

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**  
**FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA RECOLECTORA Y TRITURADORA DE  
POLIETILÉN TEREFALATO (PET)**

**POR:**

**I.M. LUIS ARMANDO MORENO JULIMEZ**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**



Diseño e implementación de una máquina recolectora y trituradora de Polietilén Tereftalato (PET). Tesis presentada por Luis Armando Moreno Julimez como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ecología y Medio Ambiente, ha sido aprobado y aceptada por:

Ph.D. Carlos Ortega Ochoa  
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

D.Ph. Agustín Corral Luna  
Secretario de Investigación y Posgrado

Ph.D Ana Luisa Rentería Monterrubio  
Coordinador Académico

Dr. Gilberto Sandino Aquino de los Ríos  
Presidente

17 de enero 2019

Fecha

Comité:

Dra. Jessica Mayett Moreno  
(Co-directora)

Dr. Mario Alberto Olmos Márquez  
Dr. Eduardo Santellano Estrada  
Ph.D. Iván Adrián García Galicia

© Derechos Reservados  
LUIS ARMANDO MORENO  
JULIMEZ  
DIRECCIÓN: PERIFÉRICO  
FRANCISCO R. ALMADA  
KM. 1, CHIHUAHUA,  
CHIH., MÉXICO C.P. 31453  
ENERO 2019

## **AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico que me otorgó para realizar mis estudios de maestría. También quiero agradecer a mis padres, hermanas y sobrina que siempre me animaron a seguir adelante y siempre han estado al pendiente de mí. Finalmente, y no menos importante, quiero agradecer a todas las personas que de alguna forma me apoyaron en el transcurso de mis estudios, en especial al Dr. Gilberto Sandino Aquino De Los Ríos y a la Dra. Leonor Cortés Palacios, ya que recibí invaluable apoyo de su parte.



## **RESUMEN**

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA MÁQUINA RECOLECTORA Y TRITURADORA DE POLIETILÉN TEREFALATO (PET).

POR:

I.M. LUIS ARMANDO MORENO JULIMEZ

Maestría en Ecología y Medio Ambiente

Secretaria de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Universidad Autónoma de Chihuahua

Presidente: Dr. Gilberto Sandino Aquino De Los Ríos

El consumo de refrescos y agua embotellada en México ha ido aumentando sostenidamente en los últimos años. Se estima que México es uno de los países que consumen mayor cantidad de botellas de PET, llegando a estar en tercer lugar a nivel mundial. El objetivo del presente trabajo fue estudiar y desarrollar una tecnología que facilite la disposición del residuo plástico PET y que sea una opción factible en el contexto de cero residuos, además estudiar y desarrollar un módulo mecánico de trituración y un módulo electrónico de comunicación. El diseño se realizó mediante un software de análisis y resolución por elementos finitos para aplicaciones físicas. El resultado principal que se obtuvo fue el diseño de una máquina expendedora inversa, la cual consta de un módulo de trituración y un módulo de control y comunicación. El reciclado de los

residuos de plástico PET es una buena opción para regresar al sistema de producción parte del material que comúnmente vemos como basura o residuo. En la actualidad no se tiene una buena cultura de reciclaje. La implementación de las máquinas expendedoras inversas es una manera de incentivar a las personas a reciclar los residuos de plástico PET. Además de la implementación de la máquina es importante llevar paralelamente la puesta en marcha de políticas y métodos de retribución para el reciclaje que ayuden a mejorar las tasas de reciclaje de PET en México.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A MACHINE COLLECTOR AND CRUSHER OF POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)**

**BY:**

**LUIS ARMANDO MORENO JULIMEZ**

In recent years, the consumption of soft drinks and bottled water in Mexico has been increasing steadily. It is estimated that Mexico is one of the countries consuming the largest amount of PET bottles, reaching third place worldwide. This work aimed to study and develop a technology that facilitates the disposal of PET waste, being a feasible option in the context of zero waste. Besides to study and develop a mechanical crushing module and an electronic communication module. The design was made using finite element analysis and resolution software for physical applications. The result was a design of a reverse vending machine consisting of a crushing module and a control and communication module. The recycling of PET plastic waste is a good option to return to the production system part of the material that we commonly see as garbage or waste. Currently, there is no good recycling culture. The implementation of reverse vending machines is a way to encourage people to recycle PET waste. In addition to the implementation of the machine, it is important to carry out in parallel the implementation of policies and methods of retribution for recycling that help to improve PET recycling rates in Mexico.

## CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
Situación de los Plásticos.....	5
Descripción del Polietilén Tereftalato y la Problemática Ambiental.....	6
Disposición en Vertederos.....	10
Reciclaje.....	10
Reciclaje Primario.....	11
Reciclaje Secundario.....	12
Reciclaje Terciario.....	14
Reciclaje Cuaternario.....	17
Ciclo de Vida de las Botellas de PET.....	18
Sistema de Recolección de PET en México.....	19
Sistema de Recolección de PET en Japón.....	21
Sistema de Recolección de PET en Estados Unidos de América.....	23
Máquina Expendedora Inversa.....	24

Diseño Industrial.....	28
Análisis por Elementos Finitos.....	29
MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
Diseño de la Máquina Expendedora Inversa.....	32
Diseño del triturador.....	32
Diseño general de la máquina expendedora inversa.....	32
Diseño del sistema de limpieza.....	34
Selección del motor y reductor de velocidad.....	35
Análisis por Elementos Finitos en la Máquina.....	35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
Triturador.....	36
Motor y Reductor de Velocidad.....	36
Sistema de Limpieza.....	40
Control de la Maquina.....	40
Resultados del Análisis por Elementos Finitos .....	46
Planos de la Máquina Expendedora Inversa .....	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
LITERATURA CITADA.....	61

## LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Eigenfrecuencias para el triturador.....	54
2	Listado de piezas y materiales que forman el triturador de botellas.....	58

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Proceso de polimerización del PET virgen.....	9
2	Opciones de reciclaje químico del PET y los principales productos de cada método.....	16
3	Sistema de recolección de las botellas de PET post-consumo para reciclaje en México.....	20
4	Sistema empleado en Japón para la recolección de botellas de PET post-consumo para su reciclaje.....	22
5	Sistema de recolección de botellas de PET empleado en Estados Unidos de América.....	25
6	Proceso que se empleó para el diseño de la máquina expendedora inversa.....	33
7	Diseño final de la máquina expendedora inversa.....	37
8	Diseño del triturador de botellas después de su adecuación.....	38
9	Motor y reductor de velocidad.....	39
10	Diseño final del sistema de limpieza de la RVM.....	41
11	Funcionamiento del proceso de limpieza del triturador de botellas de PET.....	42
12	Ubicación del PLC en la parte superior derecha.....	43
13	Funcionamiento de la RVM, Primera parte.....	44

14	Funcionamiento de la RVM, Continuación .....	45
15	Resultados del análisis estático.....	47
16	Resultados del análisis estático realizado en el triturador	48
17	Condiciones utilizadas en el análisis dinámico.....	50
18	Deformación experimentada por el análisis dinámico.....	51
19	Desplazamiento experimentado en la máquina bajo condiciones normales de funcionamiento.....	52
20	Estrés experimentado en el triturador bajo cuando se le realiza el análisis dinámico.....	53
21	Primeras dos eigenfrecuencias que provocan fallas en el triturador.....	56
22	Desglose y numeración de las diferentes piezas del triturador de botellas.....	57
23	Listado de piezas y materiales que forman el triturador de botellas.....	58
24	Plano general de la máquina expendedora inversa y sus principales componentes.....	59

## INTRODUCCION

El aumento de la población, el crecimiento económico, la urbanización y el aumento de la calidad de vida han acelerado la generación de residuos plásticos en el mundo (Song *et al.*, 2015). El aumento de la generación de residuos se ha convertido en un problema de interés mundial. Esto se debe a que la cantidad de residuos plásticos aumenta de forma directa con el aumento de la población y la gestión de estos desechos se ha vuelto difícil (Ayeleru *et al.*, 2018). La generación de cualquier residuo agota los recursos naturales, utiliza energía y agua, contamina el medio ambiente y genera costo para la gestión de los residuos. En los últimos años el enfoque de cero residuos se ha sugerido como un medio para solucionar la problemática de manejo de residuos.

Cero residuos es una filosofía que busca el rediseño de los ciclos de vida de los recursos, de manera que la mayoría de los residuos sean reciclados o reusados. En un sistema de cero residuos el flujo de materiales es circular, lo que significa que los materiales se utilizan una y otra vez, por lo tanto, al final de sus vidas son productos reutilizados, reparados, vendidos o redistribuidos dentro del mismo sistema (Matete y Trois, 2008; Singh *et al.*, 2017). Uno de los métodos para poder cumplir los objetivos de reciclaje, del enfoque de cero residuos, es mediante la implementación de un concepto de máquina expendedora inversa (RVM, por sus siglas en inglés) en la que el usuario obtendrá su recompensa cuando se recicla su artículo (Tomari *et al.*, 2017). La RVM es un dispositivo que se utiliza para la recolección y separación de desechos de botellas de plástico y otros residuos de forma automática (Korucu *et al.*, 2016). Actualmente, la RVM

es muy popular en Corea, Japón, Inglaterra, Gran Bretaña, Grecia y China (Sabitha, 2014). La RVM es un concepto innovador que ha sido introducido para ayudar a recolectar los materiales de reciclaje (Tomari *et al.*, 2017). Las RVM utilizan tecnologías basadas en sensores de proximidad, procesamiento de imagen, radio frecuencia y en años recientes reconocimiento por sonido para recibir y clasificar diferentes tipos de residuos como aluminio, plásticos como el polietilén tereftalato PET, el cual es de gran importancia y de amplio uso en la actualidad, entre otros. (Sabitha, 2014; Korucu *et al.*, 2016). México ocupa los primeros lugares de consumo de bebidas embotelladas en el mundo y, por lo tanto, el uso de botellas de PET. En este contexto, la resina de PET virgen es una de las resinas plásticas que más se utiliza en el país (Aguilar *et al.*, 2013). En el año 2016 la producción de resina fue mayor a 1,000,000 de toneladas según datos proporcionados por la asociación ambientalista Ecología y Compromiso Empresarial (ECOCE, 2018).

Actualmente las principales compañías dedicadas a la fabricación y comercialización de RVM son: 1) Tomra de Noruega, 2) Wincor Nixdorf de Alemania, 3) Envipco de Estados Unidos de America, 4) Envirobank de Australia y Reverse Vending Corporation de Reino Unido. Tomra, Wincor Nixdorf y Envico son las compañías líderes en mercado de las RVM con una participación del 65%. En México la empresa BioBox cuenta con máquinas propias cuya función es la recolección y compresión de plástico y aluminio, por medio de un programa de recompensas.

La razón por la cual desarrollar una nueva máquina es que, actualmente, en el estado de Chihuahua no se cuenta con una RVM que sea capaz de recolectar y triturar botellas de PET, además brindar información sobre los patrones de recolección en los sectores donde se ubique la máquina. El desarrollo de esta nueva RVM tendrá la ventaja que será diseñada para ser un tanto un módulo independiente como un módulo adjunto a las máquinas expendedoras de refrescos actuales. Esto actualizará las máquinas expendedoras existentes y evitara la generación de basura electrónica por el cambio de tecnología, además ayudará a que mayor número de usuarios tengan acceso a la RVM. Además, por ser una máquina de diseño y producción local se evitarán los costos de compra y de importación de RVM extranjeras.

Se espera que con la implementación de una RVM presente beneficios de tipo social, ambiental y económico. Con la implementación de este tipo de estrategias, se pretende a largo plazo contribuir a la disminución del calentamiento global, derivado del proceso de producción de la resina virgen de PET el cual comprende desde la extracción del petróleo, los procesos de refinación para la extracción de la materia prima para la producción de la resina de PET hasta su disposición final, la generación de empleos por la fabricación y mantenimiento de las RVM, el cuidado del medio ambiente, la conservación de los recursos naturales y la creación de una cultura ambiental y de cuidado del medio ambiente.

El objetivo principal de la presente investigación fue estudiar y desarrollar una RMV que facilite la disposición del residuo plástico de PET y que sea una

opción factible en el contexto de cero residuos. Además, como objetivos específicos, se tuvieron el estudiar y desarrollar un módulo mecánico de trituración y un módulo eléctrico y/o electrónico de comunicación.

## REVISION DE LITERATURA

### Situación de los Plásticos

Desde que tuvo lugar la producción a escala industrial de polímeros sintéticos (plásticos) en la década de 1940, la producción, el consumo y la tasa de generación de residuos plásticos han aumentado considerablemente (Al-Salem *et al.*, 2009).

Los polímeros se han convertido en uno de los materiales más importantes para el desarrollo de la tecnología y la ciencia y para el sostenimiento de nuestro actual estilo de vida (Pivnenko *et al.*, 2016). Los polímeros sintéticos se han convertido en materiales muy versátiles y útiles para la tecnología moderna y debido a que los polímeros son de bajo costo y se pueden utilizar para fabricar productos de consumo mediante máquinas automatizadas (Sinha *et al.*, 2010), ha resultado en el incremento de la producción global del plástico en un 500% en los últimos 30 años y se espera que continúe creciendo hasta 850 toneladas por año para el año 2025 (Hunt *et al.*, 2015).

Los residuos sólidos plásticos se están generando a gran escala alrededor del mundo y su producción global alcanza 150 millones de toneladas por año. Los plásticos se pueden encontrar en muchos productos, desde ropa, envases, hasta maquinaria (Papong *et al.*, 2014). Las industrias están cada vez más interesadas en la manufactura del plástico. Los plásticos se han convertido en una parte crucial del estilo de vida (Singh *et al.*, 2017), el PET es un caso particular. Desafortunadamente, los plásticos también están asociados con problemas ambientales, debido a que están basados principalmente en materias

primas no renovables, son comúnmente utilizados en productos de corta vida y, una vez desechados, son llevados a rellenos sanitarios e incinerados (Pivnenko *et al.*, 2016).

El manejo de los residuos en los países en desarrollo está caracterizado por prácticas de recolección altamente ineficientes debido a los recursos limitados, falta de sistemas de control ambientales, vertimiento indiscriminado y sobre todo la mala conciencia ambiental y de residuos del público en general (Matete y Trois, 2008). Actualmente, el escenario de reciclaje, recuperación y manejo de los residuos plásticos es un motivo de preocupación (Singh *et al.*, 2017).

### **Descripción del Polietilén Tereftalato y la Problemática Ambiental**

El PET es un polímero de cadena larga semi-cristalino de la familia del poliéster (Sinha *et al.*, 2010; Webb *et al.*, 2013). El PET se empleaba tradicionalmente en la producción de fibras textiles desde mediados de la década de 1940. La botella de PET fue patentado en 1973 por Nathaniel Wyeth y comenzó a ser utilizado popularmente para la producción de botellas desechables para bebidas en la década de los 80's (Al-Sabagh *et al.*, 2016).

El PET se ha convertido en el empaque más utilizado alrededor del mundo como botella para agua y refresco. En comparación con otros polímeros para empaques, el PET es de color claro, es fuerte, durable, estable química y térmicamente, tiene una baja permeabilidad a los gases y es fácilmente procesable y manipulable. Esta combinación de propiedades hace al PET un

material deseable para una amplia gama de aplicaciones y un componente importante del consumo de plástico en todo el mundo (Welle, 2011; Webb *et al.*, 2013). La producción mundial total de poliésteres era de 25-30 millones de toneladas en 2000, este valor aumentó a 55 millones de toneladas en 2012 y consistía en su mayoría de PET (Al-Sabagh *et al.*, 2016). Estados Unidos de América es el mayor usuario de envases de PET, seguido de China y México. América Latina mostró el mayor crecimiento entre 2001 y 2006 (Coelho *et al.*, 2011).

Para la fabricación del PET se utiliza ácido tereftálico puro (TPA) y etilenglicol (EG), los cuales se derivan de petróleo crudo. Cuando se calientan juntos el primer producto es un monómero (bis-hidroxietil-tereftalato, BHET) mezclado con polímeros de bajo peso molecular (oligómeros). La mezcla luego reacciona adicionalmente, se destila el exceso de etilenglicol y forma el PET. Algunos PET también se fabrican utilizando el tereftalato de dimetilo (DMT). El PET, en su forma más pura, es un material semejante al vidrio amorfo. Bajo la influencia de los aditivos modificadores directos se desarrolla cristalinidad. También, la cristalinidad puede ser desarrollada por tratamiento térmico del polímero. El PET de alto peso molecular se fabrica de una segunda etapa de polimerización. El alto peso molecular es esencial para las buenas propiedades mecánicas que proporcionan rigidez, tenacidad y resistencia a la fluencia, mientras que, al mismo tiempo, dan suficiente flexibilidad para resistir ruptura y presión (Sinha *et al.*, 2010; Al-Sabagh *et al.*, 2016).

El producto final de esta reacción son pellets cristalinos (Welle, 2011). Un esquema del proceso de polimerización del PET virgen es mostrado en la Figura 1. El aumento en el consumo del PET ha dado lugar a la aparición de diversos problemas principalmente los relacionados con la eliminación de residuos de PET. Debido a este problema, la industria de los plásticos, tanto de fabricación, así como el procesamiento, representa una amenaza al medio ambiente (Sinha *et al.*, 2010; Zhang y Wen, 2014). La disposición de los plásticos se ha convertido en un problema global debido a la alta producción y consumo de los materiales poliméricos. Los países tienen diferentes niveles de generación de residuos en función de su nivel de ingresos que se convierte en un serio problema de disposición y manejo de los residuos sólidos plásticos (Singh *et al.*, 2017). Países con un alto PIB tienden a producir grandes cantidades de RSU (Gundupalli *et al.*, 2017). Dados los altos volúmenes de generación y disposición final de envases de bebidas de PET, es evidente la necesidad de evaluar en términos ambientales los diferentes esquemas de producción, consumo, las tecnologías de reciclaje y manejo de residuos de los envases de bebidas de PET (Aguilar *et al.*, 2013). El manejo de los residuos es un proceso complejo debido al requerimiento de información de diferentes fuentes como los factores que influyen en la generación de residuos, pronóstico de las cantidades y datos confiables (Singh *et al.*, 2017). Existen dos principales métodos para el manejo de los residuos plásticos: la disposición en vertederos y el reciclaje. Cada uno tiene sus propias ventajas y desventajas, las cuales se mencionan a continuación.

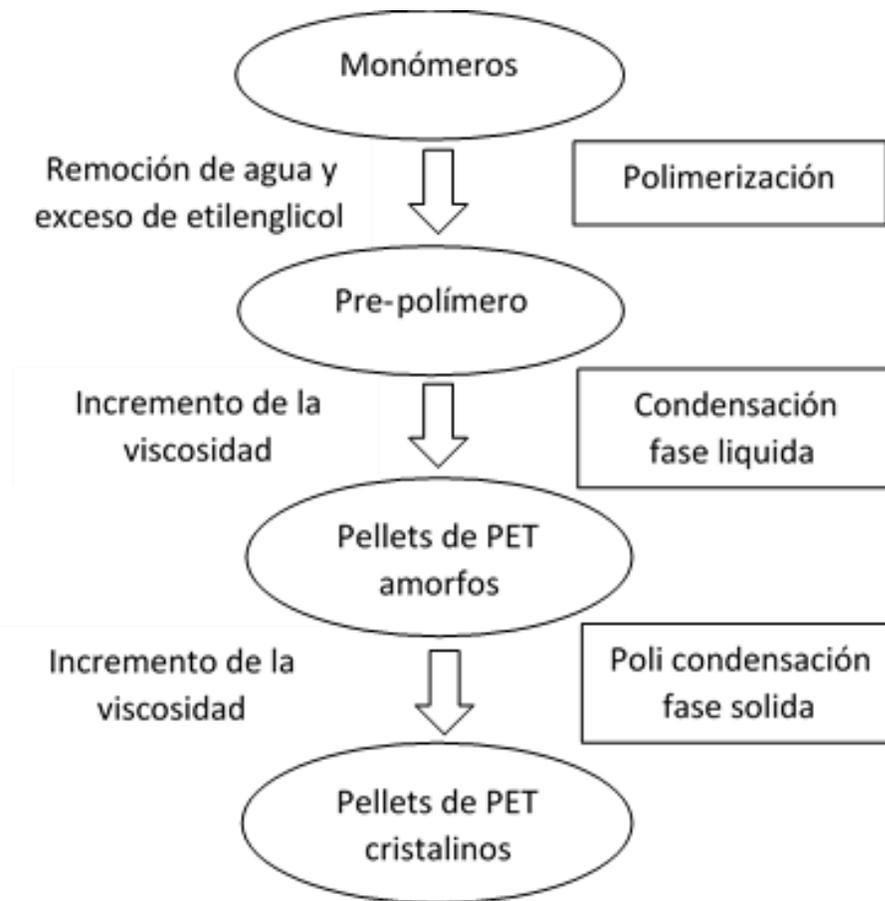


Figura 1. Proceso de polimerización del PET virgen (Welle, 2011).

## **Disposición en Vertederos**

El primer inconveniente es que las instalaciones de los vertederos ocupan un gran espacio que podría ser utilizado para otras aplicaciones. Esto se ve agravada por la lenta degradación de los plásticos lo que significa que la tierra no estará disponible para otros usos por largos periodos de tiempo. Los desechos plásticos en los vertederos actúan como fuente de contaminantes secundarios: contaminantes volátiles orgánicos como en benceno, tolueno, xilenos, etilbencenos y trimetilbencenos liberados como gases y lixiviados y disruptores endocrinos, en particular el bisfenol A (BPA) (Webb *et al.*, 2013).

## **Reciclaje**

El reciclaje implica la reintroducción en el sistema, parte del material y la energía que de otro modo sería de residuos. Es una alternativa para la reducción de los desechos (Coelho *et al.*, 2011). Aunque la causa más importante para el reciclaje y reprocesamiento de los residuos plásticos ha surgido a partir de la toma de conciencia y preocupación por la contaminación del medio ambiente, también es importante debido a la urgencia de la conservación de la energía y de materias primas costosas y escasas (Sinha *et al.*, 2010). Por otra parte, como el precio del PET virgen permanece estable, nuevas y baratas tecnologías para el reciclado de PET dan un beneficio a la industria del reciclaje de PET para proporcionar a la industria PET relativamente barato (Al-Sabagh *et al.*, 2016).

El reciclaje de plástico depende en su mayoría del tipo de plástico. La mezcla de un polímero con otro puede conducir a la reducción de las propiedades del material reciclado debido a los diferentes puntos de fusión. Además, la

dificultad en la maximización de reciclaje está relacionada con los costos implicados en el proceso, es decir, uno debe tener en cuenta los costos de recogida, transporte y almacenamiento de valor comercial material (Coelho *et al.*, 2011).

Hay cuatro enfoques principales para el reciclaje del residuo plástico: primario, secundario, terciario y cuaternario. La técnica de reciclaje de polímero juega un papel importante en la generación de nuevos polímeros. Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas. Cuando el material plástico se somete a un proceso de reciclaje, comienza a perder algunas propiedades en términos de resistencia a la tracción, propiedades de desgaste y precisión dimensional. Algunas técnicas de reciclaje se mencionan a continuación (Al-Sabagh *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2017).

### **Reciclaje Primario**

El reciclaje primario, conocido como re-extrusión (Singh *et al.*, 2017), es el reciclaje del desecho industrial limpio, no contaminado y con propiedades cercanas al material virgen (Al-Sabagh *et al.*, 2016). Este proceso utiliza los plásticos de desecho que tienen características similares a los productos originales. El reciclaje primario sólo es factible con desechos semi-limpios, por lo que es una opción popular por los recicladores (Al-Salem *et al.*, 2009). Los residuos sólidos plásticos no son adecuados para el reciclaje primario debido a la alta contaminación. Este enfoque garantiza la simplicidad y bajo costo, especialmente cuando se hace dentro de la planta de producción (Sinha *et al.*, 2010). El reciclaje primario es fácil de usar y popular en los fabricantes, debido a

la conversión de los residuos plásticos en el producto original de la calidad (Singh *et al.*, 2017).

### **Reciclaje Secundario**

El reciclaje secundario, también conocido como el reciclaje mecánico, es el proceso de recuperación de residuos de plástico a través de medios mecánicos para el re-uso en productos de plástico menos exigentes (Al-Salem *et al.*, 2009; Singh *et al.*, 2017). En este enfoque, el polímero se separa de sus contaminantes asociados y puede ser reprocesado fácilmente en gránulos mediante extrusión convencional en estado fundido (Sinha *et al.*, 2010). El reciclado mecánico sólo puede realizarse en plástico de polímero único, por ejemplo, PE, PP, PS, PET, etc. Cuanto más complejos y contaminados los residuos, más difícil son para reciclar mecánicamente (Al-Salem *et al.*, 2009).

Los pasos implicados en el reciclaje secundario pueden incluir las etapas siguientes, cada uno de los cuales pueden ocurrir en cualquier lugar y múltiples veces a través de la secuencia. 1) separación y clasificación: se produce en base a forma, densidad, tamaño, color o composición química 2) corte o trituración: piezas de plástico grandes son cortadas por cizallamiento o una sierra para su posterior procesamiento. 3) separación de contaminantes: Papel, polvo y otras formas de impurezas se separan de plástico. 4) molienda: plásticos de un solo polímero separados se muelen. Este paso se toma generalmente como un primer paso con muchos recicladores de todo el mundo. 5) lavado y secado: Este paso se refiere a la etapa de pre-lavado. El proceso de lavado de plástico real ocurre después si se requiere tratamiento adicional. 6) extrusión: se hace una extrusión

del plástico del plástico para formar pellets. Entonces se recoge el producto, se almacena y se vende después de la adición de los pigmentos y aditivos para su uso final (Al-Salem *et al.*, 2009; Sinha *et al.*, 2010; Ragaert *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2017). Uno de los principales problemas que enfrentan los recicladores mecánicos es la contaminación, la degradación y la heterogeneidad del plástico a reciclar.

Durante el reciclado mecánico del PET, prevalecen dos tipos de degradación: la degradación causada por el reprocesamiento (degradación térmica-mecánica) y la degradación durante la vida útil del plástico. La principal es la degradación térmica-mecánica de polímeros durante la reprocesamiento. La degradación térmica-mecánica es causada por el calentamiento y cizallamiento mecánico del polímero durante el procesamiento en estado fundido. El otro tipo de degradación es la degradación que se produce durante toda la vida por la exposición de largo plazo a todo tipo de factores en el medio ambiente (calor, oxígeno, luz, humedad, etc.) (Ragaert *et al.*, 2017).

Aunado a lo anterior, hay contaminantes que pueden inhibir significativamente el proceso de reciclaje y resultar en un deterioro grave del PET recuperado. Por ejemplo, es de particular importancia que el PVC se elimine del PET para ser reciclados, y esto normalmente se realiza manualmente. Los contaminantes que todavía residen dentro de las hojuelas de PET, y bajo altas temperaturas de extrusión, conducen a la degradación hidrolítica y térmica y a la subsecuente disminución del peso molecular y la viscosidad intrínseca del plástico. Además, un obstáculo importante en el reciclaje de PET post-consumo

es el amarillamiento del polímero. El color es debido a la reticulación intramolecular y reacciones de oxidación. Amarillamiento es un problema significativo para el PET que se reutiliza en la producción de botellas (Webb *et al.*, 2013; Al-Sabagh *et al.*, 2016).

La principal desventaja de este tipo de reciclaje es el deterioro de las propiedades del producto en cada ciclo. Esto ocurre ya que el peso molecular de la resina de reciclado se reduce debido a las reacciones en cadena de escisión provocados por la presencia de agua y trazas de impurezas ácidas. Un proceso de reciclaje secundario presenta algunos problemas únicos que pueden causar que no sea apropiado para la producción de artículos en contacto con alimentos (Sinha *et al.*, 2010).

### **Reciclaje Terciario**

Es conocido que el polímero se compone de los productos a base de petróleo. El reciclado terciario implica someter al residuo PET a tratamiento químico que conduce a la generación de las materias primas de las que se hizo originalmente (Al-Sabagh *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2017). Este método de reciclaje implica la transformación de la cadena del polímero en moléculas más pequeñas, utilizando por lo general líquidos o gases, que son adecuados para su uso como materia prima para la producción de nuevos productos petroquímicos y plásticos (Al-Salem *et al.*, 2009). La cadena principal del polímero bajo proceso de reciclaje se degrada en unidades de monómero (despolimerización), o se rompe al azar en fragmentos de cadena más grandes (escisión de la cadena al azar) con la formación asociada de productos gaseosos (Al-Sabagh *et al.*, 2016).

El reciclado químico del PET puede despolimerizar completamente en monómeros de ácido tereftálico (TPA), tereftalato de dimetilo (DMT), bis hidroxietil tereftalato (BHET) y etilenglicol (EG). En este caso, la despolimerización es la reacción inversa de la ruta de formación de polímero. El PET también puede ser despolimerizado parcialmente a oligómeros u otras sustancias químicas (Ragaert *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2017).

El reciclado químico se lleva a cabo ya sea por solvólisis o por pirólisis; la primera a través de la degradación por disolventes que incluyen agua, y la última a través de la degradación por calor en ausencia de oxígeno o aire, o el vacío. los rendimientos de reciclado químico monómeros, líquidos de petróleo y gases. Los monómeros son purificados por destilación y secado, y se utilizan para la fabricación de polímeros (Sinha *et al.*, 2010).

Existen diferentes rutas de despolimerización, tales como metanólisis, glucólisis, hidrólisis, amonólisis, aminólisis, y la hidrogenación, dependiendo del agente químico utilizado para la escisión de la cadena de PET. La Figura 2 resume las diferentes opciones para el reciclaje químico del PET, así como el tipo de productos que se derivan de la despolimerización (Sinha *et al.*, 2010; Webb *et al.*, 2013; Al-Sabagh *et al.*, 2016; Welle, 2016; Ragaert *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2017).

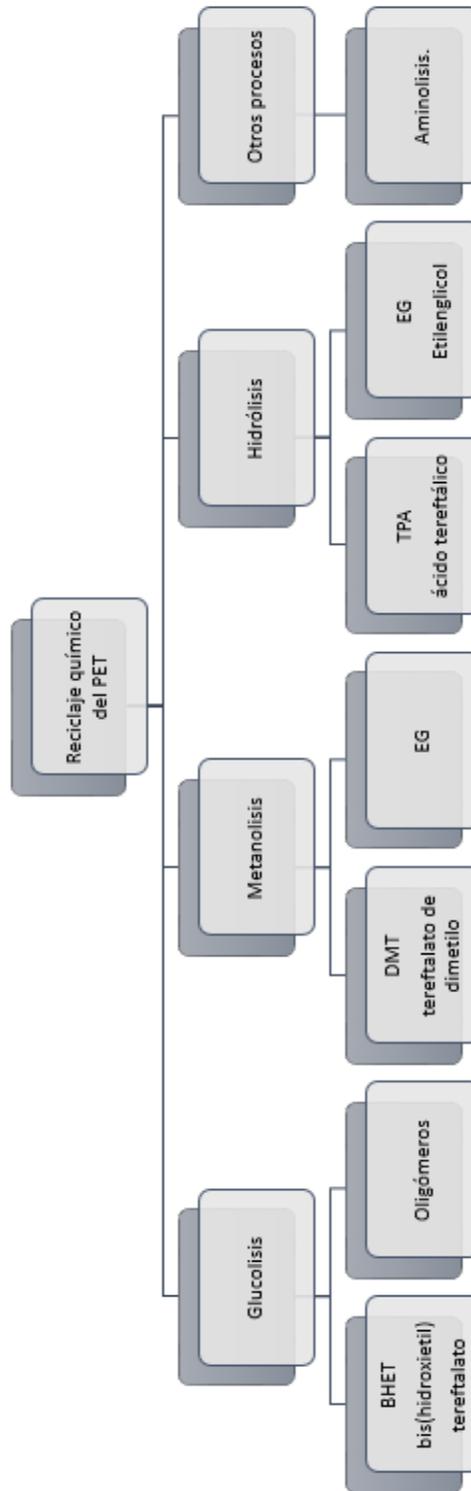


Figura 2. Opciones de reciclaje químico del PET y los principales productos de cada método (Sinha *et al.*, 2010).

## **Reciclaje Cuaternario**

Después de un número de ciclos de reciclaje, por el método primario, secundario y terciario de reciclaje, el PET comienza a perder sus propiedades. En el reciclaje cuaternario el material de desecho se procesa para recuperar energía en forma de calor a través de la incineración y conduce a la reducción del volumen de residuos. Esto se lleva a cabo en tipo especial de reactores llamados incineradores, para quemar los residuos en la presencia de aire de una manera controlada para convertir los hidrocarburos del plástico en dióxido de carbono y agua. El reciclaje de residuos de plástico por el método de recuperación de energía es lógico sólo cuando el reciclado de residuos no es posible debido a las limitaciones. También cuando la recolección, clasificación y separación de los residuos plásticos son difíciles o económicamente no viable, o el residuo es tóxico y peligroso de manejar. (Sinha *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2017).

El método del reciclaje cuaternario ha sido ampliamente acusado de ser ecológicamente inaceptable. La incineración de plástico conduce a la formación de numerosos compuestos nocivos, la mayor parte de los cuales son liberados a la atmósfera, principalmente contaminantes como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>. La combustión de plásticos también es conocido por generar compuestos orgánicos volátiles (COV), material particulado, metales pesados y dioxinas (Webb *et al.*, 2013; Sinha *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2017). Se debe admitir que no es posible tener cero emisiones en la incineración de residuos plásticos (Sinha *et al.*, 2010).

Los plásticos pueden considerarse como una fuente potencial de energía almacenada debido a que cada año se necesita el 4 % de la producción anual de

petróleo para la producción de resina de plástico virgen, esto equivale a 1,300 millones de barriles al año. Por lo que se recomienda el reuso y el reciclaje del residuo plástico.(Singh *et al.*, 2017). El calor producido por la combustión de los plásticos en los residuos en forma de vapor de agua sobrecalentado se puede utilizar para la generación de electricidad a través de los generadores de turbina, y el calor residual de la corriente de residuos para el calentamiento de edificios residenciales e industriales (Sinha *et al.*, 2010).

### **Ciclo de Vida de las Botellas de PET**

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se considera como una herramienta clave para la evaluación de potenciales impactos ambientales, así como para la generación de información científico-técnica útil para la orientación de la política y legislación ambiental; el establecimiento y fortalecimiento de programas de gestión integral de residuos y planes de manejo entre otros instrumentos de política, así como la toma de decisiones de los tres órdenes de gobierno incluyendo también a los sectores industrial y social (Aguilar *et al.*, 2013).

El ciclo de vida de los plásticos puede ser descrita de la siguiente manera: las materias primas se transforman en productos a través de las diversas técnicas de conversión. Esta es la fase inicial de la vida útil del producto. Durante el proceso de fabricación, se genera un primer tipo de residuos de plástico: residuo postindustrial (PI), que nunca llega al consumidor. Típicamente los residuos PI tienen las ventajas de que están limpios y se conoce la composición del polímero. En términos de reciclaje, éstos son a menudo los grados de mayor calidad de residuos de polímeros. Al final de su vida útil, el producto se desecha y se

convierte en desechos pos-consumo (PC). Dependiendo del país, los residuos plásticos PC se recogen por separado o no (Ragaert *et al.*, 2017).

Los sistemas de recolección de botellas de PET son diferentes entre los países debido a las diferencias en las condiciones locales, que incluyen diseño técnico del sistema de reciclaje, la política del gobierno, y la cultura social sobre el reciclaje (Zhang y Wen, 2014).

### **Sistema de Recolección de PET en México**

En México, según el Estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del Manejo de Envases de Bebidas de Polietilén Tereftalato (PET) en la Fase de Pos-consumo, el diagrama de flujo para evaluar el manejo de los envases de PET se agrupa en dos subsistemas de manejo de residuos y un subsistema que describe el reciclaje para la producción de resina virgen (Figura 3). Según este mismo estudio, el 64% de los residuos de PET entra al sistema de recolección de residuos sólidos urbanos del país; el 24% se separa en la fuente por programas de separación y el 12% del residuo de botellas de PET no entra al sistema de recolección ni se canaliza a ningún programa de separación. De los envases para bebidas de PET que entran al sistema, se recupera para reciclaje el 44.5%; el 46.5% es dispuesto en tiraderos a cielo abierto, sitios controlados o rellenos sanitarios; y el 9% se desecha al ambiente en tiraderos clandestinos, cuerpos de agua, vía pública, entre otros. La recuperación de los envases de PET pos-consumo se da de la siguiente manera: el 23.8% se recupera por programas de separación; el 13.8% se recupera vía pre pepena en el sistema de recolección; el 3.6% por plantas de separación y 3.2% por actividades de pepena en tiraderos

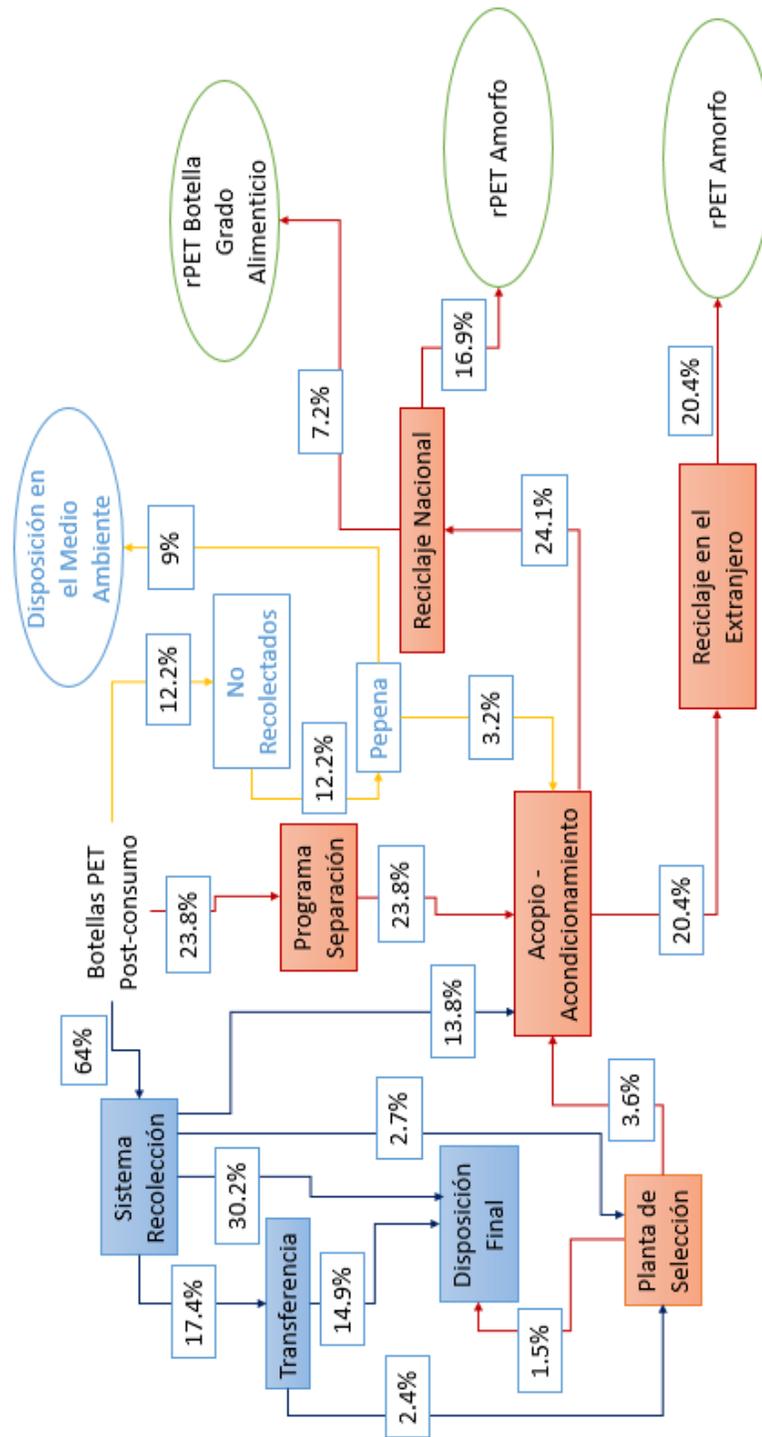


Figura 3. Sistema de recolección de las botellas de PET post-consumo para reciclaje en México (Aguilar *et al.*, 2013).

clandestinos, vía pública y disposición al ambiente. La fracción de envases de PET recuperadas para reciclaje nacional es de 24.1% y aproximadamente el 20.4% es exportado para reciclaje en el extranjero (Aguilar *et al.*, 2013).

De acuerdo a datos obtenidos de la ECOCE en el año 2016 se consumieron cerca de 750 mil toneladas de resina de PET en México, de las cuales se recuperaron 422,783 toneladas, lo que representa una recuperación del 58% de residuos de plástico PET para su reciclaje. Del plástico PET reciclado un 21.5% se utiliza para la fabricación de lámina termoformado y fleje, un 13% para fibras diversas, 11.6% para envases no alimenticios y 53.9% para envases grado alimenticio (ECOCE, 2018).

En los últimos años se ha extendido el uso de RVM para la recuperación de botellas de PET. En consecuencia, durante el año 2014, se colocaron cerca de 100 RVM en diferentes puntos de la Ciudad de México, Puebla, Guanajuato y Jalisco con lo que se logró recuperar 128 toneladas de PET (Alcántara, 2018).

### **Sistema de Recolección de PET en Japón**

Japón, es de los países con mayor tasa de reciclaje de botellas de PET, estableció el consejo para el reciclaje de botellas de PET (CPBR) en 1993. El CPBR en colaboración con La Asociación de Reciclaje de Contenedores y Empaques de Japón (CPRA) están a cargo del reciclado de las botellas de PET pos-consumo en Japón.

Japón tiene un sistema de responsabilidad extendida del productor (EPR) para el reciclado de botellas de PET. El sistema (Figura 4) es operado bajo la Ley

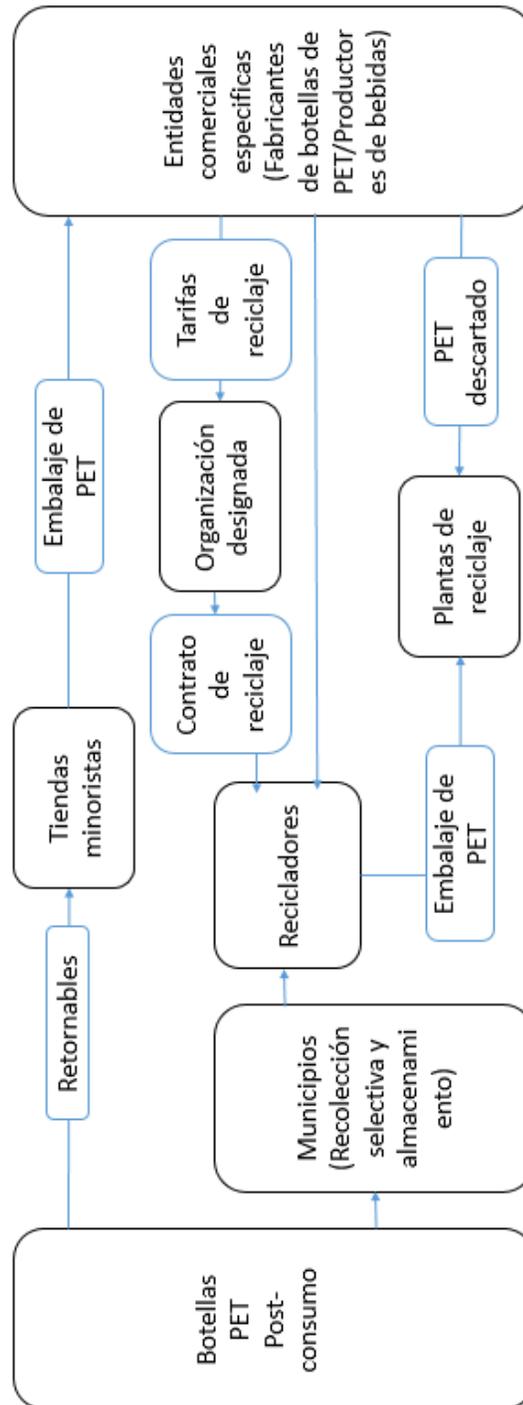


Figura 4. Sistema empleado en Japón para la recolección de botellas de PET post-consumo para su reciclaje (Zhang y Wen, 2014).

de Reciclaje de Envases y Embalajes. La ley define los participantes y aclara el papel de cada parte como: 1) Los consumidores están obligados a "descartar las reglas", es decir, quedan exentos de responsabilidad sobre las botellas de PET cuando las desechan adecuadamente. Los consumidores tienen la opción de disponer los residuos de botellas de PET en contenedores de reciclaje en la calle, desecharlas con otra basura doméstica o desecharlas separadas de otros residuos domésticos; 2) Los municipios realizan la recogida selectiva de botellas de PET para cumplir las normas de clasificación. Los municipios recogen clasifican, lavan, empaquetan y almacenan las botellas de PET de los consumidores para su reciclaje posterior; 3) Los fabricantes de botellas de PET y los productores de bebidas están obligados al reciclado de botellas de PET, y pagan las tasas de reciclaje a la CPRA; (4) El CPRA se encarga de la tarifa de reciclaje y firma los contratos de reciclaje con los recicladores, además, transfiere las obligaciones de reciclado de la fábrica a los recicladores; (5) Los recicladores implican personas que obtuvieron los derechos de las botellas de PET, transportan, reprocesan las botellas de PET recuperadas y consiguen la cuota de reciclaje de la CPRA después de terminado el proceso de reciclaje (Amano, 2004; Zhang y Wen, 2014).

### **Sistema de Recolección de PET en Estados Unidos de América**

Estados Unidos de América estableció la Asociación Nacional para Contenedores de PET (NAPCOR) en 1987. Esta asociación se encarga de PET reciclado de botellas y da informes anuales sobre las actividades de reciclaje de botellas de PET post-consumo. Las botellas de PET pos-consumo en dicho país

son recogidos y transportados en cuatro métodos básicos (Figura 5). El primer método se creó como resultado de la ley estatal conocida como Legislación de Envases Retornables, o "Bottle Bills", que estableció un valor de rescate en las bebidas carbonatadas. Este sistema de depósito condujo a la reducción de la basura total entre un 30% y 64%. El segundo método es la recolección en la acera. Aproximadamente el 55% de los envases de plástico de PET recogidos para reciclaje se recolectan a través de los programas de la acera. En este sistema, debido a que no existen incentivos para la clasificación y recogida de botellas de PET, las actividades de clasificación de botellas de PET se basan en la iniciativa de los consumidores. El tercer método requiere que los residentes entreguen las botellas de PET a los centros de acopio y necesita más esfuerzos individuales. El último método se basa en los centros de reciclaje de recompra. La mayoría de los centros de reciclaje de recompra son operados por empresas privadas, pagando a los consumidores por las botellas de PET. Aunque este método ofrece incentivos financieros a individuos, los necesitan llevar las botellas de PET a los centros de recompra (Zhang and Wen, 2014).

### **Máquina Expendedora Inversa**

La práctica de reciclaje manual actual en la que el usuario necesita llevar los residuos hasta el centro de se ha convertido en un factor desalentador para reciclar. Además, la experiencia mundial ha demostrado que la recompensa es la forma más eficaz para preservar alto nivel de participación en el proceso de reciclaje (Tomari *et al.*, 2017). Uno de los métodos para poder cumplir los objetivos de reciclaje es mediante la implementación de un concepto de máquina

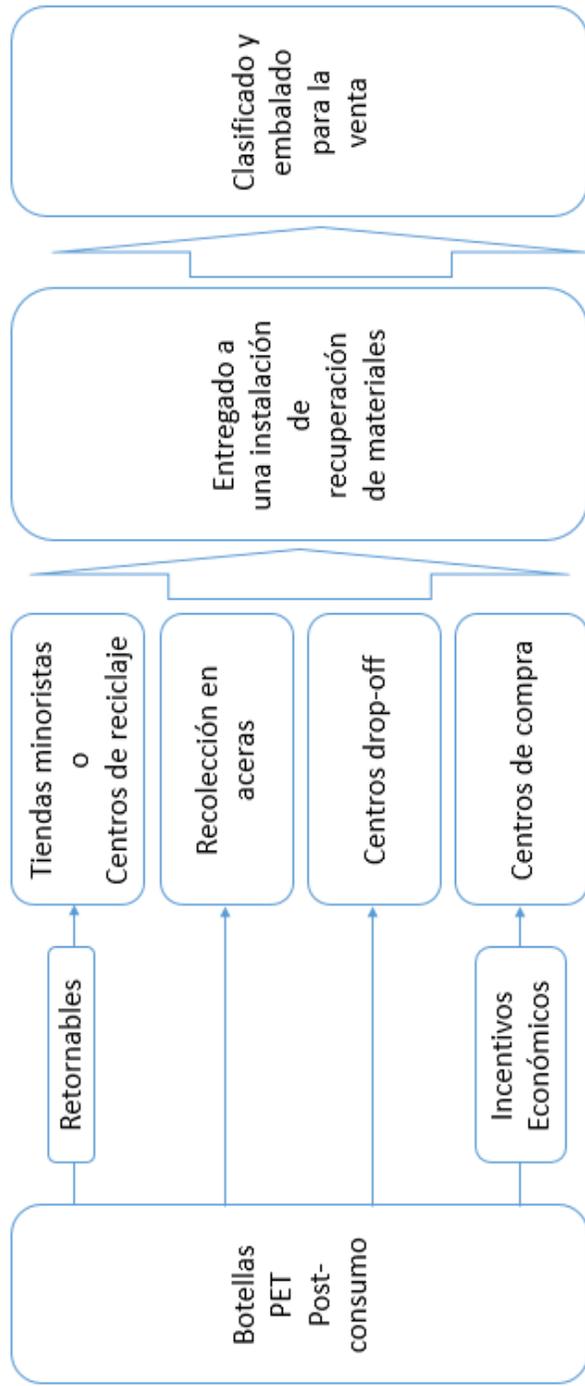


Figura 5. Sistema de recolección de botellas de PET empleado en Estados Unidos de América (Zhang y Wen, 2014).

expendedora inversa (RVM, por sus siglas en ingles) en la que el usuario obtendrá su recompensa cuando se recicla su artículo (Tomari *et al.*, 2017). La RVM es un dispositivo que se utiliza para la recolección y separación de desechos de botellas de plástico y otros residuos de forma automática (Korucu *et al.*, 2016). Se suele utilizar para fomentar a la comunidad para disponer adecuadamente de sus residuos, sobre todo reciclar materiales tales como plástico, papel y aluminio. Por lo que el proyecto de la RVM es inútil sin la cooperación de los consumidores (Sabitha, 2013).

La primera patente para una máquina de devolución y manipulación de contenedores vacíos con un mecanismo de devolución de monedas fue presentada en Estados Unidos el 13 de septiembre de 1920 por Elmer M. Jones y Sue Walker Vance. A finales de 1950 la primera máquina de devolución de botellas funcional fue inventada y fabricada por Wicanders de Suecia. Posteriormente una avanzada máquina automática de devolución de botellas mejor conocida como una RVM fue diseñada por Aage Tveitan y fabricada en Noruega. Las RVM han sido utilizadas en Europa durante las últimas cinco décadas, en la mayoría de los casos se utilizan en mercados que tienen depósitos en envases de bebidas, lo que ofrece un método eficiente para identificar la cantidad de depósito devuelta y proporcionar un reembolso al cliente (Reverse Vending, 2018). En México, durante el año 2014 la empresa 3B Hengsheng colocó cerca de 100 máquinas en diferentes puntos de la Ciudad de México, en Puebla, Guanajuato y Jalisco, con lo que se logró recuperar 128 toneladas de PET (Alcántara V., 2015).

Actualmente, la RVM es muy popular en Corea, Japón, Inglaterra, Gran Bretaña, Grecia y China (Sabitha, 2013). La RVM es un concepto innovador que ha sido introducido para ayudar a recolectar los materiales de reciclaje eficaz y como consecuencia aumenta las actividades de reciclaje y, consecuentemente, mejorar la gestión de los residuos (Tomari *et al.*, 2017). Hay varios tipos de máquinas expendedoras en este mundo como la de selección individual, doble selección y de triple selección. Del mismo modo, hay una gran cantidad de máquinas expendedoras inversas (Sabitha, 2013).

Una máquina expendedora inversa prevé la separación, conteo y trituración de envases de bebidas de un rango y composición de tamaño predeterminado. La máquina incluye: 1) una estación de alimentación para recibir múltiples contenedores. 2) Una estación de carga y un transportador de alimentación para transportar recipientes múltiples desde la estación de alimentación a la estación de carga. 3) Un separador/transportador para separar un recipiente de los múltiples recipientes, y para transportar un recipiente separado de la estación de carga a la estación de descarga. 4) Mecanismos para rechazar los contenedores inaceptables entre la estación de carga y la estación de descarga. 5) Un contador para contar el número de contenedores aceptables. Los contenedores pasan a una trituradora que reduce el volumen de los contenedores. 6) Una impresora para imprimir un recibo que indique la cantidad de contenedores aceptables procesados por la máquina. Y, 6) un microprocesador coordina los ciclos operativos de la máquina (Hampson *et al.*, 1994).

Las máquinas actuales son independientes por lo que las mejoras que se pueden realizar son: 1) que la máquina sea un módulo de las máquinas expendedoras de bebidas actuales y no sean solo para reciclar. Al ser un módulo se minimiza la basura electrónica. 2) Las máquinas recolectoras actuales ubicadas en México, en su mayoría, solo comprimen las botellas para el almacenamiento de las mismas. Esto por simplificar el mecanismo de la máquina y ahorrar en costos. Por ello una mejora considerable es que el módulo de reciclaje tenga la capacidad de triturar maximizando al volumen de almacenamiento. 3) Optimizar el diseño mecánico para minimizar el consumo de energía eléctrica, el volumen total de la máquina y los niveles de ruido. 4) Agregar un módulo de adquisición de datos e interconexión a internet para tener monitoreado el módulo de reciclaje. 5) Establecer una estrategia de bonificación en función del nivel de limpieza de la botella. Finalmente, 6) con el módulo de comunicación y adquisición de datos se agrega valor ya que se puede monitorear en tiempo real los patrones de consumo.

### **Diseño Industrial**

El diseño industrial es un servicio profesional que consiste en crear y desarrollar conceptos y especificaciones que optimizan la función, el valor y la apariencia de productos y sistemas para beneficio de usuario y fabricante. Los diseñadores generan estos conceptos y especificaciones a través de la recopilación, el análisis y la síntesis de datos por las exigencias del cliente o fabricante. Están formados para elaborar recomendaciones claras y concisas a través de dibujos, modelos, diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas

en inglés) y descripciones verbales. CAD es el uso de programas computacionales para crear representaciones gráficas de objetos físicos ya sea en segunda o tercera dimensión. El software CAD puede ser especializado para usos y aplicaciones específicas. CAD es ampliamente utilizado para la realización de cálculos para determinar una forma y tamaño óptimo para una variedad de productos y aplicaciones de diseño industrial. En diseño industrial y de productos, CAD es utilizado principalmente para la creación de modelos de superficie o sólidos en 3D, o bien, dibujos de componentes físicos basados en vectores 2D. Sin embargo, CAD también se utiliza en los procesos de ingeniería desde el diseño conceptual hasta el layout de productos, a través del análisis de fuerza y análisis dinámico de ensamblajes hasta la definición de métodos de manufactura. Esto le permite al ingeniero analizar interactiva y automáticamente las variantes de diseño, para encontrar el diseño óptimo para manufactura mientras se minimiza el uso de prototipos físicos (SIEMENS, 2018).

### **Análisis por Elementos Finitos**

El método de los elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) es una técnica matemática para configurar y resolver sistemas de ecuaciones diferenciales (o integrales) parciales. En ingeniería, el FEM finitos es utilizado para dividir un sistema en el cual su comportamiento no puede ser predicho usando ecuaciones de forma cerrada en pequeñas piezas, o elementos, cuya solución es conocida o puede ser aproximada. El FEM requiere que la geometría del sistema este definida por un número de puntos en el espacio llamados nodos. Cada nodo tiene un conjunto de grados de libertad (temperatura, desplazamiento,

entre otros) que pueden variar basado en las entradas al sistema. Esos nodos están conectados por elementos que definen las interacciones matemáticas de los grados de libertad. Para algunos elementos, como bigas, la solución de forma cerrada es conocida. Para otros elementos, como elementos continuos, la interacción entre los grados de libertad es estimada por una integración numérica sobre el elemento. Todos los elementos individuales en el modelo están combinados para crear un conjunto de ecuaciones que representan el sistema a ser analizado. Finalmente, estas ecuaciones son resueltas para revelar información útil acerca del comportamiento del sistema. Así como un polígono regular se aproxima a un círculo perfecto a medida que el número de lados se aproxima el infinito, un modelo de elementos finitos se aproxima a una representación perfecta del sistema a medida que el número de elementos se vuelve infinito. Ya que es imposible dividir el sistema en un infinito de elementos, el FEM produce la solución exacta a una aproximación del problema que se desea resolver. Cuando el número de elementos se vuelve lo suficientemente grande, la aproximación se vuelve lo suficientemente buena como para usarla en el análisis de ingeniería. Sin embargo, esto puede aumentar el número de ecuaciones a resolver más allá del punto en el que es práctico resolverlas a mano. Por esta razón el FEM se asocia con programas informáticos como COMSOL® Multiphysics® y ANSYS® que configuran, resuelven y visualizan las soluciones de estos conjuntos de ecuaciones. Estos programas informáticos son capaces de ofrecer distintos tipos de análisis dependiendo del sistema que se esté estudiando. Para cuestiones mecánicas los principales análisis que se realizan son estudios estáticos, dinámicos y de eigenfrecuencias. Un estudio

estático se utiliza para problemas que esperan una solución estacionaria; este tipo de estudio se ocupa del análisis de fuerzas y momentos que actúan sobre sistemas físicos que no experimentan una aceleración, si no que están en equilibrio estático. Cuando se está en equilibrio, la aceleración del sistema es cero y el sistema está en reposo, o su centro de gravedad se mueve a velocidad constante. El análisis dinámico tiene soluciones dependientes del tiempo; este tipo de solución necesita un intervalo de tiempo determinado por el usuario para poder generar la respuesta. Este estudio comprende el análisis de las fuerzas, desplazamientos, velocidades y aceleraciones que aparecen en una estructura o mecanismo como resultado de los desplazamientos y deformaciones que aparecen en la estructura o mecanismo. Un sólido alterado de su posición de reposo tiende a vibrar a ciertas frecuencias denominadas naturales o resonantes cuando éste es excitado. El análisis de frecuencia calcula las frecuencias naturales. Cuando la frecuencia externa coincide a la frecuencia natural de una estructura se llega a una condición que se conoce como resonancia. La resonancia es la tendencia de un sistema físico a oscilar con mayor amplitud en algunas frecuencias, lo que puede provocar fallas en este sistema.(Thompson y Thompson, 2017; Stolarski *et al.*, 2018; Vargas, 2010; Pryor, 2011).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Diseño de la Máquina Expendedora Inversa

El proceso que se siguió para el diseño de la máquina expendedora inversa se muestra en la Figura 6.

**Adecuación del Diseño del triturador.** El Triturador se basó en el diseño que se ofrece en la página web precious plastic (<https://preciousplastic.com>). Una vez obtenidos los archivos para su construcción se procedió a realizar modificaciones y adecuaciones para iniciar con el diseño y las simulaciones de la máquina general. Posteriormente se consultó con la empresa JB Estructuras y Maquinados (<http://www.jbestructuras.com>) sobre las medidas de los materiales del triturador al cual se hizo la recomendación de cambiar las medidas a lo que ellos llaman medidas comerciales. Por lo que se realizaron las modificaciones en las dimensiones de las diferentes piezas que conforman el triturador.

**Diseño general de la máquina expendedora inversa.** Para el diseño de la RVM se buscaron diseños de las máquinas disponibles en el mercado para inspirar el diseño propio. En un principio se tenía pensado que en una sola máquina se aceptaran dos tipos diferentes de plásticos, PET limpio sin etiquetas ni tapadera ni anillo y PET “sucio” con color, etiqueta, anillo y tapadera, para esto la máquina automáticamente seleccionaría o clasificaría el material a reciclar utilizando un solo triturador. Analizando sobre esta última opción se determinó que se necesitarían dos trituradores para evitar la contaminación del plástico limpio ya que en la parte inferior del triturador se tendría una trampa para limitar el tamaño de la hojuela por lo que queda un residuo del plástico anteriormente

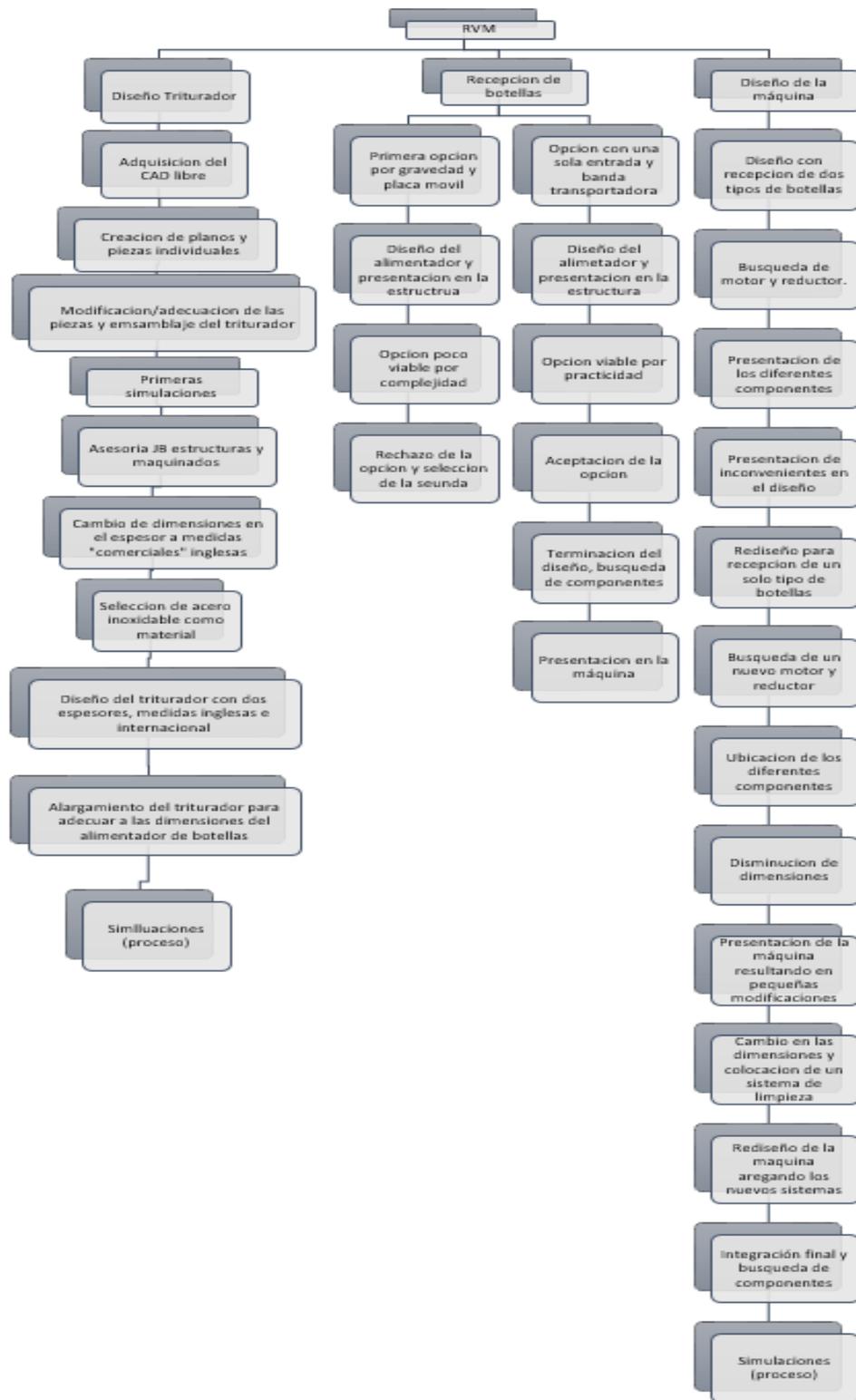


Figura 6. Proceso que se empleó para el diseño de la máquina expendedora inversa.

triturado y aquí es donde podría ocurrir la contaminación. Además de necesitar dos trituradores, para que una sola máquina reciba dos tipos de plástico se necesitaría adecuar el mecanismo del motor y reductor para que se puedan accionar ambos trituradores lo que complicaría el diseño de la máquina. Por lo que, se decidió que la máquina recibiría solo un tipo de plástico y el que no cumpla con las especificaciones necesarias se regresaría al usuario. Si se requiere juntar de dos o más tipos de botellas de PET, con colores y etiquetas, se puede adecuar cada máquina por medio del software. Debido a lo anterior, las dimensiones de la máquina se vieron reducidas en comparación con el diseño inicial. Las dimensiones finales fueron: alto 1.6 m y ancho y espesor 0.9 m. La RVM contará con un sistema de recepción de botellas el cual seleccionará las botellas que recibirá y las que rechazará por medio de un sistema de visión y de sensores. Al inicio de este sistema se tendrá una compuerta la cual se cerrará una vez ingresada la botella para que permitir que ingrese solo una a la vez, serán ingresadas al interior a través de banda transportadora. Una segunda compuerta evitará que la botella pase directo al triturador, esta segunda compuerta se abrirá solo si la botella es aceptada para que ingrese al triturador, de lo contrario, si la botella es rechazada esta segunda compuerta no se abrirá y se regresará la botella a través de la primera compuerta.

**Diseño del sistema de limpieza.** Como las botellas pueden contener residuos de refresco o alguna otra bebida es necesaria la limpieza del triturador, para lo cual se decidió que se instalará un sistema de limpieza a base de agua con boquillas. Dichas boquillas serán alimentadas por una bomba de agua

ubicada en la parte inferior de la máquina, también se ubicarán aquí los depósitos de agua. Para que el agua utilizada en la limpieza no caiga en el depósito se tiene un sistema que capta el agua para dirigirla a otro contenedor y evitar que se mezcle el agua y el PET triturado.

**Selección del motor y reductor de velocidad.** Para la selección de estos componentes se tomaron en cuenta los siguientes aspectos: velocidad de rotación de 60 rpm y que sea un motor monofásico para su facilidad de conexión a la red de electricidad. Siguiendo los anteriores puntos se calculó la potencia que debería tener el motor, así como también las características del reductor de velocidad. Posteriormente se realizó una búsqueda de los componentes.

### **Análisis por Elementos Finitos en la Máquina**

Para la obtención de información sobre el diseño mecánico se realizaron estudios estáticos, dinámicos y de eigenfrecuencias para optimizar el diseño. El procedimiento de modelado se dividió en tres etapas importantes: la primera fue la descripción del modelo para lo cual se debió especificar los parámetros, funciones y variables, dimensión de la geometría y el diseño de la geometría, el segundo paso fue el proceso de la simulación en el cual se especificó el modelo a utilizar, adicionar la física al modelo, seleccionar el tipo de solución y, un paso muy importante, el mallado de la geometría. Finalmente, se visualizaron los resultados lo cual fue el tercer y último paso del procedimiento. En el tercer paso se obtuvieron los resultados de la simulación para posteriormente hacer una interpretación estos últimos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño final de máquina expendedora inversa se muestra en la Figura 7, en el cual se integraron los requerimientos de diseño establecidos. La parte superior de la estructura será destinada para la colocación del triturador, motor, reductor, el sistema de admisión y clasificación de las botellas de PET entre otros dispositivos. La parte media será el depósito del PET triturado y la parte inferior será para la colocación de los depósitos de agua para la limpieza del triturador.

### Triturador

El diseño final del triturador de botellas se muestra en la Figura 8. Las dimensiones del triturador son 206 mm de largo, 135 mm de alto y 210 mm de profundidad. Se utilizarán placas de acero inoxidable de 3/8", de 1/4", de 3/16", de 1/8". También de utilizar una barra de 1 1/4", lamina lisa calibre 20 (1.56 mm de espesor) y ángulo de 3/16" X 1".

### Motor y Reductor de Velocidad

Una vez realizados los cálculos para la obtención de la potencia del motor se encontró que el motor debe tener una potencia de 2 hp y un moto-reductor con una relación de 31:1 (Figura 9). Realizando una búsqueda en internet se encontró en la página web de motoredutores.mx (<http://www.motorreductores.mx/motor-monofasico-2-hp>) un motor con las siguientes características: 1) Motor eléctrico monofásico 2 hp, 2) motor de 4 polos @ 1750 RPM, 3) Armazón 56 de lámina rolada, 4) Flecha 5/8 de pulgada y 5) Brida C. También se encontró en la misma página el reductor con las siguientes características: 1) Modelo RED. T-75 REL 30:1, 2) Reductor de

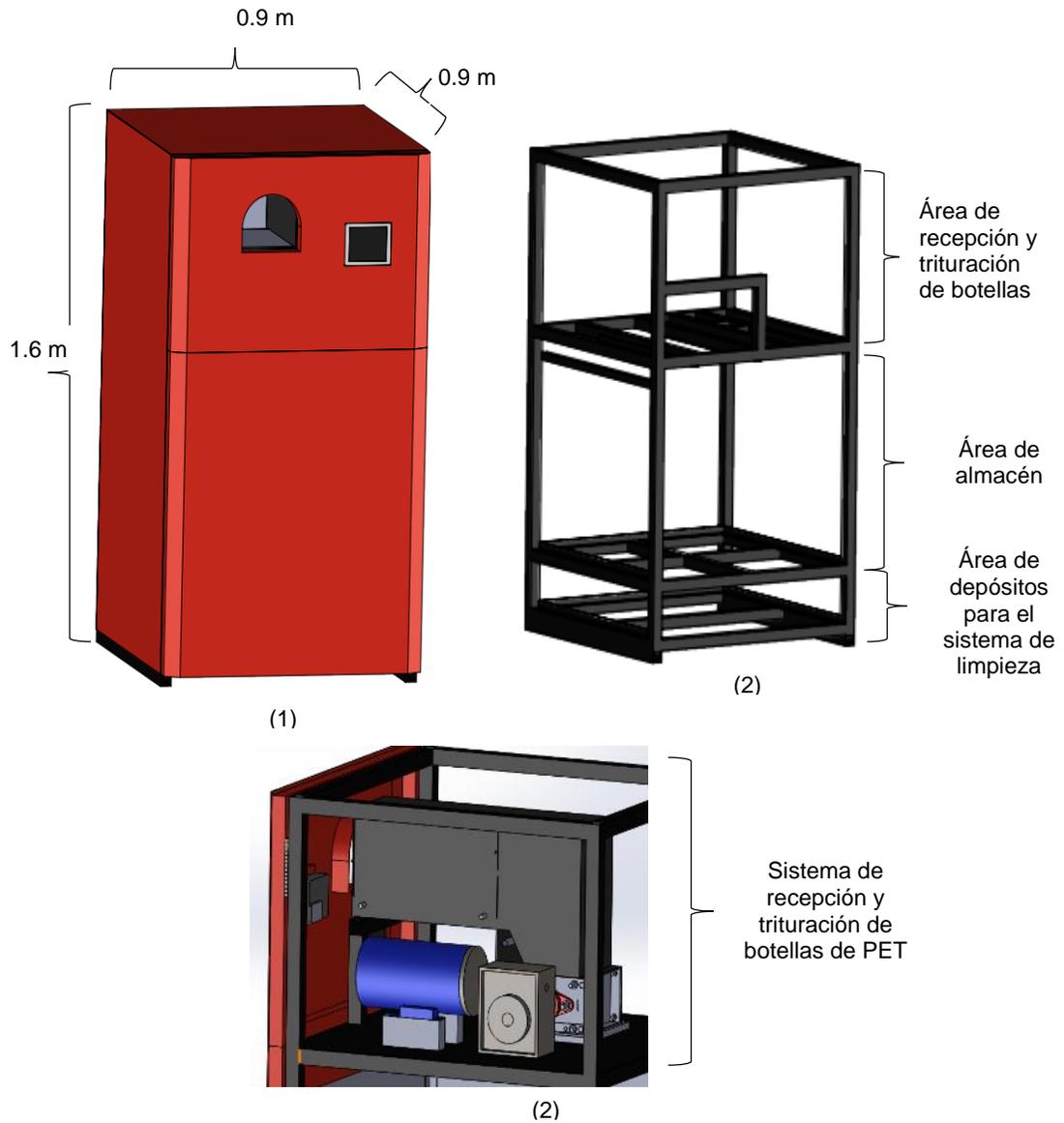


Figura 7. Diseño final de la máquina expendedora inversa. (1) Dimensiones 1.6 m x 0.9 m x 0.9 m, (2) áreas internas de la máquina y (3) sistema de recepción de botellas de PET y trituración de las botellas.

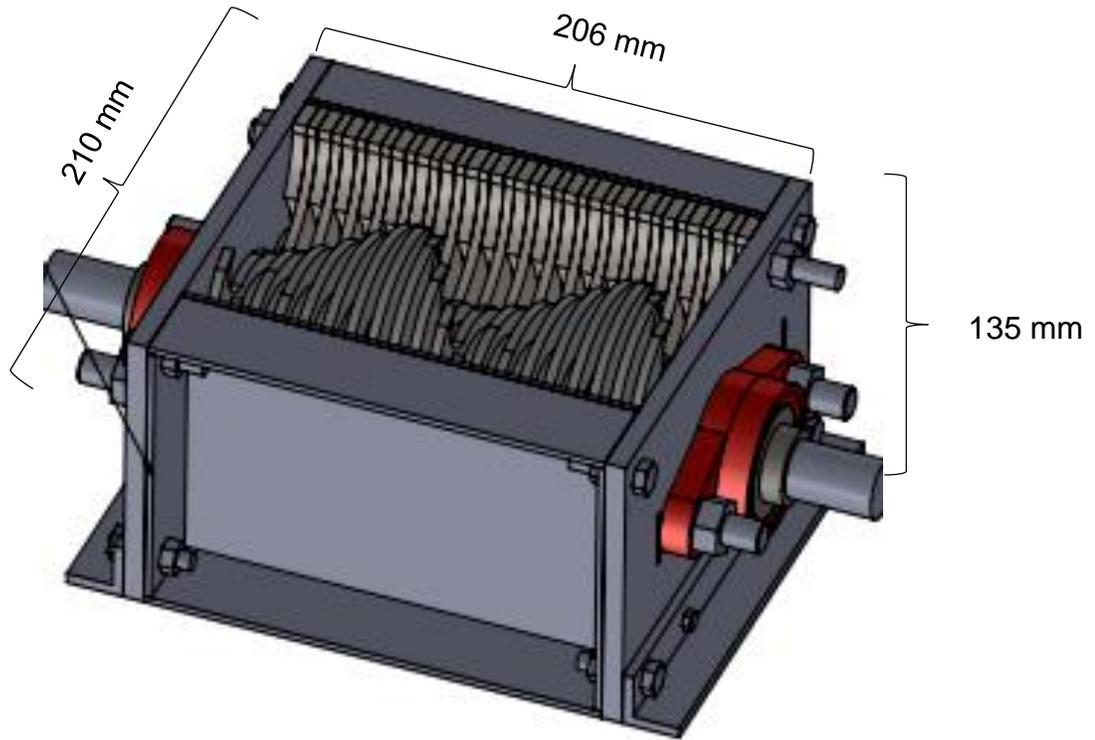


Figura 8. Diseño final del triturador de botellas después de su adecuación. Será elaborado en acero inoxidable.



(1)



(2)

Figura 9. Motor y reductor de Velocidad. (1) Motor de 2 Hp@1750 RPM con flecha de 5/8 y armazon 56 acoplado a (2) reductor de velocidad relacion 30:1 tipo corona sin fin con flecha de entrada de 5/8 y de salida 1 1/4. (<http://www.motorreductores.mx/>).

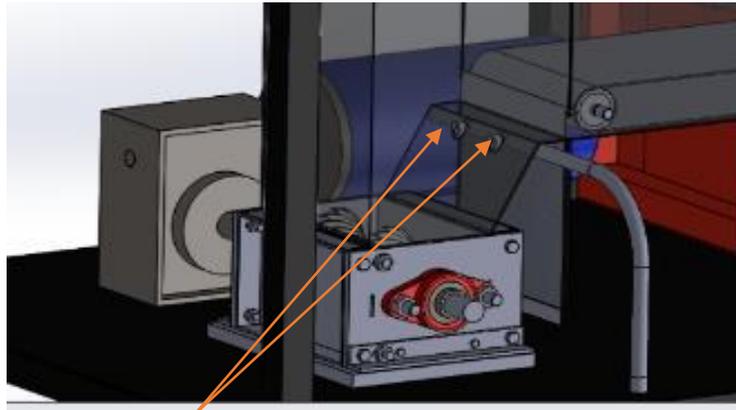
velocidad corona sin fin tamaño 75 relación 30:1, 3) Flecha de salida 1 1/4 de pulgada, 4) Fabricado en aluminio fundido para motor con armazón 56, 5) Flecha de entrada y/o flecha de motor 5/8 de pulgada, 6) Máxima potencia de entrada 2 HP y 7) Máximo torque 2035 pulgadas/libras.

### **Sistema de Limpieza**

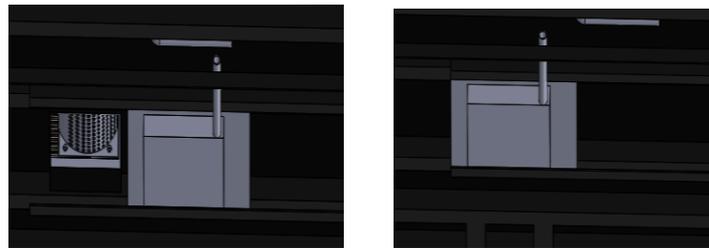
El sistema de limpieza constará de: 1) dos depósitos ubicados en la parte inferior de la máquina, un depósito con agua limpia y el segundo con el agua recuperada de la limpieza del triturador, 2) una bomba para llevar el agua hasta el triturador y elevar la presión de la misma, 3) líneas de conducción del agua, 4) boquillas industriales para limpieza y 5) un captador de agua debajo del triturador para dirigirla hacia el depósito respectivo y evitar la mezcla del agua con el PET triturado ya que traería consecuencias negativas en el PET recuperado. En la Figura 10 se muestra el diseño final del sistema de limpieza del triturador. El funcionamiento del sistema de limpieza se explica en la Figura 11.

### **Control de la Máquina**

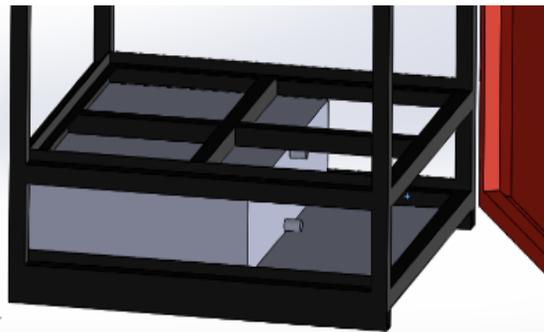
Todos los sistemas antes mencionados serán controlados por un PLC de pantalla táctil de 7" de la marca Proface ubicado en la puerta superior de la máquina, Figura 12. La Programación que llevará el PLC para el funcionamiento general de la máquina se muestra en la Figura 13 y Figura 14.



(1) Ubicación de las boquillas de limpieza



(2) Receptor del agua utilizada en la limpieza del triturador



(3) Depósitos del agua limpia y agua ya utilizada en limpieza

Figura 10. Diseño del sistema de limpieza de la RVM. (1) ubicación de las boquillas para la limpieza del triturador, (2) receptor que se posiciona debajo del triturador para captar el agua utilizada en la limpieza y (3) ubicación de los depósitos de agua en la parte baja de la máquina.

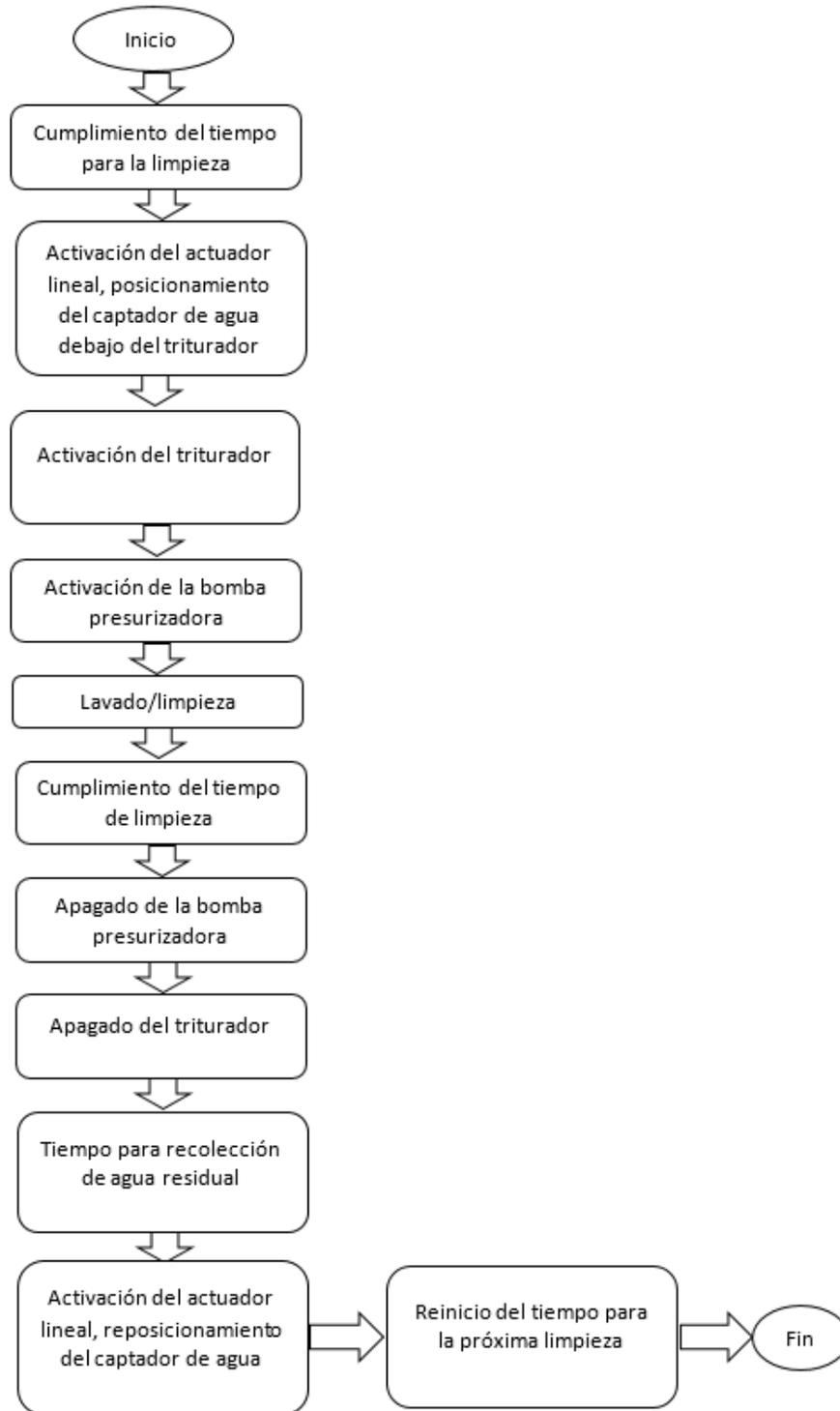


Figura 11. Funcionamiento del proceso de limpieza del triturador de botellas de PET.

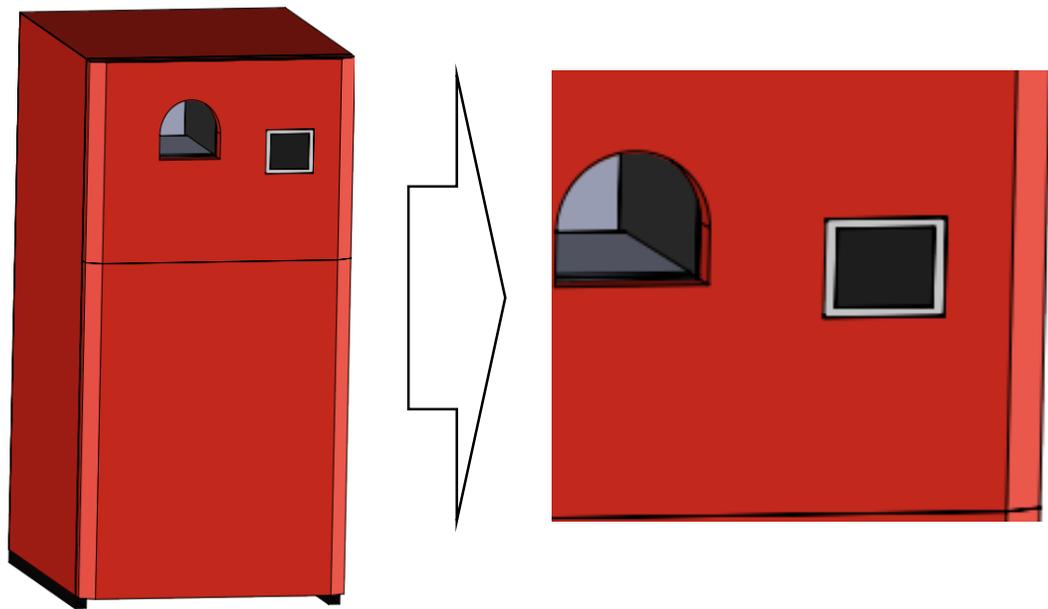


Figura 12. Ubicación del PLC (controlador de la máquina e interfaz con el usuario) en la parte superior derecha.

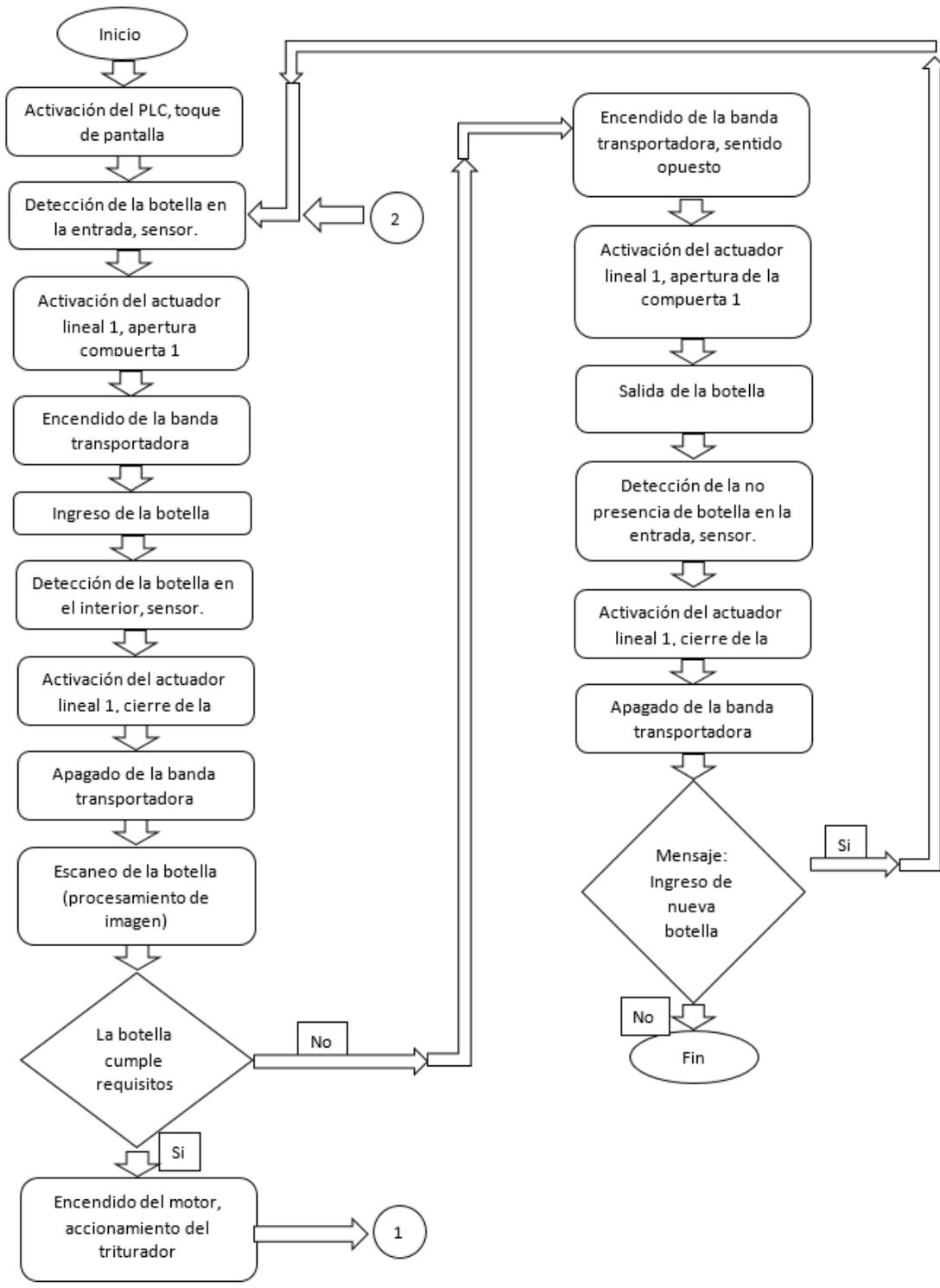


Figura 13. Diagrama de funcionamiento de la RVM, primera parte.

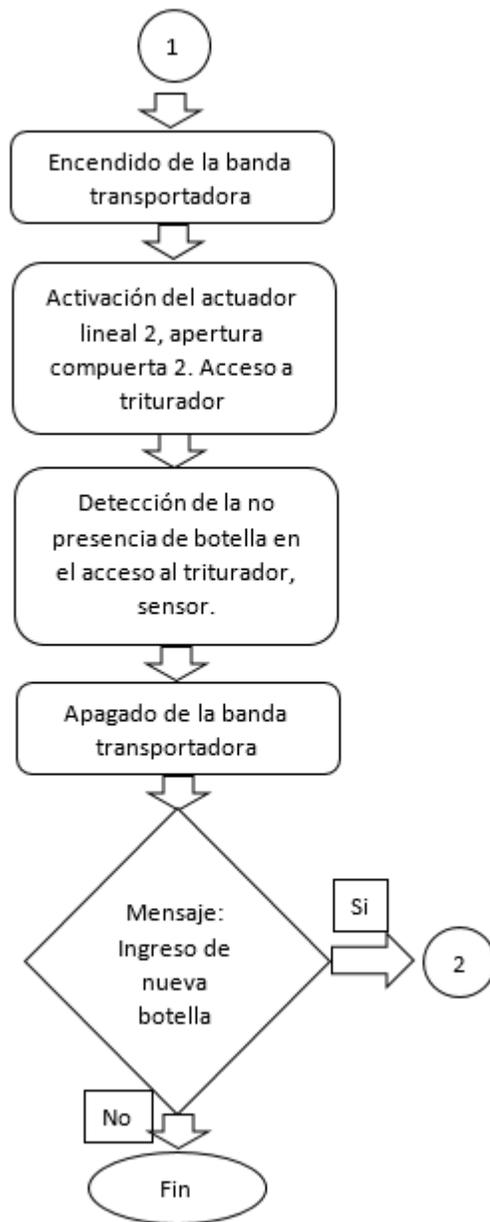


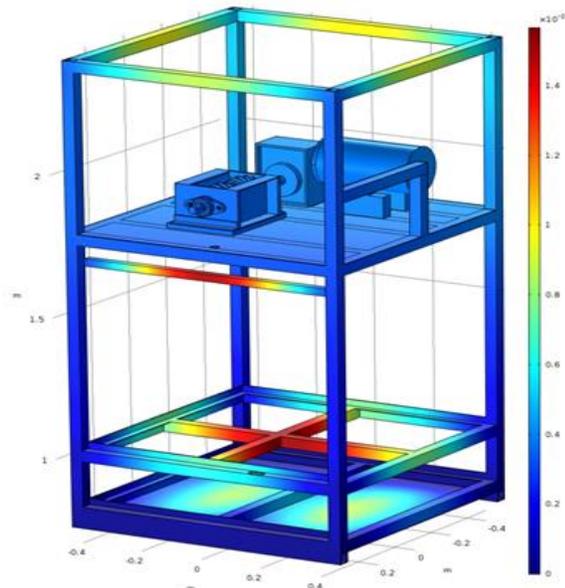
Figura 14. Diagrama de funcionamiento de la RVM, continuación.

## **Resultados del Análisis por Elementos Finitos**

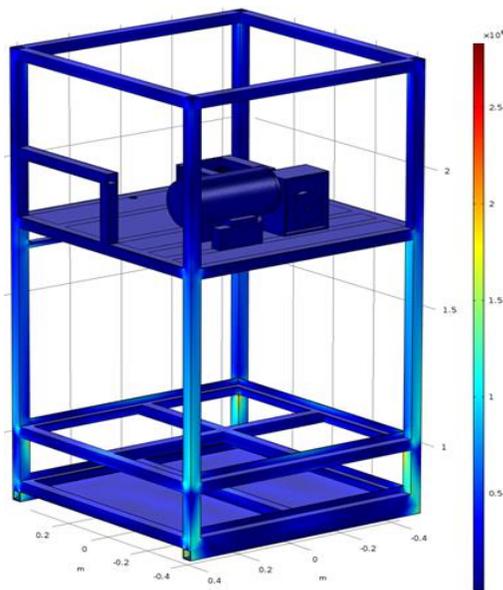
Se realizaron estudios estáticos, dinámicos y de eigenfrecuencias para optimizar el diseño. Un estudio estático se utiliza para problemas que esperan una solución estacionaria; este tipo de estudio se ocupa del análisis de fuerzas y momentos que actúan sobre sistemas físicos que no experimentan una aceleración, sino que están en equilibrio estático. Los resultados de este análisis para la máquina se muestran en la Figura 15, de las cuales podemos deducir que: en el caso de la deformación ésta es pequeña teniendo un valor máximo cercano a  $1.6 \times 10^{-2}$  centímetros, el cual no representa riesgo o problema alguno para la integridad estructural de la máquina expendedora inversa. En el caso de del estrés podemos observar que la máquina no está sometida a un estrés que pudiera conducir a un fallo de la estructura, quedando el valor máximo de estrés por debajo del límite de elasticidad del acero el cual es el material de construcción.

Se realizó un análisis estático para el triturador para verificar su estabilidad estructural y detectar posibles puntos de falla. Los resultados (Figura 16) indican que el punto de posible falla es en el eje del triturador, pero verificando el valor del estrés máximo observamos que está por debajo del límite máximo del acero inoxidable material que será utilizado para su construcción.

El análisis dinámico tiene soluciones dependientes del tiempo, este tipo de solución necesita un intervalo de tiempo determinado por el usuario para poder generar la respuesta. Este estudio comprende el análisis de las fuerzas, desplazamientos, velocidades y aceleraciones que aparecen en una estructura o

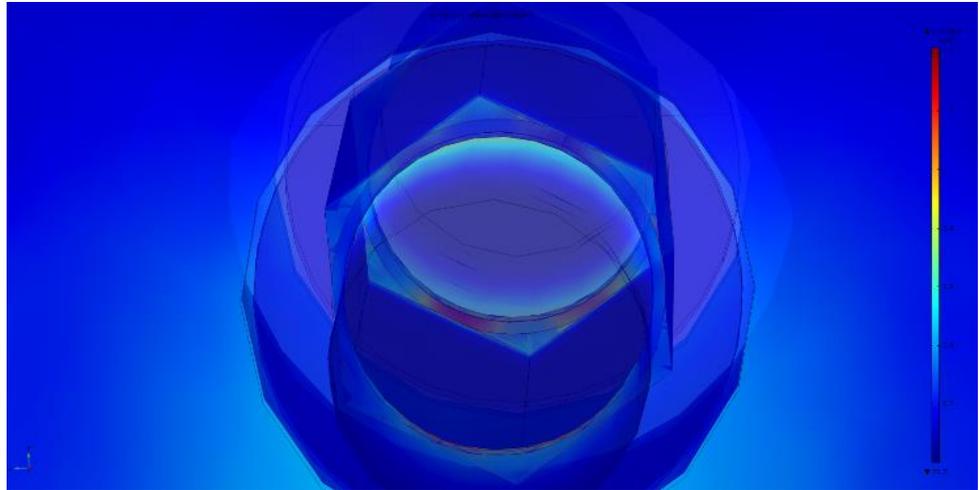


(1)

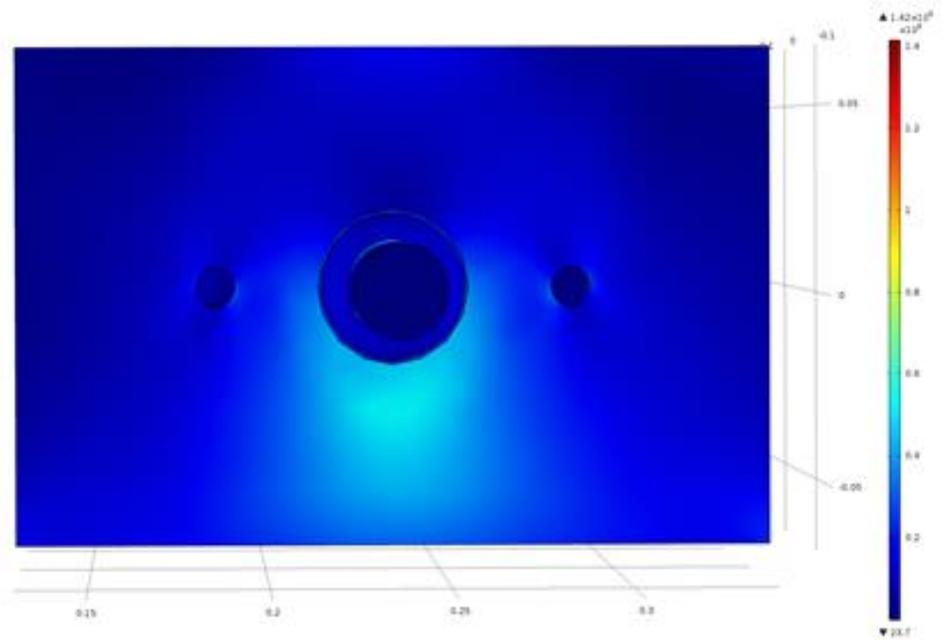


(2)

Figura 15.- Resultados del análisis estático. (1) deformación máxima de  $1.6 \times 10^2$  cm representado en color rojo y (2) estrés máximo en Mega pascales



(1)



(2)

Figura 16. Resultados del análisis estático realizado en el triturador. (1) concentración de estrés en el cambio de geometría en el eje del triturador y (2) estrés en el soporte del eje del triturador. Ambos resultados no representan riesgo de falla en el diseño.

mecanismo como resultado de los desplazamientos y deformaciones que aparecen en la estructura o mecanismo. Las condiciones iniciales para el análisis dinámico (Figura 17) fueron: 1) fuerza de gravedad aplicada a todo el sistema, 2) velocidad de rotación de 60 RPM aplicados en el eje del triturador, 3) material de acero inoxidable para el triturador y acero estructural para el resto del sistema, 4) coeficiente de fricción de 0.35 entre las bases de la máquina y el suelo de concreto. El resultado de la deformación experimentada por la máquina se muestra en la Figura 18, en la cual se puede observar que el valor máximo de la deformación es de 0.11 mm el cual no representa riesgo de falla en el mecanismo de trituración, así como de la máquina en general.

Se realizó una simulación para ver el desplazamiento que experimenta la máquina cuando está en funcionamiento en condiciones normales colocada sobre una base de cemento. Los resultados (Figura 19) muestran que las bases de la máquina, así como el propio peso, son suficientes para mantenerla fija, pero se recomienda una fijación extra para mayor seguridad.

El análisis dinámico para el triturador indicó que el triturador muestra un estrés elevado al arranque y al paro del mismo (Figura 20). Al igual que en los análisis anteriores, el estrés máximo experimentado no representa riesgo de falla en el eje bajo un factor de seguridad de 2.

El análisis de frecuencia calcula las frecuencias naturales. Cuando la frecuencia externa coincide a la frecuencia natural de una estructura se llega a una condición que se conoce como resonancia. La resonancia es la tendencia de un sistema físico a oscilar con mayor amplitud en algunas frecuencias, lo que puede provocar fallas en este sistema.

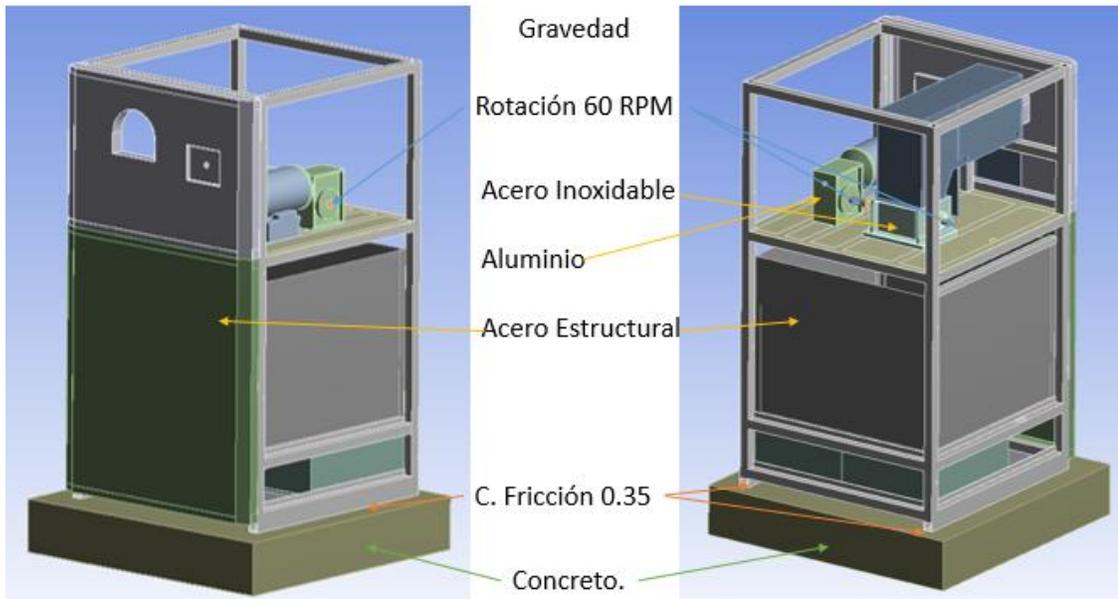


Figura 17. Condiciones iniciales utilizadas en el análisis dinámico. Fuerza de gravedad, velocidad de rotación del triturador de 60 RPM, material de acero inoxidable para el triturador y acero estructural para el resto del sistema, coeficiente de fricción de 0.35 entre las bases de la máquina y el suelo de concreto.

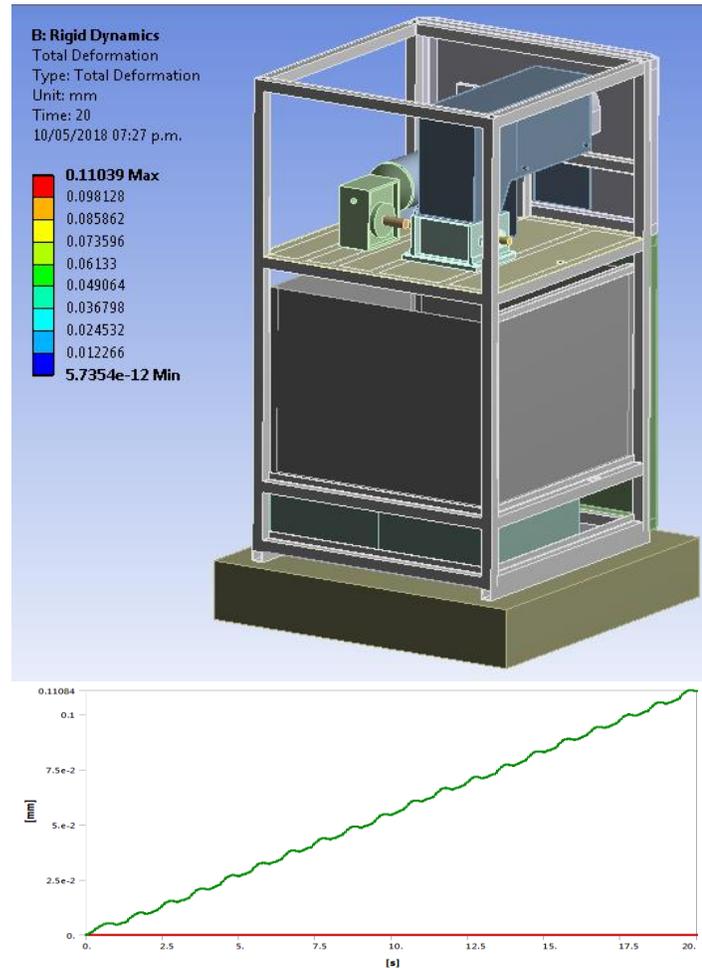
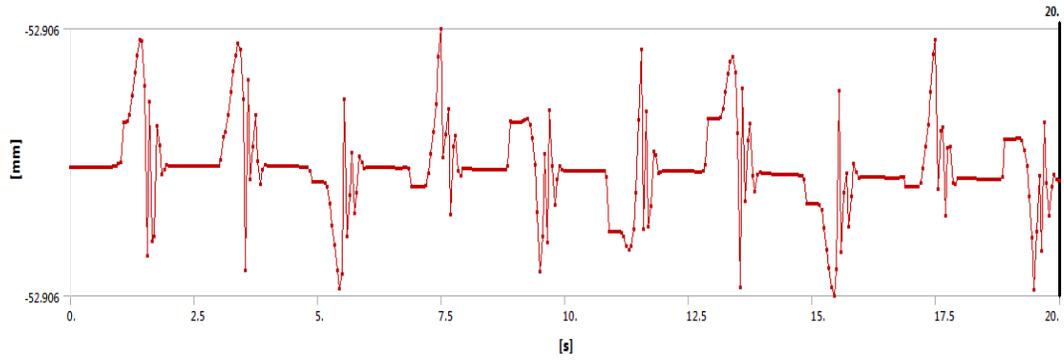
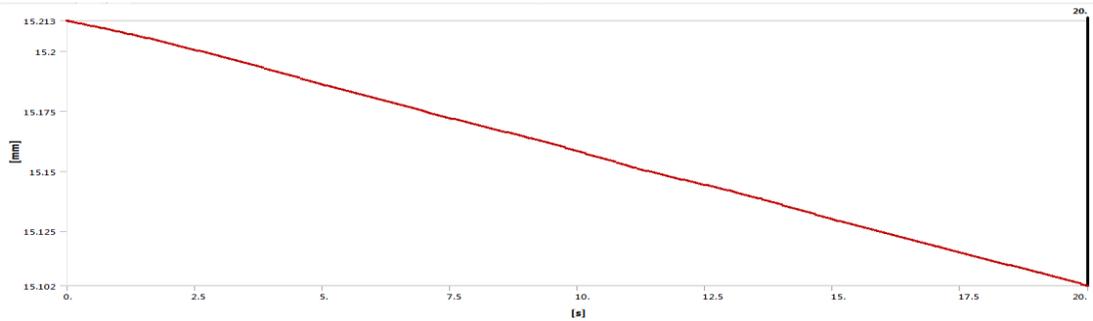


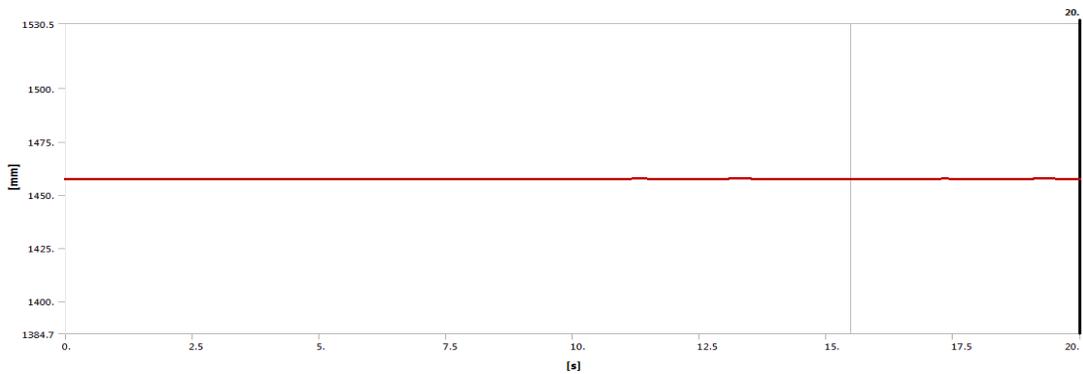
Figura 18. Deformación experimentada por el análisis dinámico. El valor fue de 0.11 mm, no representa riesgo de falla.



(1)



(2)



(3)

Figura 19. Desplazamiento experimentado en la máquina bajo condiciones normales de funcionamiento. (1) coordenada x con movimiento oscilatorio sobre la base, (2) coordenada y con un ligero desplazamiento en esa dirección y (3) coordenada z sin desplazamiento.

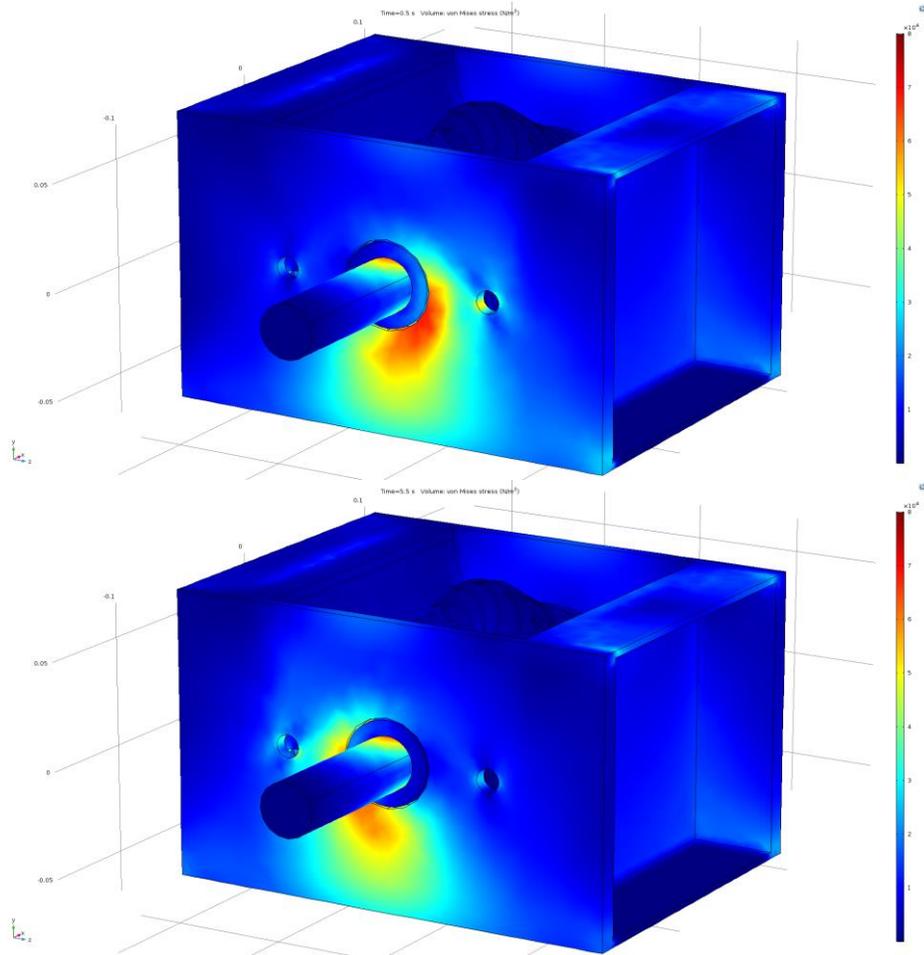


Figura 20. Estrés experimentado en el triturador cuando se le realiza el análisis dinámico, no representa un riesgo en el funcionamiento del triturador.

Para el caso del triturador, los resultados de las eigenfrecuencias se muestran en el Cuadro1 y Figura 21. Los valores de velocidad para que el triturador entre en resonancia están por encima de la velocidad de funcionamiento del triturador.

### **Planos de la Máquina Expendedora Inversa**

Una vez realizado el análisis por elementos finitos para la máquina se obtuvieron los planos de construcción de cada uno de los componentes En la Figura 22 y Cuadro 2 se muestra la lista de componentes del triturador. De cada componente de la lista se obtuvo el plano individual para su fabricación. Los planos a detalle no se muestran por cuestiones de derechos de propiedad. Por último, En la Figura 23 podemos observar el plano general de la máquina expendedora inversa, de ésta también se obtuvieron los planos de cada componente.

Cuadro 1.- Eigenfrecuencias que representan fallas en el triturador.

Eigenfrecuencias	
Valor	Unidad
88782	RPM
123690	RPM
129800	RPM
132420	RPM
134810	RPM
137690	RPM
153090	RPM
175870	RPM
190030	RPM
200900	RPM

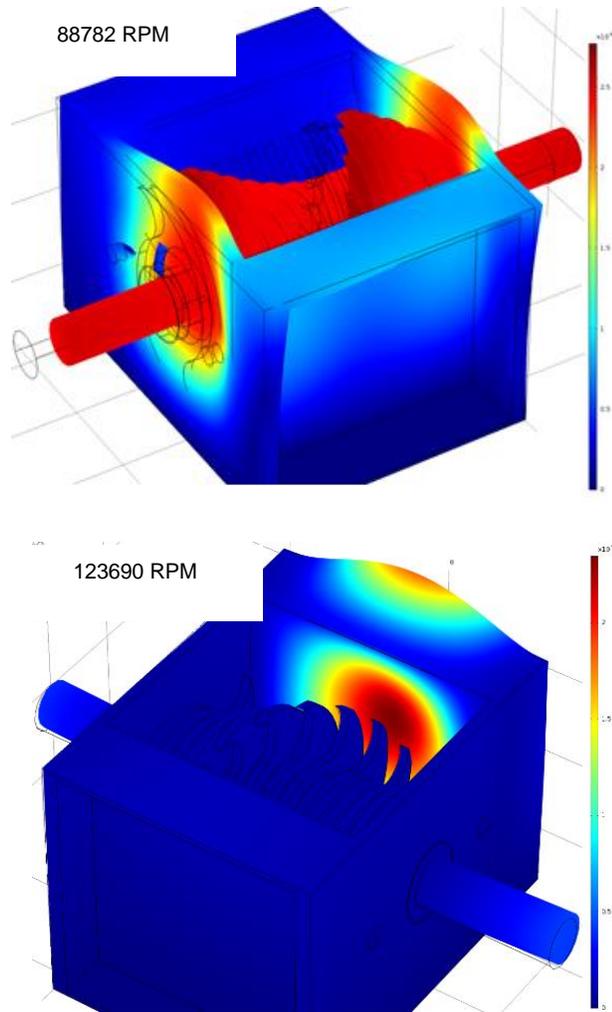


Figura 21. Primeras dos eigenfrecuencias que provocan fallas en el triturador.

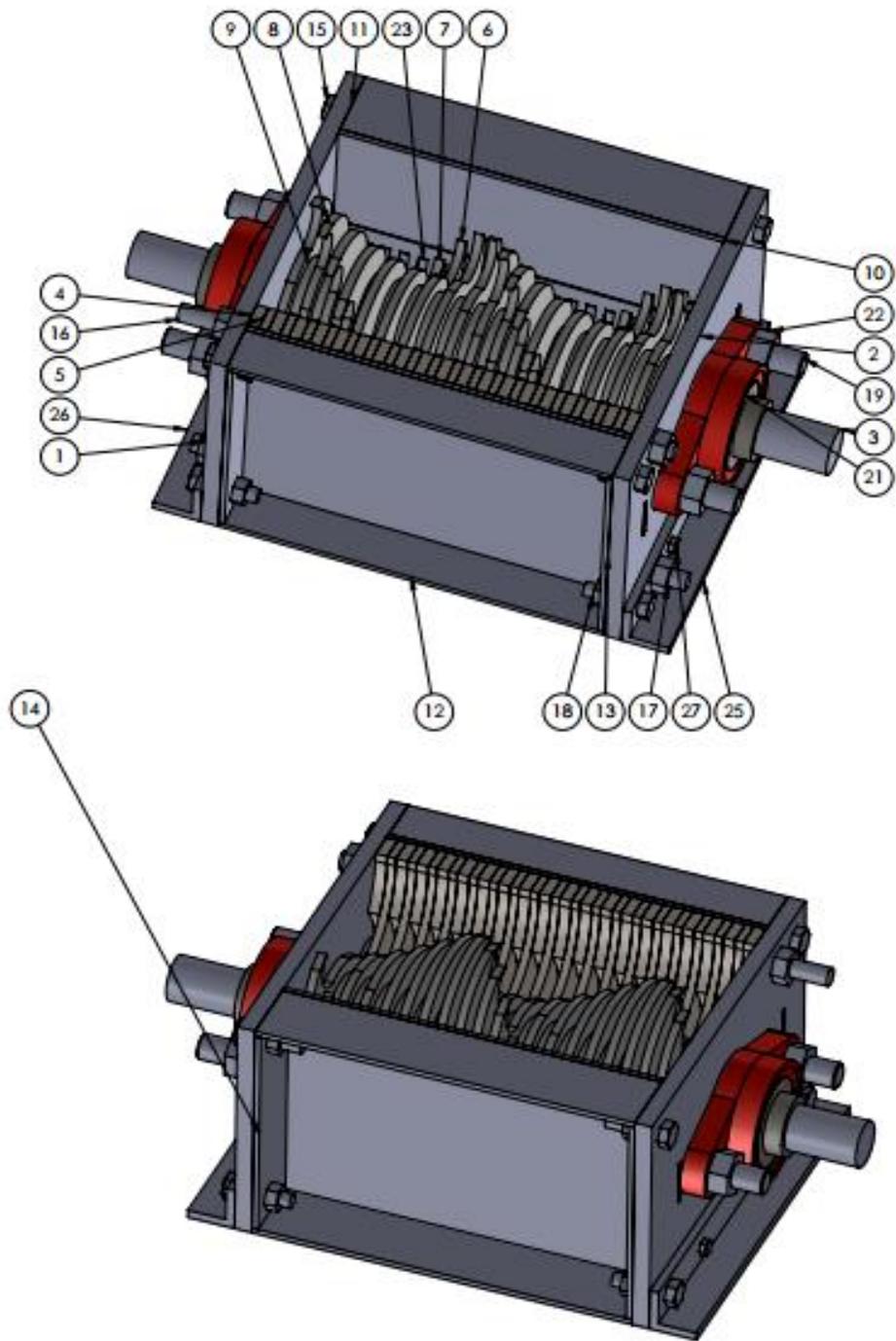


Figura 22. Desglose y numeración de las diferentes piezas del triturador de botellas.

Cuadro 2. Listado de piezas y materiales que forman el triturador de botellas.

Elemento	Pieza	Material	Cantidad
1	Placa Soporte Eje	Placa Acero 3/8"	1
2	Placa Soporte Eje 2	Placa Acero 3/8"	1
3	Eje Triturador Largo	Barra Acero Inoxidable 1/4"	1
4	Contra Navaja	Placa Acero 1/4"	19
5	Contra Espaciador Navajas	Placa Acero 3/16"	18
6	Navaja P1	Placa Acero 3/16"	7
7	Navaja P2	Placa Acero 3/16"	6
8	Navaja P3	Placa Acero 3/16"	6
9	Espaciador Entre Navajas	Placa 1/4"	18
10	Placa Espaciador	Placa 1/8"	2
11	Espaciador 20 cm Ancho	Placa 1/8"	2
12	Espaciador 20cm	Placa 1/8"	2
13	Placa Lateral	Placa 1/8"	2
14	Placa Lateral 2	Placa 1/8"	2
15	Tornillo Cabeza Hexagonal M8	Acero Inoxidable	8
16	Barra Roscada M10	Acero Inoxidable	2
17	Tuerca M10	Acero Inoxidable	4
18	Tuerca M8	Acero Inoxidable	8
19	Tornillo Cabeza Plana M14	Acero Inoxidable	4
20	Espaciador Chumacera a Navaja	Acero Inoxidable	2
21	Chumacera	Acero Inoxidable	2
22	Tuerca M14	Acero Inoxidable	4
23	Criba Larga	Lamina Lisa Acero Inoxidable Calibre 20	1
24	Soporte Criba	Placa Acero 1/8"	2
25	Soporte Triturador	Angulo Acero 3/16" x 1"	1
26	Soporte Triturador 2	Angulo Acero 3/16" x 1"	1
27	Tornillo Cabeza Hexagonal M5	Acero Inoxidable	4
28	Tuerca M5	Acero Inoxidable	4



Figura 23.- Plano general de la máquina expendedora inversa y sus principales componentes.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Los diferentes análisis que se realizaron a la máquina nos muestran que las adecuaciones hechas al triturador, el diseño del resto de la máquina y selección de los materiales de fabricación nos dan como resultado una RVM que funcionará correctamente bajo las condiciones de trabajo en las cuales se hicieron los análisis y para las que fue diseñada. Además, ninguna de sus piezas o mecanismos sufrirá falla estructural alguna.

En cuanto al diseño mecánico de la máquina es recomendable utilizar las nuevas herramientas de diseño y de análisis de elementos finitos para tener una aproximación del funcionamiento del mecanismo diseñado y así ahorrar tiempo y dinero en la fabricación de la máquina. Pero además de los resultados de los análisis también es importante tomar en cuenta la experiencia del centro de maquinado en el cual se fabricará la máquina para obtener un producto de buena calidad.

La implementación de las máquinas expendedoras inversas es una manera de incentivar a las personas a reciclar sus residuos de plástico PET, pero además de la implementación de la máquina es necesario llevar paralelamente la puesta en marcha de políticas y métodos de retribución para que ayuden a mejorar las tasas de reciclaje de PET en México, lo que generaría un impacto positivo en la conciencia de la reutilización y reciclaje de los residuos plásticos PET.

## LITERATURA CITADA

- Aguilar, G. E., A. J. Campos Rivera, A. P. Avila Forcada, S. Bjön Rüd, y S. Flores Martínez. 2013. Estudio de Análisis de Ciclo Vida (ACV) del manejo de envases de bebidas de polietilen tereftalato (PET) en la fase de pos-consumo. 1:57. Available from: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/sqre/2013\\_acv\\_pet.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/sqre/2013_acv_pet.pdf).
- Alcántara V. 2015. Presentan nuevo modelo de máquinas recicladoras en México. En <http://www.plastico.com/temas/Presentan-nuevo-modelo-de-maquinas-recicladoras-en-Mexico+107750>. Consultado el 4 de Diciembre de 2018.
- Al-Sabagh, A. M., F. Z. Yehia, G. Eshaq, A. M. Rabie, y A. E. ElMetwally. 2016. Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*. 25:53–64.
- Al-Salem, S. M., P. Lettieri, y J. Baeyens. 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management* 29:2625–2643.
- Amano, M. 2004. PET Bottle System in Sweden and Japan: an Integrated Analysis from a Life-Cycle Perspective. Master Thesis. Lund University International Master's Programme. Lund, Sweden.
- Ayeleru, O. O., F. N. Okonta, y F. Ntuli. 2018. Municipal solid waste generation and characterization in the City of Johannesburg: A pathway for the implementation of zero waste. *Waste Management*. 79:87–97.

- Coelho, T. M., R. Castro, y J. A. Gobbo. 2011. PET containers in Brazil: Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 55:291–299.
- Guerrero, L. A., G. Maas, y W. Hogland. 2013. Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*. 33:220–232.
- ECOCE. 2018. Cifras y Estadísticas. En <http://www.ecoce.mx/cifras.php>. Consultado el 4 de Diciembre de 2018.
- Gundupalli, S. P., S. Hait, y A. Thakur. 2017. A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste Management*. 60:56–74.
- Hampson, A. A., B. M. Hampson, S. R. Aldrich, y L. J. Robie. 1994. United States Patent 4,653,627. II:5–9.
- Hunt, E. J., C. Zhang, N. Anzalone, y J. M. Pearce. 2015. Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. *Resources, Conservation and Recycling*. 97:24–30.
- Korucu, M. K., Ö. Kaplan, O. Büyük, and M. K. Güllü. 2016. An investigation of the usability of sound recognition for source separation of packaging wastes in reverse vending machines. *Waste Management*. 56:46–52.
- Matete, N., y C. Trois. 2008. Towards Zero Waste in emerging countries - A South African experience. *Waste Management*. 28:1480–1492.

NAPCOR. 2018. Report on Postconsumer PET Container Recycling Activity. En <https://napcor.com/reports-resources/>. Consultado el 26 de Noviembre de 2018.

Oromiehie, A., y A. Mamizadeh. 2004. Recycling PET beverage bottles and improving properties. *Polymer International*. 53:728–732.

Papong, S., P. Malakul, R. Trungkavashirakun, P. Wenunun, T. Chom-In, M. Nithitanakul, y E. Sarobol. 2014. Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*. 65:539–550.

Pivnenko, K., M. K. Eriksen, J. A. Martín-Fernández, E. Eriksson, y T. F. Astrup. 2016. Recycling of plastic waste: Presence of phthalates in plastics from households and industry. *Waste Management*. 54:44–52.

Pryor, R. W. 2011. *Multiphysics Modeling using COMSOL®: A First Principles Approach*. 1<sup>st</sup> Edition. JONES AND BERTLETT PUBLISHERS

Ragaert, K., L. Delva, and K. Van Geem. 2017. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*. 69:24–58.

Reverse Vending. 2018. About Reverse Vending. En [http://www.reversevending.co.uk/About\\_Reverse\\_Vending.html](http://www.reversevending.co.uk/About_Reverse_Vending.html). Consultado el 4 de Diciembre de 2018.

da Rosa, A., C. Michelin, y R. Campomanes. 2011. Reciclaje de PET: Evaluación de la eficiencia de separación del contaminante PVC. *Revista ECIPERÚ*.

8:8–14.

Sabitha, S. 2014. Implementation of Reverse Vending Machine Based on FPGA. International Journal of Emerging Technologies in Computational Applied Sciences. 265–271.

SIEMENS. 2018. Diseño asistido por ordenador (CAD). En <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>. Consultado el 15 Noviembre 2016.

Simon, B., M. Ben Amor, y R. Földényi. 2016. Life cycle impact assessment of beverage packaging systems: Focus on the collection of post-consumer bottles. Journal of Cleaner Production. 112:238–248.

Singh, N., D. Hui, R. Singh, I. P. S. Ahuja, L. Feo, y F. Fraternali. 2017. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. Composites Part B: Engineering. 115:409–422.

Sinha, V., M. R. Patel, y J. V. Patel. 2010. Pet waste management by chemical recycling: A review. Journal of Polymers Environment. 18:8–25.

Song, Q., J. Li, and X. Zeng. 2015. Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. Journal of Cleaner Production 104:199–210.

Stolarski, T., Y. Nakasone y S. Yoshimoto. 2018. ENGINEERING ANALYSIS WITH ANSYS SOFTWARE. 2<sup>nd</sup> Edition. Butterworth-Heinemann. United States.

- Thompson, M. K. y J.M. Thompson. 2017. ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis. 1<sup>st</sup> ed. Butterworth-Heinemann. United States.
- Tomari, R., A. A. Kadir, W. N. W. Zakaria, M. F. Zakaria, M. H. A. Wahab, y M. H. Jabbar. 2017. Development of Reverse Vending Machine (RVM) Framework for Implementation to a Standard Recycle Bin. *Procedia Computer Science*. 105:75–80.
- Vargas , J. M. 2010. Calculo de Estructuras Utilizando Elemento Finito con Computo en Paralelo. Tesis de Maestría en Ciencias con Especialidad en Computación y Matemáticas Industriales. Centro de Investigación en Matemáticas A. C. Guanajuato, Guanajuato. México.
- Wang, C. Q., H. Wang, y Y. N. Liu. 2015. Separation of polyethylene terephthalate from municipal waste plastics by froth flotation for recycling industry. *Waste Management*. 35:42–47.
- Webb, H. K., J. Arnott, R. J. Crawford, y E. P. Ivanova. 2013. Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate). *Polymers*. 5:1–18.
- Welle, F. 2011. Twenty years of PET bottle to bottle recycling - An overview. *Resources, Conservation and Recycling*. 55:865–875.
- Welle, F. 2013. Is PET bottle-to-bottle recycling safe? Evaluation of post-consumer recycling processes according to the EFSA guidelines. *Resources, Conservation and Recycling*. 73:41–45.

Welle, F. 2016. Investigation into cross-contamination during cleaning efficiency testing in PET recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 112:65–72.

Zhang, H., y Z. G. Wen. 2014. The consumption and recycling collection system of PET bottles: A case study of Beijing, China. *Waste Management*. 34:987–998.