



Reciclaje de tereftalato de polietileno

Polyethylene terephthalate recycling

Reciclagem de politereftalato de tereftalato de etileno

Anahí Vanesa Ramírez Antezana

vanesa.ramirez.antezana.backup@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-2496-3779>

Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre - Bolivia

Artículo recibido el 12 de agosto 2021, / Aceptado el 22 de octubre 2021 / Publicado el 15 de marzo 2022

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue proponer una solución óptima de reciclaje de tereftalato de polietileno para una planta transformadora en Sucre, Bolivia. Para cumplir lo propuesto, el estudio se presentó en tres etapas: descripción del proceso general de transformación con base en aportes teóricos y prácticos; descripción del proceso de transformación con base en la experimentación en una planta transformadora de Buenos Aires, Argentina; se aplicó la metodología de Muther para diseñar la alternativa de distribución de la planta. Como resultado se identificaron dos (2) hallazgos importantes: existe alta variación entre los balances de materiales extraídos del estado del arte y los obtenidos en la etapa experimental y, finalmente, la calidad del producto final depende del control en cada etapa de la separación de residuos de metales, polipropileno y polietileno de baja densidad. La propuesta presentada favoreció la eficiencia en el proceso, reduciendo la cantidad de horas trabajadas y elevando la calidad del producto terminado.

Palabras clave: Reciclaje; Hojuelas; Botellas; Química; Eficiencia; Control

ABSTRACT

The objective of this research was to propose an optimal polyethylene terephthalate recycling solution for a processing plant in Sucre, Bolivia. To accomplish what was proposed, the study was presented in three stages: description of the general transformation process based on theoretical and practical contributions; description of the transformation process based on experimentation in a transformer plant in Buenos Aires, Argentina; application of Muther's methodology to design the alternative distribution of the plant. As a result, two important findings were identified: [1] there is high variation between the balances of materials extracted from the state of the art and those obtained in the experimental stage; [2] the quality of the final product depends on the control at each stage of the separation of waste metals, polypropylene, and low-density polyethylene. The proposal presented favors efficiency in the process, reducing the number of hours worked and raising the quality of the finished product.

Key words: Recycling; Leaflets; Bottles; Chemistry; Efficiency; Control

RESUMO

O objetivo desta investigação é propor uma solução óptima de reciclagem de tereftalato de polietileno para uma fábrica de processamento em sucre, Bolívia. Para alcançar a solução proposta, o estudo é apresentado em três fases: descrição do processo geral de transformação baseado em contribuições teóricas e práticas; descrição do processo de transformação baseado na experimentação numa fábrica de processamento em Buenos Aires, Argentina; aplicação da metodologia de Muther para conceber a alternativa de layout da fábrica. Como resultado, foram identificadas duas (2) descobertas importantes: existe uma grande variação entre os equilíbrios de materiais extraídos do estado da arte e os obtidos na fase experimental e, finalmente, a qualidade do produto final depende do controle em cada fase da separação do metal, polipropileno e resíduos de polietileno de baixa densidade. A proposta apresentada favorece a eficiência no processo, reduzindo o número de horas trabalhadas e aumentando a qualidade do produto acabado.

Palavras-chave: Reciclagem; Reciclagem; Flakes; Garrafas; Química; Eficiência; Controle

INTRODUCCIÓN

El PET (abreviación en inglés de tereftalato de polietileno) es un material altamente contaminante usado como recipiente de bebidas, aceites, cosméticos, detergentes, productos químicos (Navarro et al., 2008; Krebs et al., 2004). Actualmente, es usado altamente en la industria tecnológica, farmacéutica, alimenticia y de productos de limpieza entre otras (Arnaiz, 2016). Adicionalmente, este tipo de plástico se usa en la industria textil para la elaboración de fibras (Bazán y Serrano, 2021). Es un material 100%. En el mundo se producen millones de toneladas anuales, de las cuales se recicla solamente el 30% (Buitrago et al., 2017), mientras que el porcentaje restante se quema generando cantidades significativas de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, o se dispersa en vertederos o basurales en las diferentes poblaciones del mundo (Meza y Pérez, 2015).

Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol (Morales, 2010). Perteneció al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres (Suasnavas, 2017). El tiempo de degradación de este material es de 500 a 1.000 años (Forero y Guzmán, 2017; Suasnavas, 2017). En vista de las normativas nacionales y políticas internacionales relacionadas con la preservación del medio ambiente, muchas empresas en el mundo han optado por reciclar las botellas (Zambrano, 2013). El proceso de transformación de botellas PET a hojuelas PET implica que éstas sean picadas para el posterior tratamiento químico o físico (Suasnavas, 2017).

En el reciclaje PET sigue pasos como acopio y selección, granulado del plástico mediante procesos industriales y, finalmente, limpieza para eliminar componentes contaminantes, el resultado de este proceso es denominado pellet (Cayllahua, 2014).

En Bolivia existen varias empresas que se encargan de recolectar botellas PET para transformarlas en hojuelas y, posteriormente, venta a nivel nacional o a países como China, México, Argentina y Estados Unidos, entre otros (Mansilla-Pérez y Ruiz-Ruiz, 2009). En la ciudad de Sucre (capital del departamento de Chuquisaca) desde hace ya dos (2) décadas se atraviesa un problema de eliminación de desechos sólidos (Terán, 2021). En esta ciudad, la última evaluación municipal, existen 71.559,16 ton de residuos sólidos anuales de los cuales 3,75% en peso son material PET (2.683,47 ton), según datos recolectados en la empresa de aseo urbano EMAS del año 2011 (EMAS, 2014). La demanda del material desechado está incrementando también, por ello aumentaron las microempresas para su recolección. Actualmente, existen entre 15 a 20 empresas de recolección de botellas PET (Torres, 2014), pero sólo existe una de picado y compresión.

Las empresas de acopio de botellas PET de Sucre envían sus productos a las de picado de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz, que se encargan de picar y ofrecer el producto obtenido a otras encargadas de crear juguetes, sandalias y otros. También existen personas encargadas de comprimir el material en la ciudad de Sucre y separar en fardos para posteriormente re-vender a los países de

Chile y Perú (Torres, 2014). En este contexto, el objetivo de esta investigación es proponer una solución óptima de reciclaje de tereftalato de polietileno para una planta transformadora en Sucre, Bolivia. Para cumplir lo propuesto, el estudio se presenta en tres etapas: descripción del proceso general de transformación con base en aportes teóricos y prácticos; descripción del proceso de transformación con base en la experimentación; aplicación de la metodología de Muther para diseñar la alternativa de distribución de la planta.

METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolló bajo el paradigma positivista, con el propósito de determinar una solución óptima de reciclaje de tereftalato de polietileno para una planta transformadora en Sucre, Bolivia. Se desarrolló en tres etapas: la primera y la tercera fueron descriptivas; la segunda tuvo alcance aplicado. A continuación, se describe la metodología aplicada. La etapa 1 se enfoca en describir el proceso general de transformación de las botellas PET. Se cuenta con aportes teóricos (Ackerman, 1997; Rodríguez y Zeballos, 2007; Bazán y Serrano, 2021; Krebs et al., 2014; Sánchez et al., 2018) y prácticos (Macero, 2011; Bracamonte, 2010; Arnaiz, 2016; Cayllahua, 2014; Mansilla-Pérez y Ruiz-Ruiz, 2009; Meza y Pérez, 2015; Morales, 2010). Con base en el estado del arte, los resultados describen el proceso y los balances de materiales estimados, considerando que la producción inicia con 1.000 kg de botellas PET (materia prima).

En la etapa 2 se realizó la fase de experimentación, en una planta transformadora de botellas PET ubicada en Buenos Aires, Argentina. La capacidad de producción de esta planta es 1500 kg/h, las características generales de son: capacidad de potencia 125,2 kW, requerimiento de espacio 200 m², lavado químico, permitió obtener hojuelas de grado textil, film y botella. Para cumplir con el propósito de estudio, la experimentación se realizó en cuatro (4) lotes, cada proceso inicia con 1.000 kg de materia prima. Tras la macroseparación (manual), el primer balance de materia estuvo entre 807,20 y 832,32 kg; es decir, la cantidad de botellas que ingresaron al proceso tuvo una variabilidad 25,12 kg. El propósito de esta etapa fue contrastar los valores estimados con base teórica con los que se obtienen en una planta de transformación similar a la que se desea implementar, asimismo identificar cuellos de botella y problemas.

Con base en las etapas previas, en etapa 3 se aplicó la metodología de Muther para diseñar la alternativa óptima de distribución de la planta de transformación de botellas PET en Sucre, Bolivia. Considerando la normativa vigente en el país (Decreto Supremo N° 29272, 2007).

RESULTADOS

Los resultados de esta investigación se presentaron en tres etapas: descripción del proceso general de transformación con base en aportes teóricos y prácticos; descripción del proceso de transformación

con base en la experimentación; aplicación de la metodología de Muther para diseñar la alternativa de distribución de la planta.

Etapa 1: **Proceso general de transformación de envases PET a hojuelas PET**

Según la base teórica y empírica estudiada, el proceso general de transformación de envases PET a hojuelas PET implica los siguientes 11 pasos: [1] Recepción y preselección; [2] Almacenamiento; [3] Pesaje; [4] Macroseparación; [5] Molido; [6] Lavado; [7] Lavado horizontal (enjuague); [8] Microseparado; [9] Secado; [10] Empaquetado; [11] Almacenamiento de producto final. A continuación, se detalla el flujo del proceso.

Recepción y preselección. Una vez se recibe las pacas de los proveedores, se procede a separar las botellas por colores: azules, transparentes y verdes. También se aprovecha de quitar impurezas evidentes como piedras, metales, líquidos dentro de las botellas, aceites, grasas, etc.

Almacenamiento de envases PET. La materia prima pre-seleccionada que no será procesada inmediatamente debe ser almacenada.

Pesaje. Se transportan cantidades exactas a la parte de molido. El pesaje se hace por colores.

Macroseparación. Implica separación de las etiquetas, extracción de las tapas, impedir la entrada de maderas, piedras, u otras impurezas distinguibles a simple vista. Esta separación se realiza manualmente a medida que los envases PET pasan por una cinta transportadora hacia el molino, este proceso requiere entre 3 a 4 trabajadores.

Primer balance de materia. El pesaje esperado se realiza según parámetros: el 5,20% de un envase PET corresponde a la tapa y el anillo (polipropileno, PP), el 4.02% corresponde a la etiqueta (Polietileno de baja densidad, LPDE). Observando que este proceso es mecánico no existen pérdidas. Suponiendo como valor base 1.000 kg, el material utilizable después de la macroseparación es 907,80 kg.

$$m_T = m_{PET} + m_{PP} + m_{LPDE}$$

$$m_{PP} = 0.052 * m_T$$

$$m_{LPDE} = 0.0402 * m_T$$

$$m_{PET} = m_T - 0.052 * m_T - 0.0402 * m_T = 0.9078 m_T$$

$$m_{PET} = 0.9078 m_T$$

$$\mathbf{m_{PET} = 907.80 \text{ KG}}$$

Molido. Los envases son picados para convertirse en hojuelas por medio de un molino y así facilitar su lavado y secado. Según el estudio del arte, las hojuelas estándar deben estar entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ de pulgada (12,7 y 6,35 mm); mientras menor sea el tamaño será más difícil la limpieza, la identificación de las impurezas será más complicada. En el caso del proyecto se designa que las hojuelas deben tener una medida entre 8 a 12 mm, con un 10% de variación.

Segundo balance de materia. La bibliografía sugiere que en el molido de envases PET existe un 2% de pérdidas en forma de polvillo. Considerando este margen, de los 907,80 kg que resultaron del primer balance de materia, se obtienen 889,64 kg utilizables.

$$m_{PET} = m_{pol} + m_{HS}$$

$$m_{PET} = 0.02 * m_{PET} + m_{HS}$$

$$1 - 0.02 * m_{PET} = m_{HS}$$

$$1 - 0.02 * 907.80 = m_{HS}$$

$$889.64 \text{ kg} = m_{HS}$$

$$0.02 * 907.80 = m_{pol}$$

$$18.16 \text{ kg} = m_{pol}$$

Lavado y enjuague. Siguiendo criterios de calidad, normas de sanidad y de protección ambiental, se escogió soda caustica en baja concentración. La tecnología entonces es la denominada *super clean*, que combina el reciclaje mecánico y químico. Las hojuelas son cubiertas con soda cáustica y pasan a través de un tambor giratorio a una temperatura alta (90°C). El secado evita rotura de la cadena del polímero de PET que ocurre cuándo el material mojado se sujeta a temperaturas altas.

En este proceso el PET y la soda cáustica son calentados y sufren una reacción de fase-sólida en la que la superficie exterior son los gránulos de PET con impurezas, se producen glycol de etileno y ácido tereftalico como subproductos. La contaminación remanente es removida con la capa exterior de PET. Resulta una mezcla de la fase sólida de una sal y los gránulos de PET limpios, éstos son separados por una filtración mecánica. Finalmente, cualquier partícula metálica diminuta es removida por un separador de metal.

Tercer balance de materia. A considerar: la relación de hojuelas de PET a agua está en un rango entre 1/12 y hasta un 5% de pérdidas de agua; el valor de concentración NaOH de 0,5%; el material contaminante es aproximadamente un 0,3% del material seco introducido a esta operación; 2% de pérdida de material sólido como material fino; consumo de NaOH de 2% respecto de la cantidad inicial del 0,5%. Los cálculos se presentan a continuación:

$$m_{HS} + m_{sol} = m_{HL} + m_{Lav}$$

La relación implica que para 1 peso de hojuela se dispone 12 pesos de NaOH:

$$m_{sol} = 12 * m_{HS}$$

$$m_{sol} = 12 * 889.64 + m_{HS}$$

$$m_{sol} = 10675.68 \text{ kg}$$

El peso de la hojuela limpia se expresa:

$$m_{HL} = m_{HS} * 0.977 + m_{sol} * 0.02$$

$$m_{HL} = 889.64 * 0.977 + 10675.68 * 0.02$$

$$m_{HL} = 1082.62 \text{ kg}$$

El cálculo para el agua resultante y sus componentes se realizó así:

$$m_{Re} = m_{sol} * 1 - 0.02 + 0.02 * m_{HS} + 0.003 m_{HS}$$

$$m_{Re} = 10675.68 * 1 - 0.02 + 0.02 * 889.64 + 0.003 * 889.64$$

$$m_{Re} = 10482.63 \text{ kg}$$

El cálculo del peso del lodo es el siguiente:

$$m_{Lo} = 0.05 * m_{Re}$$

$$m_{Lo} = 0.05 * 10482.63$$

$$m_{Lo} = 524.13 \text{ Kg}$$

$$m_{Dis} = 0.95 * m_{Re}$$

$$m_{Dis} = 0.95 * 10482.63$$

$$m_{Dis} = 9958.50 \text{ Kg}$$

La cantidad de NaOH que debe aumentarse al agua reciclada es:

$$m_2 = m_{sol} - m_{Dis}$$

$$m_2 = 10675.68 - 9958.50$$

$$m_2 = 717.18$$

$$m_{NaOH} = 0.005 * m_2$$

$$m_{NaOH} = 0.005 * 717.18$$

$$m_{NaOH} = 3.59$$

$$m_{H2O} = 0.995 * m_2$$

$$m_{H2O} = 0.995 * 717.18$$

$$m_{H2O} = 713.59$$

Para el enjuague de las hojuelas también existe la relación de 12/1 de agua y PET. Igualmente se sabe que el PET retiene un 2% de agua en el proceso de lavado y enjuague (Montecinos, 2010).

$$m_{HL} = m_E = 1082.69 \text{ kg}$$

$$m_{RES} = 12 * 869.178$$

$$m_{RES} = 10430.14 \text{ kg}$$

Microseparación. Se realiza por medio de un sistema de flotación que está basado en la diferencia de densidades, que está relacionado con el peso, densidad y tamaño; consiste en emplear tinajas de burbujeo o vibratorias que se alimenten de las botellas molidas del proceso anterior mezcladas con otros materiales como los de las tapas y etiquetas de los envases y el PET, que tiene mayor densidad, cae al fondo de las tinajas y son transportadas mediante un rodillo sin fin al siguiente proceso. Los otros materiales que flotan en la superficie son retirados mediante paletas tipo limpia piscinas a Big Bags dispuestos cerca de las tinajas para ser vendidos a empresas encargadas de reciclar polipropileno y polietileno de baja densidad que son los materiales de las tapas y etiquetas de los envases PET. El balance de materia es el mismo que el de macroseparación.

Secado. Se quita la humedad para evitar concentraciones de moho, u otros hongos de la humedad. Se usan secadores de aire caliente.

Cuarto balance de materia. A considerar: según las características climáticas de la ciudad, se estima una humedad ambiente del 20% a una temperatura promedio de 20°C. Realizaron los siguientes cálculos:

De tablas de vapor se obtiene la presión de vapor de agua a $20^{\circ}\text{C}=293\text{ K}$ un valor de 17.54 mmHg .

$$\frac{P_V * V_{\text{air}} * M_{H_2O}}{R * T} = m_{H_2O1}$$

$$\frac{17.54 * 1000 * 18}{62.4 * 293} = m_{H_2O1}$$

$$m_{H_2O1} = 17.27\text{ g} = 0.01727\text{ kg}$$

Incluyendo la humedad del ambiente se tiene el siguiente cálculo:

$$\frac{P_V * \varphi * V_{\text{air}} * M_{H_2O}}{R * T} = m_{H_2O2}$$

$$\frac{17.54 * 0.2 * 1000 * 18}{62.4 * 293} = m_{H_2O2}$$

$$m_{H_2O2} = 3.46\text{ g} = 0.00346$$

Estos resultados indican que por cada metro cúbico de aire que ingrese al sistema de secado se puede extraer la siguiente masa de agua:

$$m_{H_2O1} - m_{H_2O2} = 17.27 - 3.46 = 13.81\text{ g} = 0.01381\text{ kg}$$

Conociendo la cantidad de agua a eliminar de la hojuela PET con una humedad del 2% gracias al proceso de lavado y enjuague se tiene:

$$m_F = 869.178\text{ kg}$$

$$m_{H_2O} = m_{HL} - m_F$$

$$m_{H_2O} = 1082.69 - 869.178$$

$$m_{H_2O} = 213.51\text{ kg}$$

Conociendo este dato se puede determinar cuántos kg de aire son necesarios por kg PET:

$$\frac{213.51\text{ kg}_{H_2O}}{869.178\text{ kg}_{PET}} \cdot \frac{1\text{ m}^3\text{ aire}}{0.01381\text{ kg}_{H_2O}} = 17.78\text{ m}^3\text{ kg}_{PET}$$

$$\frac{17.78\text{ m}^3\text{ aire}}{\text{kg}_{PET}} * \frac{1000\text{ l}_{\text{aire}}}{1\text{ m}^3\text{ aire}} * \frac{0.78\text{ g}}{1\text{ l}} = \frac{13869.22\text{ g}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{PET}} = 13.869\frac{\text{Kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{PET}}$$

$$m_H = m_F * 13.869\frac{\text{Kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{PET}}$$

$$m_H = 869.178 * 13.869\frac{\text{Kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{PET}}$$

$$m_H = 12054.83\text{ kg}_{\text{aire}}$$

$$m_A = m_H + m_{HL} - m_F$$

$$m_A = 12054.83 + 1089.69 - 869.178$$

$$m_A = 12267.65\text{ kg}$$

Empaquetado. Las hojuelas PET limpias de impureza pasan al llenado de *big bags*.

Almacenamiento de producto terminado. El área de almacenamiento debe estar cubierta de la intemperie y la humedad. Las *big bags* tardan varios días en llenarse por completo.

El producto final debe contener un grado de pureza de 0,1% a 0,2% (máximo de admisión de PVC), lo cual implica contar con un control de calidad estricto, realizando: granulometría, determinación de contaminantes u otros materiales y detector de humedad, estos estudios deberán ser realizado de forma aleatoria. Antes del ingreso de las hojuelas PET al empaquetador debe existir personal encargado de rebuscar entre las hojuelas e identificar impurezas, esto se puede realizar mediante una pantalla tipo lupa por donde pasan las hojuelas y así maximizar la capacidad de visión, también se puede implementar un detector e imán de metales auxiliar al de la máquina micro separadora.

Si bien el control calidad en el proceso de producción es permanente, los cuellos de botella se encuentran en: [1] Proceso de recepción y preselección; [2] Transporte de materia prima al molido; [3] Microseparación. Los factores de calidad a evaluar son: aspecto de los envases e impurezas visibles.

Balance de materia general. En la Figura 1 se muestra la síntesis del balance general de todo el proceso de producción.



Figura 1. Síntesis del balance general de todo el proceso de producción.

En la Figura 1 se observan las entradas y salidas del sistema; son tres productos resultantes del proceso: el PET, el polietileno y polietileno de baja densidad. La descripción expuesta fue contrastada con los resultados obtenidos tras la fase experimental, según se presenta a continuación.

Etapas 2: Proceso experimental de transformación de envases PET a hojuelas PET

El proceso experimental se desarrolla en una planta transformadora de envases

PET ubicada en la ciudad de Buenos Aires (Argentina). Las características generales de esta planta son: capacidad máxima 1000 kg/h, capacidad de potencia 125,2 kW, requerimiento de espacio 200 m², lavado químico, permite obtener hojuelas de grado textil, film y botella. En la Figura 2 se presenta el gráficamente la línea de reciclaje.

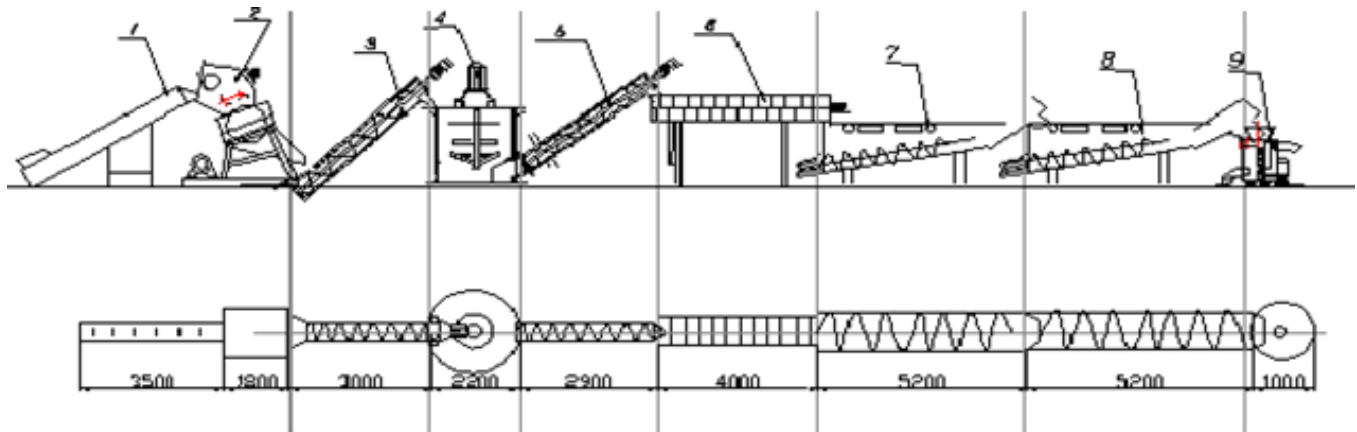


Figura 2. Lay out línea de reciclaje. Fuente: Rodríguez (2012).

A continuación, se detallan las características del proceso y de la tecnología empleada.

Transportadora de banda; permite transportar envases PET al proceso de molido y donde se efectúa la macroseparación.

Molino y lavador; molido de los envases y el lavado previo.

Tornillo sin fin; utilizado para enviar las hojuelas PET del molido y prelavado al lavado químico en caliente.

Tambor lavado químico en caliente; lavado de hojuelas PET y removido de pegamento de etiquetas y otras impurezas mediante químicos en agua caliente a una temperatura alrededor de 90 grados centígrados (el químico puede ser soda caustica). En el interior del tambor las hojuelas se agitan generando fricción para la pronta separación de impurezas. La ración de soda caustica es de 2 gramos por litro de agua.

Tornillo sin fin; utilizado para enviar las hojuelas PET lavadas al lavado horizontal.

Lavador horizontal; en esta parte las hojuelas son enjuagadas y mediante a la agitación a alta velocidad hace que las impurezas salten

hacia la malla de filtro.

Tornillo sin fin y filtro; Transporte de las hojuelas y proceso de microseparación mediante la rotación total de las hojuelas mientras el tornillo está en funcionamiento circula agua limpia, haciendo que las etiquetas y tapas floten a la superficie y la corriente retire los residuos de menor densidad hacia el filtro que contiene un imán para atraer los metales. Se requiere el empleo de 2 tornillos sin fin y filtro puesto que así mejora la limpieza de la hojuela.

Escudridor; secado y escurrido de hojuelas mediante rotación de alta velocidad y envío de la hojuela seca al secado final.

Sistema de secado y tolva de almacenamiento; utilizado para secar completamente las hojuelas PET mediante vapor de agua y empaquetarlas en big bags.

Cabina de control; se encuentran todos los controles para el manejo total de la línea de reciclaje.

En la Figura 2 se muestra el balance general experimental en la planta de reciclaje objeto de estudio. Nótese que en el primer

balance de materia se obtuvo una cantidad inferior a la esperada. Tras cuatro lotes de transformación que iniciaron con 1.000 kg de botellas PET, el balance de materia finalizada

la macroseparación estuvo entre 807,20 kg y 832,32 (siendo el promedio 819.76). En la Figura 3 se presenta el balance general de todo el proceso de producción.

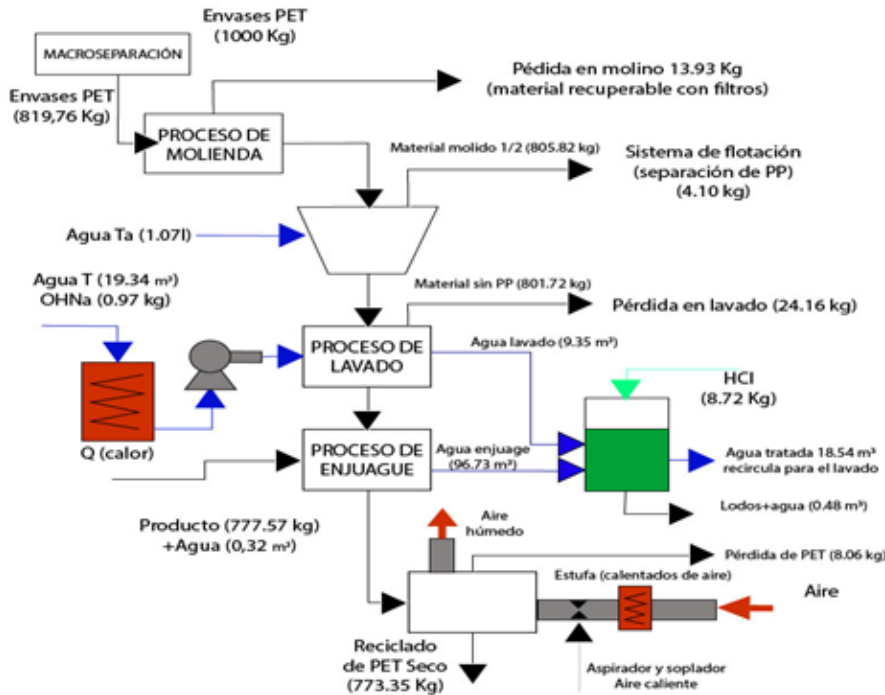


Figura 3. Balance general de todo el proceso de producción.

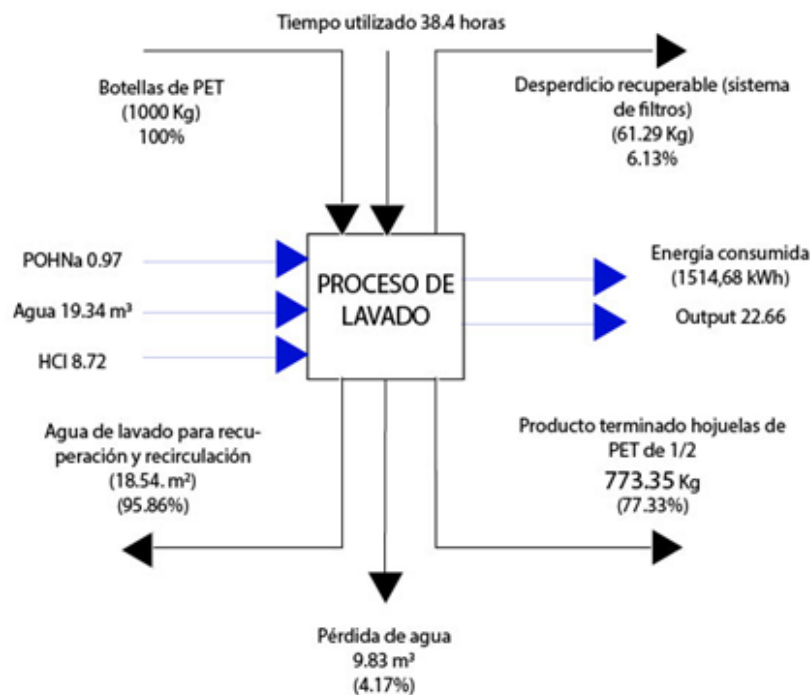


Figura 4. Síntesis balance experimental general del proceso.

En la fase experimental (figuras 3 y 4) se creó una relación diferente a la estimada en la primera etapa; para elaborar 773,35 kg de hojuela limpia y seca se requiere 819,76 kg de envases PET (considerando el primer balance de materia: posterior a la macroseparación) como es el caso en el proyecto en estudio en base a la capacidad nominal.

Observaciones al proceso: durante los cuatro lotes de producción se evidencia la existencia de fallas en la separación de residuos de metales, polipropileno, PP y polietileno de baja densidad LPDE. Esto implica un trabajo manual que es añadido en forma sistemática al final del proceso, implicando mano de obra y tiempo, restando eficiencia al proceso. Esta observación ha sido considerada en la etapa 3.

Habiendo aplicado el proceso y obtenido el balance experimental general del proceso, se propone el diseño de una planta transformadora de botellas PET en hojuelas de grado textil. film y botella.

Etapas 3: Diseño de planta de producción de hojuelas PET con base en la metodología de Muther

El diseño requirió de un análisis de la capacidad instalada, determinación de la distribución de la planta y la diagramación del recorrido. Según se detalla a continuación:

Capacidad instalada; en este proceso el factor que determina la capacidad instalada es la ubicación de los cuellos de botella: molido y lavado (capacidad 1.000 kg/h), puesto que los

otros procesos como el transporte, tornillos sin fin, las tinajas horizontales de enjuague y microseparación tiene una capacidad de producción superior a 1.500 kg/h.

Para el transporte de las *bigbags* al almacén de productos terminados y para el transporte de la materia prima preseleccionada a la transportadora de banda, se requieren dos (2) montacargas con capacidad de 550 kg, pero considerando la tecnología disponible se usarán montacargas de una (1) tonelada (capacidad mínima de estos vehículos). La máquina es de producción local, tiene una capacidad de carga de 1.800 kg, 500 mm de centro de carga, peso de servicio 2.890 kg, ángulo de inclinación 6/12 mm, altura de elevación 3.000 kg, 2.070 mm de altura de protección superior, longitud 2.274 mm, ancho 1.080 mm y 1.982 de radio de giro.

Las características de la afiladora requerida son: máxima longitud de afilado 800 mm; motor de la cabeza de afilado: 2 Hp, trifásico, 220/440 V, 3,400 rpm; motor del carro de afilado 0,25 Hp; motor de la bomba de enfriamiento 0,125 Hp; tamaño de la rueda de afilado Ø15 x 10 x 9 cm; mesa cambiable de 0 - 90°, con abrazaderas (clamps) para sujeción de cuchilla; dimensiones de la máquina 115 x 75 x 135 cm; peso total 290 kg.

Según lo antes expuesto, la línea de reciclaje elegida cuenta con las siguientes características: 1.000 kg/h de capacidad, 125,2 kW de potencia, 750 l/h de requerimiento de agua, 200 m² de espacio requerido, instalación en el lugar, capacitación para el uso, apta para lavado químico, provee hojuelas de grado de botella.

Distribución de la planta; se propone la distribución óptima de la planta, considerando que para el posicionamiento de la maquinaria se requieren 200 m² aproximadamente. Para analizar las alternativas de distribución se utilizó como base el método SLP (Sistematic Lay Out Planning). La distribución de la planta es lineal y por producto debido a que este tipo de distribución encaja mejor con el proceso continuo. El estudio fue realizado por secciones, esto implica el análisis de almacén

de materia prima, línea de reciclaje, sistema de secado y llenado en big bags, oficinas, comedor, baños y garaje. El sistema de secado y llenado en big bags fueron considerados por separado puesto que no es indispensable su disposición lineal.

Diagrama del recorrido; se parte considerando la capacidad instalada (1000 kg/h), para así dimensionar las distancias y el orden que se deben seguir en el proceso (ver Tabla 1).

Tabla 1. Rutas consideradas en el estudio de velocidades.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	DISTANCIA (m.)
1	Transporte de envases PET al molino y macroseparación	4
2	Molido de los envases PET	-
3	Transporte de las hojuelas al proceso de lavado	4
4	Lavado químico en caliente con soda caústica	-
5	Transporte al proceso de lavado	4,5
6	Lavado horizontal de las hojuelas PET	4,5
7	Microseparación y transporte al proceso de secado	9
8	Secado de hojuelas PET	-
9	Transporte al proceso de llenado en Big Bags	3
10	Llenado de hojuelas PET en Big Bags	-
11	Transporte al almacenamiento de producto terminado	5
12	Almacenamiento de producto terminado	-
TOTAL		34

Los datos registrados en la Tabla 1 fueron obtenidos con ayuda del cursograma analítico, donde describe las distancias del movimiento de materiales, a partir del transporte de las botellas PET del almacén al molino y culminando en el transporte al almacén de productos terminados. Siguiendo

con la metodología del SLP se presenta el estudio de relación de actividades y recorrido representado en un diagrama de relación de proximidades para poder determinar la zona de los servicios requeridos y quienes deben estar juntos. En la Figura 5 se presenta el diagrama propuesto por Muther.

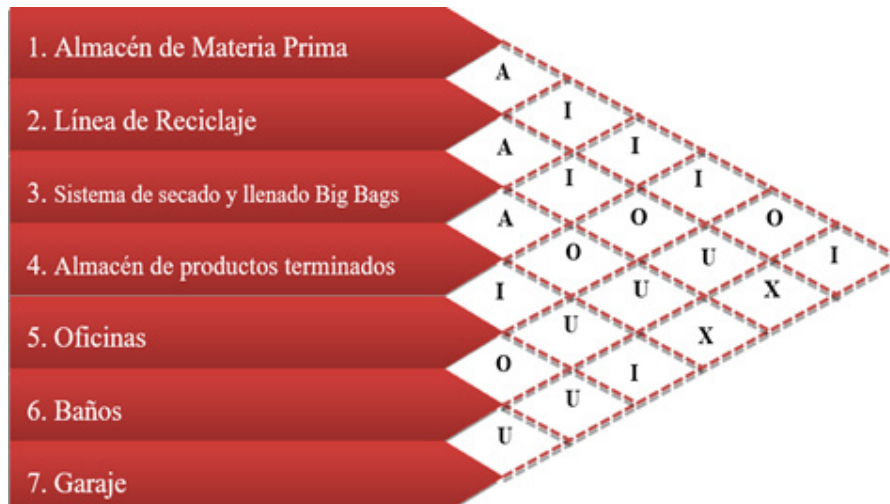


Figura 5. Diagrama de proximidad de actividades.

La Figura 5 asume la siguiente simbología de proximidad deseable: [A] absolutamente necesaria, [I] importante, [O] ordinaria, [U] no importante, [X] no deseable. La interpretación es la siguiente.

Proximidad absoluta: Almacén de materia prima (1) con línea de reciclaje (2); línea de reciclaje (2) con sistema de secado y llenado de big bags (3); sistema de secado y llenado de big bags (3) con almacén de producto terminado (4).

Proximidad importante: Almacén de materia prima (1) con sistema de secado y llenado en big bags (3); almacén de materia prima (1) con almacén de producto terminados (4); almacén de materia prima (1) con oficinas (5); almacén de materia prima (1) con garaje (7); línea de reciclaje (2) con almacén de productos terminados (4); almacén de producto terminado (4) con oficinas (5); almacén de producto terminado (4) con garaje (7).

Proximidad ordinaria: Almacén de materia prima (1) con baño (6); línea de reciclaje (2) con oficinas (5); sistema de secado y llenado de big bags (3) con oficinas (5); oficinas (5) con baño (6).

Proximidad sin importancia: Línea de reciclaje (2) con baño (6); sistema de secado y llenado de big bags (3) con baño (6); almacén de productos terminados (4) con baño (6); baño (6) con garaje (7); oficinas (5) con garaje (7).

Proximidad no deseable: Línea de reciclaje (2) con garaje (7); sistema de secado y llenado de big bags (3) con garaje (7).

En la Figura 6 se presenta el diagrama de hilos basado en la información obtenida en la Figura 5.

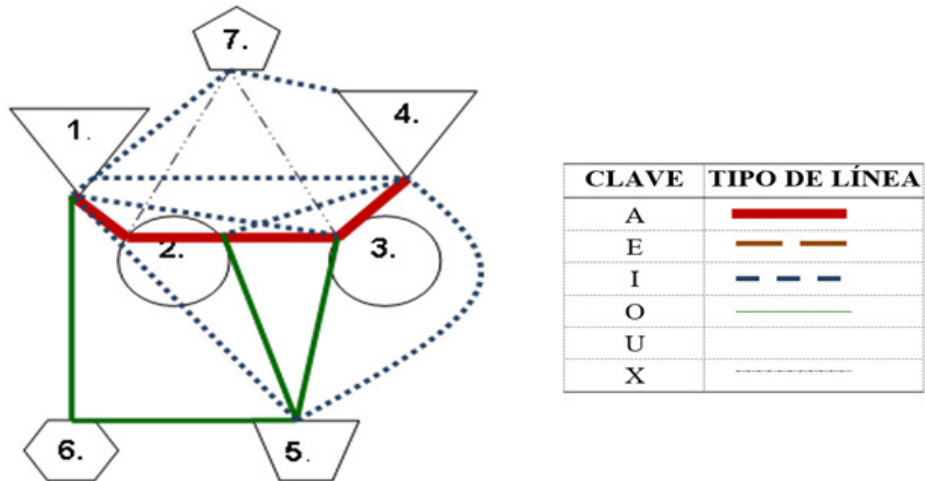


Figura 6. Diagrama de hilos.

En la Figura 6 se observa cuáles son las proximidades indispensables que debe tener la distribución (línea roja) entre los cuales se encuentran los sectores de almacén de materia prima, línea de reciclaje, sistema de secado y llenado en big bags y el almacén de productos terminados, estos deben estar conectados

entre sí en una proximidad absolutamente necesaria. Las proximidades no deseables son la línea de reciclaje, el sistema de secado y el llenado en Big Bags con el garaje. Con base en el análisis previo se presenta la alternativa óptima de disposición de planta (ver Figura 7).

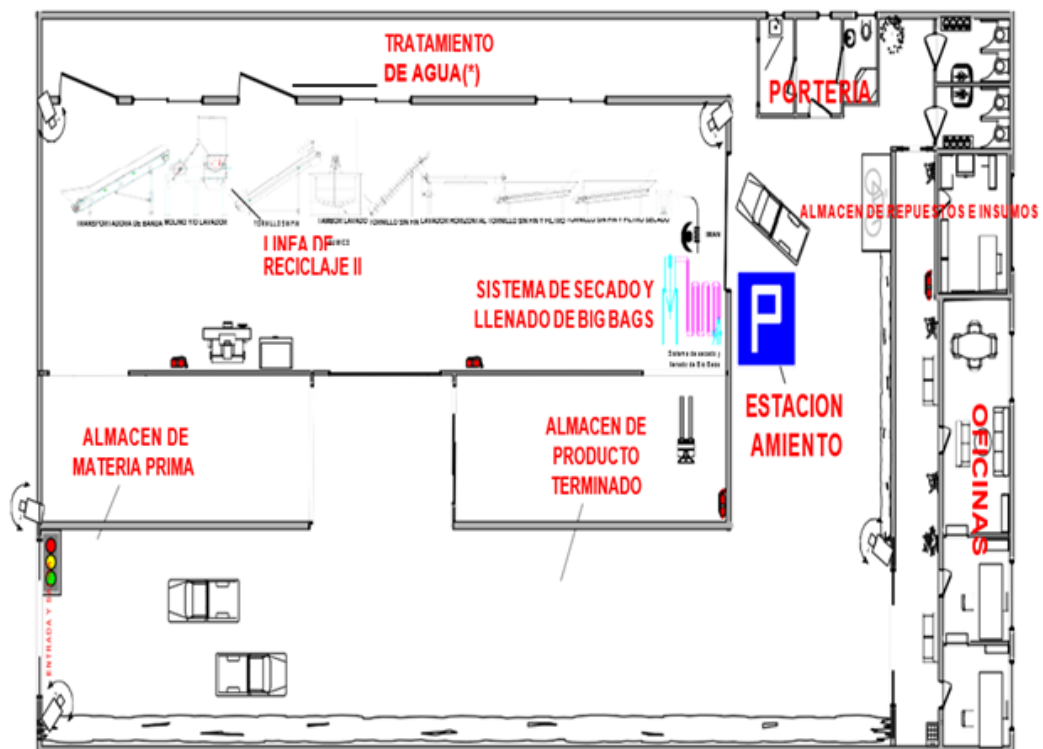


Figura 7. Plano alternativa óptima de disposición de la planta.

Se propuso que la línea de reciclaje y el sistema de secado y llenado en big bags tengan forma de L incrementando así un

equipo de control calidad entre el secador y el sistema de secado (Figura 8).

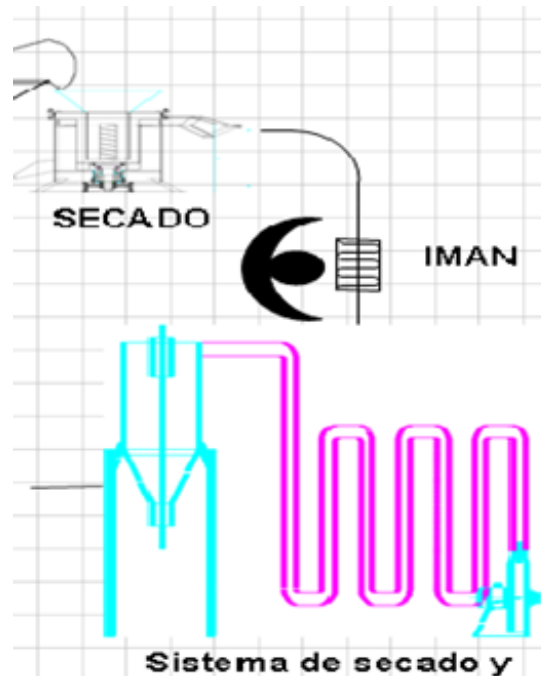


Figura 8. Tubería de control de calidad.

Esta tubería permite recoger los metales que podrían continuar después del proceso de lavado mediante un imán, dicha tubería tiene una parte descubierta para que el encargado de control de calidad pueda observar y retirar alguna impureza, esta verificación se realizará mediante un vidrio tipo lupa para maximizar la vista.

Esta es la mejor alternativa desde el punto de accesibilidades, proximidades y estética, cumple con: respeto a las proximidades absolutamente necesarias permitiendo comunicación eficiente; la portería no está aislada de las instalaciones lo que permite un mejor control de éstas fuera de horarios de trabajo; la entrada es mucho más amplia

permitiendo una doble circulación de moviidades y así prescindir de otra puerta innecesaria; la altura de la planta es de 5 m (la maquinaria más alta de 3 m); combina una distribución óptima con una mejora en el control de calidad del proceso, abarcando el total de metros cuadrados del terreno elegido (780 m²); las oficinas están cerca de los almacenes y lejos de la planta para evitar el ruido que ésta realizará, también están cerca del estacionamiento y tienen a disposición el baño junto a su sector; posee puertas amplias en la planta que dan al aire libre, que sirven para la instalación de las maquinarias y los futuros reemplazos de maquinaria.

CONCLUSIONES

El proceso productivo óptimo para la transformación de hojuelas PET fue descrito. La maquinaria más adecuada para la planta incluye un lavado químico con soda caustica, que cumple con las normas nacionales (limpieza extrema) y fue aprobado por la FDA USA (Food and Drugs Administration). La efectividad del proceso se encuentra en la alta temperatura (90 °C) que debe tener el tanque de lavado para eliminar impureza orgánica, tierra, etc. Este lavado se complementa con el lavado horizontal (enjuague) y la microseparación para eliminar rastros de soda caustica y otras impurezas como papeles, etiquetas, tapas, y otros.

Se optimizó la distribución del espacio físico de la planta mediante la aplicación del método de Muther, incluyendo además un equipo pequeño para el control de calidad final que incluye un imán para extraer metales inmersos aún en la hojuela. La necesidad de este equipo fue detectada tras la etapa experimental, el objetivo es elevar la eficiencia del proceso.

La automatización del proceso reduce la cantidad de operarios, sin embargo, se requiere de un supervisor que controle su correcto funcionamiento. Asimismo, se requieren gestiones enfocadas en garantizar que la materia prima llegue a tiempo. El trabajo de separación manual es importante para mantener la calidad del producto final.

Las etapas cuello de botellas del proceso de producción que garantizarán la calidad del producto son: separación, trituración y lavado. Cada etapa requiere tecnología china que puede ser adquirida por importadoras

vecinas a Bolivia, las especificaciones fueron establecidas de acuerdo con criterios de costo-eficiencia, es la línea de reciclaje. Para tener una línea de reciclaje completa se requiere una afiladora de cuchillas puesto que el desgaste generaría polvillo u hojuelas dañadas arruinando así la calidad del producto, por ello se dispuso una maquinaria exclusiva para cuchillas de molino PET. Con base en la identificaron de cuellos de botellas que limitan la producción en condiciones óptimas, se determinó que la capacidad instalada de la planta es 1.000 kg/h.

REFERENCIAS

- Ackerman, F. (1997). *Why Do We Recycle? Markets, Values, and Public Policy*. United States of American: Island Press
- Arnaiz A., N. (2016). *Reciclaje de polímeros mediante la producción de materiales de alto valor añadido*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ingeniería Química. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=62604>
- Bazán S., C. A., y Serrano Alemán, C. M. (2021). *Metodología para desarrollar producto textil a partir del PET reciclado en Lima: revisión sistemática del 2010-2020*
- Bracamonte, R. (2010). *Diagnóstico del funcionamiento de la actividad de segregación y plan de agrupación estratégica residuos sólidos reciclables en la ciudad de El Alto*. La Paz
- Buitrago B, S., Onofre C, N., y Sierra R, E. (2017). *Viabilidad técnica de obtención de un diseño de mezcla asfáltica adicionada con 1.6% de fibra de pet, con porcentajes de asfalto entre el 4.5% y el 6% que cumplan con la normatividad del invias*. monografía para optar al título de ingeniero civil
- Cayllahua I., B. F. (2014). *Láminas de Tereftalato de Polietileno Pet Reciclado*

- Decreto Supremo N° 29272 (2007). Estado Plurinacional de Bolivia
- EMAS. (2014). Servicio y seguridad. Entidad municipal de aseo urbano Sucre
- Forero, L., y Guzmán, F. (2017). Proceso de recuperación de PET de baja densidad: un estudio financiero aplicado al municipio de Tenjo
- Krebs, F. C., Alstrup, J., Spanggaard, H., Larsen, K., y Kold, E. (2004). Production of large-area polymer solar cells by industrial silk screen printing, lifetime considerations and lamination with polyethyleneterephthalate. *Solar energy materials and solar cells*, 83(2-3), 293-300
- Macero, Y. (2011). Lavadora de botellas de vidrio retornable de una planta productora de refresco. Universidad de Oriente
- Mansilla-Pérez, L., y Ruiz-Ruiz, M. (2009). Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster. *Ingeniería industrial*, (027), 123-137
- Meza M, S.S., y Pérez, B.Y. (2015). Caracterización de la cadena de abastecimiento de botellas de tereftalato de polietileno como estrategia de optimización del reciclaje en la ciudad de barranquilla (Doctoral dissertation, Universidad de la Costa)
- Morales P., J. (2010). Proceso de recuperación del ácido tereftálico y el etilenglicol del PET reciclado
- Navarro, R., Ferrandiz, S., Lopez, J., y Seguí, V. J. (2008). The influence of polyethylene in the mechanical recycling of polyethylene terephthalate. *Journal of Materials Processing Technology*, 195(1-3), 110-116.
- Rodríguez, J. y Zeballos, M. (2007). Evaluación de proyectos de desarrollo local. Enfoques, métodos y procedimientos. Lima: Desco
- Sánchez H., C. E., Peña R., G. J., y Rico L., L. F. (2018). Identificación de los usos actuales del tereftalato de polietileno (PET) reciclado en la Ingeniería Civil. *Ingeniería Civil*. Villavicencio: Universidad Cooperativa de Colombia
- Suasnavas F., D. F. (2017). Degradación de materiales plásticos PET (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión (Bachelor's thesis, PUCE)
- Terán C., L.A. (2021). Co-Proceso de combustibles alternos en la industria del cemento: una alternativa para la eliminación de desechos sólidos. *Universidad Andina Simón Bolívar, Sucre -Bolivia*. Vol. 3 Núm. 1 (2021): ENE – JUN. <https://doi.org/10.33996/mayav3i1.6>
- Torres, R., Flores, P., Flores, M., Flores, V., y Mairon, K. (2014). Mezclas asfálticas con materiales reciclados de construcción y demolición para la reparación de pavimentos. *Ciencias Tecnológicas y Agrarias*; © ECORFAN: Sucre, Bolivia