

JIFI2018
JORNADAS DE INVESTIGACIÓN
ENCUENTRO ACADÉMICO INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA UCV

ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS PARA LA RECUPERACIÓN, REUSO, RECICLAJE Y/O DISPOSICIÓN FINAL DE LAS LAMPARAS Y BOMBILLOS FLUORESCENTES.

Ing. Maybel Lopez¹ Ing. Jiraleska Hernandez¹ Lic. Federico Barroso³, Samuel Villanueva¹,
Magaly Henríquez¹

¹ Centro Nacional de Tecnología Química, Gerencia de Proyectos de I+D+i, Coordinación de
Energía y Ambiente (CEA)

² Universidad Experimental Marítima del Caribe.

RESUMEN

Las lámparas fluorescentes son dispositivos de descarga que generan luz mediante radiaciones energéticas producidas por electrones en movimiento a través de vapor de mercurio. Debido a su eficiencia y consumo reducido de energía, el uso de estos dispositivos se ha visto favorecido en comunidades, industrias, comercios e instituciones, masificando la generación de residuos con mercurio y afectando gravemente la salud pública y el ambiente. Esta investigación tiene el objetivo de estudiar las tecnologías que se emplean a nivel mundial para la recuperación, reuso, reciclaje y/o disposición final de las lámparas y bombillos fluorescentes desgastados, a partir de la búsqueda y análisis de publicaciones científicas y patentes durante el período 1997-2017. Adicionalmente, se presentan alternativas de recuperación de elementos de interés económico como los son las tierras raras, itrio (Y), europio (Eu), Lantano (La), Cerio (Ce) y Terbio (Tb); por medio de tecnologías como centrifugan de medio denso y extracción físico-química utilizando un líquido iónico.

Keywords: Lámparas fluorescentes, mercurio, tecnologías de recuperación, reciclaje y tierras raras.

ABSTRACT

Fluorescent lamps are discharge devices that generate light through energetic radiations produced by electrons moving through mercury vapor. Due to its efficiency and reduced energy consumption, the use of these devices has been favored in communities, industries, businesses and institutions, massifying the generation of waste with mercury and seriously affecting public health and the environment. This article aims to study the technologies that are used worldwide for the recovery, reuse, recycling and / or final disposal of worn fluorescent lamps and bulbs, from the search and analysis of scientific publications and patents during the period 1997-2017. Additionally, there are alternatives for the recovery of elements of economic interest such as the rare earths, yttrium (Y), europium (Eu), Lantano (La), Cerio (Ce) and Terbio (Tb); by means of technologies such as dense medium centrifugation and physical-chemical extraction using an ionic liquid.

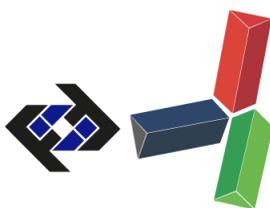
Keywords: Fluorescent lamps, mercury, technologies, recycling and rare earths.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una creciente necesidad de implementar nuevas tecnologías para satisfacer las demandas del sector económico, social e industrial, orientadas a una mayor eficiencia y menor consumo de energía eléctrica, tal es el caso de las lámparas y bombillos fluorescentes. Estos dispositivos de uso masivo en comunidades, industrias, comercios e

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.
Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053
Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>



instituciones, que de no recibir un manejo adecuado pueden presentar riesgos a la salud pública y al ambiente. Anteriormente, las lámparas fluorescentes no eran consideradas material peligroso, sin embargo, en 1990 la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) emitió la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos identificando a las lámparas fluorescentes caducadas como desechos peligrosos por su contenido de mercurio y otros elementos de igual naturaleza; recomendando se realicen manejos estrictos y rigurosos para su tratamiento y disposición final [1]. La presente investigación tiene por objetivo el estudio de las tecnologías para la recuperación, reuso, reciclaje y/o disposición final de las lámparas y bombillos fluorescentes desgastados a partir de la búsqueda y análisis de publicaciones científicas y patentes para el periodo de 1997-2017.

METODOLOGÍA

Se partió de la elaboración de una ecuación de búsqueda utilizando palabras clave, operadores booleanos y de truncamiento; se aplicó en las plataformas bibliométricas y patentométricas para la recopilación de datos a través de las publicaciones científicas y documentos de patentes por un lapso de tiempo de 1997 al 2017. En cada búsqueda se aplicaron filtros (Ver cuadro N°1) para evitar la contaminación de la información y finalmente se realizó el almacenamiento, tratamiento y análisis de información que permitió determinar alternativas tecnológicas para tratar las lámparas y bombillos fluorescentes como residuo peligroso. La ecuación de búsqueda empleada, los filtros, las plataformas utilizadas y los resultados obtenidos se muestran en la tabla N°1.

Tabla N°1. Resultados de las publicaciones y patentes.

Buscador	Ecuación	Filtro	Resultado
Wed of Science	((Recovery OR Recycling OR Recuperation OR Recoverable	(1991-2017) y título.	41
Patent Inspiration	OR separation) AND ("Fluorescent lamp*" OR "Fluorescent tube" OR "discharge lamp*") NOT LED)	Título. Mostrar solo uno por familia Patentes sin título ni resumen en blanco. 1991-2017 NOT (H05B41/00-F21S2/00-F21V23/00-F21V19/00).	102

Fuente: (Mlopez, 2018)

Un filtro importante fueron los códigos de la Clasificación Internacional de Patentes (CIP), proporcionan una clasificación jerárquica según las áreas de conocimiento desarrollado para cada documento y su aplicación a nivel internacional. Debido a que los códigos CIP descritos en la Tabla N°1 ilustran una mejora en el dispositivo, ya sea en el circuito o en uno de los aparatos que permite un funcionamiento más eficiente de las iluminarias, fueron excluidos de la búsqueda por estar fuera del objetivo del estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la ecuación de búsqueda planteada en la metodología, se obtuvieron 41 publicaciones

científicas y 102 documentos de patentes orientadas a la temática en estudio (Ver Tabla N°1). Se realizó el tratamiento y análisis de toda la información, clasificando el manejo de estos residuos en dos etapas, un tratamiento primario y uno secundario para el reciclaje y aprovechamiento de estas iluminarias. Estos se describen a continuación:

Tratamiento primario

El tratamiento primario consiste en el desmantelamiento de estos dispositivos en vidrio, casquillos y polvo fluorescente, utilizando equipos de corte y soplado; seguidamente se utiliza un equipo de trituración para reducir el tamaño del tubo de vidrio en partículas de menor tamaño, y finalmente en el proceso están presentes filtros de maga y carbón activado para retener las trazas de mercurio que se forman en el proceso y evitar la contaminación del ambiente de trabajo. Esta técnica se utiliza cuando las lámparas fluorescentes son en forma de tubo, para cualquier otro tipo de lámpara, se tritura primero el bombillo para extraer el polvo fluorescente mediante una campana de extracción que permite limpiar el aire antes de entrar en contacto con la atmósfera, seguido de una separación del vidrio y los casquillos mediante un imán. Culminando la primera etapa se obtienen tres subproductos: vidrio, componentes metálicos y el polvo fluorescente, que deberán ser tratados con otra técnica a fin de extraer el mercurio presente en ellos. [1]

Tratamiento Secundario

En el tratamiento secundario se emplean diversas tecnologías para la recuperación, extracción y/o estabilización del mercurio contenido en los subproductos (vidrio, casquillos y polvo fluorescente) obtenidos del tratamiento primario, con la intención de reducir la peligrosidad que estos poseen y llevar a cabo una adecuada valorización de estos materiales que pueden ser insertados en la cadena de valores. Estas tecnologías son:

Técnica de destilación y extracción de mercurio

Consiste en la evaporación del mercurio a temperaturas de 500 o 600 °C, luego la corriente de salida pasa por un sistema de enfriamiento condensándolo para su recuperación en estado líquido, y finalmente se utilizan filtros de carbón activado para retener y recuperar las trazas de mercurio en fase de vapor. Estos filtros tienen que ser reemplazados al culminar su vida útil para continuar el proceso y deben ser tratados para evitar que se conviertan en un pasivo ambiental. El porcentaje de eficiencia que puede alcanzar esta tecnología es de un 99,99% (Ver Figura N°1). [2]

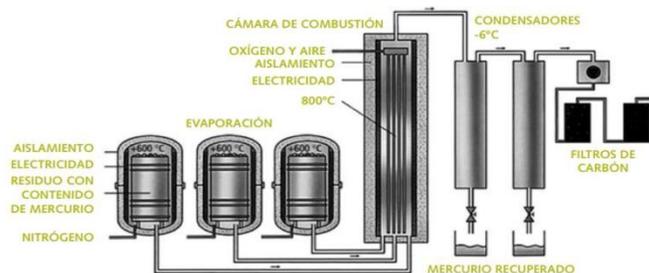


Figura N°1. Tecnología de Destilación de Mercurio. Fuente: Ambilamp, 2012.

En el 2008, se publicó la patente **JP2008229405A** relacionada a un equipo que destila mercurio a partir del polvo de fósforo residual contenido en un tubo de desecho fluorescente. El mercurio se recupera promoviendo la evaporación del mismo, agitando el polvo de fósforo en un horno rotatorio a una temperatura de 250 ° C a 300 ° C por un intervalo de 2 a 6 horas o a una temperatura de 550 ° C a 650 ° C, durante 1 a 2 horas y enfriar el gas de mercurio evaporado.

Técnica de solidificación/estabilización:

El proceso de inertización o solidificación/estabilización se realiza mediante la mezcla los desechos de luminaria con mortero (cemento + arena 1:3) y azufre hasta formar una pasta que luego solidifica, formándose el sulfuro de mercurio II (HgS), una sal poco soluble en agua (Ver Figura N°2). Finalmente, el residuo se almacena en contenedores o recipientes especiales antes de ser enviados a un relleno sanitario. En Costa Rica, se utiliza esta técnica para tratar los residuos de lámparas fluorescentes y las principales empresas que aplican dicha técnica son la Fundación Tecnológica de Costa Rica (FUNDATEC) y Campos y Muñoz Asesores Profesionales SA (CYMAPSA). [3]



Figura N°2. Residuo de lámparas fluorescentes tratadas con inertización de mercurio. Fuente: Revista de Ciencias Ambientales. (Julio-diciembre, 2017). [3]

Recuperación del mercurio mediante técnicas Físico-químicas.

Las tecnologías que involucran procesos físico-química son aquellas que modifican las propiedades químicas o físicas de un residuo y tienen por objetivo extraer el mercurio para su reciclaje y aprovechamiento. Estas técnicas se dividen en dos partes, primero se realiza una lixiviación química para extraer el compuesto del vidrio, polvo fluorescentes, etc., utilizando soluciones de hipoclorito de sodio / cloruro sodio (NaOCl / NaCl), yoduro de potasio / yodo (KI / I₂) o hipoclorito de sodio (NaOCl). El elemento se extrae del residuo como el ión tetrayoduro de mercurio (HgI₄⁻²) o el ión tetracloruro de mercurio (HgCl₄⁻²) dependiendo del agente químico utilizado para la lixiviación. Debido a que el compuesto resultante sigue siendo tóxico por ser un complejo de Hg (II) se realiza una segunda etapa en la que se reduce a su estado elemental (Hg⁰) mediante procesos de: Cementación, Electrocoagulación, Fotocatálisis y Extracción con Solventes orgánicos. A continuación se describen las tecnologías físico-químicas para tratar las lámparas y bombillos fluorescentes:

1. Técnica de lixiviación oxidativa y cementación

Se realiza una lixiviación química utilizando soluciones de hipoclorito de sodio / cloruro de sodio (NaOCl / NaCl) e yoduro de potasio / yodo (KI / I_2) para determinar el más eficiente. En cuanto al proceso de cementación se utilizarán polvos metálicos de hierro (Fe), cobre (Cu), y zinc (Zn) como agentes reductores para capturar mercurio en fase sólida. [4]

2. Técnica de lixiviación oxidativa y proceso de electrodeposición.

Se realiza la recuperación del mercurio mediante una lixiviación oxidativa utilizando soluciones de hipoclorito de sodio y yoduro de sodio (NaOCl / NaCl). Seguidamente se transforma el mercurio a su estado metálico mediante un proceso de reducción electrolítica. [5]

3. Técnica para el tratamiento en húmedo de las lámparas fluorescentes usando yodo en soluciones de yoduro de potasio.

Se realiza una lixiviación del mercurio como tetrayoduro de mercurio (HgI_4^{2-}), utilizando una solución de yoduro de potasio / yodo (I_2 / KI). Para finalizar se utiliza un solvente orgánico CyMe 4 BTBP en nitrobenceno, para extraer el mercurio del lixiviado en forma metálica (Hg^0). [6]

4. La recuperación y el reciclaje de mercurio de lámparas fluorescentes utilizando técnicas fotocatalíticas.

Se realiza una extracción química del mercurio como tetracloruro de mercurio (HgCl_4^{2-}) usando una solución de hipoclorito de sodio (NaOCl), luego una reducción fotocatalítica en presencia de dióxido de titanio como catalizador y ácido nítrico como agente orgánico auxiliar. El resultado es una mezcla de varios compuestos de mercurio en forma sólida depositada sobre el catalizador. [7]

Además del mercurio, existen otros elementos posibles de recuperar, como los son las tierras raras, itrio (Y), europio (Eu), Lantano (La), Cerio (Ce) y Terbio (Tb). Las tierras raras son elementos con un papel destacado en la industria informática (civil y militar), así como también en los diferentes sistemas de generación de energías renovables, en la fabricación de armamento y material militar. En la patente EP1126005A2 del año 2001, se describe un método de recuperación de tierras raras basado en el recubrimiento y reciclado de las lámparas fluorescentes. El proceso consiste en hacer fluir aire a través del tubo de vidrio a una velocidad suficiente para eliminar las partículas de la capa de revestimiento, siendo esta el polvo de fósforo que contiene las tierras raras.

Indicadores Patentométricos

La actividad de patentamiento ilustra los documentos publicados por año, describiendo la tendencia y evolución de las patentes. En la figura N°3 se observan los máximos picos, en el 2009 con 11 y el 2012 con 16 patentes, proporcionando información sobre sistemas y equipos que tratan las lámparas y bombillos, así como también la recuperación de mercurio, incluyendo

elementos de interés económico como las tierras raras presentes en estos dispositivos. Adicionalmente se nota un incremento de las patentes a partir del 2001 hasta el 2016 demostrando un creciente interés en el tratamiento de las lámparas y bombillos fluorescentes por parte de la sociedad. Para el 2010 se estimó la deposición atmosférica de mercurio a nivel mundial y el resultado fue de 3.200 toneladas/año a la tierra y 3.700 toneladas/año a los océanos. De esta cantidad, una gran parte del mercurio depositado, tanto en la tierra como en los océanos, es reemitido a la atmósfera (UNEP, 2013). Siendo este un incentivo para que las instituciones públicas y privadas tomaran acciones contra el impacto que genera la contaminación de mercurio en la salud humana y en el ambiente.

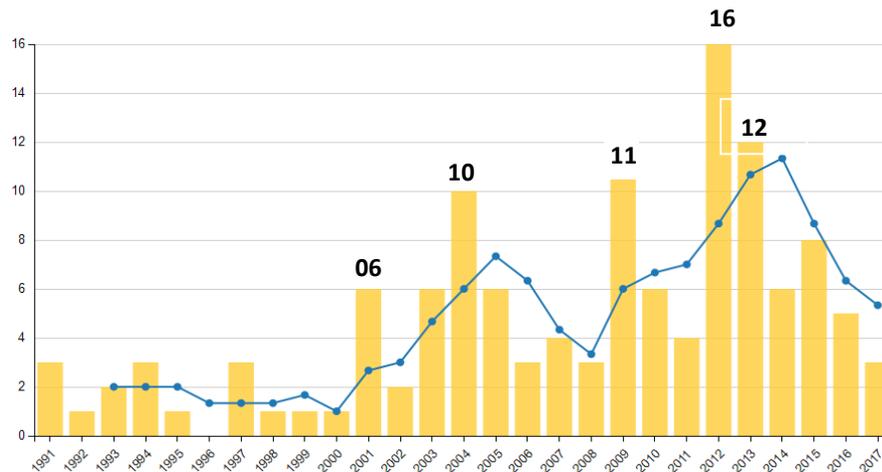


Figura N°3. Cantidad de Patentes relacionadas a tecnologías para el tratamiento de las lámparas y bombillos fluorescentes. Periodo 1985-2017. Fuente: (Elaboración Propia, en base a los datos de las patentes 2018).

En cuanto al análisis geográfico, se describen los continentes líderes en el tratamiento, reutilización y reciclaje de las lámparas fluorescentes usadas, destacando al continente asiático con el 69 % de patentes, mientras que el continente americano abarca el 17% y el europeo un 14%. Por su parte, Japón es el país predominante con 31 % de las patentes en el área de estudio, orientadas a la recuperación del mercurio, fósforo y vidrio como material aprovechable, aplicando técnicas de destilación descritas en la patente JP2008229405A y una técnica química detallada en el documento registrado bajo el código JPH1012149A. La empresa con más invenciones publicadas es JFE KANKYO CORP con 05 documentos, corporación Japonesa dedicada a la recolección y transporte de desechos reciclables, procesamiento intermedio, eliminación y reciclaje.

En la figura N°4, se observa el número de publicaciones científicas por año, destacando el 2014 con ocho (08) escritos, siendo el año con mayor cantidad de investigaciones enfocadas a las tecnologías de recuperación, reciclaje y/o disposición final estos dispositivos. Las causas que favorecieron el incremento de las documentos publicados para ese periodo pueden ser atribuidas a que 160 países se reunieron en enero de 2013 en la ciudad de Ginebra, Suiza para la aprobación del Convenio de Minamata sobre el Mercurio, con el objetivo elaborar un documento legal que

contenga los lineamientos para la reducción de las emisiones de mercurio y sus compuestos, así como las medidas para tratar estos desechos y las repercusiones que tiene en la salud pública. Para el periodo 2014-2017 bajo el interés por publicar tecnologías para el tratamiento de las lámparas y bombillos fluorescentes en comparación con las patentes, debido a que las empresas prefieren patentar sus inversiones que publicarlas.

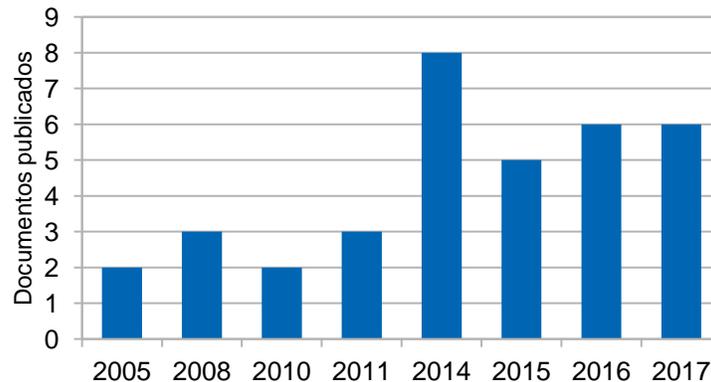


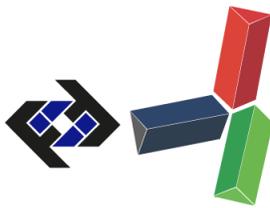
Figura N°4. Publicaciones por año. Fuente: (Elaboración propia a partir de los resultados de publicaciones científicas con la plataforma de Web of Science, 2018).

En relación a los países pioneros en publicaciones científicas, se encuentra liderando Alemania con cinco (05) documentos científicos, Seguido Japón y China con cuatro (04), Estados Unidos (USA) con tres (03), mientras que Brasil y Canadá se ubican con dos (02) publicaciones cada uno (Ver gráfico N°4). Alemania muestra interés por investigar tecnologías para tratar las lámparas y bombillos fluorescentes, debido a que se determinó que 4.645 personas entre 18-69 años de edad presentan niveles preocupantes de contaminación por mercurio, según informe de la organización ambiental de la salud por Poulin. J y Gibb. H para el 2008,

La presencia del mercurio en el ambiente ha ocasionado contaminación de zonas estratégicas como suelo dedicado al cultivo, agua de consumo humano, alimentos y el aire circundante, afectan la salud de comunidades, lo que ha contribuido a una desmejora de la calidad de vida de la población. Países que son potencia a nivel mundial se han visto en la obligación de desarrollar tecnologías que permitan tratar estos dispositivos evitando que se conviertan en un riesgo potencial que afecte la salud pública y el ambiente.

CONCLUSIONES

El análisis de las patentes y publicaciones científicas permitió describir la dinámica del área, tendencias y evolución en el tiempo, así como la identificación de empresas e instituciones más destacadas para la identificación de tecnologías para tratar las lámparas y bombillos fluorescentes. Las tecnologías seleccionadas se clasificaron en seis (06) procesos: destilación, solidificación/estabilización y cuatro (04) técnicas físico-químicas para recuperar el mercurio presente en estas iluminarias o estabilizarlo en una estructura de concreto. De todas las técnicas descritas anteriormente, la tecnología de destilación y solidificación/estabilización generan residuos que debe ser tratados para evitar que se conviertan en un pasivo ambiental, como los filtros de carbón activado, subproducto de la técnica de destilación. Por otro parte se ha evidenciado la posibilidad de reciclar las tierras raras presentes en estas iluminarias como alternativa que permite recuperar



materiales con valor agregado para la creación de un mercado secundario a partir de residuos comunes, elementos que destacan por participación en la industria informática (civil y militar), así como también en los diferentes sistemas de generación de energías renovables, en la fabricación de armamento y material militar. Finalmente los indicadores bibliométricos y patentométricos permitieron evaluar el panorama científico de las publicaciones científicas y patentes, determinando que Japón es el país que cuenta con el mayor porcentaje (31%) de las patentes y JFE KANKYO CORP es la empresa japonesa con mayor cantidad de invenciones en el área de estudio, con seis (06) documentos en total. Mientras que para las publicaciones científicas los continentes líderes fueron Europa y Asia, representados por Alemania, Italia, Suecia, Turquía, Japón, China y Corea, con el dominio en publicación, organizaciones, autores y agencias financiadoras de estudios relacionados con tecnologías en esta área.

REFERENCIAS

- [1] Montenegro, K y Nicolalde, A. (2012) Diagnostico y Evaluación Experimental del Tratamiento de Lámparas Fluorescentes mediante el equipo BALCAN modelo FSL 110 en INCINEROX CÍA. Distrito Metropolitano de Quito: Repositorio Digital. Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/490>
- [2] Geymonat, E. (2011) Tratamiento térmico para la recuperación de mercurio, Uruguay. Manejo racional de productos con mercurio. Recuperado de <http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/Tratamiento-t%C3%A9rmico-para-la-recuperaci%C3%B3n-de-mercurio-Diciembre-2011.pdf>
- [3] Jiménez, J y Ramírez, W. (2015) Evaluación preliminar. Tratamiento del mercurio de fluorescentes y bombillas del alumbrado público. Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperado de <file:///C:/Users/PERSONAL/Downloads/solidificacion%20.pdf>
- [4] Coskun. S y Civelekoglu. G, 2015. Recuperación de mercurio de lámparas fluorescentes agotadas a través de lixiviación oxidativa y cementación. Recuperado de DOI 10.1007/s11270-015-2391-9.
- [5] Ozgur. C, Coskun. S, Akcil. A, Beyhan, M. Serkan, I y Civelekoglu. G. (2016) Procedimiento combinado de lixiviación oxidativa y electrodeposición para mercurio, recuperación de lámparas fluorescentes gastadas. Universidad Suleyman Demirel, Isparta, Turquía. Recuperado de Doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.039.
- [6] Tunsun. C, Ekberg, C, Foreman. M y Retegan. T. (2014) Técnica para el tratamiento en húmedo de las lámparas fluorescentes usando yodo en soluciones de yoduro de potasio. Departamento de Ingeniería Química y Biológica, Universidad Tecnológica de Chalmers, Gotemburgo, Suecia.
- [7] Bussi. J, Cabrera. M, Chiazzaro. J, Canel. C, Veiga. S, Florencio. C, Dalchielec. E y Belluzzid. M. (2009) La recuperación y el reciclaje de mercurio de lámparas fluorescentes con técnicas fotocatalíticas. Recuperado de DOI 10.1002/jctb.2313.
- [8] Mercury distillation apparatus for distilling mercury from waste phosphor powder in waste fluorescent tube and mercury recovery method. SAFETY LAND KK. 2 Oct 2008. **JP2008229405A.**