

# Análisis numérico del mecanismo de una trituradora de PET mediante el método de elementos finitos



## Colaboración

Miguel Alberto Domínguez Gurría; Ulises Augusto Jaen Rendón, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Angelo Garibaldi Rodríguez, Centro de Enseñanza Técnica y Superior; Vladimir Zagoya Juárez, Tecnológico Nacional de México / Campus Misantla

Fecha de recepción: 11 de agosto de 2020

Fecha de aceptación: 11 de marzo del 2021

**RESUMEN:** Se presenta un análisis de los elementos mecánicos que constituyen una trituradora de plástico PET en donde se considera la influencia de la fuerza de oposición al corte del plástico en las cuchillas de corte y el eje rotatorio. El objetivo se centra en corroborar la factibilidad del uso de un eje rotatorio hexagonal junto con las cuchillas de corte y que no se presentarán fallas estructurales en el sistema. El estudio se realiza mediante experimentación numérica con un software de elemento finito considerando los elementos del sistema de acero general. Los resultados muestran los esfuerzos presentes en los elementos de corte y el eje hexagonal debido al giro y fuerzas resistivas generadas por el PET, por lo que de acuerdo a los resultados obtenidos los elementos cuentan con un factor de seguridad de 1.5 por lo que se comprueba que las piezas no fallaran bajo condiciones de trabajo normales.

**PALABRAS CLAVE:** Análisis Numérico, Elemento Finito, Modelado, PET, Trituradora.

**ABSTRACT:** The present analysis of the mechanical elements that constitute a PET shredder, in which the influence of oppositional cutting force on the cutting blades and the rotating shaft. The main focus is to validate the usage of an hexagonal shaft in conjunction with the cutting blades without structural damage to the system. The study is done through numerical experimentation with a finite element software using general steel for the system elements. Static and dynamic conditions are considered for the system, the conditions are based on the literature. The results show stress on the cutting elements and on the hexagonal shaft due to rotation and opposing forces from PET. The results obtained take into account a safety factor of 1.5, with this results, the proper function of the machine elements is assured.

**KEYWORDS:** Numerical análisis, Finite Element, Modeling, PET, Crusher.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento del consumo de materiales poliméricos ha crecido de manera desmedida en las últimas décadas debido a que por sus propiedades físicas, químicas y mecánicas han sustituido otros materiales en bastantes aplicaciones, como lo son los vidrios en envases de bebidas, textiles, embalajes entre otros.

De acuerdo con la Organización de Naciones Unidas, la generación de basura en el mundo por cada habitante es en promedio de un kilogramo de desechos diariamente, considerando que la población mundial llega a 6 mil 500 millones de personas, esto significa que diariamente se produce 6 mil 500 millones de toneladas de basura en promedio en el mundo. México genera más de 44 millones de toneladas anuales de residuos y se espera que este número alcance 65 millones para el año 2030 [1].

En la Figura 1 se muestra el consumo nacional de plásticos, siendo la industria del envase predominante con un 48%, mientras que el sector automotriz consume solo un 4%, lo cual representa una muy fuerte área de oportunidad para reinsertar a la cadena de valor los materiales recuperados del desperdicio de la industria del envase.

Niveles de consumo por área

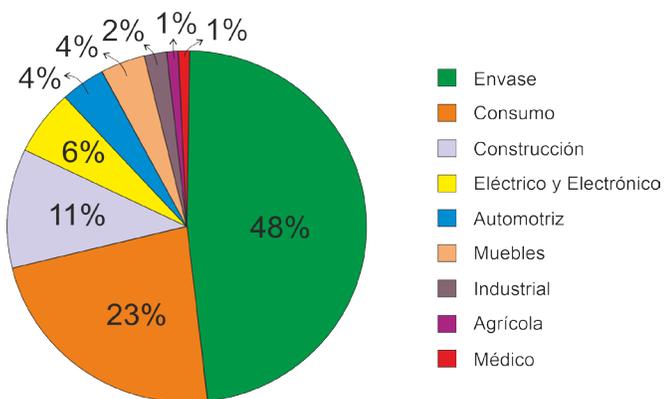


Figura 1.- Consumo porcentual de plásticos en México por sector [2].

El ciclo de vida en los polímeros se ilustra en la Figura 2, donde inicia con el proceso para obtener materia prima, ya sea a partir de material virgen o reciclado, para después ser transformado mediante diferentes procesos, como lo son extrusión, moldeo por inyección entre otros; esto aplicado solo en los termoplásticos debido a su fundición por temperatura. Las propiedades mecánicas de un material al pasar por un proceso de reciclado disminuyen entre el 5 y 10%, esto puede modificarse con la utilización de ciertos aditivos [4].

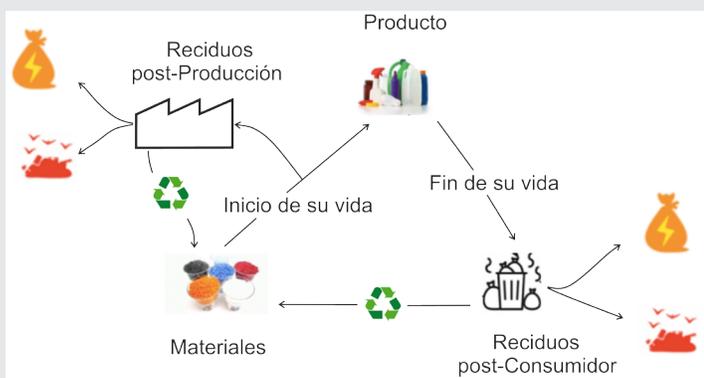


Figura 2.- Ciclo de vida en los polímeros [3].

La reducción en el consumo de estos materiales es una estrategia que se ha puesto en marcha a nivel mundial, sin embargo, por sus propiedades es conveniente plantearse como una estrategia contra la contaminación ambiental el aprovechamiento de los envases PET, así como de otros elementos reciclables. El reciclado de materiales plásticos es una actividad rentable, encaminada a la utilización del material reprocesado en nuevos productos.

El presente artículo consiste en establecer la viabilidad en la construcción, en el funcionamiento y resistencia de los componentes de una máquina trituradora de PET mediante el método de los elementos finitos, con la fi-

nalidad de facilitar el reciclado de plásticos y reintegrarlos a la cadena de valor.

## Reciclaje

El reciclaje, es un proceso mecánico, químico o biológico que produce nuevos materiales, productos o energía a través de materiales usados y desechados [7]. El plástico es uno de los residuos que más tardan en degradarse, por ende, es importante reciclar y reutilizar este tipo de material, debido a su alta demanda. El reciclaje de plásticos puede llevarse a cabo de manera mecánica o química.

## Reciclaje mecánico

El reciclaje mecánico consiste en un proceso relativamente sencillo contando con 4 etapas principalmente, estas son:

- Recolección del material.
- Lavado y limpieza primaria.
- Clasificación.
- Trituración.

La recolección del material tiene como estrategia la concientización de las masas para facilitar la actividad, esto daría una ventaja y mayor porcentaje de recolección de residuos [5].

La clasificación o sorteo consiste en separar los elementos por el tipo de resina que se ha usado para su fabricación, posteriormente se eliminan las impurezas que lleven, como etiquetas o residuos. Para lograr separarlos según su tipo, existe un sistema de clasificación y codificación de plásticos, lo cual facilita su recuperación y sorteo para poder realizar el reciclado. La Tabla 1 muestra el código de identificación plástico.

Tabla 1.- Código de la identificación plástico para su gestión y reciclado [6].

Símbolo	Tipo de plástico	Abreviatura
	Polietilentereftalato	PET o PETE
	Polietileno de alta densidad	PEAD o HDPE
	Poliloro de vinilo	PVC
	Polietileno de baja densidad	PEBD o LDPE
	Polipropileno	PP
	Poliestireno	PS
	Otros plásticos	Otros

**Botellas de PET**

El PET o PETE, indicado con el número 1, es un tipo de material muy utilizado debido a que con él se elaboran botellas de agua, refrescos, jugos, incluso envases de alimentos, el cual es un material transparente e impide la entrada de oxígeno.

Dentro de las botellas analizadas se consideraron las de bebidas embotellada en sus presentaciones de 355ml, 500ml, 600ml y 2lt como se observa en la Figura 3, debido a que son las de mayor demanda en el mercado [8].

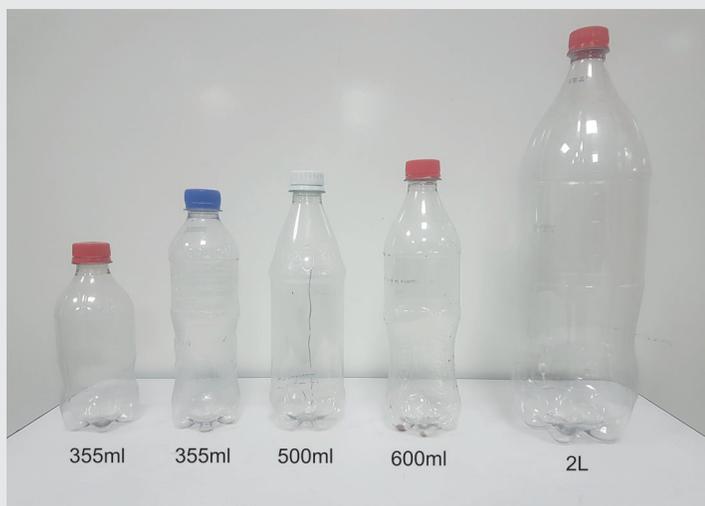


Figura 3.- Tamaños de botellas de PET

Las dimensiones de las botellas en sus diferentes presentaciones se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.- Dimensiones de botellas comerciales de PET.

Volumen	Diámetro	Alto
335ml	50.6mm	180mm
600ml	67.4mm	250mm
1L	79.4mm	250mm
2L	100.04mm	350mm

El dimensionamiento de las botellas de PET es esencial, debido a que a partir de estas mediciones se determinan las dimensiones de la flecha y de las cuchillas.

Existen maquinas trituradoras de PET en el mercado, las cuales presentan diversas ventajas y desventajas como el uso de geo-localizadores [9], diversas geometrías en las cuchillas de corte [10] así como en el

eje donde se montan [11], sin embargo, el análisis de los elementos mecánicos, así como la selección del material en ocasiones no es tomado en cuenta a la hora de ser diseñadas las máquinas trituradoras y sus elementos.

**MATERIAL Y MÉTODOS**

**Elementos de trituración**

Las dimensiones de los elementos de corte fueron seleccionadas de acuerdo a las botellas de PET de mayor demanda, siendo la de mayor tamaño como la elegida como referencia de las dimensiones que tendrían los elementos, la cantidad de cuchillas y la longitud de la flecha se derivaron de estas medidas, el espesor de los separadores es el encargado de dar el tamaño de la oblea de PET.

El ensamble de los elementos de corte está conformado por 3 elementos diferentes, que son: las cuchillas de corte (2), los elementos separación (3) y el eje (1) sobre el cual están montados los otros elementos como se observa en la Figura 4.

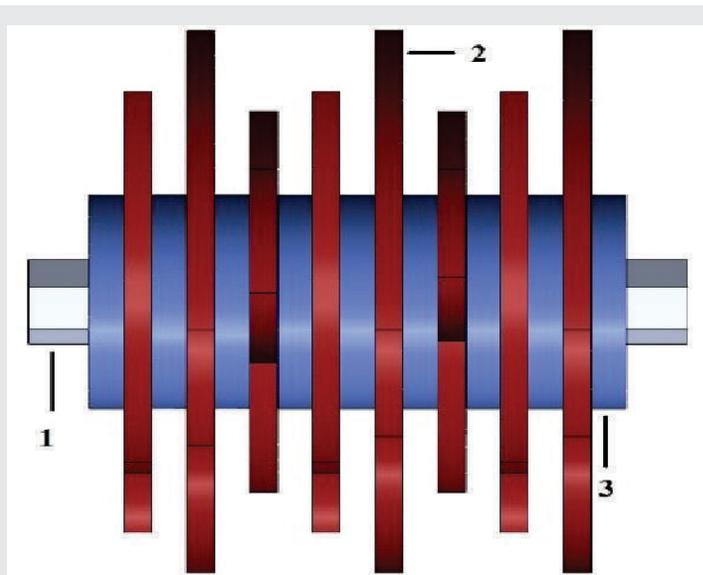


Figura 4. Medidas volumétricas estándar utilizadas.

La propuesta de las cuchillas de corte mostrada en la Figura 5, tiene un espesor de 3/16 de pulgada y entre cada cuchilla, es montado un separador cuyo espesor es de 1/4 de pulgada, dando ese tamaño a el PET ya cortado.

El montaje de las cuchillas en el respectivo eje, tiene un acomodo con una diferencia de 60° como se presenta en la Figura 6, debido a su geometría hexagonal se hace más sencillo el montaje de las piezas así la como fijación de las cuchillas y separadores reduciendo a su vez la cantidad de elementos de fijación (tornillería), debido a que no es necesario fijar pieza a pieza, logrando la fijación de los elementos con un tornillo al inicio y al final del ensamble.

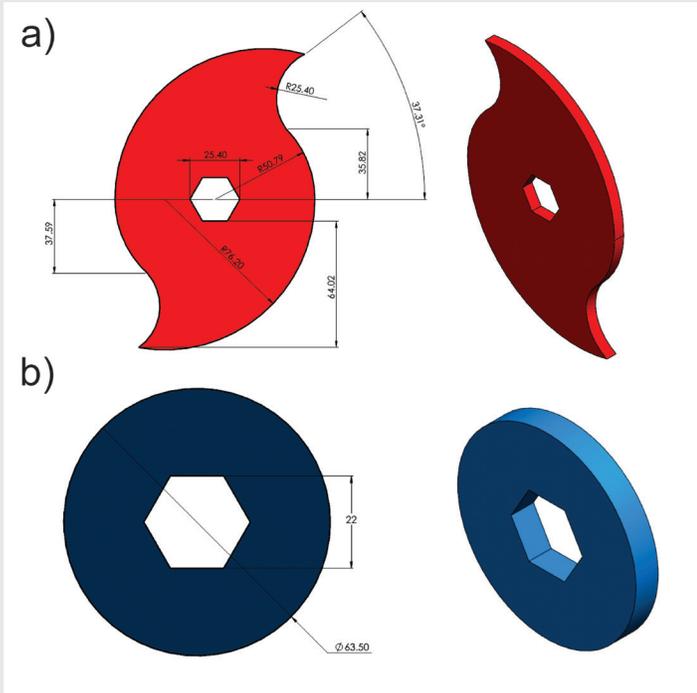


Figura 5.- Dimensiones de elementos, donde: a) cuchilla de corte, b) separador.

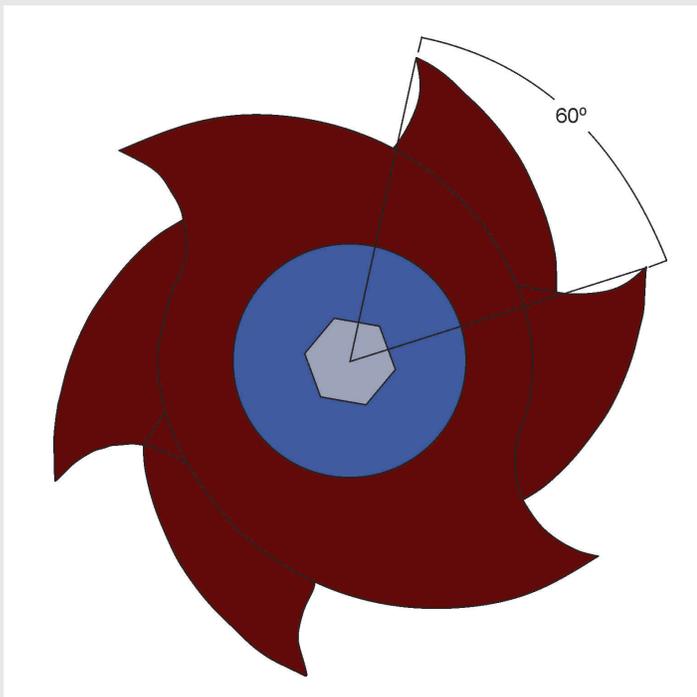


Figura 6.- Posición angular de las cuchillas.

Los elementos de corte consisten en un cortador fijo y uno rotatorio. La Figura 7 muestra las cuchillas de corte y los separadores montados en los ejes, siendo uno fijo (a) y el otro rotatorio (b). La diferencia de dimensiones entre los elementos, nos permite tener un claro de 1/16 de pulgada, provocando el corte del material.

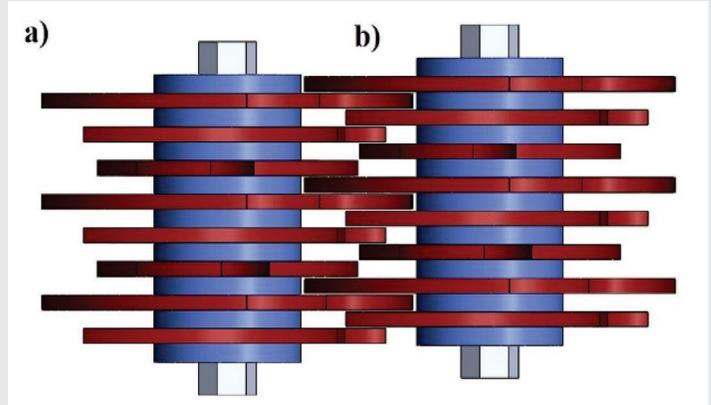


Figura 7.- Ensamble de componentes, donde: a) eje rotatorio, b) eje fijo.

### Validación analítica del modelo discreto

Para conocer los esfuerzos que se presentan en el eje debido a los elementos que soporta, se realizó un análisis estático utilizando teoría de vigas [14], los cuales serán una referencia importante en la validación de los modelos numéricos realizados. La figura 8 presenta el diagrama de cuerpo libre, mostrando las fuerzas ejercidas sobre el eje por cada uno de los elementos que soporta.

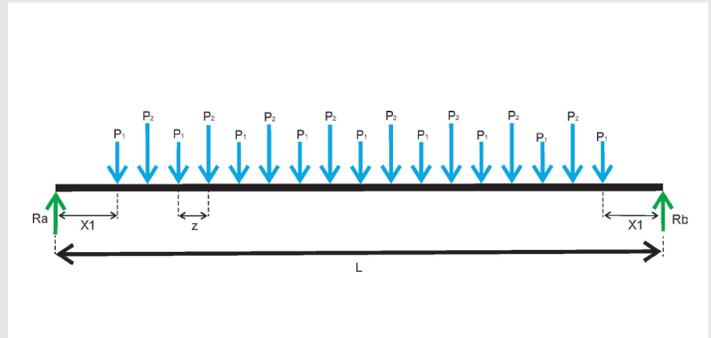


Figura 8.- Diagrama de cuerpo libre.

Por simplicidad, se concentra una fuerza puntual en el centro del eje para realizar los cálculos mediante las ecuaciones de equilibrio:

$$\sum F_y = 0 \tag{Ec (1)}$$

$$\sum M_a = 0 \tag{Ec (2)}$$

Con base al DCL mostrado en la figura 8, se define la condición de equilibrio mostrada en la Ec (3).

$$R_a + R_b - P = 0 \tag{Ec (3)}$$

Al aplicar la segunda condición de equilibrio, se obtiene la siguiente expresión:

$$R_b = \frac{P \left(\frac{L}{2}\right)}{L} \tag{Ec (4)}$$

Con lo anterior, se tiene conocimiento de la magnitud de las reacciones existentes en los soportes del eje.

Teniendo en cuenta la simetría y la posición de la fuerza aplicada en el eje, se obtiene el momento máximo con el cual se obtiene el esfuerzo máximo a flexión mediante la ecuación 5 [17].

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \tag{Ec (5)}$$

Donde:

$M$  = Momento máximo

$c$  = distancia de centro a extremo de la viga

$I$  = Momento de área

Con la ecuación 6 se calcula la deflexión máxima de la viga para el caso particular, el cual se define mediante el tipo de apoyo presente en el eje [17].

$$\delta_{max} = \frac{-P L^3}{192EI} \tag{Ec (6)}$$

Donde:

$P$  = Carga

$L$  = Longitud de la viga

$E$  = Módulo de elasticidad del material

$I$  = Momento de área

**Modelado por elemento finito**

Se realizó el modelo discreto usando un software de elementos finitos, con las condiciones de frontera que se muestran en la Figura 9.

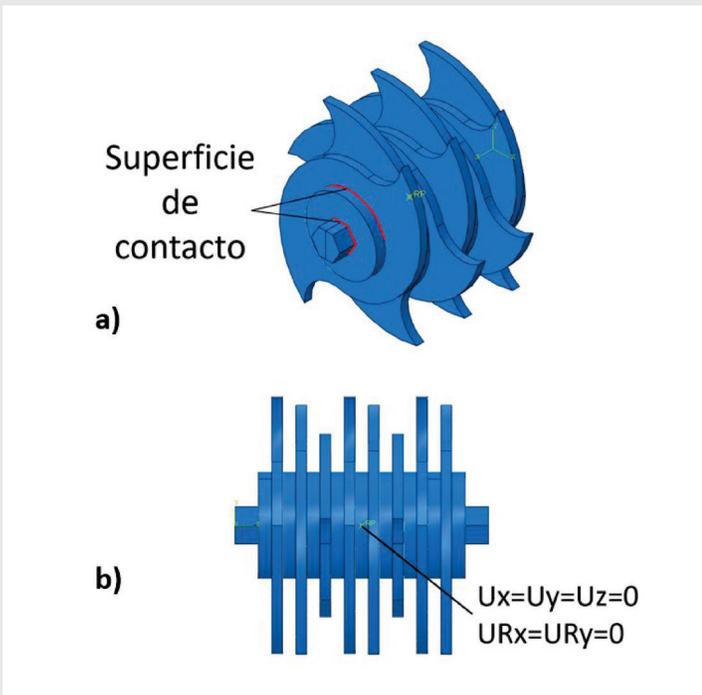


Figura 9.- Modelo discreto, donde: a) superficies en contacto, b) condiciones de frontera en el eje.

Para minimizar las deflexiones, el acero es la mejor elección como material para ejes, debido a su alto módulo de elasticidad; no obstante, el hierro colado también se utiliza sobre todo cuando los accesorios se funden con el eje [17].

El modelado discreto considera todos los elementos como deformables utilizando las propiedades del acero, las cuales se presentan en la Tabla 3. Se utilizó un coeficiente de fricción de 0.3 [13] entre las superficies del eje, las cuchillas de corte y el elemento separador.

Tabla 3.- Propiedades de los materiales utilizados [15].

Propiedades/Material	Acero	PET
Módulo de Young (MPa)	20000	3000
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	7850	1400
Coef. de Poisson	0.33	0.44

Entre todos los elementos que integran el modelo, se consideró un tamaño de malla de 3 mm en el eje y 3mm en la cuchilla de corte y el separador como se observa en la Figura 10.

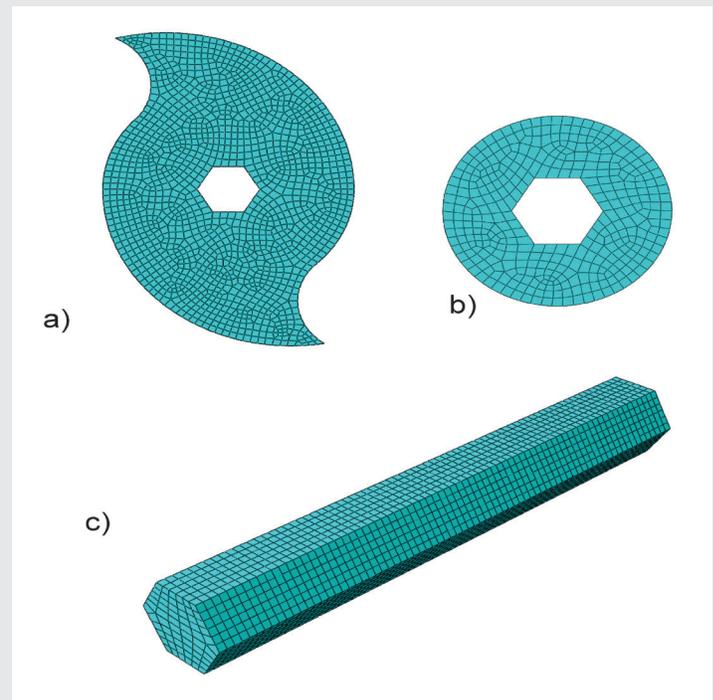


Figura 10.- Malla en los elementos, donde: a) cuchilla de corte, b) separador, c) eje.

El tamaño de malla en los elementos se estableció mediante un análisis de convergencia de malla, el cual se realizó comparando los resultados analíticos de deflexión en el eje y los numéricos.

**Análisis estático**

El análisis estático consistió en modelar el eje sometido a cargas producidas por el peso de los elementos que soporta con la finalidad de conocer los esfuerzos presentes y su resistencia. Se realizaron los cálculos correspondientes para conocer la fuerza que ejercen

los elementos en el eje y así agregarlas como presión en el modelo. Las condiciones de frontera se muestran en la Figura 12.

En la Figura 13 se presentan las condiciones de frontera para el modelado dinámico.

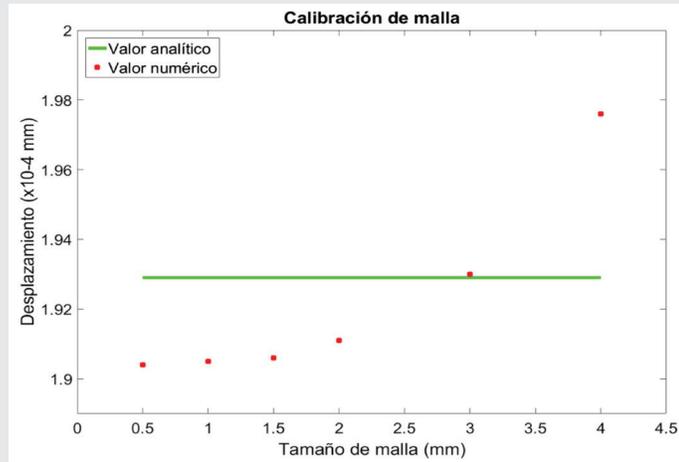


Figura 11.- Convergencia de malla.

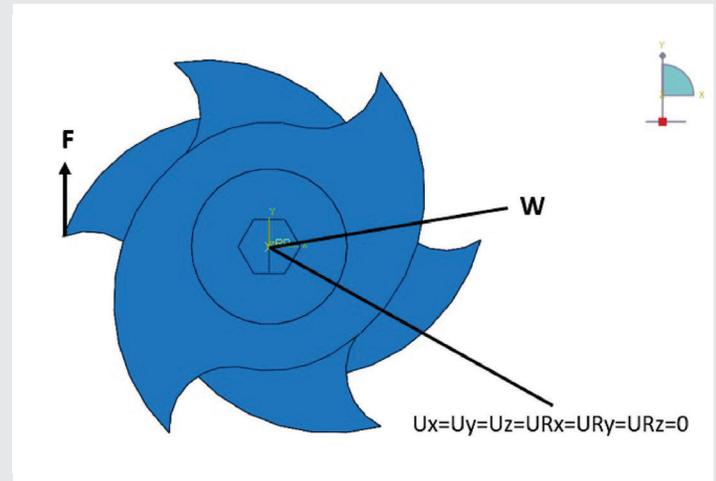


Figura 13.- Condiciones de frontera para modelado dinámico con fuerza resistiva

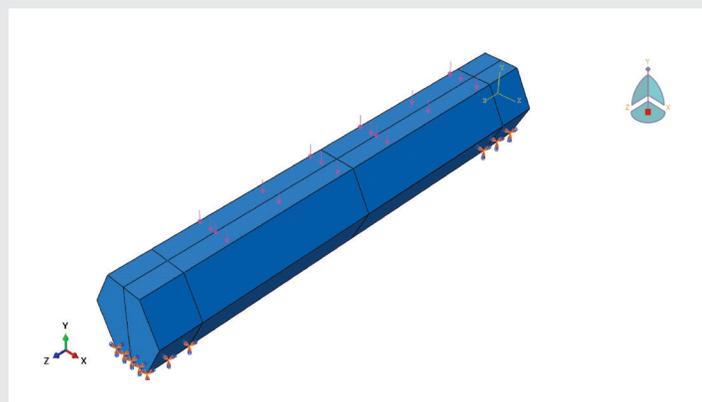


Figura 12.- Modelo discreto para análisis estático.

## RESULTADOS

### Análisis estático

Al someter el eje a cargas ejercidas por el peso de los componentes, se obtuvieron los resultados de esfuerzos mostrados en la Figura 14.

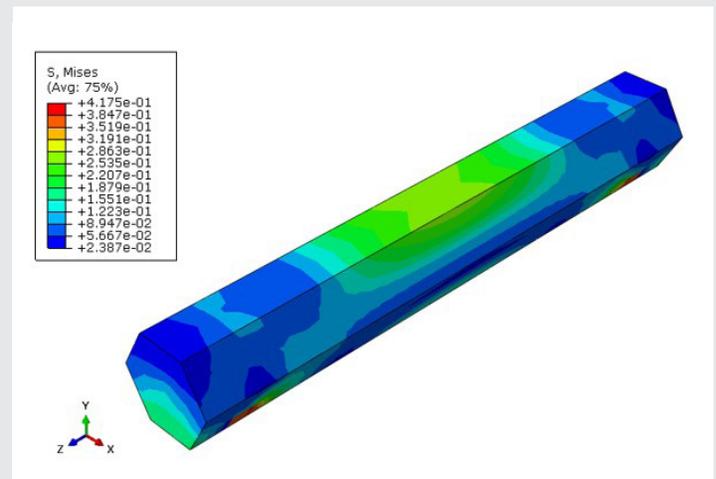


Figura 14.- Esfuerzos de Von Mises en el eje.

### El análisis dinámico

El análisis dinámico consistió en dos partes; la primera en modelar el eje con una velocidad constante de giro, la cual es de 175 R.P.M [14] y así conocer los esfuerzos producidos por el movimiento del eje. La segunda parte consistió en modelar el movimiento de las cuchillas con una fuerza resistiva, la cual representa la fuerza de oposición del PET.

Para considerar una fuerza de oposición al giro representativa, se obtuvo la relación entre el esfuerzo último del PET [16] y el espesor de mayor magnitud en una botella de dicho material, con eso se obtuvo lo siguiente:

$$\sigma_u = \frac{F}{A} \quad \text{Ec (7)}$$

Donde:

$\sigma_u$  = esfuerzo

$F$  = fuerza opositora

$A$  = área representativa

Despejando la ecuación 7, tenemos:

$$F = A * \sigma_u \quad \text{Ec (8)}$$

En los resultados se muestra que el eje presenta esfuerzos máximos cercanos a la fijación del eje, con valor de 0.69 MPa.

Con lo que respecta a la deflexión máxima en el elemento, se presenta en la mitad de este con valor de  $1.930 \times 10^{-4}$  mm como se observa en la Figura 15.

La validación del modelo discreto se realiza utilizando ecuaciones de equilibrio y teoría de vigas. Sustituyendo los valores en la ecuación 6 y 7 obtenemos lo siguiente:

$$\sigma = \frac{(870N \cdot mm)(11mm)}{14055mm^4} \quad \text{Ec (9)}$$

$$\sigma = 0.68MPa$$

$$\delta_{max} = \frac{-(57N)(122.24mm)^3}{192(2 \times 10^5 \frac{N}{mm^2})(14055mm^4)} \quad \text{Ec (10)}$$

$$\delta_{max} = 1.929 \times 10^{-4} mm$$

La comparación de los resultados obtenidos de manera numérica como analítica presenta una diferencia menor al 1%, de esta manera se valida el modelo discreto permitiendo continuar con las variaciones.

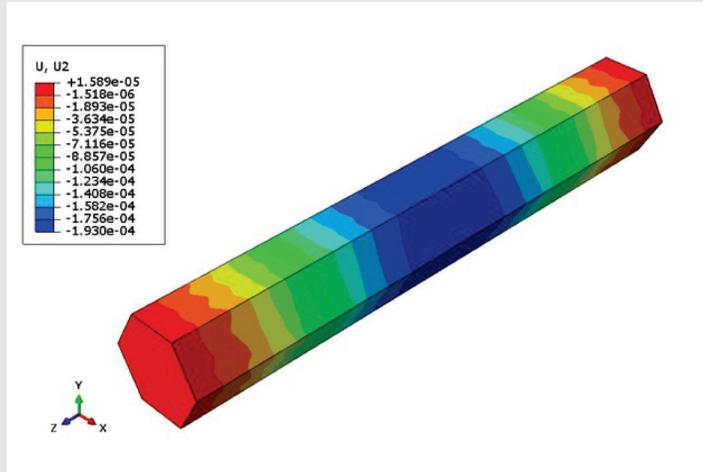


Figura 15.- Deformación en el eje.

**Análisis dinámico.**

El sistema se sometió a una velocidad de 175 R.P.M [11] para conocer los esfuerzos que se producen en el eje mediante la rotación del mismo en un giro de 180°, acoplado con los demás componentes. Los resultados de esfuerzos se presentados en la Figura 16.

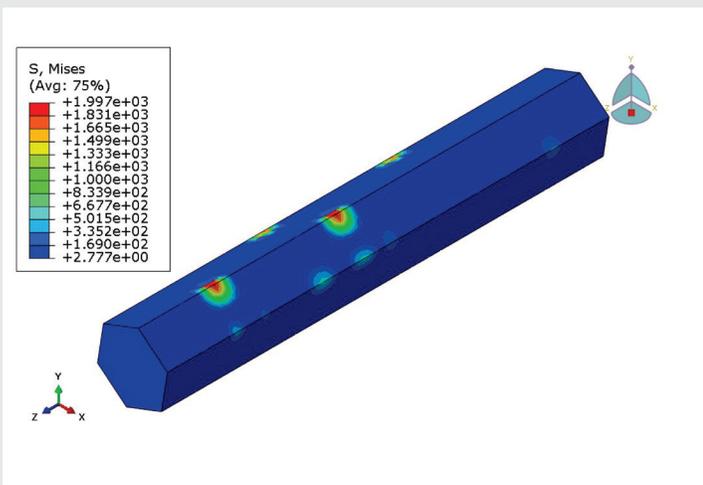


Figura 16.- Esfuerzos de Von Mises en el eje con rotación.

En los resultados se muestra que el eje presenta esfuerzos máximos en la zona de contacto con las cuchillas de corte con valor de 1,997 MPa.

Los resultados de esfuerzos en la cuchilla de corte se presentan en la Figura 17.

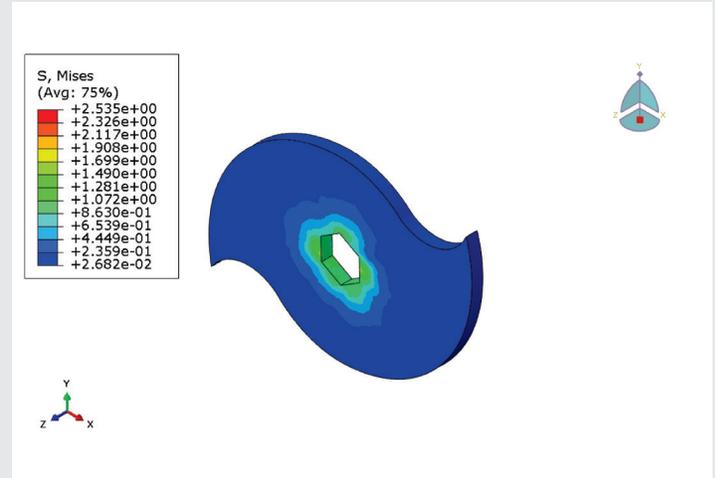


Figura 17.- Esfuerzos de Von Mises en la cuchilla de corte.

En los resultados se muestra que la cuchilla presenta esfuerzos máximos de contacto con valor de 2.5 MPa.

Para analizar el esfuerzo en las cuchillas y en el eje producido por el corte de una botella de PET, se consideró la fuerza que se requeriría para cortar la parte con mayor espesor de la botella, la cual presenta un espesor de aproximadamente 1.9mm. Con base a eso, se sustituyó en la ecuación 8, con la cual se obtuvo:

$$F = 3.61mm^2 * 85 MPa$$

$$F = 306.85N \quad \text{Ec (11)}$$

La fuerza obtenida se multiplicó por un factor de seguridad de 1.5 [11], esto con la finalidad de sobre estimar la fuerza necesaria para cortar la parte con mayor espesor de la botella; obteniendo así una fuerza de 460 N, la cual se incluyó en el análisis. Los resultados de esfuerzos en el eje se presentan en la Figura 18.

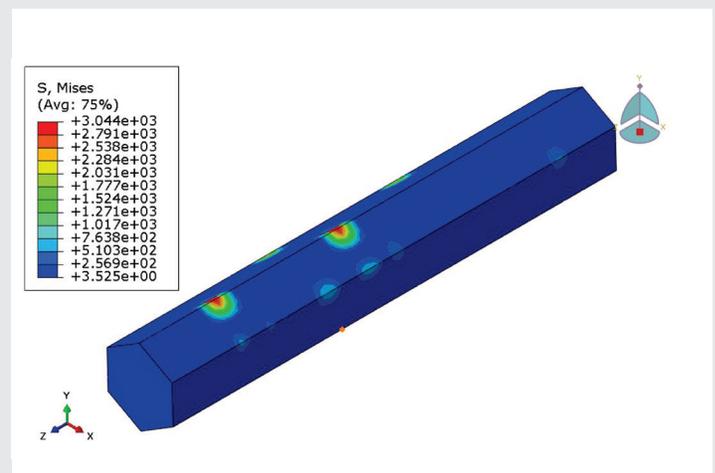


Figura 18.- Esfuerzos de Von Mises en el eje considerando fuerza en la cuchilla de corte

Los resultados de esfuerzos en la cuchilla de corte considerando una fuerza opositora se presentan en la Figura 19.

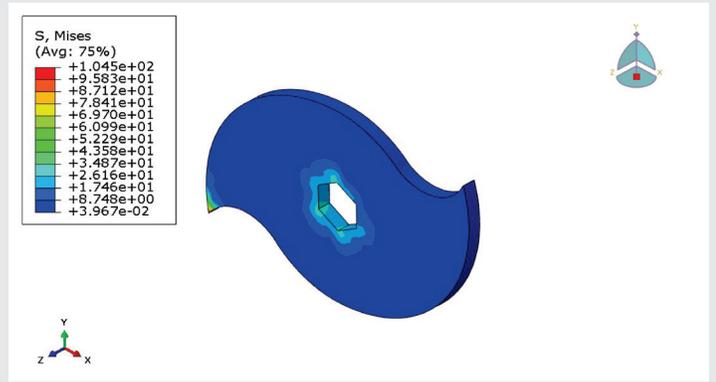


Figura 19.- Esfuerzos de Von Mises en la cuchilla de corte considerando fuerza de oposición.

En los resultados se muestra que la cuchilla presenta esfuerzos máximos de contacto con valor de 104 MPa.

## CONCLUSIONES

Se propuso un sistema conformado principalmente por un eje, separador y cuchillas de corte, con la capacidad de triturar botellas de PET en sus diferentes dimensiones. La posibilidad de usar un eje hexagonal facilita el montaje y fijación de las cuchillas; la cantidad de elementos se reducen debido a la geometría del eje. Se concluye que el diseño de los elementos de corte y la utilización de un eje hexagonal para la trituración de botellas PET de distintas dimensiones es factible. Se verificó numéricamente que el sistema no presentara fallas considerando fuerzas equivalentes a la boquilla de las botellas PET, las cuales presentan un espesor mayor con respecto al resto de la botella. El eje hexagonal trabaja con un factor de seguridad de 1.5 [17].

Naturalmente, el factor de seguridad debe ser mayor que 1. Debido a que es el margen que se da en el diseño para así minimizar y evitar fallas en el sistema. Dependiendo de las circunstancias, los factores de seguridad varían de 1 hasta 10.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Semarnat, *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. México. 2016.*

[2] S. Corrales C., "Industria del plástico en el noroeste de México y Texas , 1995-2005," *Región Y Soc.*, vol. 47, pp. 1995-2005, 2010.

[3] K. Ragaert, L. Delva, y K. Van Geem, "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste," *Waste Manag.*, vol. 69, pp. 24-58, 2017

[4] Barreto, S., *Diseño de Calzado Urbano*, Editorial Nobuko, 2006, Vol. 1, ISBN: 987-584-041-6

[5] M. Pérez, Laura y R. Ruiz, Marcos, *Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliéster*, *Ingeniería Industrial*, núm. 27, 2009, pp. 123-137

[6] C. Frías, Arturo, Ize, Irina, Gavilán, Arturo La situación de los envases de plástico en México, *Gaceta Ecológica*, núm. 69, octubre-diciembre, 2003, pp. 67-82.

[7] INECC, *Instrumentos y análisis económicos del mercado de botella pet post-consumo: el caso del municipio de Querétaro*, 2014.

[8] Cámara de Comercio de Bogotá, *Reporte de monitoreo sectorial, Sector de materiales pasticos Estados Unidos*, 2010 ISBN: 978-958-688-375-7

[9] Torres Sandra, Mondragón José y Fuentes Valeria, *Propuesta para el diseño de un triturador de PET con geolocalización*, *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, Junio 2016 Vol.3 No.7 46-542016

[10] Piero Espino, Alejandro Lizárraga, José V. Núñez, Josué A. Sapiens, *Diseño de una máquina trituradora de PET*, *Investigación aplicada de las universidades politécnicas*, 2017.

[11] G. Villalba Luz, P. Corral Carlos, M. López Edith, L. Ordaz León, *Diseño y prototipo de una máquina trituradora de PET*, *CULCyT*, 2014.

[12] Gonzalez G. Alvaro, *Factores de Seguridad... Por qué tantos?*, *Encuentro de ingenieros de suelos y estructuras*, 2009.

[13] V. Useche Libardo, Abdel Wahab Magd, *Determinación del coeficiente de fricción entre cerdas de acero de cepillos laterales para barrer calles*. *Scientia et Technica Año XIV No 39*, 2008, ISSN 0122-1701.

[14] C. Vázquez Alfonso, E. Navarro Alejandro, G. López Antonio, *Variantes de la Aplicación de la Viga Conjugada*, en el *Cálculo de Momentos de Empotramiento*, *Scientia et Technica Año XVII, No 52*, pp. 32-37 2012, ISSN 0122-1701.

[15] S. R.Schmid, B. J.Hamrock, and B. O.Jacobson, *Fundamentals of Machine Elements*, 2014.

[16] MatWed (n.d.). Overview of materials for Polycarbonate/PET Polyester Blend. Obtenida el 25 de marzo de 2020. De la página electrónica: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=dd853b4106ed405294583cb4978451c6>

[17] R. L. Norton, *Diseño de Máquinas Un enfoque integrado*, Cuarta Edi. México: Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2011.