

Diseño de un prototipo de una trituradora de un solo eje para la reducción de las placas de circuito impreso de teléfonos móviles

Design of a prototype single-shaft shredder for reducing the size of printed circuit boards from cell phones

Juan A. Labastida González ^a, Justo F. Montiel Hernández ^b, Edith Jiménez Muñoz ^c, Carlos E. Borja Soto ^d, Mario O. Ordaz Oliver ^e, José L. Rodríguez Muñoz ^f

Abstract:

The growing amount of electronic waste, particularly from cell phones, has become a source of pollution but also an area of opportunity for the application of urban mining to extract metals of economic value. While the process of size reduction through mechanical fragmentation is essential for improving subsequent metallurgical treatments, commercially available industrial alternatives entail high investment costs for both acquisition and maintenance. The objective of this study is to propose an optimal design and parameterize a three-dimensional model of a single-shaft shredder—compact in size and energy-efficient—intended primarily for processing printed circuit boards (PCBs) from cell phones, considering virtual assembly and the verification of kinematic interferences. Each of the device's components was generated using computer-aided design (CAD) software, specifically SolidWorks, including the 4- and 6-blade cutters, the hexagonal shaft, the shredding chamber with internal teeth, the feed hopper, and the base with its corresponding discharge chute. The virtual assembly was performed using positional relationships and geometric constraints (coincidence and concentric), confirming the absence of interference and the correct kinematic coupling for proper motion. A practical model of a shredder with overall dimensions of 500 mm × 300 mm × 625 mm—including the supports—was successfully developed, capable of processing PCBs with dimensions of up to 600 mm × 1200 mm. Six blades are arranged alternately on the shaft—three with 4 blades and three with 6 blades—with an axial spacing of 40 mm, creating multiple shearing zones. The single-shaft design and the use of a low-power motor (approximately 1.5 to 2.5 kW) reduce energy consumption compared to multi-shaft shredders. The designed machine provides a viable and cost-effective option for reducing the size of PCBs from cell phones, simplifying the initial stage of the recycling process and enabling the development of circular economy models for managing electronic waste. Future work will involve conducting finite element analysis to experimentally validate the structural mechanical strength and thereby build a functional prototype.

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0009-3920-8144>, Email: la449580@uaeh.edu.mx

^b Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0001-6890-6069>, Email: justo_montiel@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Apan-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0001-7883-0600>, Email: edith_jimenez@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

^e Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Pachuca | Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-9302-0988>, Email: mario.oo@pachuca.tecnm.mx

^f Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4108-9414>, Email: jose_rodriguez@uaeh.edu.mx

Fecha de recepción: 07/08/2026, Fecha de aceptación: 27/08/2026, Fecha de publicación: 30/09/2026

DOI: <https://doi.org/10.29057/escs.v14iEspecial3.18520>



Keywords:*Shredder, printed circuit boards, computer-aided design, urban mining***Resumen:**

La generación acelerada de residuos electrónicos, en especial de teléfonos móviles, se vuelve un foco de contaminación, pero también un área de oportunidad para la aplicación de la minería urbana con el propósito de extraer metales de interés económico. Siendo el proceso de reducción de tamaño mediante la fragmentación mecánica fundamental para mejorar los tratamientos metalúrgicos posteriores; sin embargo, las alternativas industriales disponibles comercialmente conllevan elevados costos inversiones tanto para adquirirlos como para darles mantenimiento. El presente trabajo tiene como objetivo plantear un diseño óptimo y parametrizar un modelo tridimensional de una máquina trituradora de un solo eje, con un tamaño reducido y bajo gasto energético, dirigida básicamente para el procesamiento de placas de circuito impreso (PCBs) de teléfonos móviles, considerando el ensamblaje de forma virtual y la confirmación de las interferencias cinemáticas. Cada una de las piezas del dispositivo fueron generadas mediante el diseño asistido por computadora (CAD) empleando el software SolidWorks, que incluye las cuchillas de 4 y 6 aspas, el eje de sección hexagonal, la cámara de trituración con dientes internos, la tolva de alimentación y la base con su respectivo ducto de salida. El ensamblaje virtual se efectuó empleando las relaciones de posición y restricciones geométricas (coincidentes y concéntricas), confirmando la ausencia de interferencias y el correcto acoplamiento cinemático para un adecuado movimiento. Se consiguió desarrollar un modelo práctico de una trituradora con dimensiones totales son de 500 mm × 300 mm × 625 mm considerando incluso los soportes, logrando procesar PCBs con dimensiones de hasta 600 mm × 1200 mm. En el eje se sitúan alternadamente seis cuchillas, tres de 4 aspas y tres de 6 aspas con una separación axial de 40 mm, creando múltiples áreas de cizallamiento. La distribución de un solo eje y el uso de un motor de baja potencia (aproximadamente de 1.5 a 2.5 kW) reduce el consumo energético en comparación con trituradores multieje. La máquina diseñada establece una opción viable y económica para la reducción de tamaño de las PCBs provenientes de los teléfonos móviles, simplificando la etapa inicial del proceso de reciclaje y permitiendo diseñar modelos de economía circular para el manejo de residuos electrónicos. Como trabajo a futuro se considera llevar a cabo un análisis mediante el método de elementos finitos para la validación experimental de la resistencia mecánica estructural y así construir un prototipo funcional.

Palabras Clave:*Trituradora, placas de circuito impreso, diseño asistido por computadora, minería urbana*

Introducción

Hoy en día el teléfono móvil se ha vuelto una herramienta indispensable en la vida diaria; dichos dispositivos son utilizados desde niños hasta personas mayores. La configuración más básica de un dispositivo móvil consiste en la superficie de una carcasa, la cual puede estar elaborada a partir de un polímero o alguna aleación, con propiedades de dispersión de calor, debido a que por dentro se deben proteger los componentes electrónicos, tales como la cámara, altavoces y con mayor atención la batería (Gómez et al., 2023). Las tarjetas de circuitos impresos se encuentran conformadas por una base polimérica donde están insertados (soldados) los pines metálicos que se constituyen de una mezcla de metales base, como son cobre, zinc y níquel, los cuales son recubiertos de una fina película de oro; (Montiel et al., 2012; Ordaz et al., 2024).

Con respecto a la parte polimérica de las PCBs, existe una gran variedad y tipos de materiales tales como, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP); plásticos tóxicos y contaminantes, entre los cuales se encuentran el cloruro de polivinilo (PVC), el polietileno tereftalato (PET), el policarbonato (PC), éteres difenólicos polibromados (PBDE), dibenzo-p-dioxinas policloradas, dibenzofuranos (PCDD/F), bifenilos policlorados (PCB) y, copolímeros de resinas reforzadas del tipo el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) (Morf et al., 2005; Dimitrakakis et al., 2009; Zheng et al., 2009; Long et al., 2013; Zhou et al., 2013; Salinas-Rodríguez, 2021).

De los componentes anteriormente mencionados es posible realizar la recuperación de los múltiples materiales que lo constituyen, entre otros elementos de interés para su reciclaje podemos mencionar a las tierras raras, los metales nobles (platino, oro, rodio, paladio, plata), así

como otros metales de igual interés ambiental y económico como son indio, litio, cobalto, cobre, aluminio, y el hierro (Gómez et al., 2023).

Mundialmente se tiene que alrededor de 44.7 millones de toneladas de residuos electrónicos se producen por año, de las cuales se tiene que solamente el 20% se les da un método de reciclaje de una manera correcta y el resto que llega a ser tratada es realizado de una manera inadecuada (Correa Córdoba et al., 2019), por lo cual se puede notar que se tiene una gran cantidad de desechos materiales tóxicos que generan un alto volumen de contaminantes ambientales que ponen en riesgo la salud de la población. La “*Environmental Protection Agency*” menciona que el proceso de reciclar un millón de dispositivos móviles puede resultar en la recuperación de 75 libras de oro, 772 libras de plata, 35274 libras de cobre y 33 libras de paladio (Kumaran et al., 2020). Se puede considerar como residuos o desechos electrónicos a aquellos dispositivos que contienen de forma total o parcial circuitos electrónicos (Borja Soto, 2021).

Podemos denotar 5 principales tecnologías de reciclaje de chatarra electrónica (Smith & Behdad, 2025), los cuales son:

- i) *Desmontaje físico*: Forma por la cual nos permite retirar componentes más aislados o específicos como son las placas de circuitos, cableado y materiales estructurales,
- ii) *Pirolisis*: Es el proceso en cual consiste en fundir las tarjetas de circuitos impresos (PCBs), que al ser calentadas a altas temperaturas degradan el sustrato polimérico y se recuperan los metales presentes.
- iii) *Hidrometalurgia*: Es la técnica mediante la cual se extraen los metales encontrados en los componentes electrónicos utilizando soluciones acuosas ácidas.
- iv) *Biometalurgia*: Es el método que consiste en emplear microorganismos como son bacterias y hongos para así poder llevar a cabo la recuperación de los metales presentes en las PCBs.
- v) *Fluidos supercríticos*: El proceso consiste en utilizar un fluido que se encuentre sometido a condiciones de temperatura y presión extremadamente altas y que termina evaporándose, de tal manera que permite degradar los polímeros y dejando únicamente los metales.

Actualmente existen diferentes tipos de máquinas de trituración, ya sea que se utilicen para moler papel,

plásticos, metales o productos vegetales. Generalmente estas se clasifican en i) *equipo de corte*: normalmente utilizado para productos de tipo vegetal o animal), ii) *equipo de molienda*: se basan en el empleo de fuerzas de gran magnitud que se impactan y logran una mayor destrucción de los objetos e incluye tanto a los molinos de martillos como a los de rodillos (Kumar & Yedhu Krishnan, 2020).

De manera industrial las máquinas que se usan para triturar diferentes tipos de materiales son:

- a) *Trituradora de mandíbulas*: consta de dos superficies que cuentan con un tipo dentado casi verticales, una parte esta estática y la otra se encuentra en movimiento lo cual permite la ruptura del material (Comeglio et al., 2025).
- b) *Trituradora de rodillos*: está formada por 2 rodillos que giran opuestos, los cuales con las compresiones logran pulverizar o destruir parcialmente los materiales, en ocasiones estos llegan a ser texturizados para lograr un cizallamiento o corte del del material puesto a triturar (Hurtado Morales, 2020).
- c) *Trituradora de cuchillas giratorias*: este tipo de máquina trabaja a bajas velocidades para lograr una correcta trituración al tener juegos de cuchillas girando de manera contraria una con respecto a la otra, produciendo un efecto de cizalla o corte, con una configuración normalmente de 1 a 4 ejes de cuchillas (Hurtado Morales, 2020).

Entre los parámetros a considerar principalmente en una máquina de trituración son: cizallamiento, desgarre y la fracturación. El cizallamiento se refiere al corte del material considerando la eficiencia con la que será seccionado, mientras que el desgarre implica que se genera la suficiente fuerza como para desprender el material metálico de la base polimérica. Finalmente, la fracturación permite trabajar con los materiales frágiles como es el vidrio, admitiendo trabajar incluso cuando las cuchillas de la máquina no están afiladas haciendo que el material se rompa o agriete (Hurtado Morales, 2020).

Este tipo de máquinas usadas para triturar los desechos electrónicos son clasificadas en diferentes tipos dependiendo del tamaño de los residuos; los trituradores normalmente empleados para procesar residuos de gran tamaño y finalmente ser reducidos a una dimensión de entre 15cm a 0.5cm; los molinos normalmente empleados para residuos de menos tamaño y produciendo fragmentos de entre 0.1mm y 0.3 mm; molinos de ultrafinos este solamente puede admitir residuos de un tamaño no mayor a 6mm y este tipo de sistema puede

lograr generar partículas de residuos de entre 1 μm y 50 μm ; máquina de corte este tiende a crear residuos de tamaños más definidos de entre 2 mm y 10 mm (Hurtado Morales, 2020).

Metodología

La parte experimental se encuentra delimitada al diseño asistido por computadora (CAD), así como la comprobación geométrica y de acoplamiento entre los componentes considerando los parámetros de forma conceptual-geométrica que fueron definidos por Timmerhaus (Timmerhaus, 2003). Describiendo cada uno de los pasos para realizar el modelado, así como las operaciones correspondientes, cotas y el ensamblaje total de todas y cada uno de los elementos que componen el dispositivo, tomando en cuenta que no se efectuaron simulaciones de esfuerzos (FEA) ni pruebas mediante la elaboración de prototipo físico.

El proceso total de modelado y acople de las piezas se llevó a cabo en el entorno de SolidWorks, un programa de referencia de gran utilidad para el diseño de maquinaria para el tratamiento de residuos, como lo muestran los trabajos previos (Kumaran et al., 2020). La selección de este software es debido a su capacidad crear formas complejas, definir ensambles con restricciones de movimiento y verificar ajustes dimensionales entre los distintos elementos, es que lo convierten en una opción particularmente adecuada cuando se abordan diseños de trituradores, donde estos aspectos resultan fundamentales (Budynas & Nisbett, 2015). A la par que permite efectuar operaciones con gran detalle en los cortes helicoidales, barrido, matrices circulares, así como roscas normalizadas con respecto a la norma ANSI/ASME B1.1-2019 (American Society of Mechanical Engineers, 2019). Con una precisión de ± 0.01 mm.

La selección de los materiales para los elementos que constituyen la máquina trituradora de tarjetas de circuitos impresos se basó en considerar las propiedades mecánicas tales como resistencia y desgaste mecánico, maquinabilidad, costo y facilidad de obtener de forma comercial, tal como se muestra a continuación (ASM, 1990; Vásquez et al., 2026; Maity 2015; Totten et al., 2003):

- *Caja (cámara de trituración):* Acero estructural AISI 1020. Límite elástico: 250 MPa. Dureza: 120 HB. Módulo de Young: 200 GPa. Peso específico: 7850 kg/m³. Soldabilidad excelente. Mecanizado fácil. Empleado como contención y guía del material al no estar sometido a esfuerzos dinámicos altos con un bajo costo y fácil de obtener.

- *Estructura del soporte y de la base:* Acero estructural AISI 1020. Límite elástico: 250 MPa. Dureza: 120 HB. Módulo de Young: 200 GPa. Peso específico: 7850 kg/m³. Soldabilidad excelente. Mecanizado fácil. Proporciona gran rigidez y estabilidad a la par de bajo costo y fácil de obtener.
- *Tolva de alimentación:* Acero estructural AISI 1020. Límite elástico: 250 MPa. Dureza: 120 HB. Módulo de Young: 200 GPa. Peso específico: 7850 kg/m³. Soldabilidad excelente. Mecanizado fácil. Por su función y al requerir que se encuentre estática no es necesario que cumpla con propiedades mecánicas especiales, simplemente que sea fácil de conformar y presentando un bajo costo.
- *Eje principal:* Acero AISI 4140 (templado y revenido). Límite elástico: 655 MPa. Resistencia a la fatiga: 380 MPa (aproximado). Dureza: 28–32 HRC. Debido a su alta tenacidad y resistencia a la fatiga al ser sometido a cargas de flexión y torsión cíclicas permite evitar fallas por fractura mientras giro de forma continua.
- *Dientes internos de la cámara:* Acero AISI 1045 (cementado y/o endurecido superficialmente). Límite elástico: 450 MPa. Dureza superficial: 50 HRC (después del tratamiento térmico). Intermedia resistencia al desgaste. Al ser sometido al rozamiento de las PCBs no debe deformarse. Es endurecido de forma superficial alargando así la vida útil sin aumentar el costo.
- *Cuchillas:* Acero AISI A2 (grado herramienta y endurecimiento). Dureza: 56–62 HRC. Tenacidad al impacto: 6.5 J. Módulo elástico: 190 GPa. Intermedia resistencia al desgaste abrasivo. Módulo elástico: 203 GPa. Coeficiente de Poisson: 0.285. Presenta características intermedias de desgaste abrasivo y tenacidad, así como resistencia al astillamiento del filo de corte. Siendo más fácil de mecanizar que otros aceros grado herramienta.

Resultados

Con el uso de la herramienta de SolidWorks se creó el diseño una máquina de un tamaño menor a lo comercial para lograr la trituración de dispositivos móviles los cuales son de menor tamaño. Algunos de los parámetros seguidos para esto es que las tarjetas (PCBs) de dispositivos móviles no superan un tamaño de 600 mm x 1200 mm. Con respecto a los resultados obtenidos se describe el modelo virtual que permite trabajar

posteriormente en etapas de simulación, validación estructural y funcional.

Modelado de la cuchilla de cuatro aspas

El diseño empieza desde una base circular de 75mm de diámetro y en la parte superior se dibujó una cuchilla de 5 mm de alto y con la operación de matriz circular especificando que serían 4 se realizan las aspas para posteriormente con una operación de extrusión ejecutarla a 20 mm de ancho. Al centro de la Figura 1, se realizará un corte de una figura hexagonal dibujando un hexágono con lados de 6.35 mm, para posteriormente realizar una operación de corte de 20 mm.

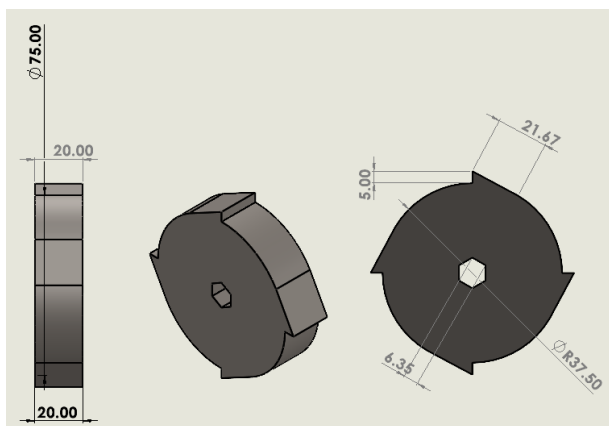


Figura 1. Cuchilla de 4 aspas. Fuente: Elaboración propia.

Modelado de cuchilla de 6 aspas

Tal como en el diseño de la Figura 1, este lleva el mismo procedimiento y las mismas medidas exceptuando la parte en la acción de la matriz circular especificaremos que es de 6 lados para así poder generar las 6 espigas de corte que se muestra en la Figura 2.

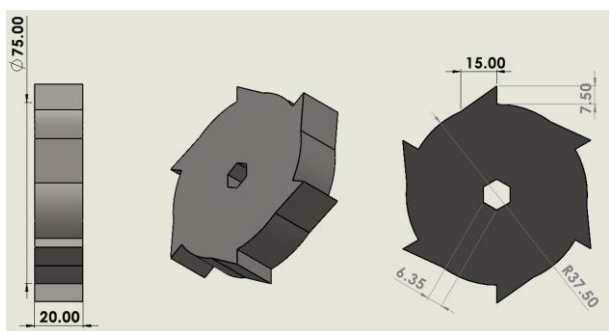


Figura 2. Cuchilla de 6 aspas. Fuente: Elaboración propia.

Modelado de eje

La realización del eje empieza a partir del dibujo de un círculo de 12.7 mm de diámetro y de la extrusión de 5 mm de este mismo; posteriormente, en la cara de lo anteriormente hecho, al centro se dibujará un hexágono, el cual tendrá 6.35 mm por lado. Posterior a ese paso se procede a la extrusión de este con un largo de 240 mm, y como final, al centro del hexágono, se dibuja un círculo y se extruye a 20 mm.

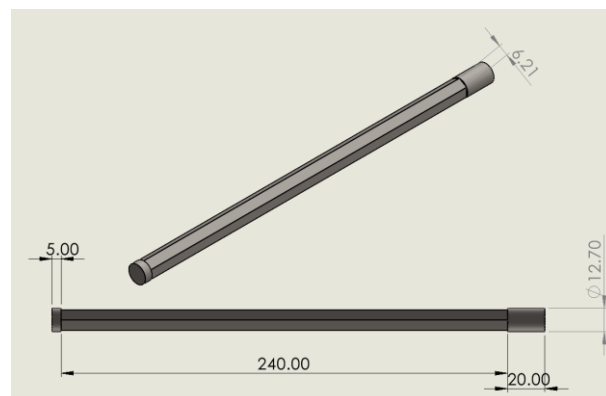


Figura 3. Eje. Fuente: Elaboración propia.

Modelado de tolva superior

Para la tolva o la parte superior se empieza dibujando un trapecio invertido con las medidas de la base mayor de 160 mm, la base menor de 100 mm y la altura de 100 mm; posteriormente extruimos el dibujo a 250 mm de largo, y con la ayuda de la herramienta de vaciado seleccionamos las caras desde las cuales se hará la operación, especificando que las paredes del vaciado tendrán 10 mm de espesor.

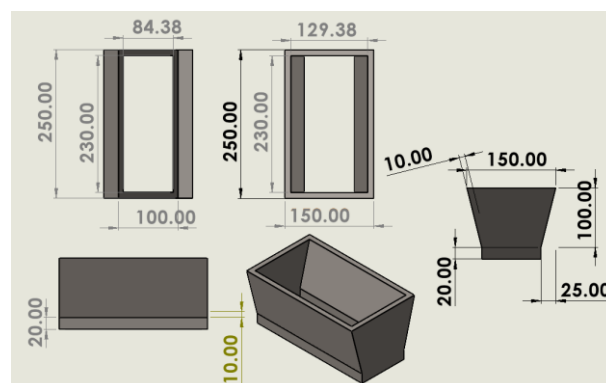


Figura 4. Parte superior de la tolva. Fuente: Elaboración propia.

Continuando con el diseño, se le dará una pequeña altura; para esto, seleccionando el lado de la base de menor tamaño, que será nuestro punto de unión con la caja donde irá el eje y las cuchillas (Figuras 1, 2 y 3), se dibujan dos rectángulos para así ocupar la orilla de la parte inferior de la figura, y posteriormente extruir esta Figura a 20 mm (Figura 4).

Modelado de caja de triturador

Se empieza dibujando lo que es un rectángulo, seleccionando un plano de planta, el cual dará forma a la caja que contendrá el eje y todas las cuchillas, la cual tendrá medidas de 150 mm de alto y 250 mm de largo, siendo extruida a 110 mm. Usando la operación de vaciado y dando una especificación de 5 mm de espesor, la aplicamos seleccionando la parte inferior y superior de esta; después, en la cara frontal de la caja, al centro y con una distancia de 50 mm, se dibuja un círculo y se realiza un corte de cara a cara para que por ahí pueda pasar el eje (ver Figura 3). Seleccionando la cara superior de la caja y usando como referencia una esquina, dibujamos 6 rectángulos con una medida de 20 mm x 30 mm, con una separación entre cada rectángulo de 20 mm, logrando así crear lo que serán los dientes que ayudarán a la destrucción de los residuos; empleando una matriz de simetría podremos tener tanto los de un lado como los del otro, y posterior a eso serán extruidos a 40 mm. Pero para darles forma, seleccionaremos una de las caras interiores de uno de los dientes de la orilla, para posteriormente dibujar un triángulo rectángulo en la parte superior con unas medidas de 20 mm x 30 mm x 36.06 mm, para realizar un corte en los dientes; este mismo proceso se repite del otro lado, y así se obtienen las piezas que nos ayudarán a realizar el corte, como se observa en la Figura 5.

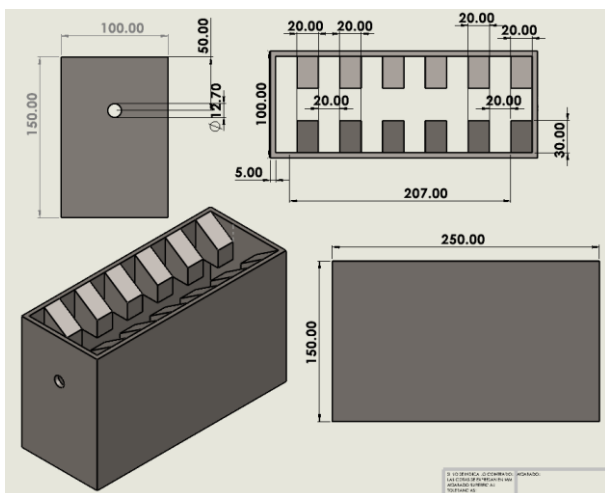


Figura 5. Caja de triturador. Fuente: Elaboración propia.

Modelado de la base

La creación de la base empieza seleccionando un plano de planta, y posterior a eso se dibuja una sección rectangular, el cual tendrá 300 mm de ancho y 500 mm de largo, para posteriormente realizar una extrusión de 25.5 mm de espesor (Figuras 6 y 7). Posteriormente, se traza un paralelogramo al centro de la figura ya extruida, el cual tendrá unas medidas de 240 mm x 90 mm (figura 6), y con esto se realiza un corte con el dibujo anterior. Como siguiente paso, seleccionaremos la cara inferior de la Figura y dibujaremos dos rectángulos: uno al límite de la abertura anterior y otro que definirá el ancho del tramo de salida, que tendrá unas medidas de 105 mm x 255 mm, el cual se extruirá a un largo de 200 mm.

Ahora bien, seleccionando una cara lateral de la Figura anteriormente extruida, dibujaremos un rectángulo de 105 mm x 150 mm; aquí dibujaremos dos líneas, las cuales serán las que darán una reducción de la sección de salida; estas partirán desde la mitad del rectángulo hasta el final de este, con una separación de las esquinas de 25 mm para hacer la reducción, y posterior a esto será extruida a 255 mm (Figura 7).

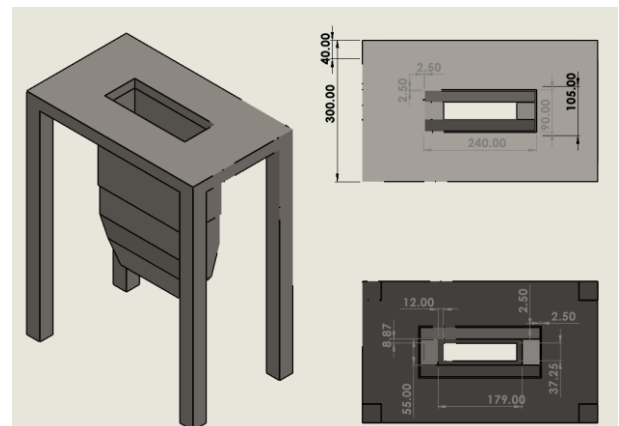


Figura 6. Vista isométrica, superior e inferior de la base y salida. Fuente: Elaboración propia.

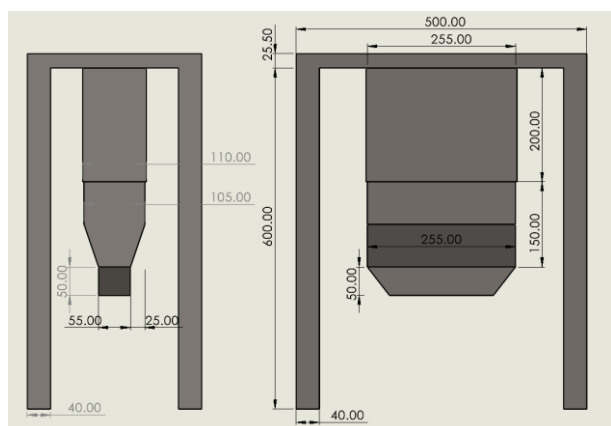


Figura 7. Vista lateral y frontal de base y salida. Fuente: Elaboración propia.

Con la operación de vaciado, seleccionaremos la parte superior interna del tubo de salida y la parte inferior de la acción anterior, para especificar que tendría 10 mm de espesor. Al quedarnos con una pequeña capa de material, rápidamente dibujaremos una base rectangular de centro de 235 mm x 40.5 mm y cortaremos ese sobrante de material. Para poder darle un poco de continuidad a la reducción del tubo de salida, dibujaremos dos rectángulos de centro, y como referencia usaremos las medidas que quedan como la orilla interna y externa de lo anteriormente realizado, y lo extruiremos a 50 mm. Como detalle final, seleccionando una de las caras frontales de la extrusión anterior, en las esquinas inferiores, tanto del lado izquierdo como del derecho, se dibujará un triángulo rectángulo, el cual cortará toda la esquina tanto de un lado como del otro, y que, como referencia, dará un grosor de 12 mm para la pared de salida (figuras 6 y 7). Como último paso, en la placa base o principal, seleccionando la parte inferior, se dibujarán 4 cuadrados de 40 mm x 40 mm para ser extruidos a 600 mm, los cuales fungirán como soportes (Figura 6).

Proceso de ensamblaje

Para el ensamblaje de la máquina de trituración empezaremos seleccionando la base y salida (Figuras 6 y 7); con esto, empezaremos a hacer relaciones de posición, agregando primeramente la caja del triturador (Figura 5) y relacionando las aristas internas de la caja con las aristas de la base, uniéndolas así con una relación de tipo coincidente. Ahora agregaremos la parte superior de la tolva (figura 4), la cual tendrá tres relaciones de posición de tipo coincidente: una de las caras frontales de la tolva con la cara frontal de la caja del triturador; esta misma operación con una de las caras laterales (de la tolva tomaremos la parte inferior del lateral, ya que esta es una cara plana); y, como último, la cara inferior de la tolva con

la cara superior de la caja de la trituradora, para así fijar la pieza. Ahora agregamos el eje (Figura 3), al cual haremos 2 tipos de relación de posición: una de tipo concéntrico y otra de tipo coincidente.

En el eje tenemos dos lados totalmente cilíndricos, uno más corto que el otro; tomaremos el lado más corto, y la cara plana de este haremos que coincida con el frente de la caja de la trituradora; seleccionando la parte cilíndrica del eje con la parte cilíndrica de la caja, haremos la relación de posición de tipo concéntrica. Empezando por agregar las cuchillas de 4 y 6 aspas (Figuras 1 y 2), realizaremos un juego de una de 4 y después una de 6, y así sucesivamente hasta completar un juego de 3 y 3. Al agregar la primera de 4, tomaremos como referencia la pared de la caja de la trituradora, ya que esto nos permitirá tomar un punto 0 utilizando las relaciones de posición; primero relacionaremos una de las caras de la espiga con la cara interna de la caja de triturar, lo que será una relación de posición coincidente, y seleccionando una de las aristas de la parte central de la cuchilla por la cual pasará el eje y una de las caras del eje —ya que este tiene forma hexagonal—, así evitaremos algún posible desfase, obteniendo una relación de posición coincidente. Volviendo a realizar la misma acción anterior, pero ahora seleccionando la arista y la cara del eje consecutivas a las anteriormente seleccionadas, se repiten las mismas acciones con la de 6 aspas, exceptuando que ahora la relación de posición coincidente será de distancia, debido a que tenemos un diente de la caja de la trituradora, lo cual nos dará que tendremos que ir dando una distancia de 40 mm de la pared; consecutivamente se repetirá lo mismo, pero ahora dando una distancia de 80 mm a otra de 4 cuchillas, y posterior a eso, otra de 6 aspas ahora a 120 mm de la pared que tomamos como punto 0; y así agregaremos otras 2, lo cual sería 1 de 4 cuchillas y otra de 6 cuchillas, lo cual nos dará un juego de cuchillas como se observa en la Figura 8a, y en conjunto se logra tener un resultado como se muestra en la Figura 8b.

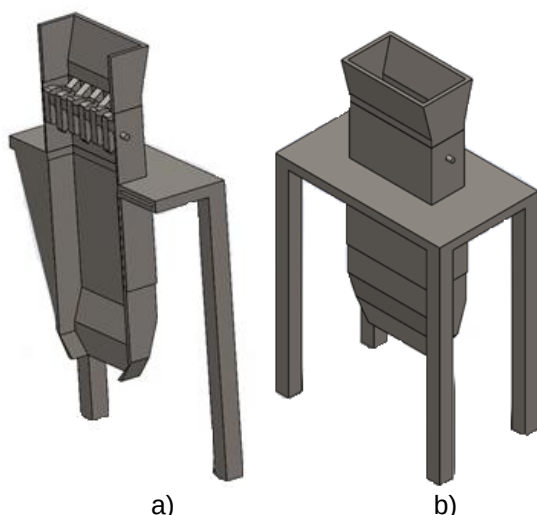


Figura 8. Vista interna de trituradora y Ensemble de trituradora. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El constante crecimiento de niveles de chatarra electrónica ha abierto un mercado a la recuperación de materiales encontrados en los dispositivos móviles a lo cual coloquialmente llaman minería urbana. Donde todo empieza con la adquisición de dispositivos descontinuados o dañados lo cual deben ser desensamblados y posteriormente procesados, a lo cual el hecho de adquirir una máquina de trituración industrial tendría un alto costo.

El diseño propuesto es una posible alternativa para la trituración de chatarra electrónica y continuando por el lado ecológico al ser de un tamaño compacto nos ayuda al cómo reducir costos de material en dado caso de una posible elaboración. Al escoger que sea de un solo eje nos permite reducir el consumo de energía ya que estos dispositivos son impulsados por un motor y debido a que este al ser de un menor tamaño requerirá de un motor de menor tamaño lo cual reducirá su consumo energético, ya que no requeriré de grandes potencias para poder lograr la fracturar las tarjetas.

El diseño propone un tamaño menor debido a que está pensado en poder recibir tarjetas PCBs de dispositivos celulares y las cuales por muy grandes o aparatosas que sean no superan un tamaño de 600 mm x 1200 mm. También el diseño propone un juego de 2 tipos de cuchillas lo cual supondrá que tengamos varios puntos de cizallamiento para intentar romper los polímeros y metales. Es importante destacar que esta máquina está pensada para poder ayudar en el área ecología, así como generar un primer paso con respecto al proceso que

permite resolver el problema de la aglomeración de desechos electrónicos.

También en diseño se propone un eje de tipo hexagonal lo cual nos permitirá que cada cuchilla tenga una posición fija y también ayudándonos a poder acomodar las cuchillas de manera desfasadas para así poder tener varios puntos de cizallamiento además de que el dentado interno de este nos ayudara a realizar esta acción.

Con respecto al trabajo a futuro se plantea utilizar la técnica de elementos finitos para realizar la simulación de la resistencia mecánica de los diversos elementos que constituyen el dispositivo cuando son sometidos a cargas de trabajo; para que finalmente se lleve a cabo la construcción de un equipo funcional para analizar el rendimiento de la máquina.

Referencias

- ASM International. Handbook Committee. (1990). *Properties and Selection--Irons, Steels, and High-performance Alloys* (Vol. 1). ASM international.
- American Society of Mechanical Engineers (2019). *ASME B1.1-2019: Unified Inch Screw Threads*. ASME, New York. [Estandarización de roscas tipo 1.0000-8]
- Borja Soto, C. E., Montiel Hernández, J. F., Jiménez Muñoz, E., Flores Renteria, M. Ángel., & Acosta Flores, D. A. (2021). Efecto de la concentración de H₃O⁺ en recuperación de los metales Au, Cu, Ni y Zn contenidos en la chatarra electrónica. *Ingenio Y Conciencia Boletín Científico De La Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 8(15), 8–11. <https://doi.org/10.29057/escs.v8i15.6497>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (10th ed.). McGraw-Hill Education.
- Correa Córdoba, M. A., Cubillos Rodríguez, A. G., Correa Córdoba, M. A., Vidal Gualteros, D. S., & Díaz Marín, S. D. (2019). Celulares Contaminación, manejo de residuos y alternativas de cambio. *Revista Agunkuyã*, 9(1), 21-34.
- Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B. and Gidarakos, E., (2009). Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of Hazardous Materials*, 161 (2–3), 913-919. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.054
- Gómez, M., Grimes, S., Qian, Y., Feng, Y., & Fowler, G. (2023). Critical and strategic metals in mobile phones: A detailed characterisation of multigenerational waste mobile phones and the economic drivers for recovery of metal value. *Journal of Cleaner Production*, 419. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138099>
- Hurtado Morales, M. A. Diseño de un sistema de trituración y separación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Brú Querol, Á. (2020). Recuperación de metales a partir de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Medellín (Colombia).
- Kumar, A., & Yedhu Krishnan, R. (2020). A Review on the Technology of Size Reduction Equipment. *International Journal of ChemTech Research*, 13(1), 48–54. <https://doi.org/10.20902/ijctr.2019.130106>
- Kumaran, P., Lakshminarayanan, N., Martin, A. v., George, R., & JoJo, J. (2020). Design and analysis of shredder machine for e - Waste recycling using CATIA. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 993(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/993/1/012013>

- Long, Y.Y., Feng, Y.J., Cai, S.S., Ding, W.X. and Shen, D.S., (2013). Flow analysis of heavy metals in a pilot-scale incinerator for residues from waste electrical and electronic equipment dismantling. *Journal of Hazardous Materials*, 261, 427-434. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.07.070
- Maity, S. R., & Chakraborty, S. (2015). Tool steel material selection using PROMETHEE II method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9), 1537-1547.
- Montiel, J.F.; Reyes, M.I.; Rivera, I.; Patiño, F.; Hernández, J. Caracterización de circuitos impresos vía SEM-EDS y su lixiviación en el sistema O2-H2SO4. *Bol. Soc. Quim. Mex.* 2012, 6, 21–23
- Morf, L.S., Tremp, J., Gloor, R., Huber, Y., Stengele, M. and Zennegg, M., (2005). Brominated Flame Retardants in Waste Electrical and Electronic Equipment: Substance Flows in a Recycling Plant. *Environmental Science & Technology*, 39(22), 8691-8699. DOI: 10.1021/es051170k
- Ordaz-Oliver, M., Jiménez-Muñoz, E., Gutiérrez-Moreno, E., Borja-Soto, C. E., Ordaz, P., & Montiel-Hernández, J. F. (2024). Application of artificial neural networks for recovery of Cu from electronic waste by dynamic acid leaching: A sustainable approach. *Waste and Biomass Valorization*, 15(12), 7057-7076.
- Salinas-Rodríguez, E., Hernández-Ávila, J., Reyes-Valderrama, M. I., Rodríguez-Lugo, V., Montiel-Hernández, J. F., & Cerecedo-Sáenz, E. (2021). Recuperación de oro y metales base a partir de desechos de placas de circuitos impresos. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 9(Especial2), 62–71. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9iEspecial2.7681>
- Smith, R. L., & Behdad, S. (2025). From present to future: A review of e-waste recycling processes. *Waste Management*, 204, 114863. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114863>
- Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers*. McGraw-Hill.
- Totten, G. E., Xie, L., & Funatani, K. (2003). *Handbook of mechanical alloy design* (Vol. 164). CRC press.
- Vásquez, J., García, V., Becerra, J., Ramos, N., Carrizales, J., & Ronceros, J. (2026, June). Evaluation of Abrasive Wear in Twin-Screw Shredder Blades for PET Block Recycling through DEM. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 3225, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.
- Zheng, Y., Shen, Z., Ma, S., Cai, C., Zhao, X. and Xing, Y., (2009). A novel approach to recycling of glass fibers from nonmetal materials of waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 170 (2-3), 978-982. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.065
- Zhuo, X., Guo, J., Lin, K., Huang, K. and Deng, J., (2013). Leaching characteristics of heavy metals and brominated flame retardants from waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 246-247, 96-102. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.065