

# Diseño y Simulación de un Sistema de Control Automático para el Proceso de Reciclaje de Luminarias de Bajo Consumo

*Arias Gómez Paulina Mishell*

*Departamento de Eléctrica y Electrónica*

*Escuela Politécnica del Ejército*

*Av. General Rumiñahui s/n, Sangolquí, Ecuador*

*E-mail: [paulinamariasg@gmail.com](mailto:paulinamariasg@gmail.com)*

**Resumen.-** En la actualidad, las luminarias de bajo consumo se han convertido en un medio de iluminación generalizado debido a su bajo consumo de energía eléctrica, sin embargo, el desecho y desuso de las mismas tienen implicaciones ambientales; para lo cual se deben aplicar técnicas para disminuir la contaminación, como es el reciclaje. El presente artículo muestra el diseño y simulación de un sistema de control automático para activar las etapas de: trituración, separación y extracción para el Reciclaje de Luminarias de Bajo Consumo. Se incluye el diseño de software de control a través de la plataforma Twido Suite; las activaciones de cada etapa del reciclaje son visualizadas a través de una interfaz Hombre – Máquina desarrolladas en la plataforma Vijeo Citect.

**Palabras Clave.-** Reciclaje, Luminarias de Bajo Consumo, Twido Suite, Vijeo Citect

## I. INTRODUCCIÓN

Conforme el ser humano adquiere avances significativos en la tecnología nacen nuevas necesidades que prolongan la preservación de la naturaleza que en la actualidad dentro de las responsabilidades del cuidado al medio ambiente se aplican técnicas con el fin de disminuir la contaminación, una de ellas es el reciclaje; que la mayoría de las personas no conocen en realidad la importancia y el significado del reciclaje, palabra conocida por muchos pero lastimosamente practicada por pocos; es precisamente que en Ecuador penosamente esto sucede.

Uno de los factores principales que se aporta para la contaminación ambiental, es el desecho y desuso de luminarias de bajo consumo LFC's debido a la presencia en su interior de gas de mercurio, un gas altamente tóxico para el medio ambiente y el ser humano; pero en cierta manera el uso de este tipo de gas en las lámparas permiten que estas disminuyan su consumo energético, una gran ventaja del uso de las mismas, convirtiéndose así en un medio de iluminación generalizado.

En Ecuador no existe una infraestructura que permita reciclar luminarias de bajo consumo, es por esto, que el presente artículo investigativo nace con la finalidad de diseñar un preliminar para el control automático de las diferentes etapas que intervienen en el reciclaje como son: trituración, separación y extracción.

En el presente artículo se detallará lo siguiente:

- Elementos Constitutivos y Principio de Funcionamiento de las LFC's
- Procesos para el Reciclaje de LFC's
- Operación Mecánica del Reciclaje de LFC's
- Instrumentación del Reciclaje de LFC's
- Sistema de Control para el Reciclaje de LFC's
- Simulación del Reciclaje de LFC's
- Factibilidad Económica

## II. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS LFC'S

Una lámpara fluorescente es un tipo de luminaria que en su interior posee un material fluorescente y una atmósfera de vapor de mercurio a baja presión (0.8 Pa) que es utilizada para la iluminación doméstica e industrial debido a su eficiencia energética (producción de más lúmenes con menos watts), vida útil mayor (más horas de funcionamiento) y su despreciable disipación de calor al medio ambiente (consideradas lámparas frías).

Las lámparas LFC's constan de las siguientes partes como se indica en la Figura. 1.

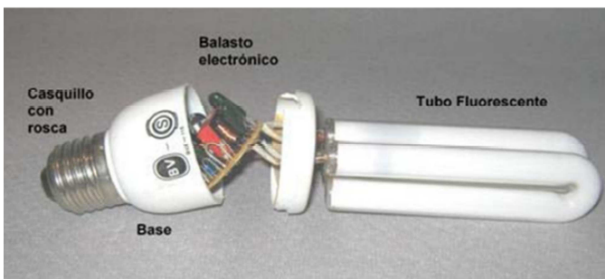


Figura. 1 Elementos constitutivos de una LFC [1]

El principio de funcionamiento de una LFC comprende la ionización del gas inerte (gas Argón) que se encuentra en el interior del tubo de esta lámpara, cuando los filamentos se calientan, es decir, esta ionización comprende la formación del puente de plasma que se origina de un filamento hacia el otro, como se puede ver en la Figura. 2.

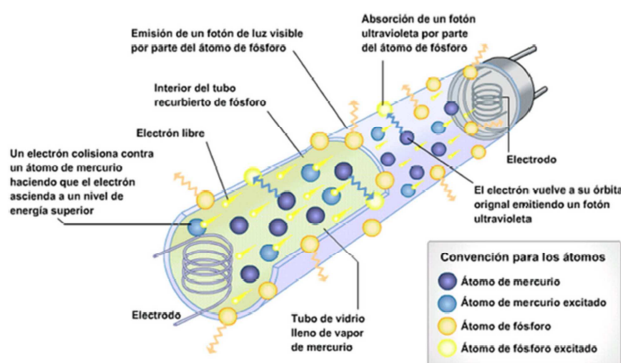


Figura. 2. Principio de Funcionamiento de una LFC [2]

La ionización del gas inerte permite dividir en electrones libres (carga negativa) y en iones (carga positiva), los mismos que colisionan con los electrones del átomo de mercurio Hg

haciendo que el electrón de Hg ascienda a un nivel de energía superior; es así como este electrón se libera de la órbita en forma de fotón de luz ultravioleta.

Los fotones de luz ultravioleta liberados impactan sobre la capa fosforescente que recubre la pared interior del tubo de cristal de la lámpara, excitando los electrones de los átomos de fósforo (P) contenidos en éste y saliendo al exterior. En ese instante liberan fotones de luz blanca fluorescente visibles para el ojo humano. Ese proceso provoca que el tubo de la lámpara fluorescente se ilumine, proporcionando luz.

Los beneficios de la utilización de lámparas LFC's está asociado a su mayor nivel de eficiencia en la transformación de energía eléctrica en luz sin disipación de calor en comparación con una lámpara incandescente, es decir, producir más luz que calor a través de un ahorro de energía del 60 al 75%. Se obtiene un rendimiento luminoso (lm/W) de 3 a 4 veces mayor que una lámpara incandescente, por lo que las LFC's resultan lámparas de uso eficiente.

Cuando una LFC se rompe las emisiones de mercurio se adicionan al ciclo global a través de la bioacumulación, a pesar que la cantidad de mercurio es muy pequeño (cantidad máxima permitida 5 mg); sin embargo se debe considerar que en todo el planeta tierra no existe una lámpara sino millones, es decir, millones volúmenes de emisiones, que esto si se convierte en motivo de preocupación para el cuidado del medio ambiente.

A pesar de ser las LFC's residuos peligrosos con impactos ambientales, no se pueden omitir ciertas sustancias para la fabricación de las mismas, por ejemplo, estudios demuestran que una lámpara fluorescente sin mercurio consumiría aproximadamente tres veces más energía que una lámpara con mercurio. Por lo tanto, se debe considerar que el mercurio está íntimamente ligado a un óptimo rendimiento durante el ciclo de vida y una máxima eficiencia energética de la lámpara. Los mayores riesgos se encuentran en la etapa de residuo cuando se producen mediante rotura accidental en cualquier fase si no existe el tratamiento adecuado.

Debido a la falta de información y cultura sobre el correcto tratamiento de estas luminarias, en Ecuador no existe un proceso (infraestructura) de recolección y reciclaje adecuado para evitar que el vapor de mercurio sea liberado al exterior cuando una luminaria se rompe. Tampoco existen disposiciones por el Ministerio del Ambiente para que las LFC's sean tratadas como residuos especiales.

### III. PROCESOS PARA EL RECICLAJE DE LFC'S

El reciclaje es una técnica de convertir los desechos en materia prima, siendo estos reutilizados; por ejemplo, si reciclamos papel se podría evitar la tala de 250 millones de árboles cada año, ya que un árbol absorbe un aproximado de 14 libras de dióxido de carbono, por ende los 250 millones de árboles que no serían talados evitarían que 3.5 trillones de libras de CO<sub>2</sub> se encuentren en la atmósfera cada año.

En el año de 1690 una familia llamada Rittenhouse realizó una especie de experimento en el que por primera vez se reciclaron materiales. Posteriormente en la ciudad de New York se abrió el primer centro de reciclaje oficial en los Estados Unidos. Finalmente en 1970 se creó la Agencia de Protección Ambiental y se difundió con mayor interés el reciclaje.

La importancia del reciclaje se engloba en las 3R:

- **Reducir:** producción de objetos susceptibles a convertirse en desechos.
- **Reutilizar:** desechos para darle una segunda vida, con el mismo uso u otro diferente.
- **Reciclar:** proceso que permite a los desechos reintroducir en un ciclo de vida.

Varios métodos de reciclaje de LFC's se han establecido, tomando en cuenta que cualquiera que sea el proceso de reciclaje debe ser llevado a cabo con sistemas de sellado al vacío, esto con la finalidad de evitar cualquier peligro al ser humano. Entre los principales métodos tenemos:

- End cut
- Trituración
- Lavado

**Método End-Cut.-** Este tipo de método se aplica exclusivamente a lámparas fluorescentes tipo tubo y es considerado un método antiguo de reciclaje. Consiste en:

- Separar los casquillos (extremos) de la lámpara y este residuo se envía a un procesamiento independiente.
- Eliminación del fósforo mediante succión del vidrio restante, en este proceso el vidrio puede romperse, además el polvo puede ser separado mediante un precipitador de polvo.
- El tubo limpio de polvo puede ser triturado y enviado a un sistema de separación magnética para asegurar que no contenga metal, y de esta manera

asegurar la producción de nuevas lámpara con el vidrio reciclado.

**Método Trituración.-** Este tipo de método, es un método generalizado en la actualidad para el reciclaje de lámparas debido a que se puede procesar cualquier tipo de lámpara sin influir tamaño o modelo de la misma. Consiste en los siguientes pasos:

- Trituración de la lámpara completa.
- Separación de la mezcla en diferentes tamaños de partículas, fracción media y fina. La fracción media es el vidrio / fracción de plástico y partes metálicas, con un tamaño de partículas de aprox. 10 cm. La tercera fracción tamizada contiene fósforo en polvo y vidrio de polvo aprox. 10 a 50  $\mu$ m.
- Utilización del reciclaje, las partes metálicas y fracciones de vidrio/plástico son enviados a su apropiado sistema de reciclaje.
- Opcional la eliminación térmica de las partículas finas (fósforo/vidrio) por medio de destilación.

**Método Lavado.-** El método de lavado de vidrio roto puede usarse para reciclar grandes volúmenes de lámparas fluorescentes independientemente de su longitud y diámetro. Este método de reciclaje es el más actual en el cual intervienen procesos más sofisticados. Consiste en los siguientes pasos:

- Trituración de la lámpara con la finalidad de obtener el polvo de la lámpara y poder dar el tratamiento adecuado a todos los residuos.
- Eliminación del fósforo, las lámparas rotas se limpian de fósforo con agua en un tanque de vibración. El agua de lavado se bombea a través de un filtro inclinado en el que el fósforo en forma de lodos se sedimentan. El mercurio se retira del polvo de fósforo por medio de destilación rotativo.
- Separación del material, las fracciones de material individuales se enjuagan y se separa por medio de tamizado. El vidrio separado de esta manera se seca y se envía para el control de calidad a través una unidad de separación de metal y una detección automática del sistema y entregado para la industria de la lámpara como un material secundario para la producción de lámparas nuevas.

Para objeto de estudio básico del reciclaje de LFC's se tomará como base al "**Método Trituración**"; la selección de este método se fundamenta en el cual se manipulan procesos netamente mecánicos como la presencia de trituradores y separadores. Mientras que en el método de lavado intervienen procesos netamente químicos como la presencia del lavado cuyos estudios se fundamentan en análisis químicos, siendo esto no objeto de investigación en este proyecto.

#### IV. OPERACIÓN MECÁNICA DEL RECICLAJE DE LFC'S

El proceso de reciclaje incluye básicamente y de manera generalizada, la separación de todos los componentes para una futura reutilización, como se puede ver en la Figura. 3.



Figura. 3. Método Trituración para Reciclaje de LFC's [3]

Para el proceso de reciclaje se debe tomar en consideración cuales son los productos iniciales (que tipos de materiales ingresan al sistema) y productos finales (que tipo de materiales salen del sistema) para su posterior utilización.

**Productos iniciales:** En el sistema propuesto se puede procesar tubos y lámparas compactas. Para tubos fluorescentes se consideran tubos de hasta 150 cm de longitud, mientras que para lámparas compactas cualquiera está admisible debido a su variedad en tamaño y forma.

Se debe tomar en consideración que por cada 1000 kg de polvo fluorescente existe 2500 g de gas de mercurio; y que se debe procesar alrededor de 1 millón de lámparas para conseguir 15 kg de mercurio líquido. Considerando que existen aproximadamente 5 mg de gas mercurio como contenido máximo.

Para nuestro entorno "ECUADOR" se debe asumir que por cada habitante se consume una LFC's, es decir, según el Censo 2010, en Ecuador existen 14'451.115 habitantes por lo tanto 14'451.115 de lámparas procesadas anualmente, considerando aproximadamente 1 millón de lámparas por mes.

**Productos Finales:** En la Tabla. 1 se especifica el porcentaje de componentes contenido en una lámpara fluorescente, que se puede alcanzar al final del proceso de reciclaje.

PORCENTAJE DE PRODUCTOS FINALES	
Polvo Fluorescente con mercurio	1
Metales libres de polvo	5
Vidrio / Plásticos libres de polvo	94

Tabla. 1. Porcentaje de Productos Finales

**Trituración:** Las lámparas ingresan enteras al sistema, se trituran con la finalidad de reducir el tamaño de la lámpara y controlar las emisiones de Hg generadas en la trituración; este proceso se utiliza para evitar roturas incontroladas. Figura. 4.



Figura. 4. Molino de Martillos para Trituración de LFC's [4]

**Separación:** Una vez trituradas las lámparas, se encuentran involucradas dos tipos de separación:

- El primero corresponde a la separación del polvo de la lámpara luego de la trituración, así este polvo puede dirigirse por las tuberías correspondientes. Esta separación se lo hace a través de cribas vibrantes, Figura. 5; y
- El segundo corresponde a la separación del metal del vidrio, después de haber separado el polvo de todos estos residuos. Esto se consigue a través de procesos de separación magnética, Figura. 6.



Figura. 5. Cribas Vibratorias [5]

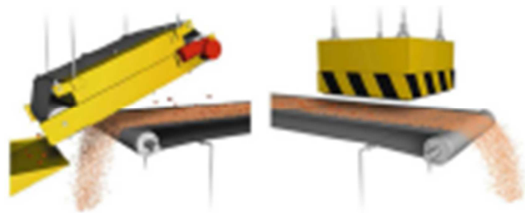


Figura. 6. Separación Magnética [6]

**Filtros Extractores:** Utilizado para recuperar todo el mercurio transportado por el polvo de fósforo con un tamaño inferior a 5 micras. Mientras que todos los vapores y restos más finos son conducidos a un conducto que contiene carbón activado con base de azufre y plata con el cual reacciona la plata con el mercurio, es decir se forma una amalgama de mercurio; esto permite que el aire extraído quede limpio de mercurio y pueda salir a la atmósfera. La extracción es un sub-proceso del reciclaje el cual consiste en el transporte de materiales polvorientos, es decir, almacenar el polvo fluorescente contenido en la lámpara. El transporte de estos materiales se lo hace a través de gas como el aire, conocido como transporte neumático, según Figura. 7. Este tipo de transporte se lo realiza principalmente para aspirar el polvo a través de corrientes de aire; al no tener presión dentro de todo el proceso del reciclaje debe existir algún agente externo que permita que el polvo pueda moverse dentro del proceso.

El principio de funcionamiento de este tipo de sistema se basa en inyectar aire comprimido en el punto de carga (tolva de carga), que en conjunto con el ventilador centrífugo generará vacío obligando de esta manera a que el material pueda fluir hasta la descarga respectiva.

Las longitudes de transporte pueden estar entre 50 y 100 metros con capacidades de transporte de hasta 300 ton/h.

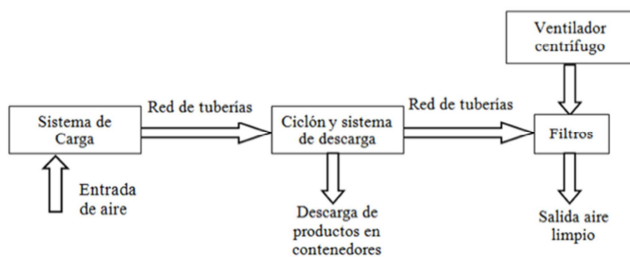


Figura. 7. Transporte Neumático de Polvos

**Cintas Transportadoras:** Utilizadas para transportar el material de un proceso hacia otro, por ejemplo, luego de trituradas las lámparas deben transportarse al proceso de separación de componentes.

Consisten en una lámina sinfín (extremos unidos) plana y flexible; hecha de tela, goma, cuero o metal, estirada entre dos poleas que la hacen girar. El material se dispone en la parte superior de la banda para transportarlo. Pueden operar horizontales, inclinadas o verticales, dependiendo del producto y del diseño de la banda. La capacidad de la cinta puede ser controlada al variar la velocidad. Los modelos más comunes de Cintas Transportadoras se pueden ver en la Figura. 8.



Figura. 8. Tipos de Bandas Transportadoras [7]

**Tolva Principal:** Utilizadas para recoger polvo con mercurio de las lámparas trituradas de forma segura, es decir, evitar emanaciones de Hg inseguras. La tolva tiene conexión directa con el sistema de extracción, el mismo que transporta el polvo hacia el contenedor de polvo con mercurio.

**Contenedores:** Utilizados para recoger vidrio, metales y polvo de fósforo después de la separación de los componentes.

**Unidad de Recuperación Térmica:** El polvo separado es llevado a un horno, donde por la aplicación de calor, el mercurio es vaporizado y posteriormente condensado y enviado a un proceso de destilación.

**Destilación:** El mercurio recuperado es sometido a una triple destilación con la finalidad de quitarle impurezas, para su venta como Mercurio Técnicamente Puro (99.99% puro).

Los procesos que corresponden a la Unidad de Recuperación Térmica y Destilación forman un sistema único denominado "Sistema de Retorta".

En determinados procesos de reciclaje se incluyen los sistemas de retortas, mientras que otros procesos solo extraen el polvo de fósforo y entregan este polvo a procesos específicos de extracción de mercurio, como sistemas de retortas.

Para procesos iniciales de reciclaje no es recomendable incluir los sistemas de retortas, ya que estos sistemas deben ser tratados y controlados con altos niveles de seguridad

debido a que el material que se procesa es mercurio, por lo tanto la Unidad de Recuperación Térmica y Destilación no se incluye en este documento de investigación, al ser un estudio de carácter químico y no constituye dentro del ámbito electrónico.

## V. INSTRUMENTACIÓN DEL RECICLAJE DE LFC'S

La automatización del reciclaje de LFC's comprende la activación eléctrica de cada etapa con una lógica secuencial para evitar el uso de energía innecesaria, por ejemplo, mientras el material se encuentra en la etapa de trituración, no existe la necesidad de funcionamiento de la etapa de extracción de polvo o viceversa.

A continuación se detallará la instrumentación necesaria en cada etapa del reciclaje de LFC's:

**Trituración.-** En esta etapa consiste en obtener material triturado con granulometría de 10 cm. esto con la finalidad de poder extraer el polvo fluorescente contenido en las lámparas, como se muestra en la Figura. 9.

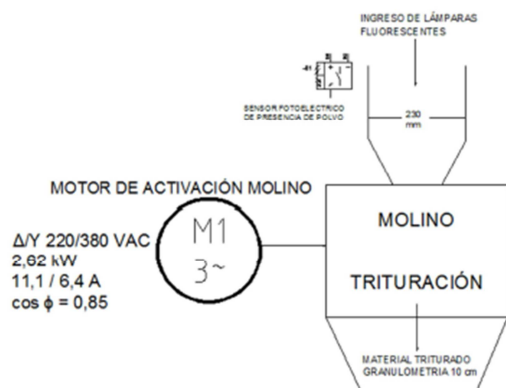


Figura. 9. Sensor y Actuator para Etapa Trituración

La etapa de trituración será activada a través de un interruptor rotativo que son usados en instalaciones eléctricas trifásicas para conexión y desconexión de cargas eléctricas.

Para la activación del Motor 1 (Molino de Trituración) el sensor de presencia ubicado en la tolva de carga de lámparas debe activar su señal de sensamiento para iniciar la etapa de trituración. Esto con la finalidad de que el molino de trituración no funcione sin material ya que esto provocaría que se malogre. Cabe recalcar que mientras está activado el Motor 1 el resto de las etapas deben estar desactivadas.

En esta etapa se debe considerar un sensor de presencia de lámparas fluorescentes, situado a la entrada del molino de trituración o en la tolva de carga de material.

Para el sensor de presencia de LFC's, se utilizará sensores fotoeléctricos, los cuales gozan de beneficios como detectar cualquier material a distancia sin contacto al sensor. Su principio de funcionamiento se base a través del emisor (integrado en el sensor juntamente con el receptor) donde genera un flujo de luz modulado. Si un objeto se sitúa en este flujo de luz entonces la luz se refleja en el objeto, una parte de esta luz reflejada va hacia el sensor. El receptor capta y dependiendo de la superficie, intensidad y color se puede evaluar los cambios.

Las características del sensor son:

- Alimentación: 12 - 24 Vdc.
- Temperatura de Trabajo: -25 a 55 °C
- Distancia Nominal de Sensamiento  $S_n$  0.6 a 0.8 m
- Corriente de consumo 35 mA
- Señal de control tipo PNP, según Figura. 4. 6.
- Fuente de luz visible

Este tipo de sensores debe ser usado en ambientes estrictamente secos, ya que líquido en la superficie puede hacer que el sensor dispare en falso. Considerando que el reciclaje de LFC's no deben existir agentes externos como fluidos, ya que el material en proceso contiene un agente tóxico (mercurio) que en conjunto con algún líquido puede reaccionar y la filosofía de reciclaje se desaprovecha.

Para la activación del motor M1 será a través de la configuración estrella - triangulo. Esta conexión se fundamenta debido a que un motor trifásico, en el momento del arranque, consume entre 4 y 9 veces la intensidad nominal. Estos picos de corriente, aunque no perjudican el motor, pueden ocasionar trastornos en los demás aparatos, además de grandes caídas de tensión en el sistema eléctrico.

Este método de arranque se puede aplicar tanto a motores de rotor devanado como a motores de rotor en jaula de ardilla, la única condición que debe cumplir el motor para que pueda aplicarse este método de arranque es que tenga acceso completo a los devanados del estator (6 bornes de conexión).

El principio consiste en arrancar el motor acoplando los devanados en estrella a la tensión de la red, lo que equivale a dividir la tensión nominal del motor en estrella por  $\sqrt{3}$ . La punta de corriente durante el arranque se divide por 3.



La velocidad del motor se estabiliza cuando se equilibran el par del motor y el par resistente, normalmente entre el 75 y 85% de la velocidad nominal. En ese momento, los devanados se acoplan en triángulo y el motor opera según sus características. Mediante un temporizador se controla el tiempo de transición del acoplamiento en estrella al acoplamiento en triángulo, entre 1 y 2 seg.

La técnica de control utilizada en esta etapa es del tipo On-Off ya que su elemento final de control (Motor 1) conmuta entre dos posiciones fijas, encendido o apagado; dependiendo de la señal que proporciona el sensor de presencia, este se activará o desactivará. En esta etapa el controlador recibirá dos señales de entrada discreta correspondiente al sensor de presencia e interruptor rotativo de activación del sistema, y tres salidas discretas tipo relé que activarán los contactores para manejar potencia indirectamente en el Motor 1.

**Separación de Polvo Fluorescente.-** Una vez que el material es triturado pasa a la siguiente etapa que consiste en separar el polvo del resto de residuos triturados, esto se lo realizada a través de un movimiento mecánico - vibratorio a través del Motor 2 correspondiente al vibrador electromagnético, como se muestra en la Figura. 10.

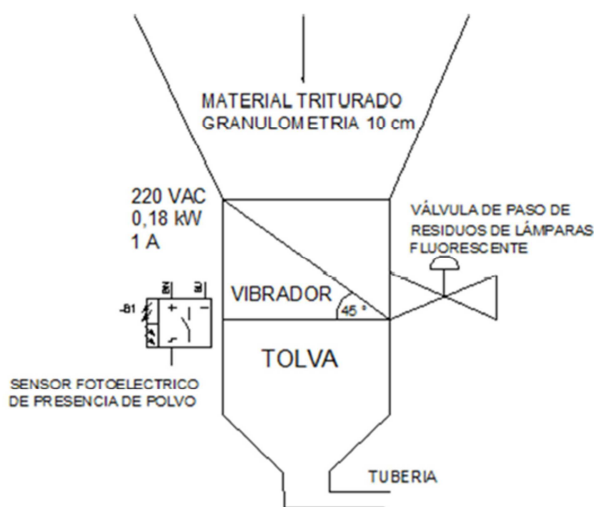


Figura. 10. Sensor y Actuador para Etapa Separación Polvo

El vibrador (Motor 2) será activado cuando la señal del sensor de lámparas fluorescentes ubicado en la etapa de Trituración, esté desactivado luego de un tiempo de 2 min, asumiendo que ya no existe material (lámparas fluorescentes) de carga a la entrada del sistema.

En esta etapa se debe sensar la caída de polvo hacia la tolva, esto con la finalidad de determinar si los residuos aún

contienen polvo, es decir, mientras siga cayendo polvo el Vibrador (Motor 2) debe estar en funcionamiento, caso contrario se debe desactivar esta etapa del reciclaje.

El polvo recolectado pasa inmediatamente a la etapa de extracción, para dirigirlo al depósito correspondiente y de esta manera evitar las continuas emanaciones del mercurio a la atmósfera.

El sensor de polvo será del tipo fotoeléctrico con las siguientes características:

- Alimentación: 12 – 30 Vdc.
- Corriente de consumo 35 mA.
- Señal de control tipo PNP.
- Fuente de luz infrarroja.

La activación del vibrador electromagnético (Motor 2) será: Después de la etapa de trituración.

La desactivación del vibrador electromagnético (Motor 2) será: Cuando el sensor fotoeléctrico no detecte la presencia de polvo descendiendo del tamiz de vibración.

Por las características eléctricas del vibrador Electromagnético (Motor 2 – Potencia Baja), se considera un arranque directo conmutado por relé electromecánico, garantizando el aislamiento de circuito de control con el circuito de potencia, protegiendo a los equipos de corrientes residuales.

En esta etapa el controlador recibirá una señal de entrada discreta correspondiente al sensor de presencia en el vibrador electromagnético y una salida discretas tipo relé que activará al vibrador electromagnético.

**Extracción de Polvo Fluorescente.-** Una vez que el polvo descende del tamiz, esta etapa consiste en extraer el polvo con la finalidad de llevar el polvo a un depósito seguro hasta que el polvo sea entregado al respectivo sistema de retorta.

En la Figura.11 se representa la etapa de extracción con los diferentes elementos que permiten realizar la automatización de esta etapa, como son: sistema de aire comprimido, sensor fotoeléctrico, válvula tipo mariposa y ventilador centrífugo.

La activación de la etapa se lo hace a través del ventilador centrífugo y la inyección de aire. El principio de funcionamiento se basa en crear una succión por medio de la cual el polvo empieza a desplazarse a través de toda la tubería hacia el depósito final.

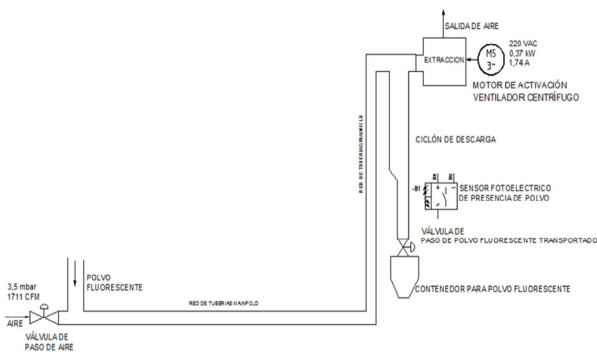


Figura. 11. Sensor y Actuador para Etapa Extracción Polvo

La instrumentación requerida en esta etapa se detalla a continuación:

- Sensor de Presencia Fotoeléctrico
- Electroválvula para paso de aire, cuya activación será a través de un relé electromecánico.
- Válvula tipo mariposa que su funcionamiento se basa en la apertura o cierre para interrumpir el flujo de un sólido en un conducto mediante una placa, denominada “mariposa”, que gira sobre un eje. Las válvulas mariposas son las más utilizadas para tolvas, silos y/o básculas que contengan material en polvo. El accionamiento de la válvula será eléctrico.

Para la activación del ventilador centrífugo se considera un arranque directo conmutado por relé electromecánico.

Una vez que el polvo es recogido en su respectivo depósito, es importante tener datos acerca del pesaje del mismo; con la finalidad de evitar que cuando el depósito se encuentre totalmente lleno poder descargar el polvo a la respectiva recicladora, y de esta manera tener datos históricos acerca de los pesajes de polvo que se han entregado a las recicladoras.

Para la selección adecuada del depósito de polvo se debe tomar en consideración lo siguiente:

- Capacidad en volumen del depósito
- Peso neto del depósito
- Peso neto del producto que se va almacenar en el depósito

A partir de esta información se puede dimensionar el sensor de peso adecuado para el depósito. Estos sensores son denominados celdas de carga que transforman las variaciones del peso en una señal analógica de voltaje, en el orden de los miliamperios. Estos sensores basan su funcionamiento en el

efecto piezoresistivo de una galga extensiométrica. Las galgas se utilizan en puentes de Wheastone; que al recibir el peso: las galgas tienden a deformarse, la resistencia varía y por ende el voltaje varía.

Para la correcta selección de las celdas de carga se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Rangos de Trabajo (Capacidad)
- Diseños Mecánicos
- Características Eléctricas

Para determinar el rango de trabajo de la celda de carga se dimensionará bajo los siguientes parámetros: masa del polvo fluorescente y masa de la estructura mecánica. El diseño mecánico de la celda de carga debe ser seleccionado de acuerdo a la ubicación del mismo sobre el depósito. Las características eléctricas aplicadas a la celda de carga deben ser seleccionadas a tensiones disponibles, voltaje más común 24 VDC.

Una característica importante de las celdas de carga es la sensibilidad expresado en mV/V. Los valores nominales de sensibilidad son 0.5, 1 y 2 mV/V. Estos valores indican el voltaje a fondo de escala, es decir; si la celda de carga se alimenta con una tensión de 24 VDC, capacidad de 50 Kg y sensibilidad de 2mV/V; cuando la celda sense el peso máximo de 50 Kg la deformación producirá una tensión de 48 mV.

Una vez obtenida la señal de deformación en mV se debe acondicionar la señal para poder procesarla en un autómata programable a su vez en una interfaz gráfica. Con el acondicionamiento de la señal se debe conseguir señales de 0 – 10 V al ser voltajes nominales de entrada a los autómatas programables.

En esta etapa el controlador recibirá una señal de entrada discreta correspondiente al sensor de presencia ubicado en la Etapa de Separación, cuando esta señal se activa se debe poner en marcha al ventilador centrífugo en conjunto con la apertura de la electroválvula que permitirá el ingreso del aire comprimido. Cuando la señal del sensor de presencia ubicado en el ciclón de descarga se active se debe abrir la válvula de paso tipo mariposa para que el polvo pueda ser almacenado en su respectivo depósito. La señal receptada por la celda de carga bloqueará el proceso de reciclaje mediante una alarma visualizada en la interfaz HMI.

**Separación Vidrio / Metal.-** La etapa de Separación Vidrio/Metal es el proceso final del reciclaje de LFC's como se muestra en la Figura. 12.



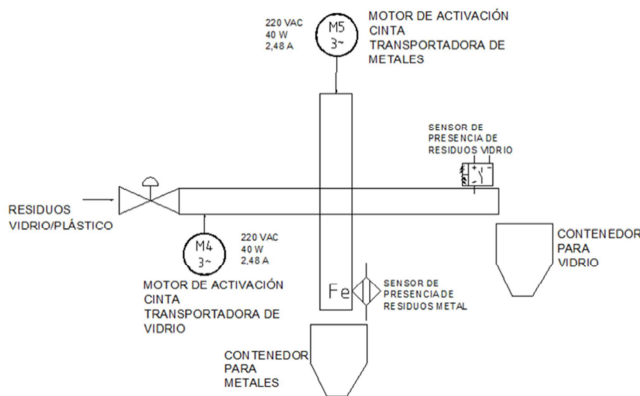


Figura. 12. Sensor y Actuador para Etapa Separación Vidrio / Metal

La instrumentación necesaria en esta etapa se detalla a continuación:

- Sensor fotoeléctrico para la detección de vidrio
- Sensor inductivo será utiliza para detectar la presencia de metales
- Válvula Mariposa de características similares empleada en la Etapa de Extracción de Polvo.

Para la activación de los motores de las respectivas bandas transportadoras se empleará contactores.

En esta etapa el controlador recibirá una señal de entrada discreta correspondiente a los sensores de presencia ubicados en la Etapa de Separación y Extracción de Polvo, cuando esta señal se desactive se debe abrir la válvula mariposa y poner en marcha a los motores correspondientes a cada banda transportadora. Para la desactivación de esta etapa se debe considerar los estados de los sensores: fotoeléctrico e inductivos localizados al final del tramo de cada banda. Cuando los estados de estos sensores se desactiven, después de haber detectado material; corresponde a que ya no existe material sobre las bandas. Por lo tanto la Etapa de Separación Vidrio/Metal ha concluido su proceso, y por ende el proceso de Reciclaje de LFC's también.

## VI. SISTEMA DE CONTROL PARA EL RECICLAJE DE LFC'S

El control automático de un proceso permite controlar las activaciones de cada una de las etapas que intervienen en el Sistema de Reciclaje de LFC's.

Dentro de las alternativas de automatización se tienen: automatización con relés, sistemas basados en  $\mu P$  y  $\mu C$ ,

adquisición de datos basados en PC y mediante controladores lógicos programables. La selección adecuada de una alternativa de automatización siempre se enfocará en los siguientes aspectos: Costos, Confiabilidad, Monitoreo en Tiempo Real, Conexión, Vida útil, etc.

Las activaciones de las etapas del proceso de Reciclaje de LFC's son realizadas mediante el uso de Controladores Lógicos Programables (PLC), los cuales permiten de una manera sencilla administrar los procesos existentes y su control. Existen tres opciones disponibles para poder realizar la programación del autómatas que son a través de: lista de instrucciones, ladder o lenguaje de contacto y lenguaje SFC.

Para la correcta selección del controlador se debe definir entradas y salidas adecuadas dentro de todo el proceso.

Una de las características de selección del Controlador se basa en el software de programación gratuito, por lo tanto la programación se la realizó a través del software Twido Suite V2.31.04 de Schneider Electric, siendo una herramienta muy sencilla y gratuita que permite monitorear el programa en ejecución, simular la programación y fundamentalmente la configuración, programación y depuración de la gama de controladores programables Twido.

Twido Suite, Figura. 13, es un programa basado en Windows de 32 ó 64 bits para un ordenador personal (PC) que se ejecuta en los sistemas operativos Microsoft Windows 2000, XP Professional y Windows 7; previamente probados. Se puede descargar desde la página del ISEFONLINE, a través de la siguiente dirección: [www.isefonline.com](http://www.isefonline.com). Para la activación del software únicamente se debe registrar el producto de manera gratuita, cuando se abre por primera vez el software. Si no se registra, solo se dispone de un periodo de prueba de 30 días para el funcionamiento del software. Para poder seguir utilizando este software después de que caduque el período de prueba, se debe registrar el producto.



Figura. 13. Plataforma Twido Suite



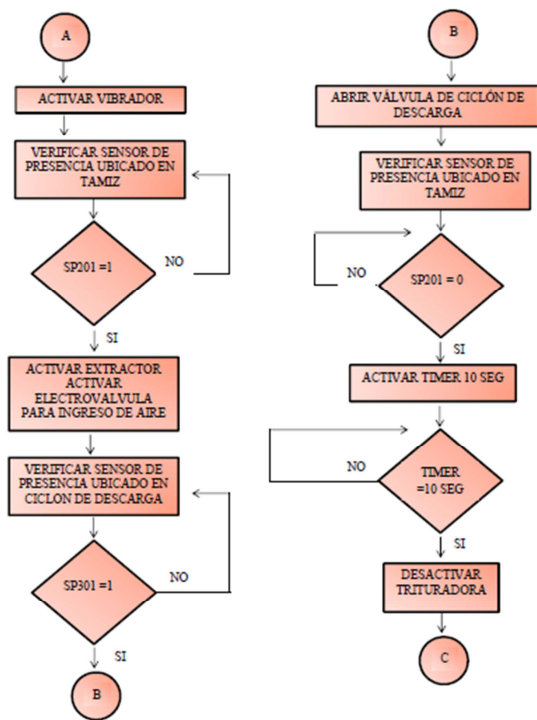


Figura. 17. Diagrama de Flujo. Modo Automático 2 de 3

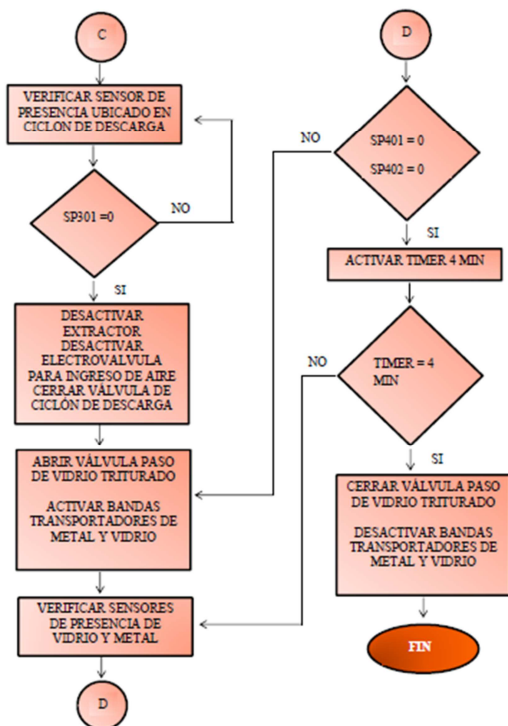


Figura. 18. Diagrama de Flujo. Modo Automático 3 de 3

La simulación gráfica del proceso de Reciclaje de LFC's se desarrolla a través del HMI/SCADA (Human Machine Interface / Supervisory Control and Data Acquisition) de Vijeo Citect 7.20 de la firma Schneider, ideal para la supervisión y el control de cualquier aplicación industrial.

Vijeo Citect es considerado un software de alto nivel, complejidad media, arquitectura flexible y escalable que a medida que se cambie o aumente la instrumentación o procesos no presenta inconvenientes.

La elección de este software se fundamente en la compatibilidad del PLC, ya que los dos pertenecen al mismo fabricante, Schneider Electric, facilitando la comunicación de la interfaz del proceso sin la necesidad de equipos intermedios como el OPC (OLE for Process Control), estándar que se utiliza para leer/escribir cualquier variable de PLC's de diferentes fabricantes.

El entorno de configuración de Vijeo Citect está formado por tres programas independientes, siendo: Explorador de Citect, Editor de Proyectos de Citect y Editor Gráfico de Citect; como se muestra en la Figura. 19.

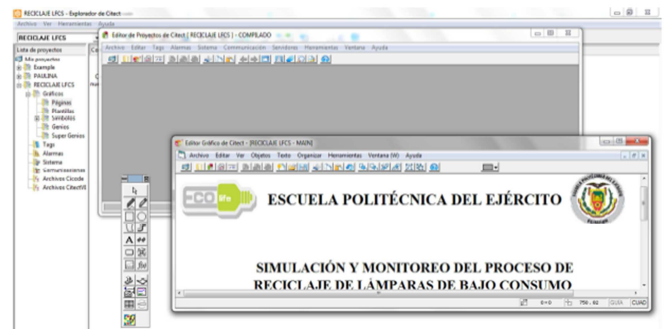


Figura. 19. Entorno de Configuración de Vijeo Citect

Las pantallas gráficas son principales para la simulación del Proceso de Reciclaje de LFC's, este diseño se basa en la interacción del operario y el PC en un sistema SCADA mediante el cual se pueda tener adquisición y supervisión de datos relevantes en el Proceso de Reciclaje de LFC's.

Según la Figura. 20 cuando el sistema se encuentre desactivado, no se tiene acceso a la activación del Modo del Sistema, Etapas del Reciclaje y Emergencia. Para la activación del sistema se tiene acceso restringido, solo personal autorizado podrá activar el sistema a través de usuario y contraseña. En la parte derecha - inferior de la Figura. 20 se tiene una prototipo del Sistema de Reciclaje de LFC's.



Figura. 20. Pantalla Simulación

Una vez que el usuario ha tenido acceso al botón ON, se activarán los botones correspondientes a: Modo del Sistema; por default el botón Manual se activará. El proceso de reciclaje empezará a funcionar en cualquier modo siempre que se ingrese la cantidad de lámparas a procesar presionando el botón Ingresar Valor. El sistema está limitado a procesar hasta 1000 lámparas. Si se ingresa una cantidad mayor a 1000, el sistema no admite y mantendrá la cantidad de lámparas en cero, por lo tanto no se podrá iniciar el reciclaje de las lámparas.

Si se selecciona modo Manual, esta opción permite ir activando cada una de las etapas, por ejemplo, si se ingresa una cantidad establecida de lámparas a procesar el único botón que se activará será el ON de la etapa de trituración, no se podrá activar las etapas de extracción y separación vidrio/metal hasta que la etapa de trituración finalice. Al finalizar la etapa de trituración, se podrá activar la etapa de Separación Polvo, la Etapa de Extracción se activará automáticamente una vez finalizada la Etapa Separación Polvo. Finalmente concluida estas etapas se podrá activar la etapa final del reciclaje, Separación Vidrio/Metal, finalizada esta etapa se concluirá con el reciclaje de las lámparas.

Si el operario selecciona un Modo Automático, siempre y cuando ninguna etapa se encuentre en funcionamiento a través del Modo Manual, basta con seleccionar la cantidad de lámparas a procesar, respetando cantidades admisibles, para que el Modo Automático entre en funcionamiento.

La única forma de detener cualquier etapa del reciclaje, es a través del Botón Emergencia, en caso de avería de cualquier etapa del reciclaje.

El funcionamiento del reciclaje se puede monitorear gráficamente, como se muestra en la Figura. 21. En esta pantalla el operario puede visualizar las cantidades almacenadas de: polvo, metales y vidrio; señales tomadas a través de los sensores de carga ubicados en el respectivo contenedor de cada residuo. Adicionalmente en esta pantalla se podrá visualizar el estado y modo de funcionamiento del sistema.

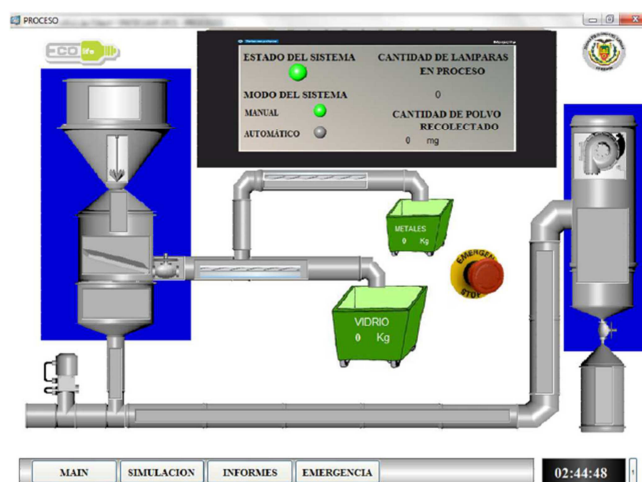


Figura. 21. Pantalla de Monitoreo

Cuando el contenedor del polvo se encuentre lleno, en la Pantalla Monitoreo se mostrará una alerta de emergencia. El Botón Vaciar se activa para que el operario calificado pueda vaciar el contenedor gráficamente, siempre y cuando el contenedor haya sido vaciado físicamente. Para esta operación de vaciado se ha activado un usuario y contraseña.

Si el operador presiona el botón Emergencia, se mostrará la siguiente pantalla (Figura. 22), todo el proceso de reciclaje se detendrá hasta que la emergencia generada se solucione; el operador podrá quitar la Emergencia a través de un usuario y contraseña, presionando el botón Desactivar Emergencia.



Figura. 22. Pantalla Emergente del Proceso de Reciclaje

## VIII. FACTIBILIDAD ECONÓMICA

En nuestro entorno, Ecuador, existen varios factores que de cierta manera pueden influir negativamente para la Implementación de este tipo de Reciclaje. Estos factores se detallan a continuación:

- En el Ecuador no está creada una cultura de reciclaje total de las lámparas, debido a la falta de recursos y la intención de pagar para que las lámparas sea recicladas.
- En caso que el Gobierno decreta la disposición para el reciclaje total de las lámparas, no existe la infraestructura adecuada para la implementación de la misma.
- Empresas privadas se encuentran limitadas para la inversión de este proyecto, ya que no se facilita el retorno de la inversión.

Este proyecto no se lo debe visualizar desde un enfoque económicamente rentable, sino desde un enfoque netamente ambiental; por lo tanto el apoyo para la Implementación del Proyecto debe ser estatal.

Los costos para la continua operación de la Planta debe basarse en el Principio de “El que contamina, paga”; por lo tanto el Estado puede generar un impuesto al reciclaje a toda lámpara con mercurio que se importe. Este impuesto cubrirán los costos de instalación y operación de la Planta. Los valores recolectados de los impuestos, no deben ser vistos como utilidad, al contrario, estos fondos servirán adicionalmente para la inversión en la concientización de la población ecuatoriana a través de campañas de apoyo al reciclaje.

Se considera que la entidad adecuada para iniciar la ejecución de este proyecto podría ser la Escuela Politécnica del Ejército ESPE, ya que es una entidad que evitará distorsiones de carácter político, considerando que el proyecto es de carácter netamente ambiental y no debe estar influenciado por elementos diferentes a la Salud Pública y Ambiental. La ESPE no tiene dentro de sus funciones institucionales Operar un Proceso de Reciclaje de LFC's, sin embargo, puede emprender este proyecto bajo la filosofía BOT (Comprar, Operar y Transferir). Al ser la ESPE una entidad pública, el crédito para la inversión de la planta puede ser factible y respaldado por el Estado Ecuatoriano. El Estado puede decidir si la ESPE continúa con la operación de la Planta o a su vez poder transferir la producción de la planta a un tercero privado.

Con todo lo expuesto anteriormente, el Ecuador podría aportar en la disminución de la contaminación ambiental, por lo que no se debería dejar a un lado la posibilidad de Implementar una Planta de Reciclaje en nuestro país.

## IX. CONCLUSIONES

- El Diseño y Simulación de una Planta de Reciclaje de LFC's desarrollado en este artículo investigativo, debe ser considerado como un modelo para que en una futura implementación pueda tomarse como base para el desarrollo del mismo; considerando que este proyecto debe ser perfeccionado y apoyado por varias ramas de la ciencia como son: química, mecánica y finalmente la electrónica.
- La implementación de un sistema de control automático en este tipo de procesos es esencial ya que se procesa componentes tóxicos, como el mercurio, considerando que una lámpara que contiene 5 mg de gas mercurio puede contaminar alrededor de 30000 litros de agua; por lo tanto debe ser tratado minuciosamente para conseguir material reciclable en los siguientes porcentajes: 94 % vidrio, 5% metales y 1% polvo fluorescente con gas mercurio.
- Si bien es cierto, la temática del reciclaje es conseguir productos totalmente reciclables; en la propuesta presentada no se considera la etapa para la extracción mercurio líquido, ya que el proceso para la recuperación de mercurio debe ser analizado y proceso a través de técnicas de destilación mediante retortas cuyo tratamiento es desarrollado por personal de ingeniería química; siendo este campo no objeto de estudio.
- La negatividad para la implementación de un sistema de reciclaje no debe ser una traba para que el Ecuador apoye en la disminución de la contaminación ambiental, por lo que el Estado en conjunto con la concientización de las personas podrá implementar este tipo de procesos y de una manera positiva aportar al medio ambiente.

## X. RECOMENDACIONES

- Se recomienda a toda la población ecuatoriana crear una cultura de reciclaje y no verlo como una moda de temporada, estar conscientes que estas mejoras influyen directamente al cuidado del medio ambiente.
- Se recomienda a todos los estudiantes de ingenierías: química, mecánica y electrónica analizar esta



alternativa de implementación de una Planta de Reciclaje de LFC's en el Ecuador.

- Este proyecto debe ser emprendido por el Estado Ecuatoriano, por lo que se recomienda que el Ministerio del Medio Ambiente tome en consideración la puesta en marcha de este proyecto.

## XI. REFERENCIAS

- [1] [http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/404/3/Capitulo1\\_Analisis\\_de\\_demanda\\_del\\_sistema\\_electrico\\_de\\_Empresa\\_Electrica\\_Azogues\\_por\\_uso\\_de\\_LF\\_Cs.pdf](http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/404/3/Capitulo1_Analisis_de_demanda_del_sistema_electrico_de_Empresa_Electrica_Azogues_por_uso_de_LF_Cs.pdf)
- [2] [http://es.wikipedia.org/wiki/Luminaria\\_fluorescente](http://es.wikipedia.org/wiki/Luminaria_fluorescente)
- [3] [http://oni.escuelas.edu.ar/2011/SAN\\_JUAN/1686/Reciclado%20de%20L%C3%A1mparas.html](http://oni.escuelas.edu.ar/2011/SAN_JUAN/1686/Reciclado%20de%20L%C3%A1mparas.html)
- [4] <http://taninos.tripod.com/molinosmartillo.htm>
- [5] [http://www.chyimeang.com/Spanish/Eseries\\_inc\\_sp.html](http://www.chyimeang.com/Spanish/Eseries_inc_sp.html)
- [6] <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/curso/desecho2/desecho-08.htm>
- [7] <http://www.ar.all.biz/cinta-transportadora-g9092>
- [8] BALCAN, Electric Machine Assembly from 'flatpack' shipping
- [9] Schneider Electric, **Manual Twido Suite**, páginas. 131
- [10] Schneider Electric, Quickstart Tutorial V7.20 Vijeo Citect, páginas. 114