.1. Componentes de las lámparas fluorescentes

Tubo de descarga: el tubo de descarga se fabrica de vidrio, en diferentes longitudes y diámetros. Esto depende de la potencia en watt (W) con la que se desarrolle la lámpara. El diámetro, por su parte, se ha estandarizado internacionalmente a 25,4 mm (equivale a una pulgada) para la mayoría de tubos. La parte interior del tubo tiene un recubrimiento fluorescente, que tiene como función convertir la radiación ultravioleta en radiación de luz visible. Este se encuentra relleno de un gas inerte y una pequeña cantidad de mercurio (Hg) líquido. El argón facilita el arranque de la lámpara y controla la cantidad de electrones que atraviesa el tubo para normalizar el flujo luminoso.

Figura 5. **Tubo de descarga**



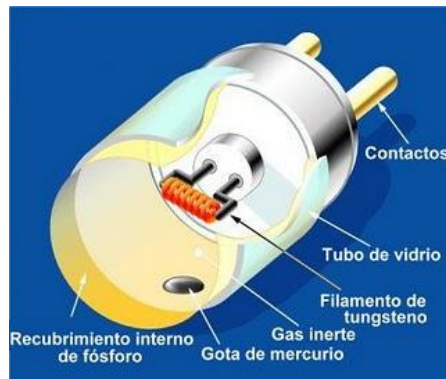
Fuente: AS. *Afinidad eléctrica*. <http://www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=35>.

Consulta: 25 de marzo de 2018.

Casquillos: son pines de contacto eléctrico externos que están conectados interiormente con filamentos de precalentamiento. Estos filamentos están fabricados de tungsteno (wolframio), recubiertos con calcio (Ca) y magnesio

(Mg), su función es calentar previamente el gas inerte, generalmente el argón (Ar), para el encendido de una lámpara.

Figura 6. **Casquillos unidos a filamentos de tungsteno**



Fuente: Blogspot. *Proceso productivo de los tubos.*

<http://08msmpr2.blogspot.com/2010/05/proceso-productivo-de-los-tubos.html>. Consulta: 25 de marzo de 2018.

- Gas de llenado: los gases comúnmente empleados son el argón o mezcla de argón, neón y kriptón. La función de este gas es facilitar el inicio de descarga, reducir el recorrido libre de electrones para aumentar la probabilidad de colisión con los átomos de mercurio y finalmente proteger la sustancia emisiva de los electrodos y reducir considerablemente la evaporación.
- Cebador: es un pequeño componente que se utiliza durante el proceso inicial de encendido, siendo un encendedor térmico (*starter*). Este dispositivo se compone de una lámina encerrada en una cápsula de cristal rellena de gas neón (Ne). Esta lamina guarda todo el calor y crear un contacto que permite el paso de la corriente eléctrica a través de todo el tubo de descarga.

- **Balastro:** es un reactor que consta de un circuito electrónico y una pequeña bobina con núcleo de ferrita. Se conecta al fluorescente sin cebador y logra un encendido instantáneo de la lámpara sin parpadeos apreciables, logrando un arranque más suave.

Figura 7. **Balastro**



Fuente: Editores SRL. *Balastos*. http://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/Balastos%20electr%C3%B3nicos-2_4.png. Consulta: 25 de marzo de 2018.

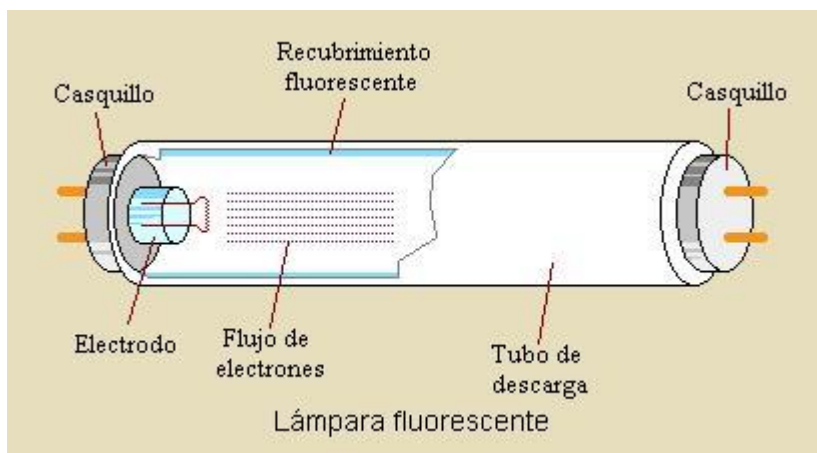
2.4. **Funcionamiento**

El proceso general de funcionamiento de un equipo fluorescente es el siguiente:

- Al cerrar el circuito (alimentar de red) los electrodos se ponen al rojo (mediante el cebador) y emiten electrones, de forma que se volatilice el mercurio del interior del tubo y se ionice el gas.
- Una vez ionizado el interior del tubo, los filamentos se enfrían y hacen el papel de cátodo y ánodo, uno atrae y el otro repele los electrones, que al pasar de un extremo a otro chocan con los átomos de mercurio y emiten radiación ultravioleta.

- Como al ionizarse el tubo la resistencia se hace muy pequeña, ello supondría una intensidad muy grande y para evitarlo están las reactancias, que sirven de reguladores de esta intensidad.
- La radiación ultravioleta (que se produce al chocar los electrones con los átomos de mercurio) activa las sustancias fluorescentes que recubren el interior del tubo y transforman estas radiaciones en luz visible.

Figura 8. **Funcionamiento de lámpara fluorescente**



Fuente: Wordpress. *Diviértete con física*. https://divierteteconfisica.files.wordpress.com/2015/02/luz_fluorescente.jpg. Consulta: 3 de mayo de 2018.

Según un informe realizado por la EPA se estima que aproximadamente 600 millones de lámparas se disponen anualmente en los Estados Unidos. Estas lámparas debido al mercurio se deben considerar peligrosas y no pueden ser desechadas en un vertedero o relleno sanitario convencional, deben tratarse individualmente para poder disponerse de ellas. En el informe se estima una cantidad total de mercurio en los Estados Unidos (1989) de 643 mg de

mercurio, de los cuales 24,4 mg (3,8%) pertenece a residuos de lámparas fluorescentes.

2.5. Desechos sólidos

Al llegar al final de su vida útil las lámparas deben ser desechadas correctamente. Estas deben ser transportadas de dos maneras: en vehículos compactadores si se deben tratar individualmente o en furgonetas adaptadas. En todo caso los vehículos deben tener una adaptación especial y asumir en todo caso que las lámparas están quebradas y que el mercurio se encuentra en estado gaseoso.

Las lámparas generan una variedad de desechos sólidos y líquidos cuando terminan su vida útil, su disposición final en vertederos municipales genera contaminación, estos son los desechos que las lámparas generan en mayor volumen:

- Vidrio: es el desecho con mayor volumen generado por la lámpara, este no causa daños al ambiente ya que es un material inerte pero no es biodegradable, su constitución es boro, silicato y minerales.
- Cuarzo: es el material del que está fabricada la ampolla interna de la lámpara, tiene forma de cristal compuesto de dióxido de silicio.
- Aluminio: es un material que permite diferentes aleaciones y compuestos que le permiten cumplir muchas funciones, y tiene excelentes propiedades físicas, químicas y mecánicas para la utilización en la industria. Este material puede ser recuperado y reciclado para evitar

impactos negativos en el ambiente y una recuperación económica del mismo. El casquillo está fabricado de este material.

- Tungsteno: es un material escaso en la corteza terrestre, se encuentra en forma de óxido y sales en ciertos minerales. Tiene el punto de fusión más elevado de todos los minerales y el punto de ebullición más alto de todos los elementos conocidos. Se usa para los electrodos de las lámparas, donde se produce el arco eléctrico.

2.5.1. Mercurio

El mercurio es un metal que existe en forma natural en el medio y también se puede obtener de varias formas químicamente. Es un metal líquido inodoro, de color blanco-plateado brillante. Al calentarlo se transforma en un gas inodoro e incoloro.

Sus características fisicoquímicas son las siguientes: estado líquido a temperatura ambiente y el único conocido en estado líquido a 0 ° C. Punto de fusión: -38,9 ° C, punto de ebullición: 356,9 ° C, densidad elevada a 20 ° C: 13,5955 kg/cm³, calor específico 0,138 kJ/(kg*° K), líquido muy poco compresible, posee una tensión superficial muy alta: 480,3 din/cm³.

Es un mal conductor de corriente eléctrica a temperatura ambiente, pero se convierte en un superconductor en temperaturas próximas al cero absoluto. A elevada temperatura, en estado de vapor, conduce la electricidad, por eso su uso es común en lámparas fluorescentes. Por su elevada densidad se utiliza en barómetros y bombas de vacío. Posee una gran capacidad de adsorción, por lo que se puede depositar en cualquier terreno o aguas superficiales. Cualquier

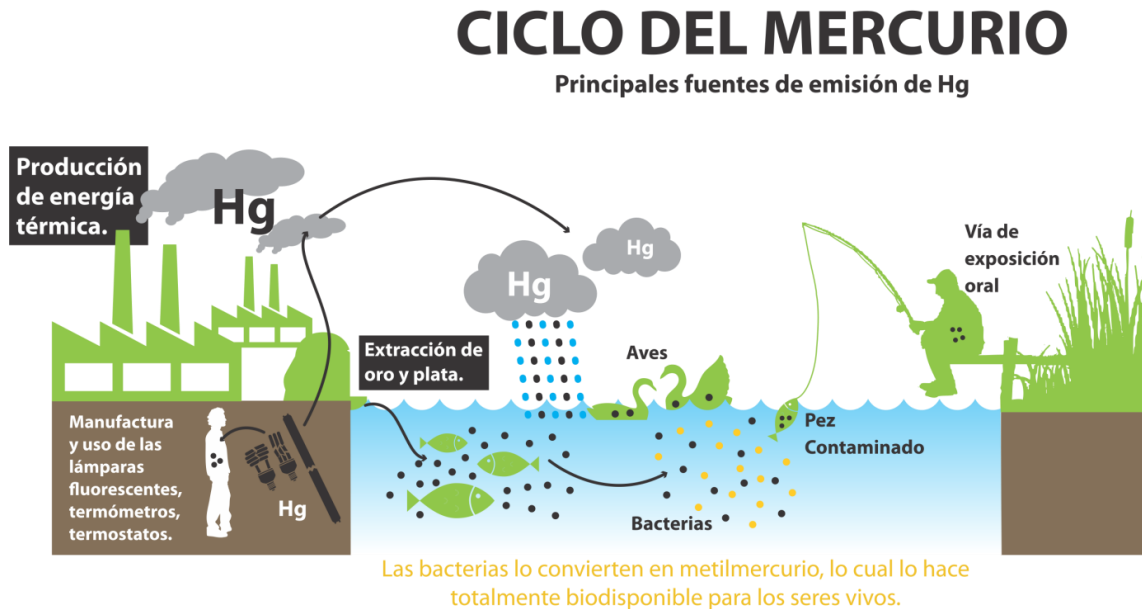
producto que se analice, natural o artificialmente, contendrá al menos trazas de mercurio debido a esto.

2.5.1.1. Ciclo de mercurio

La química del mercurio es muy compleja. El mercurio aparece en la naturaleza en diferentes estados de oxidación y en compuestos orgánicos e inorgánicos. Puede aparecer en la fase gaseosa (Hg elemental, dimetilmercurio), como líquido (Hg elemental), en la fase sólida y en solución en una variedad de formas. En la atmósfera el Hg⁰ es la forma primaria. En sedimentos, suelos mineralizados y sedimentos anaerobios el mercurio aparece como cianuro (HgS).

El mercurio difiere de otros metales por su carácter orgánico: aparece naturalmente en compuestos órgano-metálicos y tiene una alta afinidad por la mayor parte de los tipos de materia orgánica, especialmente las proteínas de los organismos. Además, el ciclo natural del mercurio ha sido interrumpido y acelerado por las actividades antropogénicas. Evidentemente el comportamiento bioquímico del mercurio es complejo y su entendimiento requiere un estudio holístico de los procesos industriales, atmosféricos, geológicos, hidrológicos, químicos, microbiales, fisiológicos y ecológicos.

Figura 9. **Ciclo del mercurio**



Fuente: Relamex. *Ciclo del mercurio*. http://www.relamex.com/?page_id=217. Consulta: 3 de mayo de 2018.

2.5.1.2. Efectos del mercurio en el ambiente

En el cuerpo humano, el sistema nervioso es muy susceptible a todas las formas de mercurio. El metilmercurio y los vapores de mercurio metálico son más nocivos que otras formas, ya que una mayor cantidad de estas llega al cerebro. La exposición a altos niveles de mercurio metálico, inorgánico u orgánico, puede dañar en forma permanente a riñones, cerebro y fetos. Los efectos sobre la función cerebral pueden manifestarse como irritabilidad, timidez, temblores, alteraciones a la vista o la audición y problemas de la memoria. La concentración media permisible de 0,025 mg/m³ y el 80 % del mercurio inhalado se retiene.

2.5.1.3. Metilmercurio

El metilmercurio es un catión organometálico, compuesto por un grupo metil (CH_3^-) enlazado a un átomo de mercurio. Se trata de un compuesto neurotóxico capaz de concentrarse en el organismo y concentrarse así mismo en las cadenas alimenticias. Sus efectos de envenenamiento por mercurio son de especial relevancia en los alimentos para los bebés y en los que toman las mujeres durante el embarazo.

2.5.1.4. Exposición y efectos en la salud humana del mercurio y sus compuestos

El mercurio, pero en especial el metilmercurio, es absorbido casi en totalidad por vía pulmonar y gastrointestinal, mientras que de manera moderada su absorción por vía dérmica. Estos se acumulan en ciertos órganos internos como el hígado y sus riñones, aunque su acumulación más severa es en el sistema nervioso. Por esto último es un neurotóxico. El mercurio posee además una gran capacidad para traspasar la barrera placentaria y la barrera hematoencefálica, por lo que puede afectar el desarrollo del cerebro fetal y de igual forma a los infantes. Algunos estudios indican que esta sustancia puede afectar igualmente al sistema cardiovascular.

2.5.1.5. Bioacumulación y biomagnificación

La bioacumulación es el proceso de sustancias químicas en organismos vivos de forma que estos alcanzan concentraciones más elevadas que en las concentraciones en el ambiente o en los alimentos. Las sustancias propensas a la bioacumulación alcanzan concentraciones crecientes a medida que se alcanza en el nivel trófico en la cadena alimenticia.

La biomagnificación es un fenómeno en el que la bioacumulación se transmite a través de la red trófica cuando cada organismo es depredado, los contaminantes permanecen en el organismo depredador dando como resultado el aumento de la concentración al ascender en la cadena trófica.

Cuando un organismo que ha acumulado contaminantes es depredado, su predador ingiere los contaminantes que había en su presa y por lo tanto se concentra aún más en él. De manera que la red trófica sube, los predadores de ultimo nivel son los que más presentan concentración de metales pesados y mercurio.

2.5.2. Tratamientos para el mercurio

Existen distintas alternativas que permiten el tratamiento total o parcial del mercurio generado por los desechos de lámparas de baja presión de mercurio. Estas buscan el mismo objetivo: reducir los impactos negativos para la salud del ambiente. En los apartados siguientes se describen algunas alternativas.

2.5.2.1. Trituración de lámparas

El proceso de trituración es empleado principalmente para disminuir el volumen de las lámparas antes de su disposición final. El material triturado luego será separado en vidrio, mercurio y aluminio. Este procedimiento debe realizarse bajo condiciones controladas que nieguen la contaminación donde se realice el procedimiento.

2.5.2.2. Incineración

Este tratamiento consiste en la destrucción de residuos al exponerlos a altas temperaturas en un sistema controlado, esto además acompaña una significativa reducción de la masa y el volumen de los mismos y sirve para generación de energía e incorporación de materiales a productos industriales.

Esto debe realizarse a altas temperaturas para eliminar las emisiones gaseosas contenidas en los residuos.

2.5.2.3. Confinamiento en rellenos sanitarios de seguridad

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería que tiene como función darle una disposición final a los residuos sólidos. Estos pueden ser por método de áreas, zanjas o una combinación de ambos. Estos disponen de condiciones controladas para minimizar los impactos negativos sobre el ambiente y la salud de la población.

Los rellenos sanitarios de seguridad reciben residuos de tipo industrial para ser confinados de forma segura, por lo que deben tener controlados todos los tipos de residuos peligrosos para evitar cualquier capacidad de reaccionar con otros compuestos y ocasionar calor, combustión, corrosión, explosiones y vapores tóxicos. Estos rellenos tienen un sistema de drenajes de tuberías para evacuar los lixiviados y geotextiles para evitar que los contaminantes lleguen al manto freático y contaminen las aguas subterráneas.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

Son las condiciones en las que se realizaron las corridas del experimento, estas se dividen en independientes y dependientes.

3.1.1. Variables independientes

Una variable independiente son las condiciones que pueden cambiar libremente su valor, sin ue este sea afectado por alguna otra variable.

Tabla II. **Variables independientes para tratamiento de lámparas fluorescentes**

Núm.	Variable	Símbolo matemático	Dimensional	Descripción
1	Masa	m	Lb	Es la cantidad de materia que posee la lámpara.
2	Longitud	l	Mm	La longitud de las lámparas.
3	Diámetro	\varnothing	Mm	La longitud del diámetro del tubo fluorescente.
4	Tipo de lámpara fluorescente	-	Lb	Cantidad de contenido de mercurio en lámpara normal y lámpara con bajo contenido de mercurio.

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables dependientes

Una variable dependiente es aquella cuyos valores dependen de los que tomen otras variables.

Tabla III. **Variables dependientes para el tratamiento de lámparas fluorescentes**

Núm.	Variable	Símbolo matemático	Dimensional (SI)	Descripción
1	Cantidad de mercurio contenido en las lámparas.	%	adimensional	El porcentaje obtenido de mercurio de la lámpara fluorescente.
2	Cantidad de residuos sólidos que producen las lámparas.	%	adimensional	El porcentaje de residuos sólidos que quedan después del tratamiento.

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La investigación es de carácter cuantitativo, experimental y comparativo. Se desarrolló la evaluación del tratamiento de lámparas fluorescentes de cuatro tipos de lámparas fluorescentes provenientes de una bodega de almacenamiento de la empresa REPELSA.

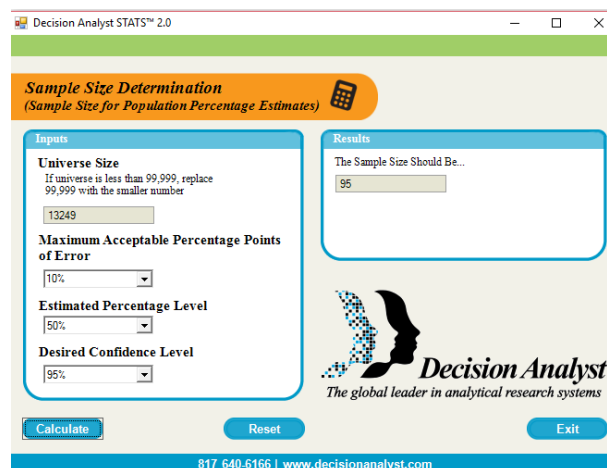
3.2.1. Obtención de las muestras

La delimitación del campo de estudio será la evaluación de la separación del mercurio de las lámparas fluorescentes usando un equipo de tratamiento industrial perteneciente a la empresa REPELSA, utilizando como muestra los

lotes de lámparas obtenidos por la empresa (13 249 lámparas de 2014 a 2016). Todos los procedimientos se realizaron en la empresa REPELSA ubicada en: km 17,5 carretera a lo de Diéguez, Villas Linda Vista, lote 30 del departamento de Guatemala.

La determinación del número de muestras óptimas que deben analizarse se debe realizar bajo un método estadístico. La cantidad de muestras a tomar se obtuvo a través del programa Decision Analyst STATS 2,0. El programa determinó el número de muestras con las siguientes variables: un universo de lámparas de los diferentes tipos de lámparas tratadas (12 249), un número de muestras con 10 % de error máximo aceptable, con un nivel de porcentaje del 50 % y un nivel deseado de confianza del 95 %, dando como resultado un número de muestras óptimas de todos los tipos de lámparas de 95, pero al ser 4 tipos de lámparas se utilizarán 96, siendo 24 muestras para cada tipo de lámpara.

Figura 10. **Determinación del número de muestras a través del programa Decision Analyst STATS 2,0**



Fuente: programa Decision Analyst STATS 2,0.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br. Eddy Alessandro Pérez Moir.
- Asesores: Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis e Ing. Pablo Cesar Saravia Solares.

3.4. Recursos materiales disponibles

Los recursos materiales para la realización de este estudio fueron otorgados por la empresa REPELSA.

Tabla IV. **Muestras**

Muestras	Lámpara fluorescente T8 normal
	Lámpara fluorescente T8 ecológica
	Lámpara fluorescente T12 normal
	Lámpara fluorescente T12 ecológica

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Instrumentos de medición, equipo y cristalería**

Instrumentos de laboratorio	Crisol
	Mortero
Instrumentos de medición	Balanza analítica
	Balanza industrial
Equipo	Máquina trituradora de lámparas industrial BALCAN
	Toneles con tapa abierta y recubrimiento epóxido.
	Bolsas ziploc
	Envases de vidrio con tapa
Otros	Bomba de vacío
	Filtro de partículas suspendidas totales

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Equipo de seguridad**

Equipo de seguridad	Guantes de protección
	Mascara de protección
	Botas industriales
	Traje de protección
	Lentes de laboratorio
	Mascarilla con filtros para gases

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cuantitativa y cualitativa

En este trabajo de graduación se utilizó la técnica cualitativa para la evaluación de la separación de mercurio de los residuos generados y una técnica cuantitativa para determinar el porcentaje de subproductos generados después de la realización del tratamiento.

3.5.1. Diseño experimental

Para la evaluación del tratamiento de lámparas fluorescentes se utilizó la cantidad de 96 lámparas, que fue el resultado que se determinó para una muestra representativa. Se escogieron 24 lámparas de los siguientes tipos:

- Lámpara T12 ecológica
- Lámpara T12 normal
- Lámpara T8 ecológica
- Lámpara T8 normal

Para la evaluación del tratamiento se realizaron 3 experimentos del mismo tratamiento para cada tipo de lámpara fluorescente, dando como resultado 12 experimentos del tratamiento de lámparas fluorescentes.

3.5.2. Procedimiento para realizar el tratamiento de lámparas fluorescentes para la separación del mercurio

- Se escogió la muestra representativa de 96 lámparas, escogiendo 24 lámparas de cada tipo especificado anteriormente.
- De las 24 lámparas de cada tipo, se forman grupos de 8 lámparas, obteniendo 3 grupos por cada tipo de lámpara y se define el peso de cada grupo de lámparas antes de ser tratadas. Al tener el dato de los 12 grupos de lámparas se inicia el proceso de trituración dentro del equipo. El tratamiento se realizó en orden según el tipo de lámpara y los 3 grupos definidos. A cada grupo de lámparas se definió el peso luego de ser trituradas para obtener el peso final, resultando 12 pesos finales de grupos de lámparas trituradas. De las lámparas, al ser trituradas, el mercurio junto con el polvo fluorescente se escapa de la lámpara fluorescente, este es llevado hacia filtros de carbono activado donde queda retenido y todo el material triturado cae en un recipiente sellado y libre de mercurio.
- Se obtienen los datos de los 12 grupos de los 4 tipos de lámparas fluorescentes después del tratamiento. Se compara el peso final con el inicial, la diferencia entre peso inicial y final determinará la cantidad de polvo obtenido después del tratamiento.

$$\text{Peso del polvo} = W_o - W_f \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

- Peso del polvo: cantidad de polvo obtenido (lb)

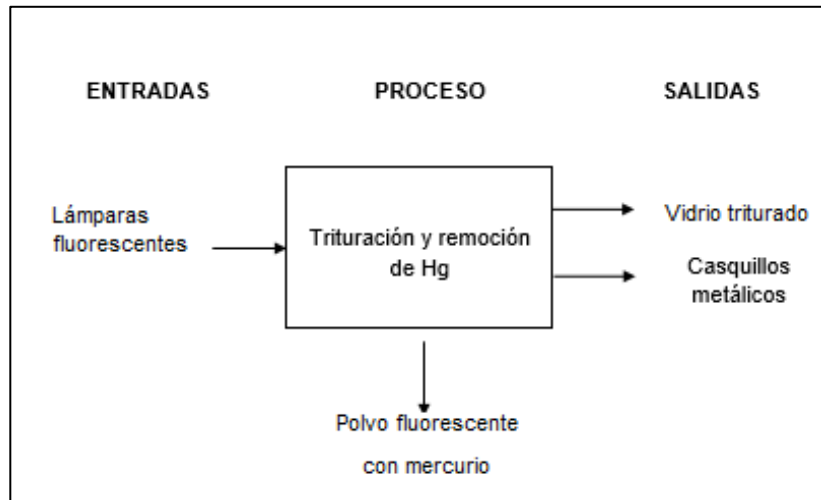
- W_o : peso inicial de las lámparas (kg)
- W_f : peso final de las lámparas después del tratamiento (lb)
- Finalizado el tratamiento de lámparas, se procedió a pesar la cantidad de residuos de vidrio triturado y aluminio que se generó. Posteriormente se determinó el porcentaje del peso total que representa la cantidad de polvo, vidrio triturado y aluminio mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ polvo y/o residuos} = \frac{(W)}{(W_T)} * 100 \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

- Porcentaje de polvo o residuo: representa el porcentaje que represente sobre el peso total de la lámpara (lb).
- W : peso del polvo y/o residuo de vidrio triturado o aluminio obtenido de la muestra de lámparas (lb).
- W_T : peso total de la muestra de lámparas (lb).
- Para determinar si el mercurio fue separado del resto de residuos de las lámparas, de una muestra compuesta de las 96 lámparas trituradas se toma una cantidad de 100 g de vidrio y se procedió a llevarlo a un análisis para detectar si el mercurio fue separado completamente.

Figura 11. **Esquema del proceso de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

3.6. **Recolección y ordenamiento de la información**

Se procedió a recolectar todos los datos obtenidos, ordenando la información según el tipo de lámpara que se trató. Con los datos obtenidos de las variables independientes se realizaron los cálculos para obtener los datos de las variables dependientes.

Tabla VII. **Peso total de lámparas por cada tipo de tratamiento**

Tipo de lámpara	Corrida	Peso total de ocho lámparas fluorescentes antes del tratamiento (lb)
Lámpara T12 ecológica	1	4,134 lb
	2	4,087 lb
	3	4,385 lb
Lámpara T12 normal	1	4,834 lb
	2	4,765 lb
	3	4,837 lb
Lámpara T8 ecológica	1	2,376 lb
	2	2,402 lb
	3	2,439 lb
Lámpara T8 normal	1	2,812 lb
	2	2,923 lb
	3	2,876 lb

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Peso total de lámparas por cada tipo después del tratamiento**

Tipo de lámpara	Corrida	Peso total de ocho lámparas fluorescentes después del tratamiento (lb)
Lámpara T12 ecológica	1	4,054 lb
	2	4,047 lb
	3	4,313 lb
Lámpara T12 normal	1	4,721 lb
	2	4,583 lb
	3	4,713 lb
Lámpara T8 ecológica	1	2,367 lb
	2	2,394 lb
	3	2,429 lb
Lámpara T8 normal	1	2,800 lb
	2	2,906 lb
	3	2,860 lb

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, ya con los datos obtenidos y calculados, se ordenó la información para poder analizarla.

Tabla IX. **Cantidad de polvo obtenido de las lámparas fluorescentes T12 con bajo contenido de mercurio**

Corrida	Peso de polvo obtenido (lb)
1	0,080 lb
2	0,040 lb
3	0,072 lb
Media	0,064 lb

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Cantidad de subproductos obtenidos de las lámparas fluorescentes T12 ecológicas**

Corrida	Peso de vidrio obtenido (lb)	Peso de aluminio obtenido (lb)
1	3,754 lb	0,300 lb
2	3,747 lb	0,299 lb
3	3,993 lb	0,320 lb
Media	3,381 lb	0,307 lb

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Cantidad de polvo obtenido de las lámparas fluorescentes T12 normales**

Corrida	Peso de polvo obtenido (lb)
1	0,113 lb
2	0,172 lb
3	0,124 lb
Media	0,136 lb

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Cantidad de subproductos obtenidos de las lámparas fluorescentes T12 normales**

Corrida	Peso de vidrio obtenido (lb)	Peso de aluminio obtenido (lb)
1	4,371 lb	0,350 lb
2	4,253 lb	0,340 lb
3	4,364 lb	0,349 lb
Media	4,329 lb	0,346 lb

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Cantidad de polvo obtenido de las lámparas fluorescentes T8 ecológicas**

Corrida	Peso de polvo obtenido (lb)
1	0,009 lb
2	0,008 lb
3	0,010 lb
Media	0,009 lb

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Cantidad de subproductos obtenidos de las lámparas fluorescentes T8 ecológicas**

Corrida	Peso de vidrio obtenido (lb)	Peso de aluminio obtenido (lb)
1	2,192 lb	0,175 lb
2	2,217 lb	0,177 lb
3	2,249 lb	0,180 lb
Media	2,219 lb	0,178 lb

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Cantidad de polvo obtenido de las lámparas fluorescentes T8 normales**

Corrida	Peso del polvo obtenido (kg)
1	0,012 lb
2	0,017 lb
3	0,016 lb
Media	0,015 lb

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Cantidad de subproductos obtenidos de las lámparas fluorescentes T8 normales**

Corrida	Peso de vidrio obtenido (kg)	Peso de aluminio obtenido (kg)
1	2,593 lb	0,207 lb
2	2,691 lb	0,215 lb
3	2,648 lb	0,212 lb
Media	2,644 lb	0,212 lb

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Balance de masa (libras)**

Tipo de lámpara	#	Peso inicial	Peso final de los residuos			Porcentaje de salida de residuos		
			Peso aluminio	Peso vidrio	Peso polvo	% aluminio	% vidrio	% polvo
T12 ecológica	1	4,054	0,300	3,754	0,080	7,27 %	90,80 %	1,94 %
	2	4,047	0,299	3,747	0,040	7,32 %	91,68 %	0,98 %
	3	4,313	0,320	3,993	0,072	7,29 %	91,07 %	1,64 %
T12 normal	1	4,721	0,350	4,371	0,113	7,24 %	90,43 %	2,34 %
	2	4,583	0,340	4,253	0,172	7,14 %	89,25 %	3,61 %
	3	4,713	0,349	4,364	0,124	7,22 %	90,22 %	2,56 %
T8 ecológica	1	2,367	0,175	2,192	0,009	7,38 %	92,24 %	0,38 %
	2	2,394	0,177	2,217	0,008	7,39 %	92,28 %	0,33 %
	3	2,429	0,180	2,249	0,010	7,38 %	92,21 %	0,41 %
T8 normal	1	2,800	0,207	2,593	0,012	7,38 %	92,19 %	0,43 %
	2	2,906	0,215	2,691	0,017	7,37 %	92,05 %	0,58 %
	3	2,860	0,212	2,648	0,016	7,37 %	92,07 %	0,56 %

Fuente: elaboración propia

3.8. Análisis estadístico

Para validar o descartar las hipótesis nulas y alternativas se utilizará el análisis de varianzas de un factor (ANOVA) para las varianzas obtenidas para los resultados de la evaluación del porcentaje de separación y/o recuperación del mercurio.

3.8.1. Modelo para un análisis de la varianza de un factor

Se suponen muestras aleatorias independientes n_1, n_2, \dots, n_k observaciones de k poblaciones. Si las medias poblacionales son $\mu_1; \mu_2, \dots, \mu_k$, con lo cual este análisis espera contrastar o debatir la hipótesis nula.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \quad \text{para al menos un par } \mu_i, \mu_j$$

3.8.2. Supuestos para la aplicación del ANOVA

- Las poblaciones van según la distribución de probabilidad de la variable independiente para cada factor, deben ser normales.
- Las K muestras que van acorde los tratamientos que son aplicados, deben ser independientes.
- Las poblaciones deben tener una varianza igual.

3.8.3. Bases del ANOVA

El análisis de varianza ANOVA está basado en la descomposición de la variación de los datos con respecto a la media global; si la hipótesis nula es verdadera, esta sería una estimación de la desviación estándar, que va acorde a las siguientes variaciones:

- Variación dentro de las muestras: se cuantifica la dispersión de las muestras con sus medias.
- Variación entre las muestras: se cuantifica la dispersión de las muestras con la media global.

3.8.4. Procedimiento para el análisis de varianza ANOVA

- Verificar tanto si los datos tienen una tendencia normal como si se cumplen los supuestos de ANOVA.
- Verificar si se cumple el modelo para un análisis de la varianza de un factor.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \quad \text{para al menos un par } \mu_i, \mu_j$$

- Se plantea el contraste de la hipótesis nula con base en el cociente entre las medias de los cuadrados.
- Se calculan las siguientes expresiones matemáticas que convergen para el análisis final de ANOVA.

- Media global

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}}{n} \quad [\text{Ec. 2}]$$

- Variación total

$$STC = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X})^2 \quad [\text{Ec. 3}]$$

- Variación dentro de los grupos

$$SCD = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad [\text{Ec. 4}]$$

- Variación entre los grupos

$$SCE = \sum_{j=1}^K (\bar{X}_j - \bar{X})^2 * n_j \quad [\text{Ec. 5}]$$

- Evaluar el cociente entre la variación dentro de los grupos con la varianza entre los grupos y según los grados de libertad K-1 y N-k, respectivamente para SCE/K-1 y SCD/n-K; si el cociente entre ambas estimaciones es 1, la hipótesis nula es cierta, y si el cociente es diferente de 1, la hipótesis nula se rechaza.

3.8.5. Datos del ANOVA

Para analizar las hipótesis planteadas y concluir se realizó un análisis de varianzas de un factor. Consta de comparar el valor F calculado respecto al F crítico, según el análisis establecido por Fischer, el cual tiene un nivel de confianza del 95 %. Según sean los resultados, si el valor de F calculado es

mayor que F crítico significa que existen diferencias significativas entre los grupos, por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa rechazando la hipótesis nula, de lo contrario se aceptaría la hipótesis nula rechazando la hipótesis alternativa. Por otro lado, si existen diferencias significativas entre grupos se puede realizar la prueba de múltiples rangos, con la cual se puede saber entre qué grupos existe una diferencia significativa.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis de varianza ANOVA para el presente trabajo de investigación:

Tabla XVIII. Resumen estadístico para la cantidad de polvo separado después del tratamiento

Tipo de lámpara	Corridas	Suma	Promedio	Varianza
T12 ecológica	3	0,1920	0,0640	0,000448
T12 normal	3	0,4090	0,1363	0,000984
T8 ecológica	3	0,0270	0,0090	1,00E-06
T8 normal	3	0,0450	0,0150	7,00E-06

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. ANOVA para la cantidad de polvo separado después del tratamiento

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Probabilidad	F crítico
Entre Grupos	0,031222	3	0,0204074	28,9028	0,00012098	4,066
Intra grupos	0,002880	8	0,0003601			
TOTAL	0,034102	11				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resumen estadístico para la cantidad de vidrio triturado obtenido después del tratamiento**

Tipo de lámpara	Corridas	Suma	Promedio	Varianza
T12 ecológica	3	11,4941	3,8313	0,0197014
T12 normal	3	12,9875	4,2191	0,0044076
T8 ecológica	3	6,6572	2,2190	0,0008284
T8 normal	3	7,9312	2,6437	0,0024221

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **ANOVA para la cantidad de vidrio triturado después del tratamiento**

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Probabilidad	F crítico
Entre Grupos	8,7986267	3	2,932875	428,7895	3,5822E-09	4,066
Intra grupos	0,0547191	8	0,0068398			
TOTAL	8,8533458	11				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Resumen estadístico para la cantidad de aluminio obtenido después del tratamiento**

Tipo de lámpara	Corridas	Suma	Promedio	Varianza
T12 ecológica	3	0,91899	0.306331	0,0001324
T12 normal	3	1,03940	0.346466	2,823E-05
T8 ecológica	3	0,53277	0.177593	5,306E-06
T8 normal	3	0,63474	0.211580	1,5513E-05

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **ANOVA para la cantidad de aluminio obtenido después del tratamiento**

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Probabilidad	F crítico
Entre Grupos	0,05627267	3	0,0187575	413,5137	4,1375E-09	4,066
Intra grupos	0,00036289	8	4,5361E-05			
TOTAL	0,05663556	11				

Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1. Evaluación de la separación del mercurio de los residuos triturados de lámparas fluorescentes

Se presentan los resultados del análisis de mercurio en una muestra de vidrio triturado con polvo fluorescente.

Tabla XXIV. **Resultado del análisis del mercurio en residuos triturados de lámparas fluorescentes**

Muestra	Unidades	Resultados	Método
Vidrio triturado con polvo fluorescente	mg/kg	<2	Análisis espectrofotométrico

Fuente: elaboración propia.

4.2. Evaluación del porcentaje de polvo separado en el tratamiento de lámparas fluorescentes

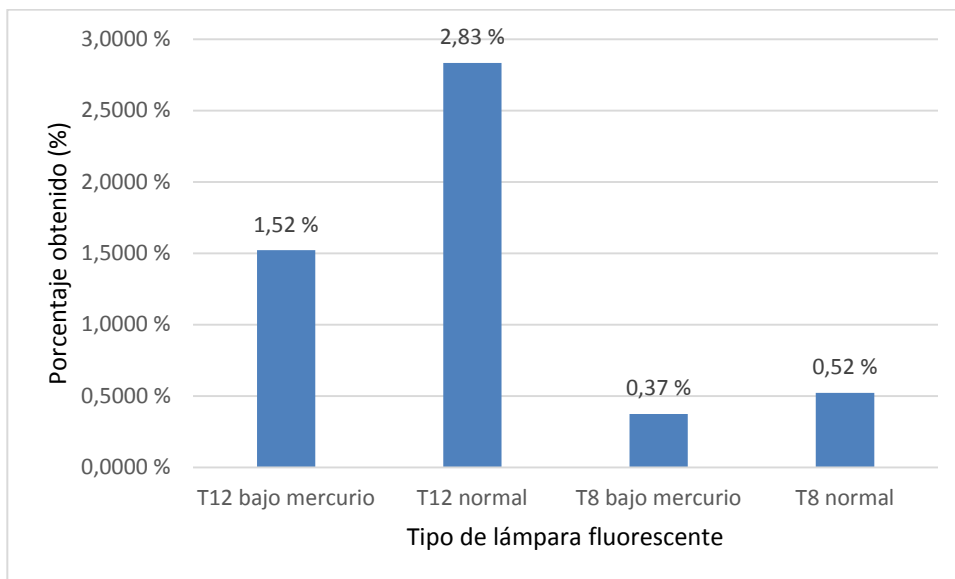
Se presentan los resultados del porcentaje de polvo separado después del tratamiento de cada tipo de lámpara fluorescente.

Tabla XXV. **Porcentaje de polvo obtenido de cada tipo de lámpara fluorescente después del tratamiento**

Tipo de lámpara	Porcentaje obtenido (%):
T12 ecológica	1,52
T12 normal	2,83
T8 ecológica	0,37
T8 normal	0,52

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Porcentaje de polvo obtenido de cada tipo de lámpara fluorescente después del tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

4.3. **Evaluación del porcentaje de vidrio triturado obtenido de cada tipo de lámpara fluorescente después del tratamiento**

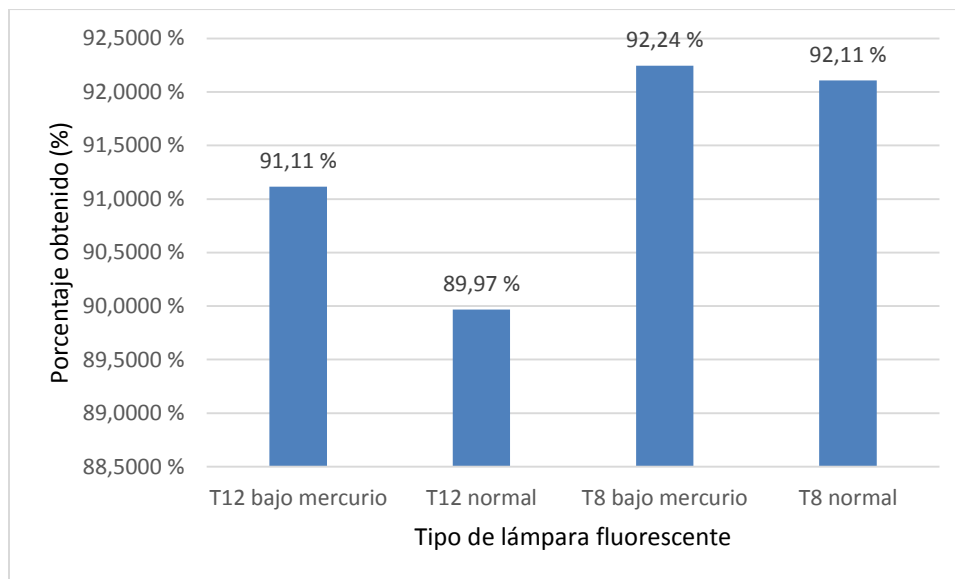
Se presentan los resultados del porcentaje de vidrio obtenido después del tratamiento de cada tipo de lámpara fluorescente.

Tabla XXVI. **Porcentaje de vidrio triturado obtenido después del tratamiento**

Tipo de lámpara	Porcentaje obtenido (%):
T12 ecológica	91,11
T12 normal	89,97
T8 ecológica	92,24
T8 normal	92,11

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Porcentaje de vidrio triturado obtenido después del tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

4.4. Evaluación del porcentaje de aluminio obtenido de cada tipo de lámpara fluorescente después del tratamiento

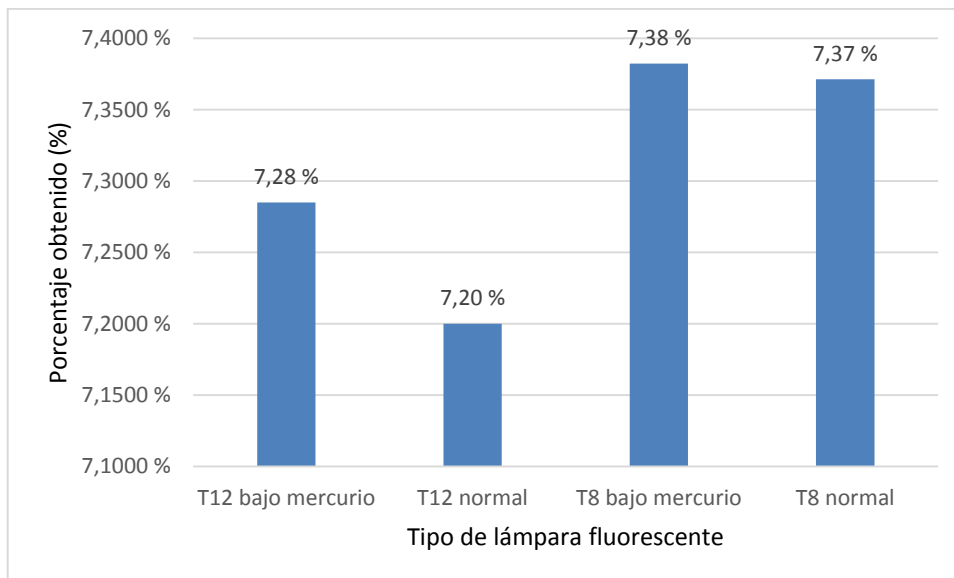
Se presentan los resultados del porcentaje de aluminio obtenido después del tratamiento de cada tipo de lámpara fluorescente.

Tabla XXVII. **Porcentaje de aluminio obtenido después del tratamiento**

Tipo de lámpara	Porcentaje obtenido (%):
T12 ecológica	7,28
T12 normal	7,20
T8 ecológica	7,38
T8 normal	7,37

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Porcentaje del aluminio obtenido después del tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El presente trabajo de graduación tuvo como objetivo evaluar el tratamiento de lámparas fluorescentes para la separación del mercurio contenido utilizando un equipo industrial, este tratamiento consistió en triturar las lámparas con un equipo industrial y separar el mercurio de los residuos triturados y encapsularlo en filtros de carbono activado dentro del equipo industrial.

Para evaluar el tratamiento de lámparas se llevó a analizar una muestra compuesta de los cuatros tipos de lámparas fluorescentes. Al recibir los resultados se determinó que el proceso de tratamiento de lámparas fluorescentes logra separar el mercurio de los residuos de las lámparas, como se puede observar en la tabla XXIV, donde el límite de detección de mercurio es de 2 mg/kg. Los resultados arrojan un nivel menor al límite de detección, por lo que se puede decir que el tratamiento se realizó de manera correcta separando el mercurio contenido.

En la figura 10 se observa la cantidad de polvo que fue retirada de cada tipo de lámpara fluorescente después del tratamiento, al comparar las dos lámparas T12 que poseen las mismas dimensiones en diámetro y longitud. La lámpara T12 normal cuenta con 2,83 % de polvo con mercurio fluorescente, teniendo un 1,31 % más polvo de mercurio en su peso total que la lámpara T12 ecológica que poseía un 1,52 % dentro, validando las especificaciones de la lámpara en cuanto a su bajo contenido de mercurio. De la misma manera para la lámpara T8 normal, contaba con un 0,52 % contenido de polvo fluorescente con mercurio, siendo un 0,15 % de polvo con respecto a su peso total que la

lámpara T8 ecológica que poseía un 0,37 % dentro, ambas lámparas T8 con las mismas dimensiones en diámetro y longitud. Se analizó estadísticamente los resultados obtenidos del polvo fluorescente con mercurio separado de los residuos triturados utilizando un análisis de varianza, en la tabla XIX se puede observar que el F es mayor que el F crítico, indicando que estadísticamente sí existe diferencia significativa en la cantidad de polvo que se extrajo de los diferentes tipos de lámpara, por lo que cada tipo de lámpara cuenta con una diferencia estadísticamente significativa en el polvo fluorescente con mercurio según el tipo que sea.

Para la evaluación del porcentaje de vidrio triturado de cada tipo de lámpara se puede observar en la figura 11 que el tipo de lámpara T12 ecológica contenía un 91,12 % de vidrio en su composición, generando un 1,15 % más de vidrio triturado que la lámpara T12 normal, que poseía un 89,97 %, mientras que en los tipos de lámparas T8, la lámpara T8 ecológica poseía un 92,24 % de vidrio en su composición, generando un 0,14 % más de vidrio triturado que la lámpara t8 normal que poseía un 92,11 %. Se analizó estadísticamente todas las repeticiones del tratamiento de lámparas fluorescentes usando un análisis de varianza para la cantidad de vidrio obtenido, como se observa en la tabla XXI el F es mayor al F crítico, indicando que cada lámpara sí posee una diferencia significativa en la cantidad de vidrio triturado que se genera después del tratamiento.

Del mismo modo, para la evaluación del porcentaje de aluminio obtenido de cada tipo de lámpara se puede observar en la figura 12 que el tipo de lámpara T12 ecológica contenía un 7,29 % de aluminio en su composición, generando un 0,0848 % más de aluminio que la lámpara T12 normal, que poseía un 7,20 %. Para las lámparas de las mismas dimensiones T8, la lámpara T8 ecológica poseía un 7,38 % de vidrio en su composición, generando un

0,01 % más de aluminio que la lámpara t8 normal, que poseía un 7,37 %. Se utilizó igualmente un análisis de varianza para analizar la cantidad de aluminio obtenido, como se observa en la tabla XXIII el F es mayor al F crítico, indicando que cada lámpara sí posee una diferencia significativa en la cantidad de aluminio contenido después del tratamiento de separación del mercurio.

Como se observa en los resultados obtenidos y en la muestra analizada, se pudo evaluar y validar, tanto cualitativa como cuantitativamente, las hipótesis de trabajo propuestas con anterioridad, y el proceso de tratamiento para la separación del mercurio en lámparas fluorescentes utilizadas por la empresa REPELSA.

CONCLUSIONES

1. Se logra validar el tratamiento de lámparas fluorescentes, ya que según el análisis de laboratorio el nivel de concentración es más bajo del límite detectable, logrando encapsular el mercurio dentro del equipo industrial.
2. Se obtuvo 2,83 % de polvo fluorescente con mercurio del total del peso de las lámparas fluorescentes T12, siendo el tipo de lámpara con mayor contenido de este polvo.
3. La lámpara ecológica T8 genera un 92,24 % de vidrio triturado después del tratamiento de trituración, siendo el tipo de lámpara que más generó residuos de vidrio triturado de todo su contenido.
4. Todos los tipos de lámparas fluorescentes contienen al menos un 7 % de aluminio en su contenido, siendo la lámpara T8 ecológica con 7,38 % la que mayor porcentaje poseía.
5. Sí existe diferencia significativa en la cantidad de polvo fluorescente con mercurio, vidrio triturado y aluminio contenido entre los 4 tipos de lámparas analizadas.
6. Sí existe una diferencia en la cantidad de polvo fluorescente con mercurio entre las lámparas T12 normal y T12 ecológica, a pesar de que estas poseen las mismas dimensiones en diámetro y longitud.

7. Sí existe diferencia en la cantidad de polvo fluorescente con mercurio entre las lámparas T8 normal y T8 ecológica, a pesar de que estas poseen las mismas dimensiones en diámetro y longitud.

RECOMENDACIONES

1. Crear reglamentos y políticas nacionales que regulen la gestión de residuos peligrosos, esto evitará que sustancias como el mercurio contaminen o dañen la salud de las personas y de los seres vivos.
2. Todas las lámparas fluorescentes que hayan finalizado su vida útil deben someterse a cualquier tratamiento que garantice la separación del mercurio de los subproductos generados, esto con el fin de disminuir los impactos ambientales generados y daños a la salud de las personas y seres vivos.
3. Realizar análisis en los subproductos que se generen periódicamente para garantizar que estos no contengan mercurio y pueda ocasionar problemas ambientales o de salud.
4. Someter los subproductos generados a un tratamiento secundario, que logre separar los residuos de vidrio triturado y aluminio para poder realizar una valoración económica.
5. Incluir, como parte del servicio integral, la gestión de las lámparas fluorescentes al finalizar su vida útil, de parte del productor y comercializador, para cerrar el ciclo de vida de las lámparas fluorescentes y evitar daños posteriores.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMSI Consultores LTDA. *Hoja de seguridad de tubos fluorescentes usados*. Bogotá, Colombia: AMSI Consultores LTDA, 2010. 104 p.
2. ANGULO ABREO, Liseth. *Análisis de alternativas para el manejo de lámparas fluorescentes de tubo desechadas -Área metropolitana del Valle de Aburra-*. Bogotá, Colombia: Univerisdad de la Salle, 2006. 125 p.
3. BRUGNONI, Mario. *Estudio de impactos en redes de distribución y medio ambiente debido al uso intensivo de lámparas fluorescentes compactas*. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires, 2006. 121 p.
4. CAMBESES POLANCO, Sara Leonor. *A situação da destinação pós-consumo de lampadas de mercúrio no Brasil*. Brasil: SÃO CAETANO DO SUL, 2007. 119 p.
5. MARTÍNEZ, N. Carolina. *Gestión interna de lámparas con mercurio*. La Plata, Argentina: VII Congreso de Medio Ambiente/AUGM, 2012. 39 p.
6. MÉNDEZ, Héctor Rolando. *Evaluación de la recuperación y tratamiento del mercurio contenido en los tubos de descarga (ampollas de cuarzo) provenientes del procesamiento de los desechos sólido-líquido de las luminarios municipales de Mixco*. Trabajo de

graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2013. 235 p.

7. SUNTECÚN, Alex. *Tratamiento primario de desechos de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión del alumbrado público en las municipalidades de Guatemala*. Trabajo de graduación de Maestría en Gestión Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 112 p.
8. THEISSEN, Carolina. *Elaboración de un procedimiento técnico para el manejo de los desechos sólidos de las lámparas de mercurio del alumbrado público*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2013. 165 p.
9. US EPA (Estados Unidos, Environmental Protection Agency). *Fluorescent LAMP recycling*. [en línea]. <[https://www.epa.gov/cfl/recycling - and - disposal - cfls -and-other-bulbs-contain-mercury](https://www.epa.gov/cfl/recycling-and-disposal-cfls-and-other-bulbs-contain-mercury)>. [Consulta: 3 de mayo de 2018].

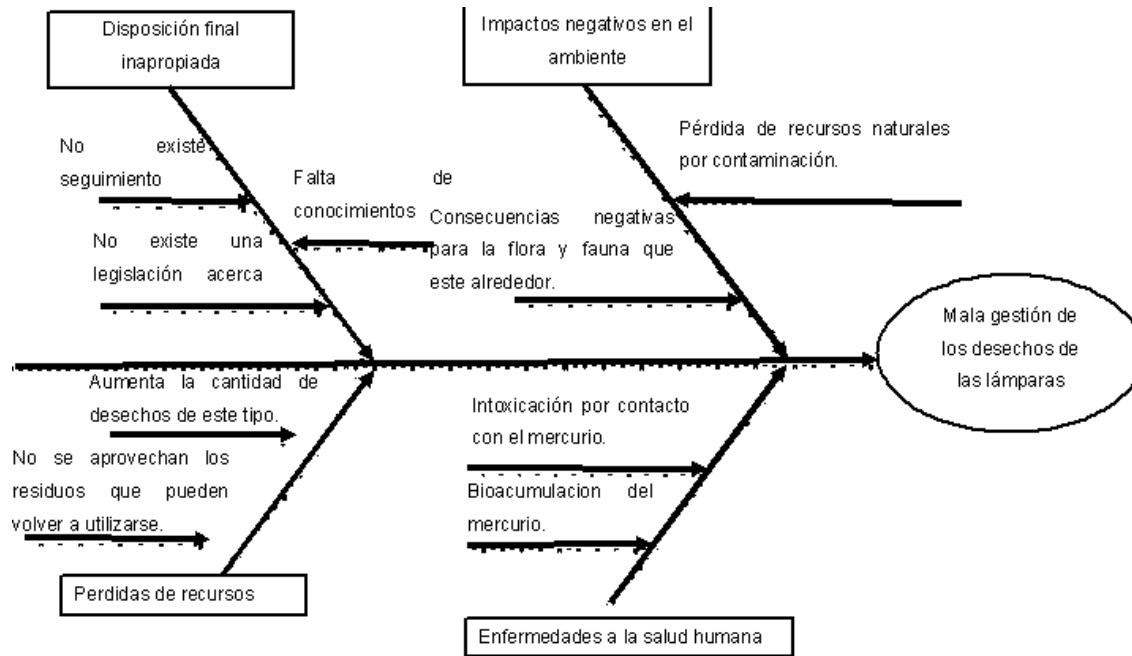
APÉNDICES

Apéndice 1. **Requisitos académicos**

Carrera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Ambiental	Química Industrial	Química Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclo del mercurio • Componentes biológicos en el ambiente
		Calidad del Agua	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminantes en el agua • Residuos líquidos
		Calidad del Aire	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminantes atmosféricos • Sistemas de tratamiento • Residuos gaseosos
	Sanitaria	Saneamiento Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Relleno sanitario
		Introducción a la evaluación de impacto ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de impactos ambientales • Medidas de control y mitigación
	Complementaria	Manejo adecuado de los desechos sólidos.	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamientos • Residuos sólidos • Residuos peligrosos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

- Equipo de protección personal

Anexo. 1. Traje de protección



Fuente: Comercial Femu. *Traje buzo de protección*. <http://comercialfemu.com/index.php/traje-buzo-proteccion-5-6-blanco-3m-t-l.html>. Consulta: 3 de mayo de 2018.

Anexo 2. Guantes de protección



Fuente: Store México. *Guantes látex de hule y nitrilo*. <http://safetystoremexico.com/esp/items/58/guantes-latex-hule-y-nitrilo>. Consulta: 3 de mayo de 2018.

Anexo 3. Máscara de protección



Fuente: Ali express. *Máscara de protección*. <https://es.aliexpress.com/popular/organic-vapor-mask.html>. Consulta: 3 de mayo de 2018.

Anexo 4. Lentes de protección



Fuente: ESSCA. *Lentes de seguridad industrial*. <http://www.essca.com.ve/producto/lente-de-seguridad-industrial-claro/>. Consulta: 25 de mayo de 2018.

- Análisis de mercurio en muestra de vidrio triturado

Anexo 5. Análisis de mercurio en muestra compuesta de vidrio triturado



ECOSISTEMAS
PROYECTOS AMBIENTALES

LABORATORIO AMBIENTAL E INDUSTRIAL

17 avenida 2-39 zona 4 Mixco | Guatemala | Ofibodegas Zaragoza 2 | Bodega 2
502 + 2437 7224 | 2437 4455
laboratorio@ecosistemas.com.gt | info@ecosistemas.com.gt | www.ecosistemas.com.gt

Ref 1493-19
Pág 1/1

REG 016 Resultados de Análisis

Muestra: 1 muestra sólida

Análisis solicitado por: Eddy Pérez

Dirección: km 17.5 Carretera a Lo De Dieguez, Villas Linda Vista Lote 30, Departamento de Guatemala.

Procedencia de la muestra: Muestra de 96 lámparas fluorescentes trituradas.

Fecha de ingreso de muestras: 030619

Fecha de análisis: 030619-110619

Fecha del informe: 110619

Identificación de la muestra: 100 gramos de vidrio triturado de lámpara fluorescente.

Correlativo Ecosistemas: 16649

Parámetros Analizados:

PARAMETRO	DIMENSIONAL	LIMITE DE DETECCION	RESULTADO
Mercurio Hg	mg/kg	2	< 2

Notas:

Captación de muestras: La muestra fue captada por personal ajeno a Ecosistemas.

Transporte y preservación de la muestra: Temperatura ambiente.

Metodología base: Espectrofotometría de Absorción Atómica. Standard Methods for the examination of water and wastewater APHA, AWWA, WEF 23 Ed. / Digestion en horno microondas.

Los análisis han sido realizados en las instalaciones del laboratorio.

Los resultados obtenidos corresponden únicamente a la muestra recibida por el personal de Ecosistemas Proyectos Ambientales.

Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización escrita de Ecosistemas Proyectos Ambientales.



Oscar Pérez
Gerente Técnico



VoBo Ing. Fernando Fuentes
Gerente de Calidad

Fuente: Laboratorio Ecosistemas, S.A.

- Tipos de lámparas fluorescentes

Anexo 6. **Lámpara fluorescente T12 normal**



Fuente: bodega de REPELSA.

Anexo 7. **Lámpara fluorescente T12 ecológica**



Fuente: bodega de REPELSA.

Anexo 8. **Lámpara fluorescente T8 normal**



Fuente: bodega de REPELSA.

Anexo 9. **Lámpara fluorescente T8 ecológica**



Fuente: bodega de REPELSA.

Anexo 10. **Equipo de tratamiento de lámparas fluorescentes industriales**
BALCAN



Fuente: bodega de REPELSA.

