



Triturador de lámparas con colector de mercurio



**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO**

**PRESENTA:
CARLOS ALBERTO HERNÁNDEZ QUINTANA**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS**

AGRADECIMIENTOS

Contenido

Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
Introducción.....	2

CAPÍTULO 1

El mercurio y sus peligros en la salud

1.1. Intoxicación por mercurio.....	4
1.2. Tratamiento	5
1.3. Enfermedad de Minamata	5
1.4. Fuentes emisoras de mercurio en México	6
1.5. Impacto ambiental del mercurio.....	7

CAPÍTULO 2

Las lámparas y el desecho de fluorescentes en México

2.1. Lámpara fluorescente.....	8
2.2. Lámpara fluorescente.....	9
2.3. Lámparas de halógeno.....	9
2.4. Lámparas de inducción.	10
2.5. Lámparas de descarga de alta intensidad (HID).....	10
2.6. Desechos de lámparas en México.....	12
2.7. Norma de Regulación de Lámparas Fluorescentes	13
2.8. Cuestiones por resolver en México sobre las LFCA's	14

CAPÍTULO 3

Carbón activado y filtro electrostático

3.1. La filtración por carbón activado.....	15
3.1.1. Fabricación y reciclado de carbón activado.	15
3.2. Principios eléctricos del filtro electrostático.....	16
3.2.1. Efecto triboeléctrico.	17
3.2.2. Campo electrostático.....	17
3.3. Filtro electrostático	18

CAPÍTULO 4

Trituradores de lámparas fluorescentes y el sistema propuesto

4.1. Partes importantes para el diseño del triturador	22
4.2. Análisis teórico del sistema propuesto	24
4.2.1. La trampa inercial	26
4.3. Resultados del primer sistema propuesto	28
4.4. Modificaciones del triturador	31

CAPÍTULO 5

Actuar y evolucionar

5.1. El reciclado	35
5.2. El futuro inmediato de la iluminación	36
5.2.1. El led	36
5.2.2. El led de potencia	37

Conclusiones.	39
Anexo 1	41
Anexo 2	47
Referencias.	49

Índice de figuras

Fig.1. Proceso seguido para el intercambio de lámparas.....	3
Fig.2. Porcentaje de desechos	6
Fig.3. Comportamiento de las emisiones de mercurio con el medio marino, la fauna de esta zona es afectada por las formas más tóxica de este elemento.	7
Fig.4. Foco incandescente	8
Fig.5. Tipos de foco fluorescente	9
Fig.6. Foco y diseño usual para lámpara de halógeno	9
Fig.7. Diseño común para lámparas de inducción	10
Fig.8. Tipos de lámpara HID.....	10
Fig.9. Lámpara rota	12
Fig.10. Ejemplificación de la estructura del carbón activado	15
Fig.11. Chemviron carbón. Ciclo de reactivación del carbón activado	16
Fig.12. Materiales que presentan el efecto triboeléctrico	17
Fig.13. Campo eléctrico en carga positiva y negativa	18
Fig.14. Entrada de aire contaminado, carga de partículas, deposición de partículas cargadas y salida de aire limpio.	18
Fig.15. Filtro electrostático de 2 etapas con representación de líneas de campo eléctrico.	19

Fig.16. Partes del filtro electrostático de polímero	19
Fig.17. Triturador Balcan	20
Fig.18. Triturador MRT	21
Fig.19. Triturador “Bulb Terminator”	21
Fig.20. Bulb Eater de Air Cycle	22
Fig.21. Modelo básico de triturador	22
Fig.22. Extractor de aire de 12cm	23
Fig.23. Juego de discos de impacto.....	23
Fig.24. Depósito debajo del sistema de discos de impacto.....	23
Fig.25. Diseño inicial para cámara de triturado.....	24
Fig.26. Contenedores metálicos para	24
Almacenar el material triturado	24
Fig.27. Configuración usada por Argonne.	25
Fig.28. Conjunto completo del sistema de impacto propuesto	25
Fig.29. Vista transversal del flujo de aire ideal	26
Fig.30. Curvas de corte para Impactadores ideales y reales (Fuente: Hinds 1982)	27
Fig.31. Triturador ensamblado	29
Fig.32. Comportamiento del flujo de aire con y sin la compuerta abierta	29
Fig.33. Grafico 3D de líneas de flujo a través de una abertura	30
Fig.34. Análisis de flujo a través de un ventilador con y sin rejilla para corrección de dirección.....	30
Fig.35. Presión estática a través del separador de partículas	30
Fig.36. Sistema de trituración.....	32
Fig.37. Comportamiento del flujo de aire cuando la parte inferior está sellada.....	32
Fig.38. Nueva configuración del sistema de separación de partículas.	33
Fig.39. Gráfico de temperatura en la superficie de impacto de cobre con 0°C en el contorno.	33
Fig.40. Ensamble de triturador sin sistema de separación de partículas.	34
Fig.41. Proceso de LFCA’s para el triturado.....	35
Fig.42. Reverse Vending de lámparas.	36
Fig.43. Partes del LED.....	37
Fig.44. Partes del LED de potencia.....	37
Fig.45. Foco con Leds de potencia	38
Fig.46. Lámpara tubular de Leds de potencia	38
Fig.47. Mallado del dominio de aire con discos en el interior.....	41
Fig.48. Mallado de la cámara de triturado	41
Fig.49. Ventilador NOCTUA de 12 cm.	41
Fig.50. Ventilador AEROCOOL 12 cm.	41
Fig.51. Rodillos para impacto.	42
Fig.52. Motor de ¼ de caballo de fuerza	43
Fig.53. Ejemplificación de banda con poleas.....	43
Fig.54. Poleas de diferentes canales.....	44
Fig.55. Corte transversal de cada tipo de polea propuesta.....	44
Fig.56. Perfil de la banda 3V	45
Fig.57. Rodillo con marcas de la posición de los pesos de las diferentes partes.....	45
Fig.58. Base de triturador.....	46
Fig.59. Chumacera de rodillos	46
Fig.60. Rodillo modificado con marcas de la posición de los pesos de diferentes elementos.....	47



Resumen

Las lámparas fluorescentes contienen un máximo de 5 miligramos de mercurio, y estas se desechan sin ningún control, llegando finalmente a los depósitos de basura, donde este elemento se evapora o se filtra en el subsuelo. En México no se tiene un sistema nacional de recolección de residuos de lámparas y los sistemas que facilitarían esta tarea tienen precios muy elevados, por tanto se creó el diseño de un triturador económico, con el fin de apoyar el reciclado. Este triturador es capaz de retener partículas inferiores a 3 micrómetros, evita la evaporación del mercurio retenido y está respaldado por un análisis de los fenómenos que en este se desarrollan. Las lámparas están siendo reemplazadas por la tecnología LED y las máquinas destinadas a reciclar tendrán solo un breve periodo de uso, el cual está definido por la conversión total a estos dispositivos.

Abstract

Fluorescent lamps contain a maximum of 5 milligrams of mercury, and these are discarded without any control, finally reaching landfills, where this element evaporates or percolates into the ground. In Mexico there is no national system of collection of waste lamps and systems that facilitate this work have very high prices, so the design of an economic crusher was created to support recycling. This disposer is able to hold less than 3 microns, prevents evaporation of mercury retained and is supported by an analysis of the phenomena in this develop. The lamps are being replaced by LED technology and machines intended for recycling have only a short period of use, which is defined by the total conversion to these devices.



Objetivo general

Generar el diseño de un triturador para auxiliar el reciclado de lámparas que contienen mercurio, con el propósito de facilitar así la creación de un control de desechos para los elementos con una vida útil finalizada.

Objetivos específicos

- Diseñar un triturador para poder colocar cualquier tipo de lámpara.
- Hacer un diseño de fácil armado a través de materiales prefabricados.
- Crear una cámara de triturado que evite la emisión de los gases contenidos en la lámpara.
- Facilitar el mantenimiento de las partes del triturador por medio de un diseño apto para esta tarea.
- Crear un filtro de aire con un rendimiento equivalente al uso de carbón activado para evitar la exposición directa del mercurio al ambiente.

Introducción.

En el Mundo se ha incrementado la creación de programas enfocados en el ahorro de energía con el objetivo de generar un menor perjuicio ambiental, generar un mayor beneficio económico y hacer un uso eficiente de las fuentes de energía. Actualmente la materia prima para la generación de electricidad son los combustibles fósiles, materiales no renovables que además están limitados en cantidad. Como alternativa se disponen de sistemas generadores de energía que usan fuentes renovables, sin embargo un uso racional de la energía, por parte de los consumidores, también es necesario. La contribución de estos puede ser por medio del cambio de focos incandescentes a focos ahorradores, la creación de espacios térmicos, la disminución del uso de sistemas de calefacción o simplemente aprovechar la luz natural.

México, dentro de este panorama, ha y sigue desarrollando proyectos para generar energía a partir de recursos renovables, enfocados en hacer un uso eficaz de la energía. Uno, fue el diseñado durante 2008, el proyecto llamado **programa luz sustentable** a cargo del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), en éste se planeó hacer un cambio de las lámparas incandescentes (LI) a las lámparas fluorescentes compactas autobalastadas (LFCA) cuyo propósito fue provocar una disminución del consumo de energía eléctrica y reducir a la vez las emisiones de dióxido de carbono; su implementación inició con el proyecto piloto que se aplicó a 125 localidades del país, en éste se intercambiaron hasta tres focos incandescentes por LFCA's a las familias pertenecientes al Programa de Desarrollo Humano Oportunidades. La prueba logró la sustitución de cuatro mil dispositivos.

El éxito del programa piloto impulsó su aplicación a nivel nacional, éste consistió en cambiar cuatro focos incandescentes por un número igual de LFCA's (Ver figura 1) en puntos de canje establecidos. El proyecto se dividió en dos partes por la gran cantidad de focos en el país, el FIDE estimaba reemplazar 45.8 millones de elementos por tanto la primera fase arrancó con el objetivo de distribuir 22.9 millones de LFCA's, una cifra que se alcanzó aproximadamente un año después (14 de Junio de 2012).

El FIDE se preparó para la segunda etapa del proyecto, enfocándose en incrementar los puntos de canje y en dar al usuario la facilidad de elegir entre las características de las



lámparas. Arrancó con la misma modalidad de intercambio y aparte se hizo entrega de focos a los participantes de la primera fase sin la necesidad de entregar un dispositivo a cambio, en esta etapa se esperaba el canje de otros 22.9 millones de LFCA's para cubrir la cifra meta del programa. El 6 de septiembre de 2012, a menos de un año del inicio de la segunda parte, se terminaron de repartir 47. 2 millones de lámparas, logrando superar la cantidad estimada.

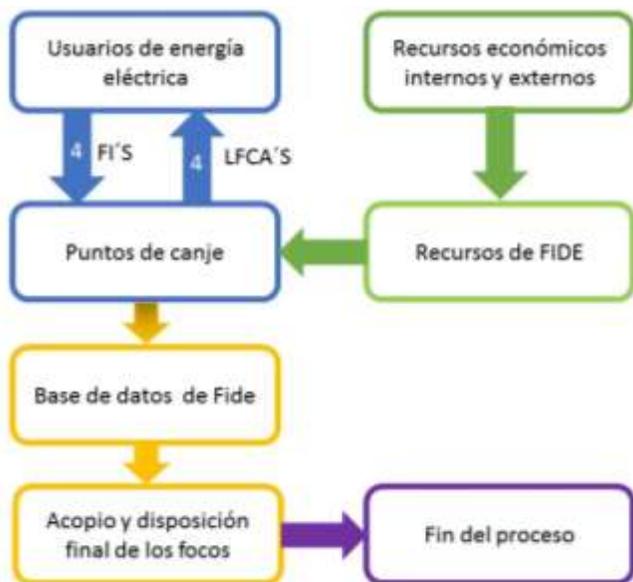


Fig.1. Proceso seguido para el intercambio de lámparas

Se distribuyeron millones de LFCA's a través del programa coordinado por el FIDE, situación que aparte de generar un beneficio energético creó una incertidumbre acerca de los desechos de lámparas, debido a que en México no existe un sistema de recolección y reciclado preparado para tratar este tipo de dispositivos que se caracterizan por su contenido de mercurio. Sin embargo actualmente si existe maquinaria especializada para tratar las lámparas y poder así reutilizar los materiales, pero por su elevado costo son difíciles de adquirir. En vista de este problema se emprendió el proyecto de diseñar un triturador de lámparas para apoyar el reciclado y evitar que los desechos perjudiquen al ambiente y a la salud.

Todas las fábricas emiten fluidos al ambiente y tratan de retener los elementos peligrosos por medio del uso de filtros. Pocos conocen el contenido de estos gases, que pueden contener mercurio, un elemento es muy tóxico. Se puede estar expuesto a esta sustancia al romperse la lámpara de la recamara, al recoger las gotas de metal que salieron del termómetro o incluso por solo vivir cerca de zonas que emiten este metal. Existe un riesgo inminente a causa de la poca información puesta al alcance de la población y ésta podría estar corriendo peligro.

Los focos que se utilizan para alumbrar todos los espacios oscuros que ocupa la humanidad, pueden contener mercurio, y se usan indiscriminadamente y se desechan a la basura sin ningún control, perjudicando a los seres vivos. Pocas personas se preocupan por este contexto, razón por la cual se ha propuesto un triturador que apoye el reciclado de los focos, una máquina que ayudará al ambiente en lo que otras tecnologías menos dañinas terminan de remplazar a las lámparas.



CAPÍTULO 1

1. El mercurio y sus peligros en la salud

Son tres las principales formas tóxicas del mercurio, el vapor de mercurio (Hg), las sales mercúricas (Hg^+ , Hg^{2+}) y los mercuriales orgánicos (Metil-mercurio ($MeHg$), Dimetil-mercurio ($DMHg$)). Este metal en su estado elemental sólo es ligeramente tóxico cuando se ingiere porque se absorbe una cantidad minúscula dentro del cuerpo, sin embargo sus vapores son absorbidos por todos los tejidos¹. El escenario se complica si el elemento se infiltra en el sistema circulatorio ya que cambia a una forma más tóxica que se acumula en mayor proporción en el cerebro, en los pulmones y en los riñones, no obstante la parte más sensible es el sistema nervioso central porque la exposición a este elemento puede provocar un desorden neurológico y también de comportamiento. Se presentan en su mayoría casos de disfunciones renales puesto que los riñones son los órganos que interactúan por más tiempo con el mercurio, lapsos de 30 a 90 días. En caso de exponerse a cualquiera de las formas tóxicas, todo el cuerpo se contamina, por esta razón se tiene especial cuidado para evitar la inhalación en mujeres embarazadas puesto que el mercurio atraviesa la membrana placentaria causando una forma congénita de la enfermedad. Para saber si una persona está a tiempo de cambiar sus hábitos y evitar daños irreversibles, es necesario realizar una prueba de sangre y verificar que la concentración sea menor a los 5.8 nanogramos (ng) de mercurio por cada mililitro (ml) de sangre, únicamente debajo de esta cantidad es seguro no tener efectos adversos.

El mercurio libre, por ejemplo el de los termómetros, no se absorbe en el tracto gastrointestinal, pero es muy volátil al exponerlo al medio ambiente y sus vapores pueden pasar a través de las mascarillas ordinarias, provocando una intoxicación por inhalación. Los derivados mercuriales se encuentran en fungicidas, en ciertos antisépticos y pigmentos, sustancias que se utilizan ampliamente en la industria. En algunas zonas se han identificado desechos industriales que contienen mercurio y el consumo de animales marinos de aguas contaminadas causa problemas sanitarios graves, como fue el caso de los 1970's en la bahía de Minamata.

1.1. Intoxicación por mercurio

El envenenamiento agudo por mercurio suele ocurrir por la ingesta de sales de mercurio causando un sabor metálico, salivación, sed, sensación de quemadura en la garganta, decoloración y edema de las mucosas orales, dolor abdominal, vómito, diarrea sanguinolenta. Además, la nefropatía² directa origina insuficiencia renal aguda llegando a causar la muerte.

La inhalación de altas concentraciones de vapores de mercurio metálico provoca neumonía química aguda³. La forma crónica debida a la ingesta repetida de cantidades muy pequeñas, se caracteriza por irritabilidad, salivación excesiva, pérdida de los

¹ Un tejido es una estructura constituida por un conjunto organizado de células.

² La nefropatía es la denominación genérica de las enfermedades renales.

³ Neumonía química: Inflamación de los alveolos en los pulmones



dientes, lesiones gingivales, balbuceos, temblor, vértigo, debilidad, ataxia⁴, daño pulmonar y cerebral a largo plazo.

La exposición a pequeñas dosis de los derivados alquilo de mercurio (forma orgánica) causa problemas pasado un largo tiempo, pero una dosis elevada puede causar los mismos en un lapso corto. Dentro de los síntomas neurológicos que puede causar se encuentra: el entumecimiento de ciertas partes de la piel, estremecimiento o temblor incontrolable, incapacidad para caminar bien, ceguera, problemas de memoria y hasta convulsiones. Esta es la forma más tóxica para el embarazo.

1.2. Tratamiento

Para el caso de envenenamiento, no hay un tratamiento específico y son usadas diferentes técnicas. Cuando se presentan los síntomas relacionados con el mercurio elemental se puede tratar al paciente con oxígeno o con aire mezclado con carbón activado. En caso de ingestión de mercurio orgánico e inorgánico, se succiona el mercurio contenido en los pulmones o se realiza un lavado gástrico, después se recibe dimercaprol⁵ para mantener al tóxico alejado del cerebro y los riñones. La dosis se utiliza por semanas o meses pero no es recomendado debido a la propia toxicidad del fármaco.

En caso de envenenamiento crónico, se retira inmediatamente al paciente de la exposición. El tratamiento incluye medicamentos parecidos al dimercaprol sin embargo los daños neurológicos son irreversibles

1.3. Enfermedad de Minamata

La enfermedad es nombrada de esta forma por el fenómeno que se observó primeramente entre la población japonesa de la comunidad de Minamata. Una de las variadas formas de intoxicación puede ser causada por la ingesta de cereales contaminados con compuestos provenientes de las emisiones de minas y fábricas, o por el consumo de alimentos marinos procedentes de aguas contaminadas con desechos industriales que suelen contener sales de mercurio soluble. Así inició el desastre en esta región de Japón, los peces y mariscos habían acumulado metilmercurio en su organismo por la exposición a los desechos tóxicos vertidos en el océano y la población continuaba con un consumo normal. Los síntomas tardan en aparecer varias semanas o quizá meses:

- Parestesias de la boca y extremidades
- Visión en túnel
- Trastornos del habla, de la audición, de la coordinación muscular
- Debilidad
- Inestabilidad emocional y estupor.

Dependiendo de la forma en la que se combine el mercurio con otros elementos en el ambiente, éste puede permanecer durante horas, meses o hasta años en la atmósfera. En la bahía de Minamata se tardaron más de diez años en encontrar la causa de los

⁴ Ataxia: falta de control muscular durante los movimientos voluntarios

⁵ Dimercaprol : Sustancia capaz de unirse iónicamente a los metales que es usada desde los 1950´s para tratar el envenenamiento por arsénico, cadmio y mercurio



síntomas en los habitantes, no se pudo evitar la muerte de cientos de personas y el daño en la salud de millones.

1.4. Fuentes emisoras de mercurio en México

Existen varias fuentes a través de las cuales se emite el mercurio: centrales carboeléctricas y termoeléctricas, fundidoras de metales, cementeras, fábricas productoras de cal, incineradoras de residuos biológico-infecciosos, industrias de celulosa y papel, manufacturas de lámparas fluorescentes y termómetros, etc. Pero no sólo la industria emite este metal, también puede deberse a la aplicación y remoción de amalgamas dentales, a la fractura de una LFCA, al desecho incorrecto de una batería o hasta del mal manejo de un termómetro roto. Dentro de los principales emisores se excluye a los basureros debido a que no debería existir mercurio en estos lugares, sin embargo, no se tiene un control de la basura de los productos que contienen este metal y su destino suele ser un tiradero. Los desechos contaminados de mercurio son expuestos al ambiente, poniendo en riesgo la salud de los trabajadores del servicio y a las localidades cercanas.

En la nación existen:

- **Centrales carboeléctricas:** la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con dos instalaciones en Coahuila, cada una con cuatro generadores, las plantas en conjunto producen 17,700 GigaWatts hora (GW/h).
- **Centrales termoeléctricas:** CFE cuenta con 23 centrales en operación, en conjunto generan aproximadamente 87,800 GW/h
- **Fundidoras:** en la república mexicana existen más de 1000 empresas fundidoras que se concentran en los estados de: Guadalajara, Nuevo León, Coahuila, San Luis Potosí y en la Ciudad de México.
- **Cementeras:** existen 32 plantas en el país con una capacidad de producción en conjunto de 51 millones de toneladas de cemento al año.
- **Fábricas de papel y celulosa:** actualmente hay 27 empresas, distribuidas a través de 58 plantas en 20 estados de la república.
- **Tiraderos de basura:** hay en México aproximadamente mil 882. El 87% son a cielo abierto y 13% rellenos sanitarios. El promedio de basura diaria recolectada a través de todas es de 86 mil 343 toneladas.

Las entidades que producen más desechos son:

- Ciudad de México
- Estado de México
- Jalisco
- Veracruz
- Guanajuato
- Tamaulipas
- Nuevo León

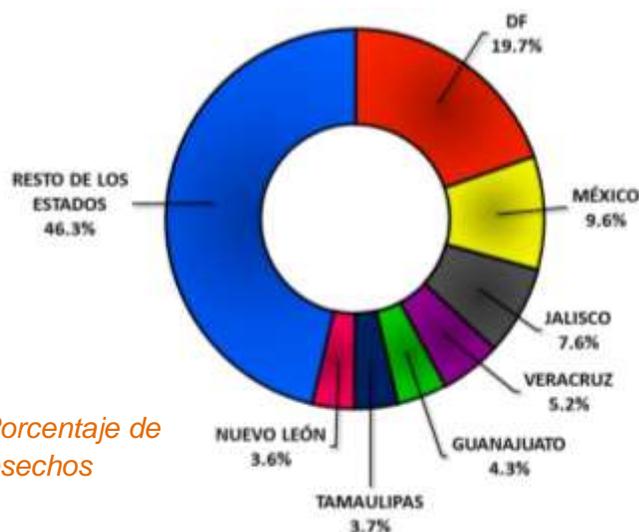


Fig.2. Porcentaje de desechos



1.5. Impacto ambiental del mercurio

Sin importar la forma en que el mercurio llegue al ambiente, el objetivo es el humano. El elemento existe en la naturaleza desde hace millones de años, el ciclo nativo sigue el ciclo del agua y con el tiempo el metal es transformado en su forma orgánica e inorgánica para terminar siendo parte de la corteza terrestre. Actualmente siguen existiendo medios que emiten mercurio, han provocado un desequilibrio de la concentración en el ambiente y estos son los efectos ocasionados:

- Contaminación de la cadena trófica: Fitoplancton, zooplancton, peces y moluscos diversos, fauna y flora terrestre y seres humanos.
- Destrucción de vegetación en las orillas de las zonas de actividad de dragas⁶.
- Impacto directo sobre la reproducción y alimentación de los peces y otras especies acuáticas.
- Deceso de animales terrestres intoxicados por habitar y alimentarse de zonas contaminadas.
- Lluvias con mayor cantidad de mercurio sobre ciudades y campos dedicados a la agricultura.

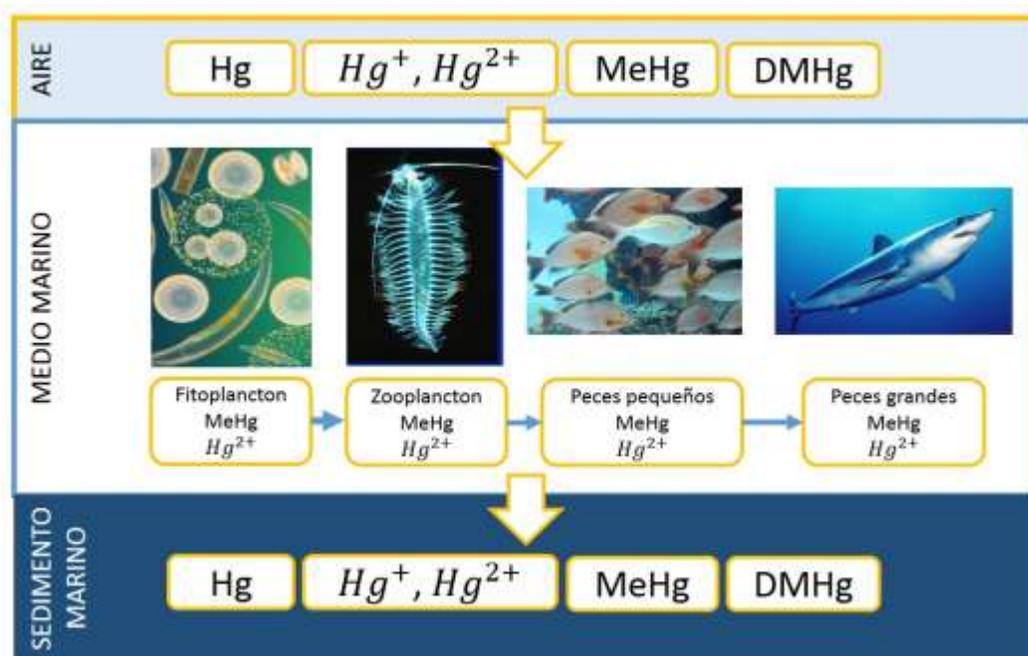


Fig.3. Comportamiento de las emisiones de mercurio con el medio marino, la fauna de esta zona es afectada por las formas más tóxicas de este elemento.

El mercurio, es un material del cual se debe evitar la exposición a grandes cantidades y a periodos prolongados, debido a los daños irreversibles que puede ocasionar. Sin importar el origen de la emisión, son afectados todos los seres vivos, principalmente el humano por estar en la cima de la cadena alimenticia. Y aun existiendo medicamentos para tratar daños leves, todas las emisiones actuales deben vigilarse, reducirse y evitarse.

⁶ Una draga es una embarcación utilizada para excavar debajo del nivel del agua, y elevar el material extraído hasta la superficie



CAPÍTULO 2

2. Las lámparas y el desecho de fluorescentes en México

Las lámparas son el dispositivo artificial que se usa para generar luz por una transformación de energía eléctrica en energía lumínica. El uso de elementos eléctricos para iluminar se inicia con la aparición de la bombilla, invento que cambió la vida de la sociedad desde 1879. A partir de entonces los avances tecnológicos en cuanto a iluminación fueron apareciendo y no sólo para iluminar pequeños espacios. Actualmente se cuenta con diferentes dispositivos para diversos usos y la mayoría están compuestas por lo siguiente:

- Bulbo
- Bases o casquillos
- Electrodo
- Gas inerte
- Elemento fosforescente o generador de luz

A continuación se describen las lámparas más comunes, destacando sus características y los elementos que las conforman.

2.1. Lámpara fluorescente

Su funcionamiento se basa en el uso del fenómeno del efecto Joule. El fino hilo de Tungsteno en el interior de bulbo se calienta por el paso de la corriente eléctrica, alcanza una temperatura promedio de 2900° Celsius, presentándose así la incandescencia⁷. Éste diminuto alambre no se oxida ni se desintegra por la presión de vacío en un bulbo de vidrio, asimismo es introducido con un gas inerte para disminuir su deterioro.

Éstas son las más antiguas y su uso todavía es común a pesar de que existan focos mucho más eficientes, su vida útil es de aproximadamente 1000 horas, se distinguen por su alta temperatura de color⁸ y por su bajo costo, sin embargo presentan varias desventajas, entre ellas su baja eficiencia, dado que del 100% de la potencia consumida solo un rango del 10% al 20% es transformada en radiación visible (luz) mientras que el resto se

Fig.4. Foco incandescente



⁷ La incandescencia es la emisión de radiación visible de sólidos y líquidos, cuando superan los 1273.15° Celsius.

⁸ La temperatura de color es una medida de la tonalidad de la fuente de luz.



emite en radiación infrarroja (calor). Estos dispositivos poseen una baja eficacia luminosa⁹ que está alrededor de 10 a 22 [Lumen¹⁰(lm)/Watt¹¹].

2.2. Lámpara fluorescente

A causa de un arco eléctrico y a la baja presión en que se encuentra el interior del bulbo, se crea una atmosfera de mercurio. Con el paso de corriente, el vapor de este elemento adquiere energía que después es emitida en radiación ultravioleta con una longitud de onda de entre 185nm y 253.5nm. Este tipo de radiación posee la energía necesaria para provocar la ionización del compuesto de recubrimiento de la lámpara, el cual emite luz blanca en el proceso de descarga.



Fig.5. Tipos de foco fluorescente

Este tipo de lámparas ofrece diferentes temperaturas de color, posee un alto rendimiento y su uso es cada vez más común, su vida útil está determinada por la duración de los electrodos y se estima un tiempo de operación de 5000 a 12000 horas, Su reemplazo es debido, en la mayoría de sus usos, a que el flujo luminoso¹² decrece con el tiempo acumulado de trabajo. La eficacia luminosa de estas lámparas varía de 55 a 75 [lm/Watt]

2.3. Lámparas de halógeno

Al igual que las incandescentes funcionan con un filamento de Tungsteno y siguen el mismo principio. La temperatura provoca la evaporación del metal dentro del bulbo por eso es añadido el gas halógeno para facilitar la reacción química conocida como **ciclo del halógeno**, ésta provee la facilidad de regenerar el filamento. Las lámparas se caracterizan por su elevada intensidad luminosa y están reemplazando el uso de los focos incandescentes. Su promedio de vida se estima en 3000 horas de uso y su eficacia luminosa es en promedio de 22 [lm/Watt].



Fig.6. Foco y diseño usual para lámpara de halógeno

⁹ La eficacia luminosa es un valor que determina la iluminación proporcionada por la cantidad de energía consumida y se mide en [lm/Watt].

¹⁰ Lumen: es la unidad de medida de la potencia luminosa.

¹¹ Watt: es la unidad de medida de la energía por unidad de tiempo.

¹² El flujo luminoso es la parte de la potencia radiante total emitida por una fuente de luz que es capaz de afectar el sentido de la vista.



2.4. Lámparas de inducción.

Funciona igual que un foco fluorescente salvo que estos elementos ya no contienen un electrodo ni un balastro electrónico. Se transmite energía a los gases contenidos a través del campo magnético creado por dos electroimanes que sujetan al bulbo. La vida útil se estima entre las 6000 horas y su eficacia luminosa es de aproximadamente 80 [lm/Watt], no se suelen usar en interiores con baja altura debido a que su diseño las ha hecho una fuente de luz con una reducida amplitud de iluminación.



Fig.7. Diseño común para lámparas de

2.5. Lámparas de descarga de alta intensidad (HID)

Este tipo de lámparas se caracterizan por generar más luz y calor en una atmósfera de mayor presión que una lámpara fluorescente, por este motivo se les conoce como de **alta intensidad**. Son dispositivos físicamente pequeños e iluminan de forma puntual, su utilidad ha sido de mayor impacto en deflectores tanto para exteriores como interiores. El periodo de vida se estima entre 5000 y 24000 horas. Este tipo de lámparas no tiene un arranque instantáneo lo que quiere decir que la eficacia luminosa máxima no se alcanza al momento de encenderse, aun así se considera que tiene un tiempo de encendido corto que oscila alrededor de los 47 minutos.



Fig.8. Tipos de lámpara HID

Se tiene identificado tres tipos de HID:

- Lámpara de vapor de mercurio
 - Su uso ha disminuido debido a que los colores son representados con una baja calidad y su depreciación de lúmenes es rápida, empiezan con una iluminación blanca llegando a un tono verde cuando están al límite de horas de uso, su duración es en promedio de 24000 horas y su eficacia esta entre los 19 y 63 [lm/Watt].



- Lámpara de aditivos metálicos
 - Es en esencia una lámpara de vapor de mercurio con la adición de elementos metálicos para provocar diferentes tonalidades de luz y mejorar el índice de rendimiento de color¹³. Su uso se ha popularizado en gasolineras, plazas y en el alumbrado público, sitios donde es necesaria una buena reproducción del color. La vida promedio de este tipo de lámparas está entre 7000 y 18000 horas, su eficacia lumínica se encuentra dentro de los 60 y 100 [lm/W].
- Lámparas de vapor de sodio
 - Pueden ser tanto a baja como alta presión. El funcionamiento es similar al de las lámparas fluorescentes salvo la utilización de sodio y de xenón para facilitar el encendido y reducir las pérdidas térmicas. Su larga vida útil la ha hecho muy competitiva, la duración es de entre 12000 y 20000 horas, su defecto está en ofrecer un bajo índice de rendimiento de color, provocando que los objetos no se reproduzcan de manera exacta y se observen con cierta opacidad. La eficacia luminosa de estas lámparas es de las mejores ya que se llegan a obtener 180 [lm/W], característica por la cual son usadas para el alumbrado público.

Tipo de lámpara	Mercurio	Eficacia luminosa [lm/Watt]	Duración [Horas]
Incandescente	No	10 a 20	1000
Fluorescente	Si	55 a 75	5000 a 12000
Halógeno	No	22	3000
Vapor de mercurio	Si	19 a 63	24000
Aditivos metálicos	Si	60 a 100	7000 a 18000
Vapor de sodio	Si	90 a 180	12000 a 24000

Tabla 1.
Comparación
entre
características de
lámparas

¹³ El índice de rendimiento de color es una escala que mide la apariencia del color de la luz con respecto a la luz día y se utiliza para comparar las características cromáticas de las otras fuentes luminosas.



2.6. Desechos de lámparas en México

CFE tenía en el 2013, 37.2 millones de usuarios eléctricos, 88.5% pertenecientes al sector doméstico. El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), no cuenta con la cantidad de lámparas usadas por vivienda pero tiene registrado que en promedio cada hogar cuenta con 3.72 habitaciones, estimando de esta forma el uso mínimo de aproximadamente 122 millones de focos que podrían ser fluorescentes y contener mercurio.

Se estima que al romperse una LFCA, el 1% del contenido de mercurio es emitido al aire en forma de vapor, aproximadamente el 85% se adhiere al fósforo con el cual está recubierto el cristal y el 14% queda impregnado justamente en el cristal. Las emisiones de mercurio generadas únicamente por la rotura de lámparas fluorescentes, en México, son en promedio de 229 kilogramos por año.



Fig.9. Lámpara rota

Las lámparas fluorescentes brindan la oportunidad de reducir las emisiones de mercurio provenientes de las centrales carboeléctricas, por medio de la reducción de producción de gases. Una planta de carbón emite 10 mg de mercurio para producir la electricidad demandada para hacer funcionar una lámpara incandescente y 2.4 mg para hacer funcionar una lámpara ahorradora.

Las lámparas disponibles en el mercado mexicano han sido manufacturadas mayoritariamente en China y la cantidad de mercurio se basa en las normas para la fabricación de lámparas en este país, cada elemento no pueden tener más de 5 mg de mercurio. Para reducir los riesgos en la salud de los seres humanos, se han creado LFCA's con menos de 1 mg de mercurio, lo cual emitiría menos partículas al aire, pero esta cantidad es relativa debido a que si es fabricada una lámpara de mayor potencia esta requerirá una mayor cantidad de mercurio a la establecida.

En México no se cuenta con parámetros oficiales para establecer límites máximos permisibles de contenido de mercurio en lámparas y en el país se pueden estar usando focos con contenidos excesivos y peligrosos, tampoco se cuenta con una regulación que exija a los fabricantes que proporcionen información a los consumidores acerca del manejo del producto o de la disposición final del mismo. Así los elementos inútiles llegan a depósitos de basura donde el mercurio reacciona para formar metilmercurio y posiblemente afectar de manera grave los diferentes ecosistemas a su alrededor.



Existen documentos de divulgación científica sobre los riesgos a la exposición de mercurio en el caso de LFCA's rotas. Al momento de fracturarse el bulbo de la lámpara, el gas contenido pasa a expandirse y ocupar el mayor volumen posible, rápidamente el elemento pasa a su estado líquido por el cambio de presión que ocurre y está presente en el espacio en forma de pequeñas gotas de unos cuantos micrómetros. Se han estudiado y simulado habitaciones en las cuales se rompe una LFCA y los resultados muestran que en toda la habitación, instantes después del suceso, las zonas inferiores a los 50 centímetros tienen como máximo una concentración de 60 microgramos de mercurio por metro cúbico de aire, conforme va pasando el tiempo las partículas se precipitan por ser más densas que el aire y la densidad de partículas disminuye pero la probabilidad de inhalación es superior al 50 %, por tanto se debe evitar la exposición, especialmente de los niños y de los recién nacidos, debido a que sus ritmos de respiración son más rápidos y su índice de masa aumenta las concentraciones en el cuerpo. Se registraron dos escenarios, el sistema con ventilación y sin ventilación, obteniendo como resultado que si seguido de la rotura de la lámpara se abren puertas y ventanas los niveles pueden llegar a no ser dañinos para la salud debido a que el flujo de aire que se genera con esta acción permite que las partículas de mercurio suspendidas en el aire sean expulsadas del interior.

2.7. Norma de Regulación de Lámparas Fluorescentes

NORMA Oficial Mexicana NOM-017-ENER/SCFI-2012, Eficiencia energética y requisitos de seguridad de lámparas fluorescentes compactas autobalastadas. Límites y métodos de prueba.

La Norma Oficial Mexicana (NOM) establece los límites mínimos de eficacia luminosa, los requisitos de seguridad, los métodos de prueba aplicables, así como la información comercial de las lámparas fluorescentes compactas autobalastadas. Ésta se aplica a todas las LFCA's que trabajen de 100 a 277 Volts¹⁴ con corriente alterna a una frecuencia de 50 o 60 Hertz¹⁵, e incluye a todas las que se fabriquen, importen o comercialicen en la nación. La norma se divulgó en el Diario Oficial de la Federación el 09 de enero de 2013 y fue elaborada por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Seguridad al Usuario e Información Comercial y Prácticas al Comercio (CCNNSUICPC) junto con el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Preservación y Uso Racional de los Recursos Energéticos (CCNNPURRE).

Por medio de la norma se clasifican a las LFCA's como sigue:

- Por potencia eléctrica
- Por tipo de envoltente
- Sin envoltente
- Con envoltente

¹⁴ Volt: Unidad de medición de la diferencia de potencial eléctrico o tensión eléctrica, comúnmente llamado *voltaje*.

¹⁵ Hertz: una unidad física usada para medir la **frecuencia** de ondas y vibraciones de tipo electromagnético



- Con reflector

Y sin excepción deben someterse a las pruebas aplicables descritas en la NOM, para determinar si los lotes cumplen con los requisitos de seguridad.

Los empaques de los focos, deben contener de manera legible lo siguiente:

- La representación gráfica o el nombre del producto, salvo que éste no sea visible o identificable a simple vista por el consumidor;
- Nombre, denominación o razón social y domicilio del fabricante nacional o importador;
- La leyenda que identifique al país de origen del mismo (ejemplo: “Hecho en. “Manufacturado en...”, u otros análogos);
- Datos eléctricos nominales de tensión eléctrica de entrada, intensidad de corriente eléctrica, frecuencia y potencia eléctrica;
- El contenido cuando el producto no esté a la vista del consumidor;
- Representación gráfica comparativa o leyenda que indique la equivalencia en potencia eléctrica consumida y flujo luminoso total, respecto a las lámparas incandescentes que sustituye;
- Leyenda o símbolo que indique que contiene mercurio (Hg), y
- Modelo del producto

2.8. Cuestiones por resolver en México sobre las LFCA´s

En México existen diferentes Normas Oficiales que informan y regulan lo correspondiente a las LFCA´s, sin embargo existen aspectos muy importantes que deben ser considerados.

- Extender la vida útil de una lámpara ahorradora.
- Regular el contenido máximo de mercurio en lámparas fluorescentes.
- Que el etiquetado de las lámparas contenga la cantidad de mercurio presente en el producto.
- Que el empaque de las LFCA´s incluya información acerca de la disposición final del mismo.
- Diseñar planes de manejo de residuos de lámparas ahorradoras, que garanticen el mínimo impacto ambiental de estas.

Existen muchas variedades de lámparas y ninguna debe llegar a los basureros, todas, sin excepción deben reciclarse. Se hace especial énfasis en las lámparas fluorescentes, debido a que son el tipo de equipo más utilizado en México, consecuencia de su precio accesible y de su eficacia luminosa. Todos estos elementos de iluminación, se pueden reciclar pero son escasos los programas de recolección, como también las empresas dedicadas al tratamiento de estas. Así, los sistemas existentes no tienen la suficiente cobertura y para lograr tenerla se necesitan más máquinas especializadas que eviten la emisión del mercurio al romperse la lámpara.



CAPÍTULO 3

3. Carbón activado y filtro electrostático

Son introducidos filtros para limpiar a cualquier fluido de polvos y residuos. Estos son usados en la campana de la cocina, en todas las industrias de purificación de agua, en los trituradores de lámparas, en los sistemas de ventilación, etc. Y existen en varias formas y materiales, pero se destacan dos productos, que a continuación se describen.

3.1. La filtración por carbón activado

La historia marca al año 3750 a.C. como el origen del uso del carbón debido a que los antiguos egipcios usaron el carbón vegetal y animal para fines metalúrgicos y médicos, el primer dato documentado data aproximadamente del año 1500 a.C. donde se relata el uso del carbón para absorber olores desagradables, curar dolencias intestinales e incluso como medio para preservar a los muertos. Este carbón que se obtenía de la combustión de la materia es el precursor del actual carbón activado. El material era y sigue siendo utilizado en forma de polvo, un estado en el que es útil al mezclarse con el líquido que va a ser tratado.

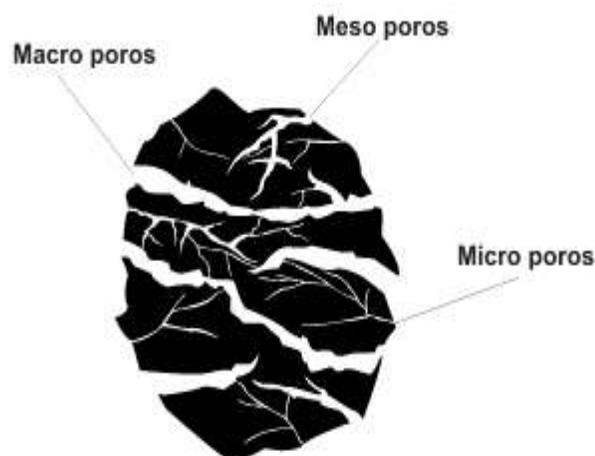


Fig. 10. Ejemplificación de la estructura del carbón activado

Hoy en día, los usos de carbón activado continúan creciendo y se utiliza en una variedad de industrias: las del maíz, las refinerías de caña de azúcar, las de absorción de gas, las que producen farmacéuticos, las que fabrican bebidas alcohólicas, y muchas más. Los filtros de carbón activado presentan una demanda elevada porque son muy útiles en la desinfección del agua, ya que eliminan a los compuestos orgánicos causantes de la aparición de carcinógenos¹⁶, y aparte su elevado uso es debido a su eficacia para limpiar el aire contaminado de partículas.

3.1.1. Fabricación y reciclado de carbón activado.

El carbón puede activarse mediante procesos térmicos o químicos. El primer método consiste en provocar una oxidación parcial del carbón, es decir, crear la porosidad del material, esto se logra exponiéndolo al vapor de agua cuando se encuentra a una temperatura entre 600°C y 1100°C.

Los procesos químicos parten de la materia prima antes de carbonizarse. Para formar la porosidad se rompen las uniones que ligan entre sí a las cadenas de celulosa, usando agentes deshidratantes como el ácido fosfórico. Después el

¹⁶ Carcinógeno: Sustancia capaz de producir cáncer al exponerse a tejidos vivos.



material se carboniza a una temperatura relativamente baja (500°C) y posteriormente se eliminan los restos de reactivo y de otros subproductos.

Cuando el carbón activado está saturado de impurezas es necesario cambiarlo por un elemento nuevo para filtrar eficientemente. El elemento remplazado puede ser reutilizado pero se requiere una reactivación del carbono, el proceso consiste en transportar el material a una cámara de reciclado, un espacio a una temperatura de 800° C donde se separan los elementos orgánicos no deseados. La porosidad no se destruye y no se requieren dosis de vapor de agua pero el producto debe ser mezclado con material virgen para aumentar la absorción.

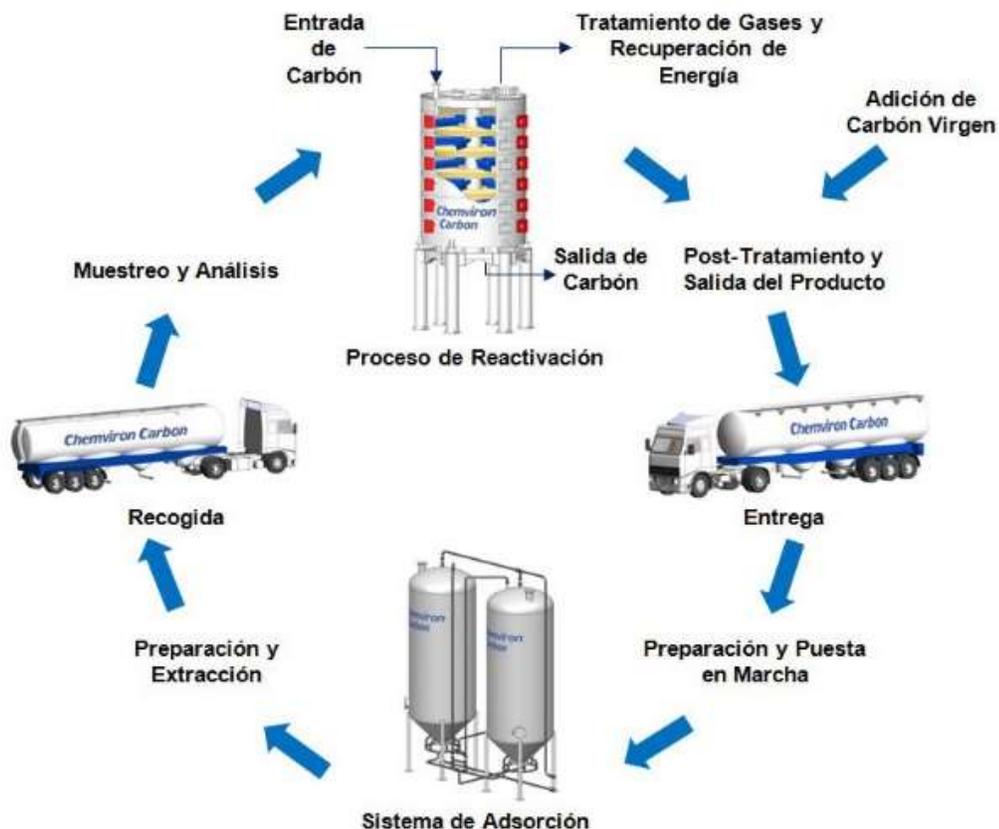


Fig.11. Chemviron carbón. Ciclo de reactivación del carbón activado

3.2. Principios eléctricos del filtro electrostático.

La electrostática estudia las interacciones entre cargas eléctricas en reposo dentro de un medio que cumple con las leyes de Newton, particularmente el principio de acción y reacción de la mecánica. Ésta inicia con estudio de la fuerza entre pequeños cuerpos cargados, fenómeno demostrado experimentalmente por Cavendish y Coulomb, cuya interacción se expresa por:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} = k_e \frac{qQ}{r^2},$$



3.2.1. Efecto triboeléctrico.

El efecto triboeléctrico (también conocido como carga triboeléctrica) es un tipo de electrificación donde ciertos materiales adquieren una carga eléctrica a causa del contacto o la fricción entre ellos. La polaridad y la fuerza de las cargas producidas difieren según los materiales, la rugosidad de la superficie, la temperatura, la fuerza y otras propiedades. Por lo tanto no es predecible.

El ámbar, por ejemplo, puede adquirir una carga eléctrica por contacto y por fricción con un material como la lana. Esta propiedad fue primero registrada por Tales de Mileto y sugirió la palabra "electricidad" de la palabra griega para el ámbar (Elektron). Otros ejemplos de materiales que pueden adquirir una carga se muestran en la serie o tabla triboeléctrica, es más notorio el efecto si se combinan materiales opuestos.

Carga relativa	Material
Más positivo (+++)	Aire seco
	Vidrio
	Mica
	Nylon
	Lana
	Piel
	Plomo
	Aluminio
	Papel
Neutro	Algodón
	Acero
	Madera
	Ámbar
	Níquel, cobre
	Latón, Plata
	Oro, Platino
	Acrílico
	Poliéster
	Poliuretano
	Poliétileno
	PVC
Más negativo (- - -)	Teflón

Fig.12. Materiales que presentan el efecto triboeléctrico

3.2.2. Campo electrostático

Sobre una carga en específico, en un sistema eléctrico imperturbable, actúa una fuerza de acción a distancia proporcional a su magnitud, este fenómeno es debido al denominado campo eléctrico, una perturbación en espacio originada por la existencia de las mismas cargas. Así el campo electrostático es un campo eléctrico estudiado sin variaciones en el tiempo. El efecto se puede describir de



forma vectorial¹⁷, creando así un espacio o campo vectorial¹⁸, cuya ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

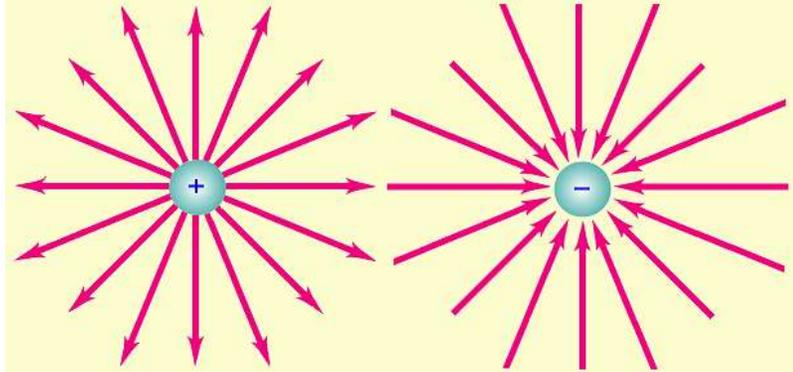


Fig. 13. Campo eléctrico en carga positiva y negativa

3.3. Filtro electrostático

El filtro de aire electrostático es un dispositivo captador de partículas basado en el principio de precipitación electrostática. Éste y ciertos filtros de diseño especial son capaces de separar partículas inferiores a 5 micras. En general se componen de dos etapas: la sección de carga y la llamada sección recolectora.

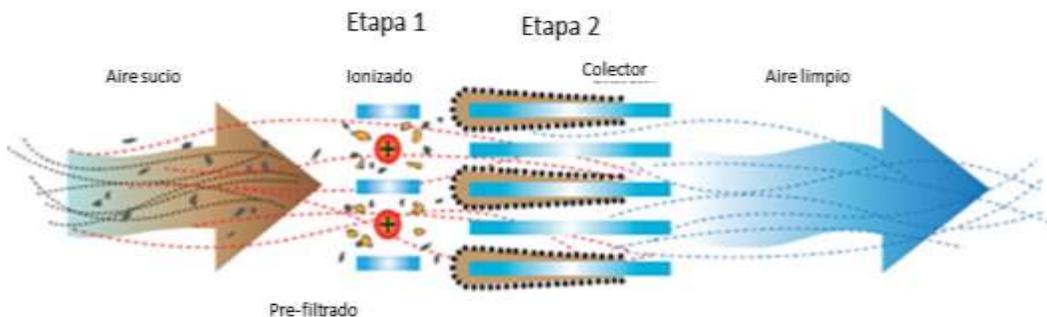


Fig. 14. Entrada de aire contaminado, carga de partículas, deposición de partículas cargadas y salida de aire limpio.

La sección de carga o ionizadora consiste en una serie de hilos de tungsteno suspendidos entre placas metálicas. Cuando se aplica una tensión continua en las superficies planas equidistantes, se transfieren electrones al hilo, estableciéndose un campo electrostático no uniforme entre las dos partes. Las moléculas o átomos del aire son atraídas por el campo eléctrico y chocan con el alambre de tungsteno, adquiriendo temporalmente una carga negativa.

¹⁷ El vector es un elemento del espacio vectorial, tiene magnitud dirección y sentido.

¹⁸ El campo vectorial es un conjunto no vacío donde están definidas la suma, la multiplicación y sus respectivos axiomas.



Después de la ionización, en la etapa de recolección, por efecto del campo eléctrico y de la fuerza eléctrica, la partícula es atraída a la parte positiva (las placas), y la descarga es inmediata al entrar en contacto con la superficie. Los elementos se adhieren a la placa porque adquieren una carga positiva, imposibilitando así su desprendimiento sin afectar la capacidad de recolección.

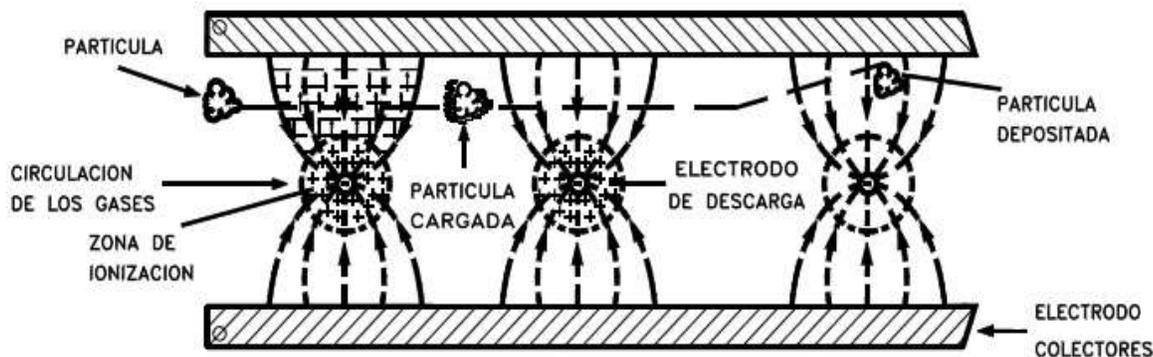


Fig. 15. Filtro electrostático de 2 etapas con representación de líneas de campo eléctrico.

Existe otro tipo de filtro que no necesita el uso de una corriente o una fuente de voltaje, estos son los filtros electrostáticos fabricados con polipropileno y espuma autocargable de poliuretano, la carga estática se obtiene por medio de la fricción del aire con las fibras del primer polímero y la espuma actúa como la placa colectora de partículas. Estos no son los únicos materiales usados y diversas configuraciones cuentan con la aprobación para su uso contra aerosoles sólidos y líquidos.

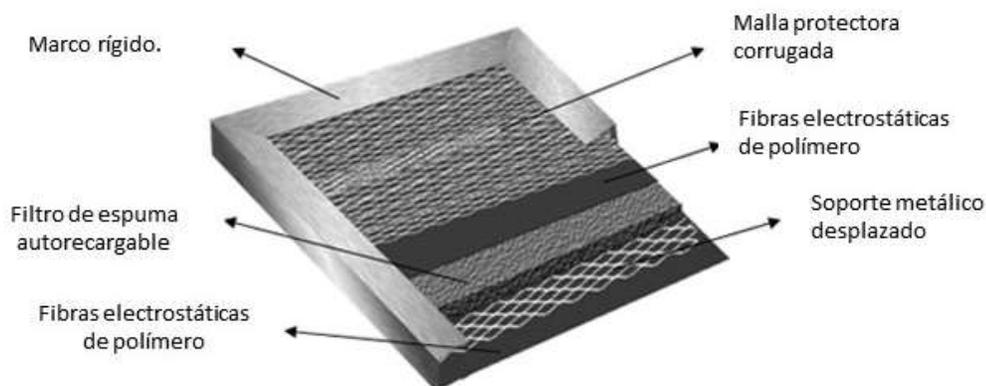


Fig. 16. Partes del filtro electrostático de polímero

El carbón activado y el filtro electrostático son los dos tipos de filtro más utilizados para separar partículas de los fluidos, incluyendo al mercurio, sin embargo el reciclado de ambos puede ser muy costoso y resultar no tan benéfico. Cualquier triturador de lámparas así como cualquier fabrica que emita gases con mercurio, debe contar con al menos uno de estos productos o con un sistema equivalente con la misma eficiencia, para así evitar contaminar el ambiente y poner en riesgo la salud de los seres vivos a su alrededor.



CAPÍTULO 4

4. Trituradores de lámparas fluorescentes y el sistema propuesto

En los países de gran desarrollo, hay compañías dedicadas al reciclado de lámparas que contienen mercurio y han creado dispositivos con tecnología de vanguardia para un uso seguro, los cuales se pueden encontrar en el mercado.

El diseño propuesto está basado en la carente inversión para crear sistemas adecuados en México, justamente porque la adquisición de los equipos significaría un gasto elevado.

Los dispositivos más relevantes para el triturado de lámparas se enlistan a continuación, en ellos se buscarán los elementos básicos que permiten su funcionamiento para sí proponer el diseño de un triturador económico.

- Triturador BALCAN, la máquina es el principio del sistema de reciclado que creó la empresa inglesa BALCAN, el triturador está preparado para procesar cualquier tipo de lámpara fluorescente, cuenta con un sistema de bombeo y no se documenta el tipo de filtro que utiliza. Se instala un recipiente a la salida para recolectar los desechos. El precio del dispositivo es de aproximadamente 165,000 pesos m/n y el costo del sistema de reciclado que proveen tiene un precio inicial de 4, 200,000 pesos m/n.



Fig.17. Triturador Balcan

- Triturador de lámparas creado por la empresa Europea MRT System Internacional AB, en este las lámparas son introducidas en la parte superior de la tolva, ocupa más espacio que el triturador BALCAN y cuenta con un sistema de aire del cual no se cuenta con información de los tipos de filtro. El precio aproximado del triturador es de 800,000 pesos m/n y el sistema de reciclado tiene un precio mínimo de 5, 300,000 pesos m/n.

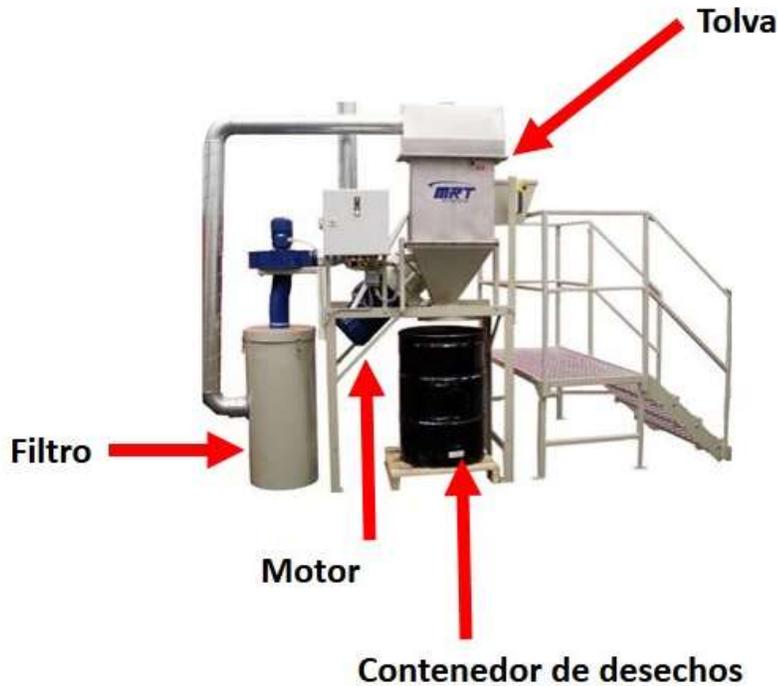


Fig.18. Triturador MRT

- BULB TERMINATOR es una máquina versátil creada en Estados Unidos por American Environmental, cuenta con un sistema de canje por el cual se reciben cupones con descuentos, el dispositivo se sella después de colocada la lámpara y crea la presión de vacío necesaria para triturar la lámpara sin poner en riesgo los alrededores. El dispositivo se ve limitado al no poder triturar lámparas tubulares mayores a los 140 cm porque sus dimensiones son:
 - 43 pulgadas de alto, 59 pulgadas de ancho y 19 pulgadas de profundidad.
 El precio de esta máquina es aproximadamente de 194,000 pesos m/n.



Fig.19. Triturador "Bulb Terminator"



- En el mercado se encuentra BULB EATER, comercialmente distribuido por Air Cycle. Cuenta con un sistema de trituración compacto que puede montarse directamente sobre los barriles metálicos. Su funcionamiento se basa en succionar la lámpara, a causa de la presión generada por una bomba de vacío, y al mismo tiempo fracturar con el conjunto rotatorio de cadenas. Dispone con una cámara de filtración de mercurio con uso de carbón activado y la desventaja es el procesamiento de una lámpara a la vez. El precio del conjunto completo con la entrada para lámparas tubulares de una pulgada es de: 50.402 pesos m/n.

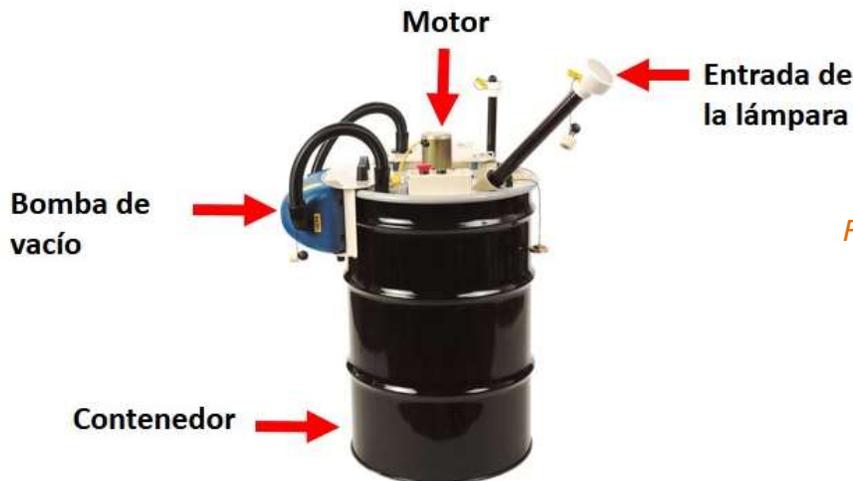


Fig.20. Bulb Eater de Air Cycle

4.1. Partes importantes para el diseño del triturador

El triturador planteado se basa en el funcionamiento de un dispositivo para el fraccionado de vidrio y, al igual que en los dispositivos anteriores, cuenta con el sistema para filtrar los gases emitidos por la lámpara. El diseño que se propone reduce el espacio y aumenta el número de lámparas de procesamiento a la vez.

Los elementos clave para el funcionamiento del triturador son:

Rodillos. Se usa un sistema de dos rodillos, estos son cilindros, tubos o barras con salientes o rugosidad, diseñadas para provocar la fractura en el material que pasa por en medio de ellos. La dimensión final del material está relacionada con la distancia de separación entre las circunferencias de los cilindros. Se procesa vidrio y aluminio, por tanto, el rodillo debe soportar los esfuerzos generados por la resistencia que oponen.

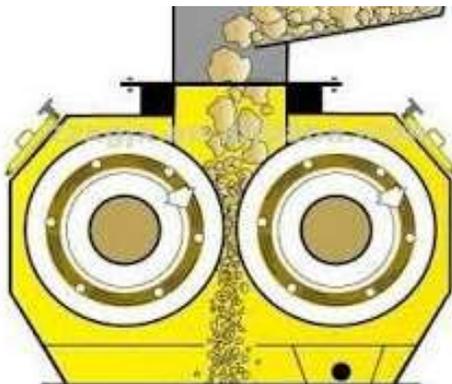


Fig.21. Modelo básico de triturador



Extractor. La propuesta usa un ventilador y se coloca de forma invertida para extraer el flujo de aire. No se dispone de un extractor con el desplazamiento de volumen adecuado para evitar que los gases se emitan al exterior de la cámara de triturado y el ventilador ofrece cantidades razonables.



Fig.22. Extractor de aire de 12cm

Sistema para evitar las emisiones de mercurio. Se conjuntan dos de los fenómenos ocupados para la retención de partículas, por un lado la separación por el uso de impactadores y por otro la deposición electrostática. Se propone el uso de acrílico para obtener los dos efectos, la carga aquí es causada por la fricción del aire con el material. No se usa un filtro electrostático de polímero por la falta de un adecuado control de limpieza, que comúnmente es con agua, y el uso de carbón activado es omitido debido a la necesidad de adherir una cámara de mezclado.

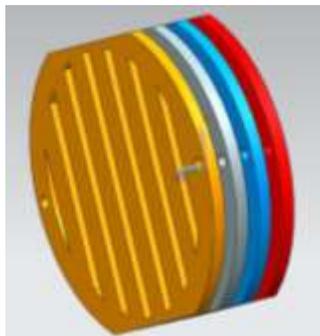


Fig.23. Juego de discos de impacto

Depósito de mercurio. El depósito es un recipiente que se coloca por debajo del sistema de impacto y se une al tubo donde circula el aire. Las partículas de mercurio se acumulan en la pared de los discos y por efecto de la gravedad fluyen hacia la parte inferior, allí las gotas son arrastradas por el fluido hasta llegar a la abertura de este elemento.

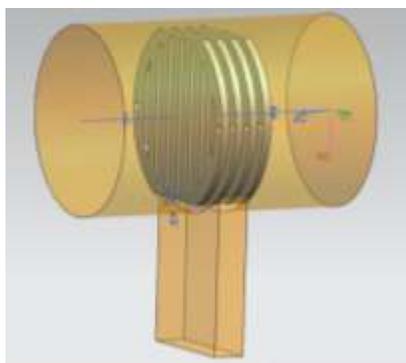


Fig.24. Depósito debajo del sistema de discos de impacto



Cámara de triturado. Se usa una configuración similar a los trituradores de vidrio con la adición de las aberturas por las cuales se va a conducir el flujo de aire. El material es arbitrario, solo dos condiciones son fundamentales, se requiere que no reaccione con el mercurio y que sea de bajo costo.

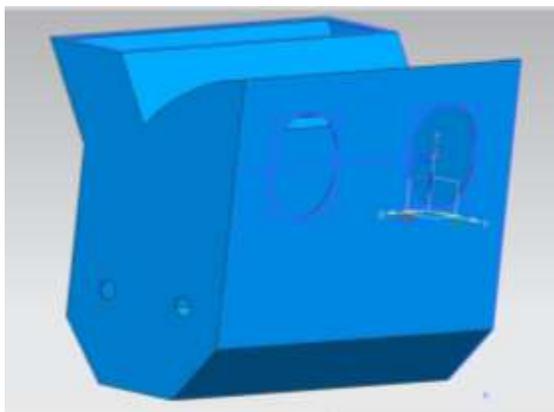


Fig.25. Diseño inicial para cámara de triturado

Almacenaje. El material triturado requiere almacenarse en recipientes adecuados debido a la toxicidad del mercurio, es común usar para esta tarea barriles metálicos. Los productos comerciales también depositan el material procesado en bolsas, pero no se recomienda por la dificultad que implica separar los residuos impregnados, además, corre el riesgo de romperse por el mismo material a contener.



Fig.26. Contenedores metálicos para Almacenar el material triturado

4.2. Análisis teórico del sistema propuesto

Se hace un arreglo inicial del sistema para evitar las emisiones de mercurio al ambiente, éste emplea unas superficies de impacto como el dispositivo creado por la división de ciencias ambientales del Laboratorio Nacional ARGONNE (Ver figura 27), donde se usó en pequeñas refinerías de oro con el objetivo de reducir las emisiones de mercurio. Primero se evalúa la teoría sobre el comportamiento del flujo en el impactador, se busca un dispositivo compacto por lo tanto las dimensiones son reducidas.

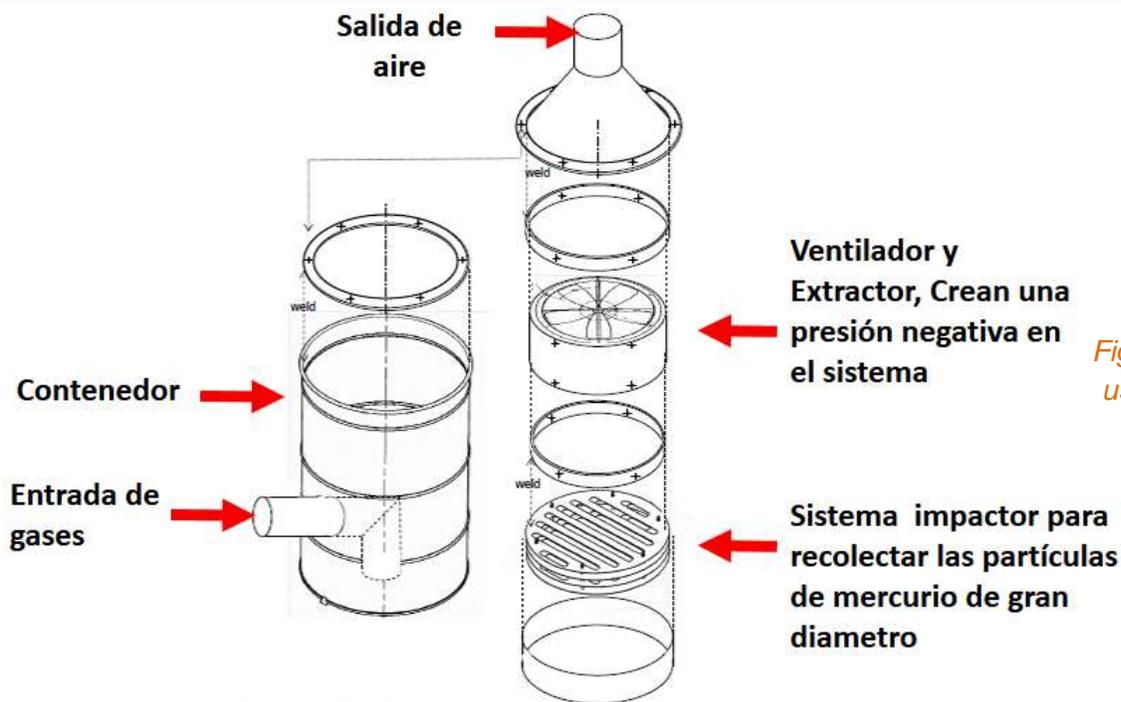


Fig.27. Configuración usada por Argonne.

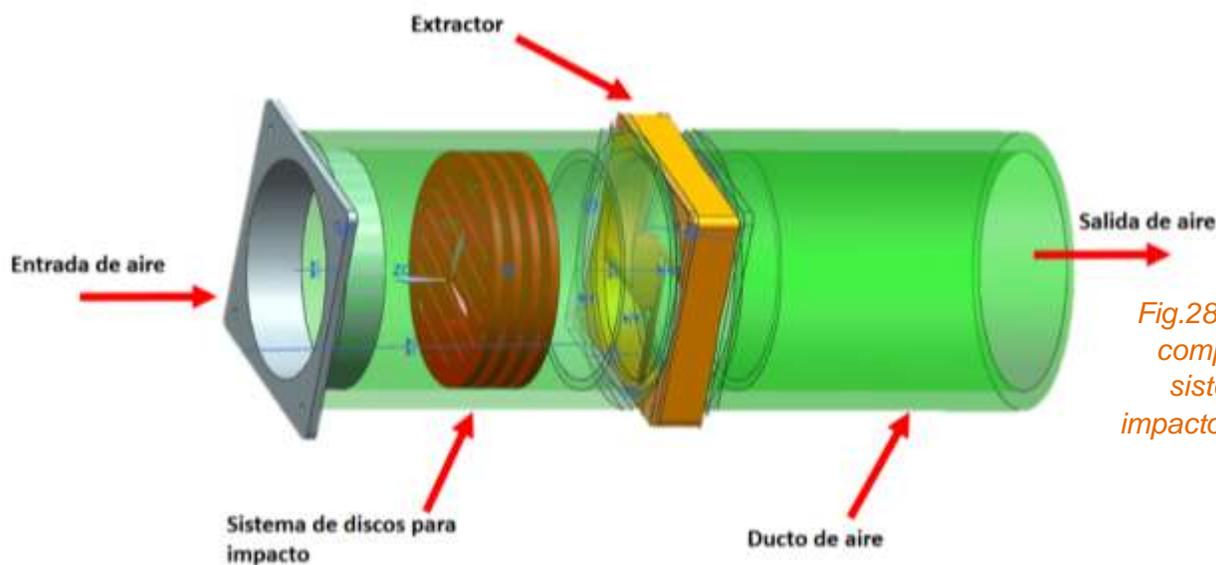


Fig.28. Conjunto completo del sistema de impacto propuesto

La ecuación de coagulación de partículas en un fluido fue introducida por Marian Von Smoluchowski en 1916 como una ecuación del balance de población. Ésta describe la evolución en el tiempo de la densidad del número de partículas a medida que se van coagulando, la expresión algebraica es integro diferencial porque estudia la distribución del tamaño de partícula en el tiempo con la interacción de todas las partículas del sistema y la única forma de resolverla es usando métodos numéricos. En el estudio del comportamiento de la coagulación se debe tomar en cuenta si el flujo es browniano o está sometido a un gradiente de velocidades, porque de ello dependerá el método de estudio.



4.2.1. La trampa inercial

La física del impactador inercial se rige por el número de Stokes, un parámetro que determina la eficiencia de este tipo de dispositivos. Es un dato unidimensional que caracteriza el comportamiento de las partículas suspendidas en un flujo, por tanto, depende del tamaño del elemento, la velocidad y el tiempo de relajación¹⁹ de éste. Su expresión matemática es la siguiente:

$$Stk = \frac{2\tau U_0}{W}$$

Donde

$$\tau = \frac{1}{18\mu} d^2 (\rho_p - \rho_g)$$

- τ : es el tiempo de relajación de la partícula
- U_0 : es la velocidad del fluido lejos del obstáculo o corriente libre.
- W : es la dimensión característica de la boquilla.
- μ : Viscosidad del gas.
- d : Diámetro de la partícula
- ρ_p : Densidad de la partícula
- ρ_g : Densidad del gas
- D_j : Diámetro del flujo de salida

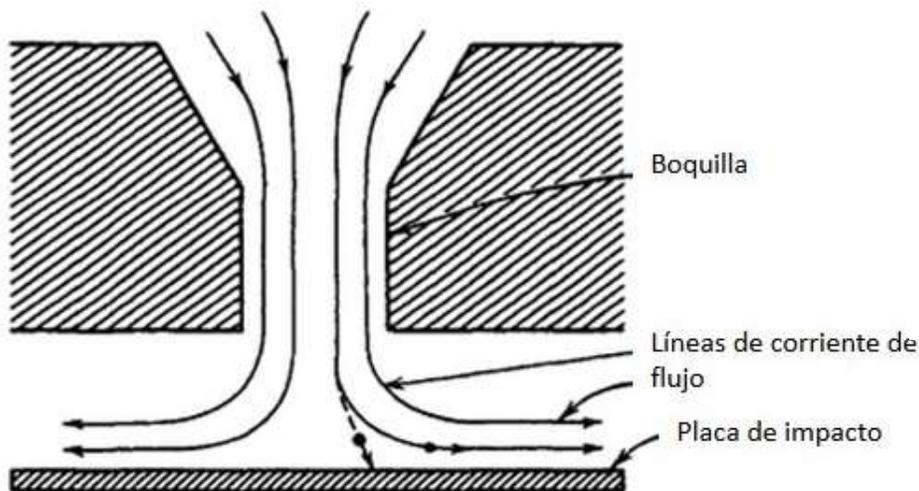


Fig.29. Vista trasversal del flujo de aire ideal

El aire suele estar compuesto de partículas de diferente tamaño y su paso a través de las aberturas o boquillas incrementa su energía cinética, así los elementos de mayor masa se desprenden de la trayectoria de la corriente de aire por el abrupto cambio de la dirección del flujo.

¹⁹ El tiempo de relajación de la partícula, es el tiempo que demora la partícula en cambiar su velocidad cuando el fluido que lo contiene cambia súbitamente de dirección



Existen dos escenarios para el comportamiento:

- Un **#Stokes** $\gg 1$ representa una alta probabilidad de que la inercia de una partícula supere la fuerza de la corriente del aire durante el cambio de dirección, evitando así seguir su trayectoria para colisionar en la superficie interpuesta.
- Para **#Stokes** $\ll 1$ la partícula tiene más probabilidades de seguir por la corriente de aire.

Para las partículas ultrafinas se considera el efecto de deslizamiento producido por los choques de las partículas contra las moléculas del fluido, por tanto se incluye el factor de corrección de Cunningham (C), este toma el valor de 1 para partículas mayores a 1 micrómetro y depende de la siguiente ecuación para elementos con diámetros inferiores.

$$C = 1 + \frac{2\lambda}{d} \cdot (A_1 + A_2 \cdot e^{-\frac{A_3 \cdot d}{\lambda}})$$

- C : factor de corrección
- λ : es la trayectoria media libre del fluido.
- d : diámetro de la partícula.
- A : son constantes experimentales, para el aire se tienen:
 - $A_1 = 1.257$
 - $A_2 = 0.400$
 - $A_3 = 0.55$

Debido a que no se conoce el diámetro de la partícula en éste y en otros muchos casos o porque no es realmente necesario, se construye una curva de eficiencia respecto al tamaño de la partícula y se considera un comportamiento ideal para poder caracterizar con un número de Stokes con un 50% de eficiencia (Stk50). La curva identifica la eficacia con la cual funciona el impactador, pero ésta ligada al diámetro de partícula que se desea que impacte, es decir, con el tamaño de corte.

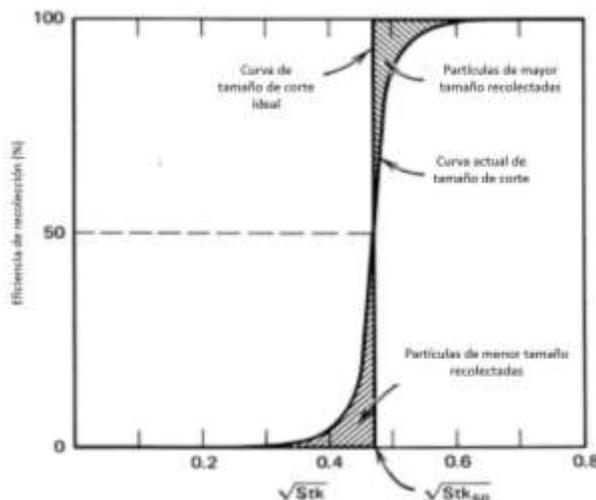


Fig.30. Curvas de corte para Impactadores ideales y reales (Fuente: Hinds 1982)



Usar un $Stk50$ es equivalente a suponer que la masa de partículas más grandes a partir del tamaño de corte que se reciben por el impactor es igual a la masa de las partículas por debajo del tamaño de punto de corte, dicho de otra forma, se recolectan todas las gotas superiores al tamaño de diseño y aparte existe la probabilidad de impacto de partículas más pequeñas.

En los sistemas de impacto, el número de Stokes también es función de las características del flujo y del dispositivo de colisión, entre ellos el más importante es la abertura destinada al paso del fluido porque de sus dimensiones depende la velocidad de la partícula. El dispositivo propuesto usa un conjunto de boquillas rectangulares, por ende el gasto volumétrico²⁰ se distribuye a través de estos y al mismo tiempo se modifica la velocidad del fluido, ésta es la velocidad de la partícula y la expresión es la siguiente:

$$U = \frac{Q}{W * L * n}$$

- Q: Gasto volumétrico
- L: Longitud de la ranura
- n: cantidad de aberturas
- U: Velocidad a la salida de la boquilla

Con la información anterior, el número de Stokes se puede representar de la siguiente forma:

$$Stk = \frac{d^2(\rho_p - \rho_g) Q}{9\mu * W^2 * L * n} * C$$

Pero realmente en el diseño se busca el tamaño adecuado de la boquilla porque el tamaño de la partícula se puede proponer, por tanto la expresión que da el ancho de la ranura con un $Stk50$ es:

$$W = \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_g) Q}{9\mu * L * n} * C * \frac{d}{\sqrt{Stk50}}}$$

4.3. Resultados del primer sistema propuesto

La configuración completa de todo el dispositivo cuenta con las dimensiones para triturar cualquier tipo de lámpara actualmente en el mercado. Se le adaptaron dos salidas de aire por las cuales se dirige el flujo de aire hacia la zona de separación de mercurio. La parte inferior de la cámara de triturado no presenta obstrucciones para depositar el material procesado directamente a los contenedores.

²⁰ El gasto es una variable que mide el flujo o transporte de materiales por unidad de tiempo, al expresarse en términos de volumen/tiempo se llama flujo volumétrico.

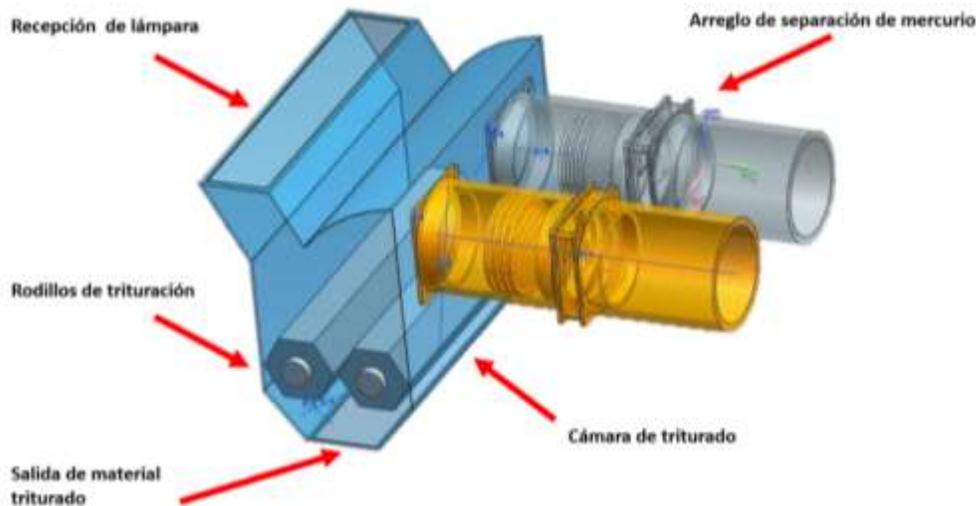


Fig.31. Triturador ensamblado

Se estudia el comportamiento del flujo de aire en la cámara de triturado y en el sistema de separación de partículas. Es utilizado un software de diseño de la empresa SIEMENS, el cual por un análisis de Método de Elemento Finito (MEF) simula el flujo de aire para así conocer la corriente provocada por los ventiladores y verificar que no escapen los gases que son liberados al momento de romperse la lámpara.

El análisis de la cámara de triturado revela una adecuada absorción del aire en las principales zonas de ruptura. El diseño presenta estancamientos de aire debido a la falta de un diseño aerodinámico dentro del dispositivo. Se exhibe un problema para el triturado de elementos largos, se liberan los gases al ambiente por la existencia de fracturas fuera de la cámara. Además la configuración no asegura un fácil mantenimiento y no sella el recipiente contenedor, afectando el alrededor por la evaporación del mercurio en su exposición al ambiente.

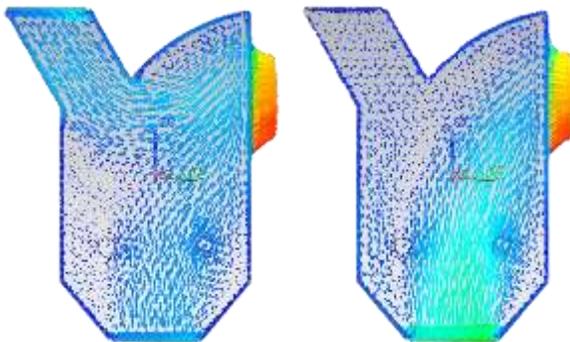


Fig.32. Comportamiento del flujo de aire con y sin la compuerta abierta

El sistema de separación de partículas se ve limitado por la dificultad de fabricación. El gráfico de las líneas de corriente válida el comportamiento del flujo en su interacción con la superficie, este arreglo tiene un tamaño de corte de 3 micrómetros pero el efecto triboeléctrico, a causa del uso de acrílico, aumenta la probabilidad de recolectar partículas inferiores. Los extractores difieren de los ventiladores en el flujo de aire y estos son descartados debido a que el dispositivo con las dimensiones adecuadas para el diseño genera un bajo flujo volumétrico. El uso de un flujo laminar provoca que este resultado difiera de la realidad debido a que el ventilador no ofrece un flujo de esta



característica, aun así se toma en cuenta este resultado debido a que en la literatura el uso de esta característica es convencional.

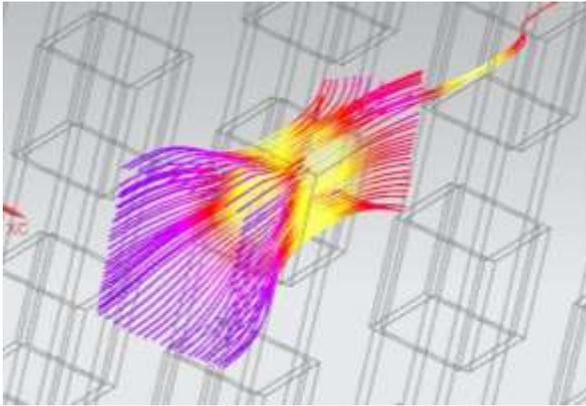


Fig.33. Grafico 3D de líneas de flujo a través de una abertura

No se hace un análisis del flujo que provoca el ventilador, pero se usa la información publicada por los dispositivos Noctua, en el cual compara un equipo convencional con un dispositivo de flujo enfocado. El uso de un elemento normal no afectaría en gran medida la captación de mercurio gracias a la coagulación que es socorrida por la zona de turbulencia que genera.

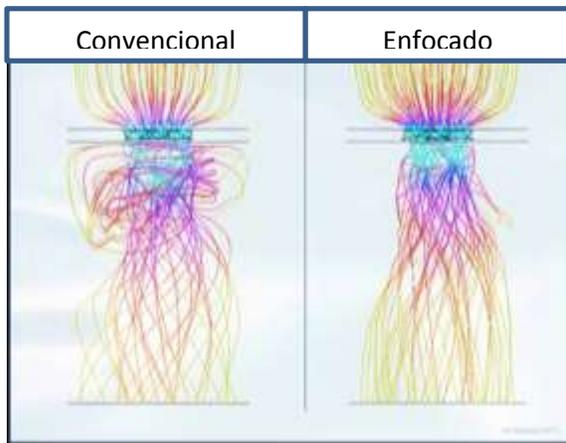


Fig.34. Análisis de flujo a través de un ventilador con y sin rejilla para corrección de dirección.

El paso del aire a través de las aberturas también provoca un cambio de presión, ésta no afecta la función del ventilador porque genera una aún mayor.

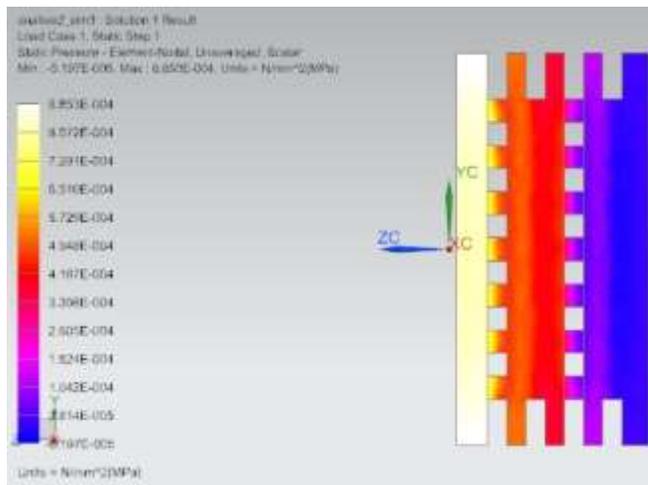


Fig.35. Presión estática a través del separador de partículas



Del cálculo de las chumaceras, de las poleas, de la distancia entre centros y de la fuerza entregada por el motor (Ver anexo 1), se tiene:

- Las chumaceras soportan mucho más de lo requerido, la carga estática en cada una es aproximadamente de 50 [N].
- La relación de poleas es de 0.38, el rodillo girará a 684 rpm.
- La distancia entre centros es de 204.5 mm
- La fuerza entregada por el motor es de 29.95 [N].

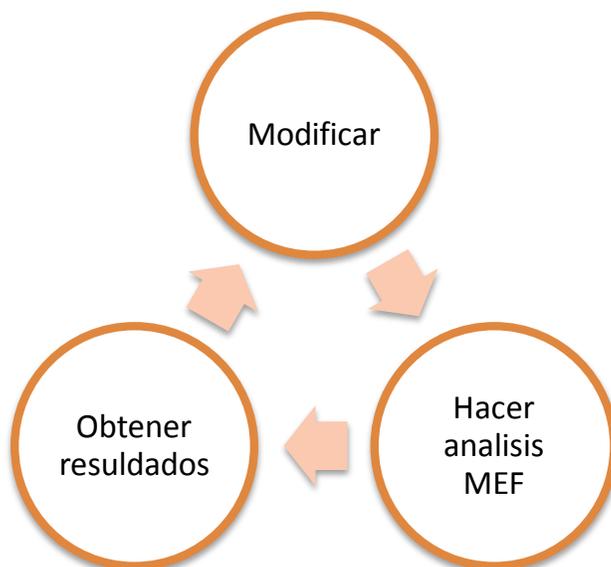
El material a fracturar en esencia es vidrio y el diseño presenta una configuración para elementos más grandes y con resistencias mayores. Por tal motivo la oposición es mínima.

La observación más relevante está en la evaporación del mercurio en su exposición al ambiente, debido a que el separador de partículas no está preparado para evitar este cambio físico.

4.4. **Modificaciones del triturador**

Se rediseña la máquina para corregir las dimensiones, las zonas de aire sin circulación y la evaporación del mercurio. Ahora el triturador, en su presentación básica, procesa LFCA's y elementos que no excedan los 50 cm. Se incluyen aditamentos para procesar lámparas más grandes, se modifica la forma de la cámara para reducir el espacio y material para fabricarlo. Se usa una forma más estética y usual para la tolva que ahora se puede desensamblar para el futuro mantenimiento de los rodillos, la parte inferior de la cámara se sustituye por una superficie móvil que sella el contenedor y así se evita la emisión de vapor de mercurio por la evaporación de gotas en el material procesado. Para facilitar el reciclaje de lámparas grandes y no perder la capacidad de absorción de aire son diseñadas extensiones a la tolva.

Las mejoras siguieron el siguiente esquema:





El nuevo sistema (Ver fig. 37) trabaja con un solo rodillo que actúa en conjunto con una de las paredes de la cámara y se divide todo el ensamble en tres secciones que facilitarán el mantenimiento:

- Ducto de entrada (Azul)
- Matriz de fractura (Amarillo)
- Sellador móvil (Verde)

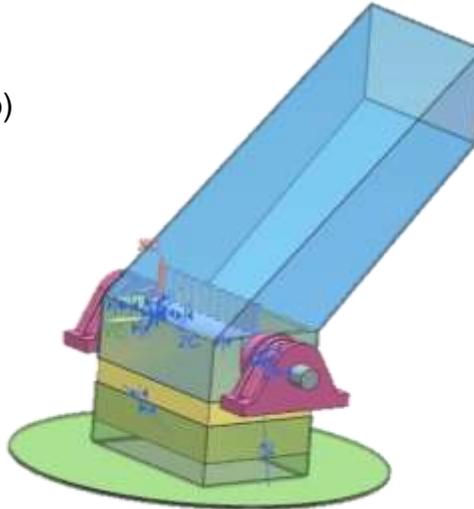


Fig.36. Sistema de trituración

El diseño es parecido a las máquinas mostradas con anterioridad y ésta se diferencia en el fácil ajuste del recipiente de reciclado, posteriormente puede montarse una línea de flujo de depósitos para reducir en tiempo y movimientos el reciclaje de lámparas. Ninguna de las máquinas anteriores trabaja con un filtro de impacto de duración ilimitada que se recicle de una forma sencilla. En este triturador el número de lámparas procesadas a la vez es similar al de los productos más costosos. El análisis MEF del conjunto de trituración muestra que, en caso de estar sellada la parte inferior, no saldrá el vapor de mercurio por la absorción de todo el flujo de aire en la única entrada que se proporciona.

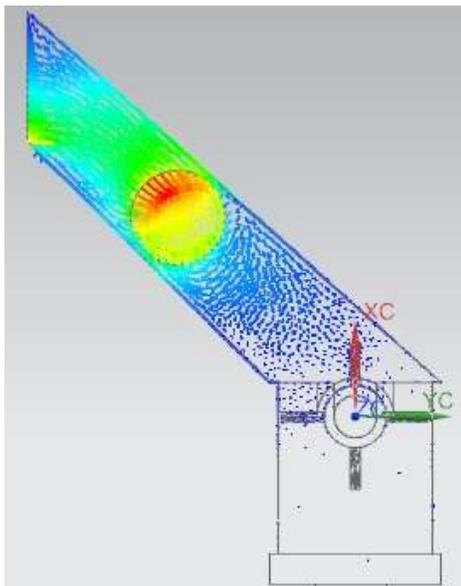


Fig.37. Comportamiento del flujo de aire cuando la parte inferior está sellada

Por la incorporación de la matriz de fractura se agregan rodamientos adicionales para evitar los efectos de fricción. Se hace un análisis de fuerzas para la elección del mejor rodamiento de bolas de una sola hilera.



A los ventiladores no se les suele introducir en tuberías y no hay información del comportamiento en estas condiciones, por tanto estos elementos se cambian de posición y pasan al principio del arreglo en el sistema de separación de partículas. (Ver fig. 39)

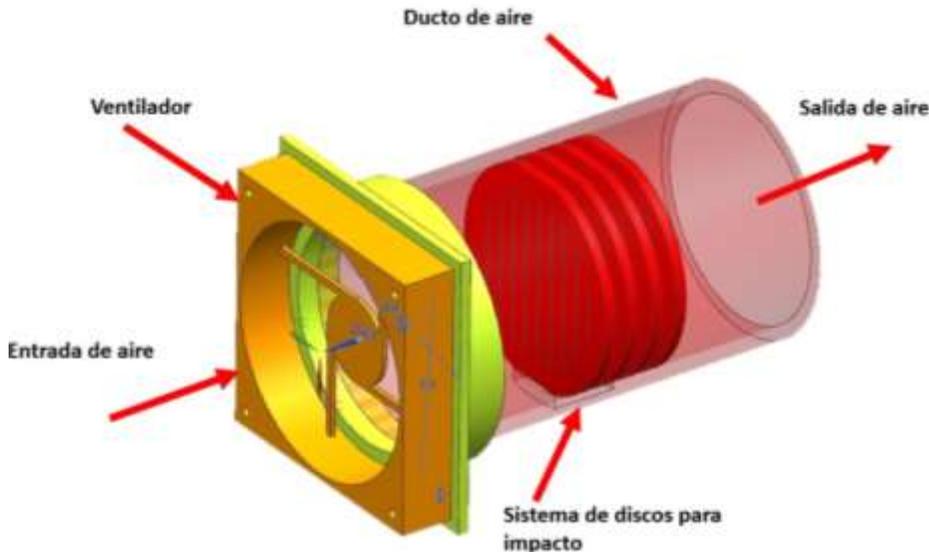


Fig.38. Nueva configuración del sistema de separación de partículas.

Para resolver la evaporación del mercurio dentro del conjunto separador se propone el uso de celdas Peltier²¹ para crear una baja temperatura. Su uso en la zona exterior es ineficiente por la dinámica del fluido. El empleo de un intercambiador de calor es necesario, ahora la superficie de impacto es de una lámina de cobre. Una simulación de transferencia de calor (Ver fig. 40), por MEF bajo convección forzada, revela que la placa mantendrá una temperatura por debajo de la ambiente, evitando así la evaporación. El depósito de mercurio se cambia a un conjunto de orificios unidos a una llave de bureta, para evitar pérdidas de presión y circulaciones de aire en zonas sin recolección.

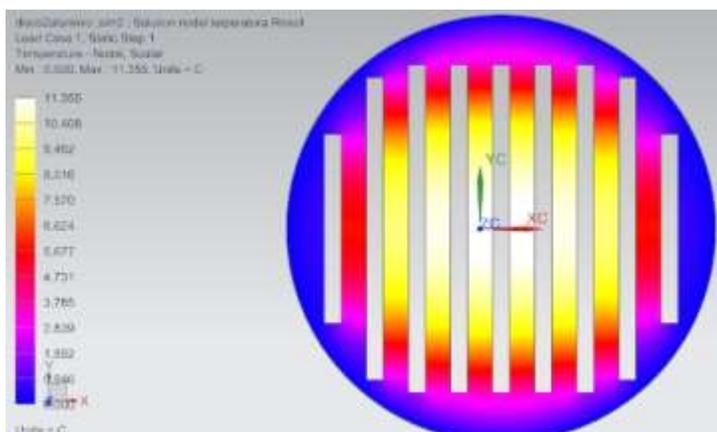


Fig.39. Gráfico de temperatura en la superficie de impacto de cobre con 0°C en el contorno.

El aspecto final del triturador se muestra en la siguiente figura.

²¹ La celda Peltier es una placa de material cerámico semiconductor que tiene la propiedad de enfriarse de un lado y calentarse del otro al circular electricidad por la misma

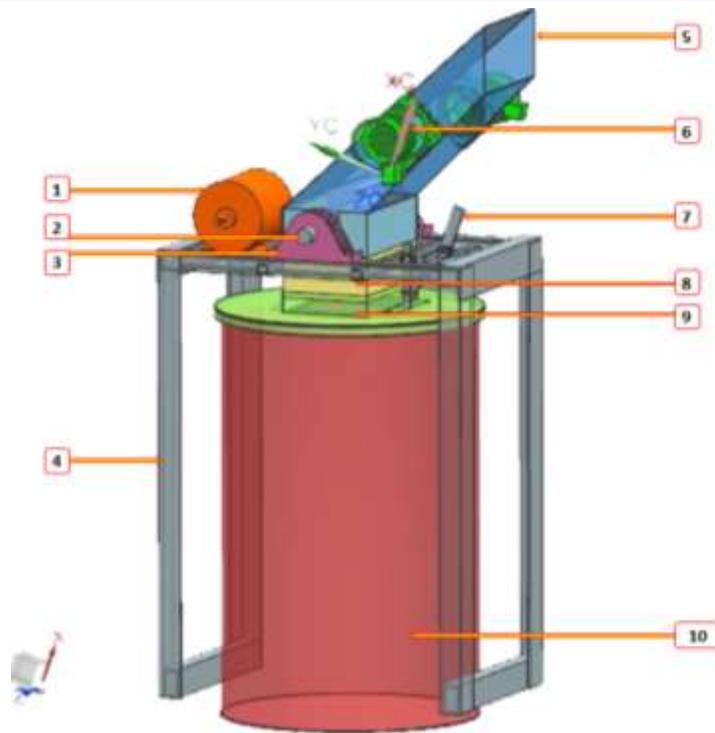


Fig.40. Ensamble de triturador con sistema de separación de partículas.

1. Motor
2. Flecha de impacto
3. Chumacera
4. Base del triturador
5. Ducto de entrada
6. Impactador de flujo
7. Palanca de tapa móvil
8. Matriz de impacto
9. Tapa móvil
10. Barril metálico

Los materiales usados en el dispositivo final pueden consultarse en el anexo 2. El costo de producción de este equipo no excede los 10 mil pesos.

La búsqueda de los trituradores en el mercado, ayudo a establecer las características esenciales en el equipo y poder así proponer una máquina competente, que además sea económicamente accesible y fácil de fabricar. Este triturador utiliza el efecto triboeléctrico, causado por la interacción del aire con el acrílico, tiene toda una teoría en base a los impactadores inerciales, cuentan con un sistema para evitar la evaporación del mercurio y su funcionamiento es respaldado por las simulaciones realizadas. El triturador en su versión final, va a ayudar al proceso de reciclado de lámparas para así disminuir la contaminación ambiental que no se había evitado.



CAPÍTULO 5

5. Actuar y evolucionar

Los desechos de lámparas que contienen mercurio son peligrosos y el triturado no es la etapa final del reciclado, pero su uso desde la recolección es en beneficio del proceso, el cual seguirá hasta una evolución en la iluminación.

5.1. El reciclado

Las lámparas, como ya se mencionó, están provistas de diferentes elementos. El triturado es el inicio del reciclado y en esta etapa los focos tubulares se procesan de manera directa, sin embargo las LFCA's no, porque se contaminan componentes que afectan la separación del mercurio en el siguiente proceso. Por esta razón las lámparas compactas necesitan prepararse para el triturado de la siguiente manera:

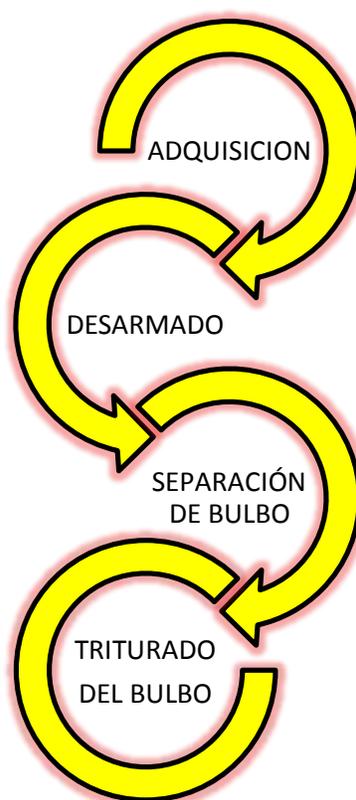


Fig.41. Proceso de LFCA's para el triturado

Todos los procesos de reciclado, después del triturado, separan el mercurio impregnado en la lámpara a través de la evaporación de este metal, cuyo punto de fusión depende de la presión a la cual se encuentre, ésta es la etapa más importante del reciclaje. Los siguientes procesos constan de equipos magnéticos para separar las partes metálicas y camas de vibración para retirar todo el fosforo posible del cristal. Las plantas de reciclado de lámparas cuentan con toda una infraestructura capaz de recuperar la mayoría de los materiales con los cuales están constituidas todas las lámparas fluorescentes y cada componente separado puede ser utilizado para crear otros productos como; lámparas, termómetros, azulejos, tubos, etc.



Los materiales recuperados son:

- Mercurio
- Fósforo
- Vidrio
- Aluminio
- Plástico

Ya existen programas de recolección de LFCA's en el país, pero corren el peligro de fracturar a las lámparas y contaminar todo el material. En todos es necesario el uso de sistemas de bombeo con filtros de aire para evitar las emisiones, de esta manera funciona la máquina de reVend (Reverse Vending), son dispositivos en los cuales se deposita la lámpara y se recibe una recompensa a cambio. Este modo de recolección no solo se ha usado para lámparas sino también para reciclar botellas de plástico y de aluminio. El éxito de éstas llevo a que ganarán en el año 2013, dentro del evento "Scottish Resource Award", el permio Gold Green Apple y que fueran votados como el ganador del "Young Recycler of The Year".



Fig.42. Reverse Vending de lámparas.

5.2.El futuro inmediato de la iluminación

En el mundo se está extendiendo el uso de un nuevo elemento para el iluminado artificial de los recintos que actualmente la humanidad tiene, este es el led. Desde hace muchos años se usa para diferentes aplicaciones, incluyendo señales de tránsito, espectaculares, televisiones, etcétera, pero no eran útiles para iluminar grandes espacios.

5.2.1. El led

El diodo emisor de luz comúnmente denominado LED por sus siglas en inglés (Light-Emitting Diode) es un dispositivo semiconductor²². El ojo humano percibe como luz (fotones) a la manifestación de la pérdida de energía de los electrones que cruzan la barrera de la juntura entre los dos materiales semiconductores con el que está

²² Semiconductor: es esencialmente la composición de Silicio con un metal que provee la capacidad de conducir la electricidad, el comportamiento del semiconductor va a depender del material conductor añadido.



compuesto el denominado **chip semiconductor**. Los diodos no solo irradian energía en forma de luz, también la liberan en radiación infrarroja o ultravioleta, el efecto depende de los elementos con los cuales este constituido.

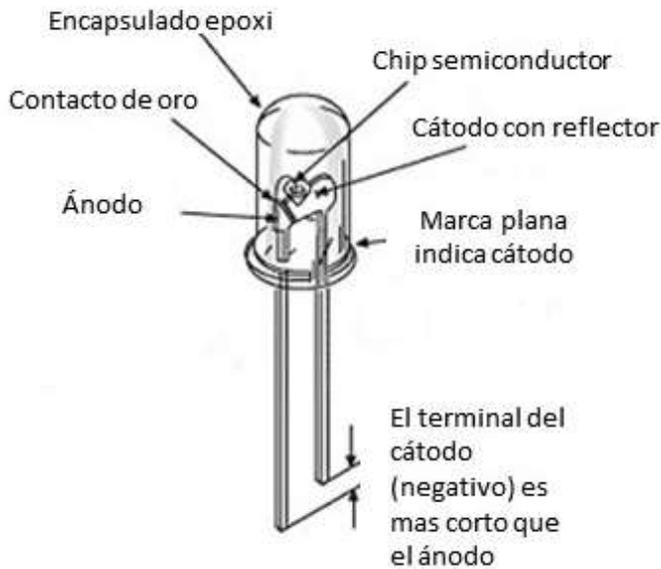


Fig.43. Partes del LED

5.2.2. El led de potencia

Debido a que los diodos pueden también emitir radiación ultravioleta se buscó obtener el mismo efecto de las lámparas fluorescentes, entonces aparecieron elementos que emiten una longitud de onda adecuada (260 nm) para ionizar el fósforo y transformar así la energía en luz blanca. Al conjunto diodo-fosforo se le ha nombrado **chip de alto brillo**.

Para considerarse elementos de potencia, éstos deben trabajar por encima de los 0.5 watts con una corriente superior a 100mA. En 1995 parecen los primeros LED´s blancos y hasta 1999 la empresa Phillips introdujo los primeros elementos de potencia (High Power LED) y la industria de la iluminación cambio con su aparición.

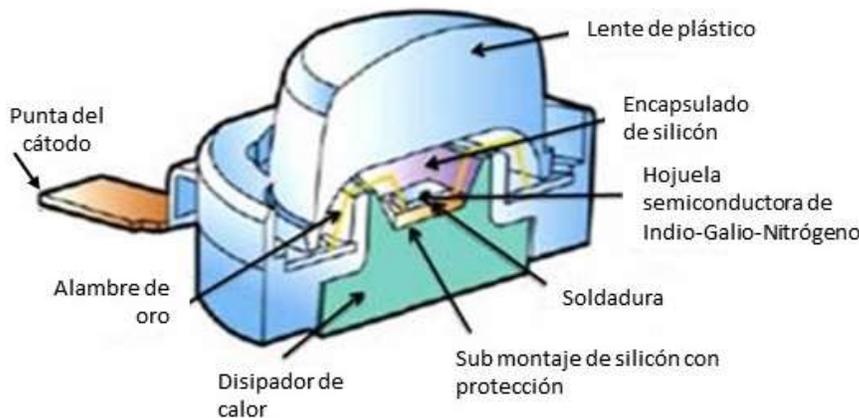


Fig.44. Partes del LED de potencia



Los HPLED tiene el defecto de trabajar a elevadas temperaturas a causa de las elevadas corrientes en que son sometidos los materiales semiconductores, por tal motivo las nuevas unidades de iluminación utilizan disipadores de calor para mejorar su funcionamiento y evitar el deterioro. Los primeros LED's se usaron para sustituir a las bombillas incandescentes de las linternas o para hacer luminarios, actualmente hay elementos que superan los 105 lm/watt y empiezan a aparecer cada vez más productos con mejores características, sustituyendo así a las lámparas incandescentes, halógenas y fluorescentes.

Fig.45. Foco con Leds de potencia



Fig.46. Lámpara tubular de Leds de potencia

Los Led's están destinados a jugar un papel muy importante, sus ventajas sobre otros elementos como; su tamaño compacto, elevada vida útil, mínima necesidad de mantenimiento, su elevado nivel de brillo, el bajo consumo de energía, sus resistencia a golpes y su fácil control, lo hacen ser el mejor dispositivo para la iluminación.

En otros países la recolección de lámparas se lleva acabo de la misma forma que en nuestro país. Los elementos pueden ser recuperados y utilizados en otros productos, pero son necesarios programas de recolección y trituradores, los primeros no son creados por la falta de los segundos, y estas máquinas son escasas por su elevado precio, cuestión que se pretende resolver con este proyecto.

Las lámparas LED ya existen en el mercado pero no tienen el gran impacto que se esperaría, a causa del costo de los productos y de la economía en las familias mexicanas. Los focos LED son en efecto mucho más eficientes y convenientes pero continuará el uso de las lámparas fluorescentes mientras no se presente una reducción en los precios.



Conclusiones.

El propósito del proyecto se cumple al proponer el dispositivo final. Las dimensiones del sistema de trituración van a facilitar el reciclaje de cualquier lámpara, se pueden triturar simultáneamente hasta 5 tubos de lámparas o 5 LFCA's, así superando la capacidad de la unidad más barata aquí mostrada. El equipo completo es compacto y se adapta con las medidas de los barriles de metal. Las modificaciones realizadas lo proveen de una fácil interacción con el operario.

El separador de partículas, basado en los impactadores de flujo, es diseñado para recolectar las gotas de mercurio superiores e iguales a 3 micrómetros, pero por el uso de un Stk50 y por el efecto triboeléctrico, se aumenta la probabilidad de captar partículas inferiores, logrando así aumentar su eficiencia, sin embargo es necesario probar nuevas estructuras que puedan mejorar lo propuesto hasta coincidir con el uso del carbón activado.

Para evitar la evaporación del mercurio en su exposición al ambiente, se adicionó un sistema de refrigeración que utiliza un intercambiador de calor auxiliado por el uso de celdas Peltier, éstas deben de cubrir la superficie del tubo más cercana al sistema de separación para cumplir con la simulación. El uso de estos aditamentos ayuda también a la creación de un medio en el cual el mercurio cambie de estado gaseoso a líquido, favoreciendo así el funcionamiento del impactador.

Es indispensable el reciclado de cada producto que contiene estos tóxicos y evitar que sustancias peligrosas, como el mercurio, sean liberadas al ambiente.

En México se usa una gran cantidad de focos y con este equipo se evitaran los desechos incontrolados. Actualmente la recolección de LFCA's procura evitar la fractura de los elementos y se transportan intactas a los centros de reciclado, acción que incrementa el costo de volver a fabricar una lámpara y de los productos derivados. El uso del triturador desde la recolección es vital para aumentar la cantidad de material a mover y reducir así los costos de cualquiera de los subsecuentes procesos.

Con el triturador al alcance de la mayor cantidad de instituciones interesadas, pueden emprenderse las campañas necesarias para recolectar, en esta ocasión, todas las lámparas fluorescentes. El uso de este elemento en el desecho correcto de los focos ahorradores, representa el evitar un perjuicio al ambiente y a la salud.

El proporcionar el diseño de un elemento barato y de fácil creación, da la oportunidad no únicamente a México sino también a otros países para resolver la falta de reciclado de lámparas. Este triturador es una innovación a métodos de reciclaje y tratamiento de residuos de lámparas fluorescentes, utilizando una combinación de fenómenos para recolectar el mercurio presente en estas.

Las lámparas fluorescentes ya están siendo remplazadas por los elementos led y por tanto es recomendable reducir la inversión en los sistemas de reciclado, debido a que todo lo adquirido llegará a ser inútil cuando estos elementos ya sean totalmente reemplazados. Los beneficios de la tecnología led son bastos y sin duda abarcaran todo el sector dedicado a la iluminación, sin embargo tampoco se tiene planeado un control de sus desechos, problema que también



tendrá que resolverse y que tal vez se solucione junto con el reciclado de todos los dispositivos electrónicos.

Por último, se debe crear conciencia en el pueblo mexicano, a través de la educación y la información correcta, acerca de los riesgos que existen al utilizar lámparas fluorescentes. De la misma forma se deben puntualizar las ventajas de las lámparas ahorradoras y de las led en comparación con las lámparas incandescentes y recalcar el impacto benéfico que tiene el uso de estas en el ámbito económico y ambiental.



Anexo 1

Las consideraciones para el análisis de la cámara y del sistema de separación de partículas son:

- Flujo de aire a una temperatura de 25°C a 1 atmosfera.
- Mallado de 5 mm en la cámara de triturado y de 2 mm en el sistema de impacto.
- Densidad del aire de $1.2 \frac{kg}{m^3}$
- Flujo de aire en las salidas de la cámara igual al generado por 2 ventiladores.
- Flujo laminar generado por el ventilador.
- Gravedad de $9.81 \frac{m}{s^2}$

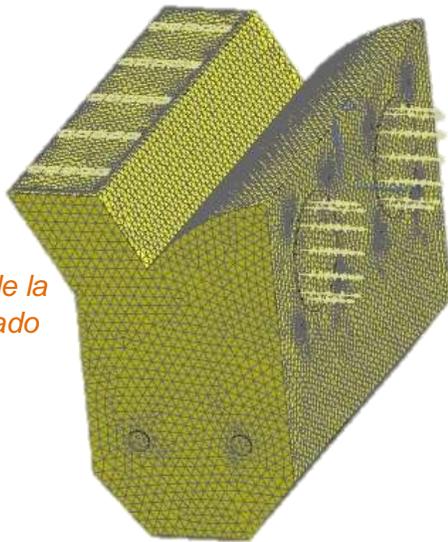


Fig.48. Mallado de la cámara de triturado

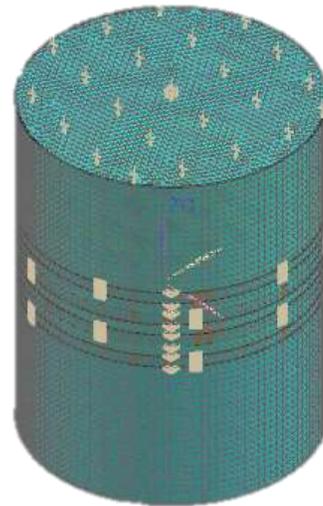


Fig.47. Mallado del dominio de aire con discos en el interior

Que el flujo de aire a través de las aberturas de los discos se acelere e impacte de forma directa en las superficies siguientes es lo más importante, la separación del mercurio de la corriente de aire es vital para evitar su emisión al ambiente.



Fig.50.
Ventilador
AEROCOOL
12 cm.



Fig.49.
Ventilador
NOCTUA de
12 cm.



Flujo que genera el ventilador = 60 pies cúbicos por minuto

$$\frac{60 \text{pies}^3 * (.3048\text{m})^3 1\text{min}}{1\text{min} * 1\text{pie}^3 * 60\text{seg}} = 0.028\text{m}^3/\text{seg} = 100.8 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Diámetro interno del tubo del separador = 102mm

$$\text{Velocidad del aire en cada ducto} = \frac{\frac{0.028\text{m}^3}{\text{seg}}}{\pi * \left(\frac{.102\text{m}}{2}\right)^2}$$

Velocidad del aire en cada ducto = 2.97 m/seg

El diseño de los rodillos se hace en base a materiales prefabricados disponibles en el mercado, como: barras, tubos, tornillos y soleras. Su forma difiere de los productos comercialmente disponibles, que en general usan una matriz circular y las salientes son soldadas, las extremidades de este rodillo son ajustadas a una matriz cuadrada por medio de tornillos. Comercialmente los dispositivos de trituración con salientes son diseñados para fracturar o romper materiales grandes con resistencias elevadas, las lámparas presentan en su composición una mayoría de vidrio, un material cerámico con un comportamiento frágil, así la propuesta está ligada a evitar que la parte de aluminio no sea un obstáculo para el triturado ya que presenta un esfuerzo de cadencia (cuando empieza a deformarse plásticamente) aproximado de 145 MegaPascuales²³.

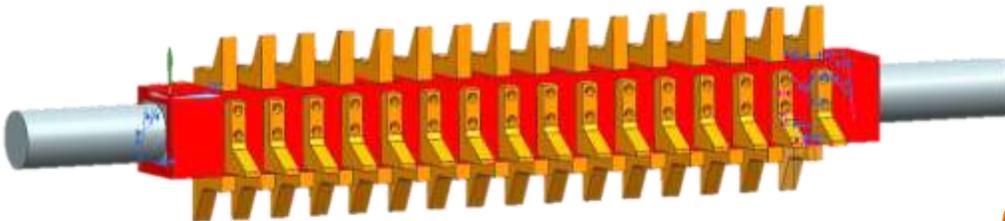


Fig.51. Rodillos para impacto.

No se requiere de una potencia levada y se escoge el motor con un cuarto de caballo de fuerza (hp). Este tipo de motor es monofásico de armazón 56, opera a un voltaje de 127 volts a una frecuencia de 60 hertz y genera 1800 revoluciones por minuto (rpm).

²³ Pascal, es una medida de esfuerzo (presión) que relaciona la fuerza aplicada por unidades de área.



Fig.52. Motor de ¼ de caballo de fuerza

La fuerza de tensión obtenida depende del radio de la polea y se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$F = \frac{hp * 447420}{\pi * r * n} [N]$$

Donde:

- hp: potencia del motor
- r: radio en milímetros de la polea sujeta al motor
- n: revoluciones por minuto de la flecha del motor

El sistema de transmisión para ejes paralelos más sencillo es el de bandas. Este mecanismo utiliza un juego de poleas para transmitir el movimiento a los rodillos y aparte facilitan el control de la velocidad de giro.

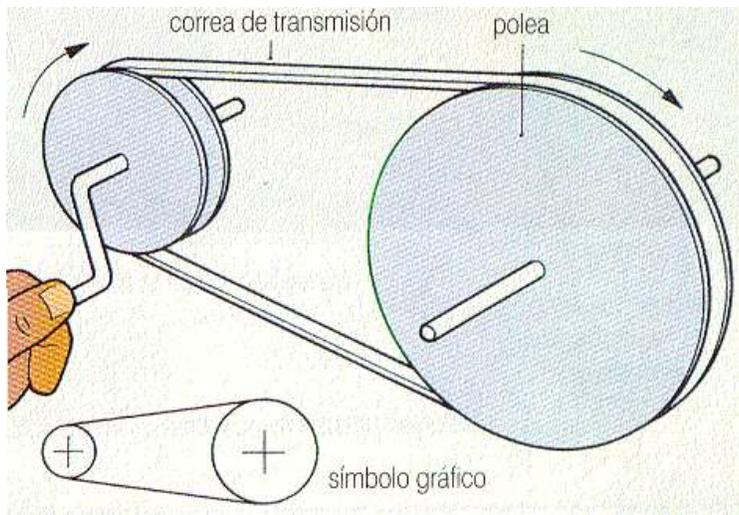


Fig.53. Ejemplificación de banda con poleas

$$\text{Diámetro de la polea al motor} * \text{rpm motor} = \text{Diámetro de la polea a los rodillos} * \text{rpm rodillos}$$

$$Dm * \text{rpm } M = Dr * \text{rpm } R$$

Por lo tanto

$$\text{rpm } R = \frac{Dm}{Dr} * \text{rpm } M$$



Se propone empezar con una velocidad de rodillos equivalente a una tercera parte de la capacidad entregada por el motor, por lo tanto la polea sujeta a la flecha del motor debe tener una relación 3 a 1 con la polea sujeta a los rodillos, las productos más cercanos a esta condición pertenecientes a la marca MARTIN son las siguientes:

- 1 3V 265 JA, con un diámetro de 66.04mm Tipo C-1
- 1 3V 690 SH ,con un diámetro de 173.99mm Tipo D-3



Fig.54. Poleas de diferentes canales.

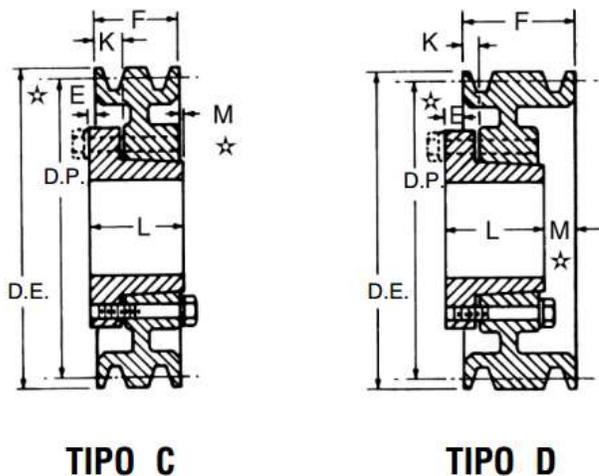


Fig.55. Corte transversal de cada tipo de polea propuesta

La banda a utilizar es del tipo V3, especial para el acanalado de las poleas, se usará un elemento comercial de 31.5 pulgadas de longitud, por lo cual es necesario encontrar la distancia entre los centros de cada polea, la ecuación correspondiente es la siguiente:

$$C^2 = \frac{1}{4} * [l - \pi * (r1 + r2)]^2 - (r2 - r1)^2$$

Donde:

- C: Distancia entre centros
- l: Longitud de la banda
- r1: Radio de la polea menor
- r2: Radio de la polea mayor

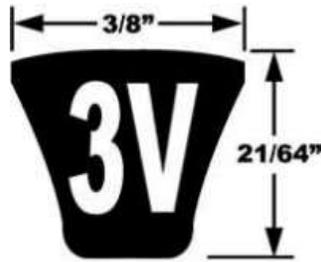


Fig.56. Perfil de la banda 3V

Aún con el cálculo de la distancia entre los centros de las dos flechas, se le proporciona a la base del motor el espacio suficiente para ajustar.

La base del triturador es hecha de tubo de acero y sobre de ésta se colocan las chumaceras que sujetan los ejes de los rodillos, las comercialmente disponibles soportan cargas elevadas (86.5 kN de carga dinámica, 86kN de carga estática, con un límite de velocidad de 4500 rpm) un estudio de cargas revela la superioridad de resistencia que asegura el buen funcionamiento. Se escoge un producto con un sistema de rodamiento de cilindros para evitar los desplazamientos axiales, porque de llegar a aparecer dañarían la estructura de la cámara de triturado y a los mismos rodillos.

El peso de cada pico con tornillos es de 0.62240761 [N]

El peso del tubo cuadrado es de 41.3708067 [N]

El peso de cada eje de detención es de 8.49821141 [N]

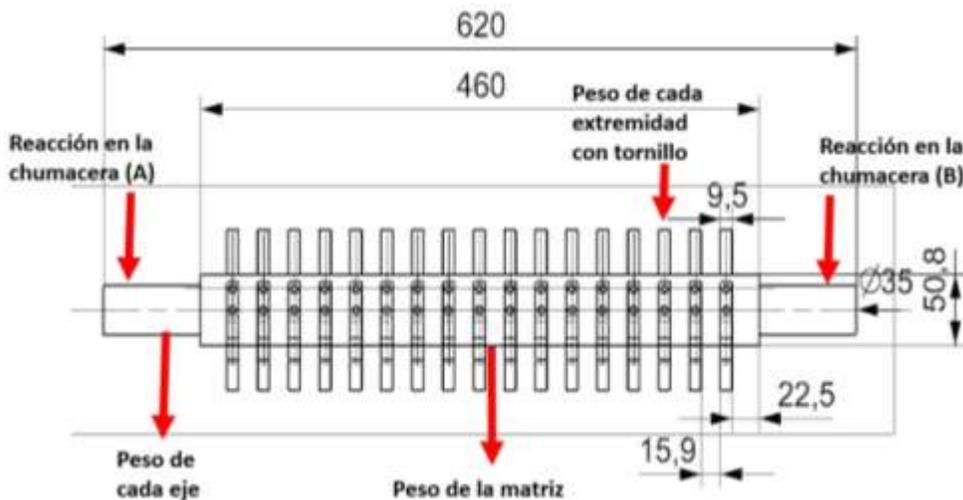


Fig.57. Rodillo con marcas de la posición de los pesos de las diferentes partes

$$\sum f_x = 0, \quad \sum f_y = 0, \quad \text{Peso}[P], \text{Reacción}[R]$$

No hay fuerzas aplicadas axialmente

$$\sum f_y = -P_{\text{matriz}} - P_{\text{ejes}} - P_{\text{salientes}} - R_A - R_B = 0$$

El dispositivo es simétrico, por lo tanto $R_A = R_B$

$$R_A = -49.2 \text{ [N]}$$



Fig.58. Base de triturador



Fig.59. Chumacera de rodillos

Materiales

- Lámina de acero forjado en frío y galvanizado, ASTM A53 A de 2 mm de espesor
- Tubo cuadrado de 2 pulgadas de lado
- Solera de 1.5 pulgadas de ancho con 9,5mm de espesor
- Barra de acero inoxidable tipo 304 de 5 cm de diámetro
- Dos chumaceras de rodillos SFK con abertura de 3.5cm
- Lámina de acrílico de 5 mm
- Tubo de acero inoxidable cedula 40 de 4 pulgadas
- Motor monofásico de 0.25 Hp
- Tornillos de 5 mm
- Par de poleas
- Banda de transmisión 3V.
- Tubo rectangular de 1.5 x 2.5 pulgadas
- Tubo cuadrado de 1 pulgada
- Dos ventiladores con un flujo de aire de 60 pies cúbicos por minuto



Anexo 2

Análisis de fuerzas para elección de rodamientos adicionales.

Peso de los componentes:

Matriz: 23.4620459 [N]

Salientes: 20.5020598 [N]

Ejes: 16.3298251 [N]

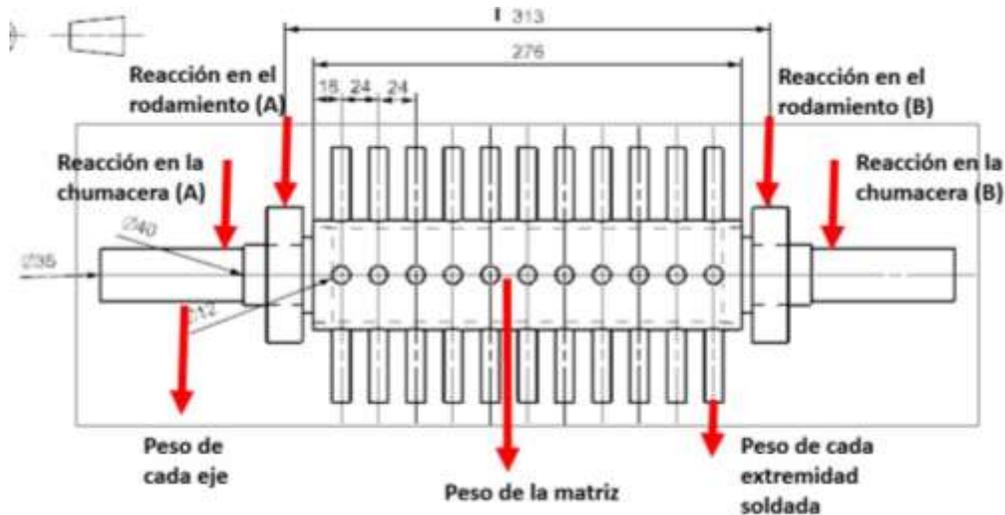


Fig.60. Rodillo modificado con marcas de la posición de los pesos de diferentes elementos.

$$\sum f_x = 0, \quad \sum f_y = 0,$$

Reacción en rodamiento A [RRA], Reacción en rodamiento B [RRB], ,

No hay fuerzas aplicadas axialmente

$$\sum f_y = -P_{matriz} - P_{ejes} - P_{salientes} - RA - RB - RRA - RRB = 0$$

El dispositivo es simétrico, por lo tanto $RA = RB, RRA = RRB$

$$\sum f_y = -P_{matriz} - P_{ejes} - P_{salientes} - 2RA - 2RRA = 0 \dots (a)$$

$$\sum MRA = 0$$

$\sum MRA = \text{Distancia de cada elemento} * \text{El respectivo peso}$

$$\sum MRA = 13.05 + 0.44RRA + 0.43RA = 0 \dots (b)$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones (a) y (b), se tiene:

$$RA = -8.76 [N]$$

$$RRA = -21.38 [N]$$



Materiales

- Lámina de acero forjado en frío y galvanizado, ASTM A53 A de 2 mm de espesor
- Tubo redondo de 2.5 pulgadas de diámetro
- Varilla de 12 mm de diámetro
- Barra de acero inoxidable tipo 304 de 2.5 pulgadas de diámetro
- Dos chumaceras de rodillos Skf con abertura de 3.5cm
- Dos rodamientos de una sola hilera Skf de 40mm de abertura y 4mm de espesor
- Par de rodamientos de una sola hilera
- Lámina de acrílico de 5 mm
- Placa de Nylamid de 10 mm de espesor
- Tubo de acero inoxidable cédula 40 de 4 pulgadas de diámetro
- Motor monofásico de 0.25 Hp
- Par de poleas
- Tubo rectangular de 1.5 x 2.5 pulgadas, calibre 12
- Tubo cuadrado de 1 pulgada
- Banda de transmisión 3V
- Celdas Peltier
- Pasta térmica
- Llaves de bureta
- Dos ventiladores con un flujo de aire de 60 pies cúbicos por minuto



Referencias.

- 1) A I Sviridewok. **Electrophysical Phenomena in the Tribology of Polymers.** 1999.
- 2) Barros Furieri Lorena. **Exposure to low mercury concentration in vivo impairs myocardial contractile function.** Toxicology and Applied Pharmacology. 2011.
- 3) BELTRAN Villegas Daniel. **Diseño y construcción de un impactador de cascada para la determinación de la distribución de tamaño de material particulado suspendido en el aire.** 2004
- 4) Biswas Pratim. **High- Velocity Inertial Impactors.** California Institute of Technology. Pasadena, California. 1984.
- 5) C. Hinds William. **Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles.** Segunda edición. John Wiley & Sons, 2012
- 6) C.I. Calle. Et. al. **Electrostatic Charging of Polymers by Particle Impact at Low Pressures.** NASA. Florida Institute of Technology. 2001.
- 7) Castelán Sánchez Juan Benito. **Evaluación de nuevas tecnologías led y pulse start para el ahorro de energía en la planta smurfit.** Tesis. Facultad de estudios superiores Cuautitlán. 2011.
- 8) **Catalogo. Aceros de México (ACEROMEX).**
- 9) D.A. Sarigiannis. et. al. **Exposure analysis of accidental release of mercury from compact fluorescent lamps (CFLs).** Science of the Total Environment. 2012.
- 10) D.S. Kim. **Characterization of a particle trap impactor.** Aerosol Science. 2005.
- 11) Ensor David S. **Aerosol Science and Technology: History and Reviews.** RTI International. 2011.
- 12) F. RODRÍGUEZ Reinoso y M. Molina Sabio. **El carbón activado en procesos de descontaminación.** Departamento de Química Inorgánica. Universidad de Alicante. España.2001
- 13) Figi Renato.et. al. **A straightforward wet-chemistry method for the determination of solid and gaseous mercury fractions in Backlight Cold Cathode Fluorescence Lamps.** Talanta.2012
- 14) **Fundamentos de ventilación.** Greenheck.2010
- 15) Galindo Hernández Mónica. **Estudio de las instalaciones de alumbrado de los pasillos y estacionamiento de las FES Acatlán y sus programas de ahorro de energía.** Tesis. Facultad de estudios superiores Acatlán. 2013.
- 16) Gonzales Carderon Raúl. **Ahorro de energía mediante iluminación LED.** Tesis. Facultad de estudios superiores Cuautitlán. 2011.
- 17) Gonzales Estrada Arturo Alberto, García Arredondo José Emmanuel. **Alternativa de ahorro de energía eléctrica para la iluminación en el edificio principal de ingeniería.** Tesis. Facultad de Ingeniería. 2013.
- 18) Hassan Taghipour. et. al. **Determining heavy metals in spent compact fluorescent lamps (CFLs) and their waste management challenges: Some strategies for improving current conditions.** Waste Management. 2014.
- 19) Hering Susanne. **Impactors, Cyclones, and Other Inertial and Gravitational Collectors.** Aerosol Dynamics, California.
- 20) Hu Yuanan, Cheng Hefa. **Mercury risk from fluorescent lamps in China: Current status and future perspective.** Environment International.2012.
- 21) Kim Croesa, et. al. **Health effects in the Flemish population in relation to low levels of mercury exposure: From organ to transcriptome level.** International Journal of Hygiene and Environmental Health.2014.
- 22) L.J. Habegger. et.al. **Technology Demonstration for Reducing Mercury Emissions from Small-Scale Gold Refining Facilities.** Environmental Science Division, Argonne National Laboratory. 2008.
- 23) Logan Earl Jr. **Turbomachinery: Basic Theory and Applications, Second Edition.** 1993
- 24) Marple Virgil A. **IMPACTOR DESING. GN.** Mechanical Engineering Department, University of Minnesota. 1976.



- 25) Martínez Robles Rene. **Diseño de alumbrado en instalaciones de PEMEX empleando un sistema autónomo con tecnología led y software de iluminación.** Tesis. Facultad de estudios superiores Aragón. 2013.
- 26) NEDA Asasian, et. **Al Elimination of mercury by adsorption onto activated carbon prepared from the biomass material.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2010.
- 27) **NORMA Oficial Mexicana NOM-017-ENER/SCFI-2012, Eficiencia energética y requisitos de seguridad de lámparas fluorescentes compactas autobalastradas. Límites y métodos de prueba.**
- 28) Northeast Waste Management Officials' Association (NEWMOA). **Review of Compact Fluorescent Lamp Recycling Initiatives in the U.S. & Internationally.** 2009
- 29) Obeweie Robert O. **Polymer science and technology.** CRC Press, 2000.
- 30) P:R: Sislian. et. al. **Bacterial aerosol neutralization by aerodynamic shocks using a novel impactor system: Design and computation.** Chemical Engineering Science. 2009.
- 31) Ping Li. et. al. **Human co-exposure to mercury vapor and methylmercury in artisanal mercury mining areas, Guizhou, China.** Ecotoxicology and Environmental Safety. 2011.
- 32) Pranas Jouzas, Zilinskas. **Electrostatic Properties and Characterization of Specific Polymeric Materials for Building Purposes.** Materials Science. 2010.
- 33) Redondo Quintela Félix. **Campo electrostático.** Universidad de Salamanca.
- 34) Rey-Raap Natalia, Gallardo Antonio. **Determination of mercury distribution inside spent compact fluorescent lamps by atomic absorption spectrometry.** Waste Management. 2012.
- 35) Roberts Mederith. **A Miniature Cascade Impactor to Capture Bacteria from the Air.** Thesis, University of Arizona. 2011.
- 36) Rodríguez Maroto Jesús Javier. **Diseño, validación y aplicación de un sistema integrado de caracterización de partículas de aerosol.** Tesis. Universidad Computense de Madrid. Facultad de C.C. Químicas. 2003.
- 37) Romay, F. J.. **A High-Performance Aerosol Concentrator for Biological Agent Detection. Aerosol Science and Technology. 2002.**
- 38) S. Trakumas. **Parallel particle impactor – novel size-selective particle sampler for accurate fractioning of inhalable particles.**
- 39) S.A. Grinshpun. **Collection of airborne spores by circular single-stage impactors with small jet-to-plate distance.** Aerosol Science 2004.
- 40) Sang Kang. **Characterization of a Microscale Cascade Impactor.** Korea Advance Institute of Science and Technology, Korea. 2012.
- 41) Scala Fabrizio, Herek L. Clack .**Mercury emissions from coal combustion: Modeling and comparison of Hg capture in a fabric filter versus an electrostatic precipitator.** Journal of Hazardous Materials 152.2008.
- 42) WANG Yun-jun. et. al. **Comparison of mercury removal characteristic between fabric filter and electrostatic precipitators of coal-firedpower plants.** JOURNAL OF FUEL CHEMISTRY AND TECHNOLOGY. 2008.



Fuentes de internet.

- 1) Blog ReVend. <http://reversevending.wordpress.com>. Junio 2014
- 2) Bulb Eater. www.aircycle.com. Abril 2014
- 3) Cámara Nacional del Cemento (CENAM). www.canacem.org.mx. Junio 2014
- 4) Carbotecnia S.A. de C.V. www.carbotecnia.info. Abril 2014
- 5) Celda peltier. <http://www.cic.ulp.edu.ar>. Agosto 2014
- 6) Censos de vivienda. www.inegi.org.mx. Octubre 2014
- 7) Chemviron Carbon. www.chemvironcarbon.com. Abril 2014
- 8) Chumaceras SKF. <http://comserprorodamientos.com>. Junio 2014
- 9) Dirección de proyectos de agua, suelos y residuos. www.sma.df.gob.mx. Abril 2014
- 10) El mercurio y los focos ahorradores. www.greenpeace.org.mx. Marzo 2014
- 11) Electroestática en los plásticos. <http://biblioteca.sena.edu.co>. Abril 2014
- 12) Elementos de transmisión de potencia. www.gates.com.mx. Junio 2014
- 13) Emily Jed. vendingtimes.com. Marzo 2014
- 14) Filtro electrostático. www.aircare.com.mx. Abril 2014
- 15) ILUMINET revista de iluminación on line. www.iluminet.com. Abril 2014
- 16) Impactador Inercial. aerosol.ees.ufl.edu Agosto 2014
- 17) Instituto Nacional para la Enfermedad de Minamata. www.nimd.go.jp. Junio 2014
- 18) Maquinas hidráulicas y térmicas. www.itescam.edu.mx. Abril 2014
- 19) Motor. <http://industria.siemens.com.mx>. Julio 2014
- 20) Poleas. www.rirsa.mx. Julio 2014
- 21) Reforma energética quitará luz a CFE. Sigler Edgar www.cnnexpansion.com. Agosto 2014
- 22) Reporte mensual de estadísticas del sector eléctrico. www.cre.gob.mx. Agosto 2014
- 23) Rodamientos. www.skf.com. Junio 2014
- 24) Sociedad Mexicana de Fundidores A.C. <http://smfac.org.mx>. Junio 2014
- 25) The Osram-The General Electric Co. www.iar.unicamp.br. Abril 2014
- 26) Triturador balcan. www.balcan.co.uk. Abril 2014
- 27) Triturador MRT. www.mrtsystem.com. Abril 2014
- 28) www.environmental-expert.com. Abril 2014