

# **TECNOLOGICO NACIONAL DE MÉXICO**

## **Instituto Tecnológico de Culiacán**



### **TITULACIÓN INTEGRAL**

**OPCION:**  
**TESIS PROFESIONAL**

**NOMBRE DEL PROYECTO:**  
Diseño y construcción de una pulverizadora de pet

**ALUMNOS:**  
Jesus Alberto Ibarra Acosta  
Luis Fernando López Miranda

**CARRERA:**  
Ingeniería Mecánica

**No. DE CONTROL:**  
20170152  
20170156

Culiacán, Sinaloa, 2025



Instituto Tecnológico de Culiacán

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ASUNTO: **Autorización de Impresión**

Culiacán, Sinaloa, 26/09/2025 15:15

**C. JESUS ALBERTO IBARRA ACOSTA Y LUIS FERNANDO LOPEZ MIRANDA  
PASANTE(S) DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
P R E S E N T E.**

De acuerdo con fallo emitido por la Comisión Revisora Integrada por:

Cédula Profesional

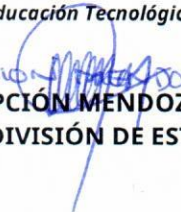
|             |                                                                                       |          |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Presidente: | Doctor en Ingeniería de Materiales<br><b>Ismael Díaz Peña</b>                         | 9798300  |
| Secretario: | Doctor en Ciencias de la Ingeniería<br><b>Omar Jhovany Payan Serrano</b>              | 11461565 |
| Vocal:      | Doctorado en Ciencia y Tecnología de Alimentos<br><b>Jennifer Vianey Félix Medina</b> | 12558860 |

Y considerando que reúne los requisitos establecidos en la Opción: **TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PULVERIZADORA DE PET"**, damos a usted nuestra autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional.

Sin otro particular, quedo de usted.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®

  
**LIC. CONCEPCIÓN MENDOZA ROSALES**  
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CULIACÁN  
DEPARTAMENTO DE  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



**2025**  
Año de  
**La Mujer  
Indígena**

Juan de Dios Bátiz 310 Pte. Col. Guadalupe C.P. 80220  
Culiacán, Sinaloa. Tel. 667-454-0100  
tecnm.mx www.culiacan.tecnm.mx



## INDICE

|       |                                                     |    |
|-------|-----------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUCCION.....                                   | 1  |
| 1.1   | Planteamiento del problema.....                     | 3  |
| 1.2   | Objetivo general.....                               | 4  |
| 1.3   | Objetivos específicos.....                          | 4  |
| 1.4   | Justificación .....                                 | 5  |
| 1.5   | Alcance .....                                       | 7  |
| 2     | FUNDAMENTO TEÓRICO.....                             | 8  |
| 2.1   | Teraftalato de polietileno (PET).....               | 8  |
| 2.2   | Propiedades y características básicas del PET ..... | 8  |
| 2.3   | Ventajas y desventajas del PET .....                | 9  |
| 2.3.1 | Versatilidad.....                                   | 9  |
| 2.3.2 | Seguridad .....                                     | 9  |
| 2.3.3 | Reciclabilidad .....                                | 9  |
| 2.3.4 | Comportamiento térmico .....                        | 9  |
| 2.3.5 | Limitaciones del RPET .....                         | 10 |
| 2.3.6 | Impacto ambiental .....                             | 10 |
| 2.4   | Proceso de reciclaje de PET .....                   | 10 |
| 2.4.1 | Recolección .....                                   | 10 |
| 2.4.2 | Reciclado.....                                      | 11 |
| 2.4.3 | Manufactura .....                                   | 11 |
| 2.5   | Contaminación ambiental causada por el PET .....    | 12 |

|       |                                                                        |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6   | Consumo y acopio de PET .....                                          | 15 |
| 2.7   | Regulacion ambiental .....                                             | 17 |
| 2.7.1 | Ley general de economía circular .....                                 | 17 |
| 2.8   | Economía circular .....                                                | 17 |
| 2.9   | Diseño de experimentos con matrices ortogonales (método Taguchi) ..... | 18 |
| 2.9.1 | Concepto de Ortogonalidad .....                                        | 19 |
| 2.9.2 | AO L8 ( $2^7$ ) .....                                                  | 20 |
| 3     | METODOLOGIA .....                                                      | 21 |
| 3.1   | Recolección y selección de los materiales .....                        | 21 |
| 3.1.1 | Contenedor .....                                                       | 21 |
| 3.1.2 | Motor .....                                                            | 22 |
| 3.1.3 | Sistema de compactacion .....                                          | 23 |
| 3.1.4 | Estructura base .....                                                  | 23 |
| 3.2   | Herramientas utilizadas .....                                          | 24 |
| 3.2.1 | Reguilete .....                                                        | 24 |
| 3.2.2 | Máquina de soldar .....                                                | 25 |
| 3.2.3 | Taladro .....                                                          | 26 |
| 3.3   | Materia prima utilizada .....                                          | 26 |
| 3.3.1 | Lamina de aluminio .....                                               | 26 |
| 3.3.2 | Lamina de acero.....                                                   | 27 |
| 3.4   | Consumibles utilizados.....                                            | 28 |
| 3.4.1 | Disco de corte .....                                                   | 28 |
| 3.4.2 | Resistol 5000.....                                                     | 28 |

|       |                                                              |    |
|-------|--------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.3 | Soldadura .....                                              | 29 |
| 3.4.4 | Lijas .....                                                  | 29 |
| 3.5   | Optimización del proceso de obtención del polvo de pet ..... | 30 |
| 4     | RESULTADOS .....                                             | 33 |
| 4.1   | Construcción de la maquina pulverizadora de pet .....        | 33 |
| 4.1.1 | Diseños de prototipos del contenedor.....                    | 33 |
| 4.1.2 | Propuesta seleccionada (Contenedor).....                     | 36 |
| 4.1.3 | Diseño del sistema de compactación.....                      | 36 |
| 4.1.4 | Construcción del sistema de compactación.....                | 37 |
| 4.2   | Estructura base.....                                         | 39 |
| 4.2.1 | Construcción de la Estructura base .....                     | 39 |
| 4.3   | Ensamblaje .....                                             | 41 |
| 4.4   | Puesta en marcha.....                                        | 42 |
| 4.5   | Pulverización mecánica de botellas de pet .....              | 42 |
| 4.6   | Medición de tamaño de partículas de polvo de PET .....       | 43 |
| 4.7   | Optimización .....                                           | 44 |
| 5     | CONCLUSIONES .....                                           | 49 |
| 6     | BIBLIOGRAFIA.....                                            | 51 |
| 7     | ANEXOS .....                                                 | 52 |
| 7.1   | Experimento 1, medición y pesaje de partículas .....         | 52 |
| 7.2   | Experimento 2, medición y pesaje de partículas .....         | 52 |
| 7.3   | Experimento 3, medición y pesaje de partículas .....         | 53 |
| 7.4   | Experimento 4, medición y pesaje de partículas .....         | 53 |

|     |                                                     |    |
|-----|-----------------------------------------------------|----|
| 7.5 | Experimento 5, medición y pesaje de partículas..... | 54 |
| 7.6 | Experimento 6, medición y pesaje de partículas..... | 54 |
| 7.7 | Experimento 7, medición y pesaje de partículas..... | 55 |
| 7.8 | Experimento 8, medición y pesaje de partículas..... | 55 |

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 2—1: Estructura molecular del Tereftalato de Polietileno (PET)</i> ..... | 8  |
| <i>Figura 2—2: Pacas de botellas de PET</i> .....                                  | 10 |
| <i>Figura 2—3: PET Molido</i> .....                                                | 11 |
| <i>Figura 2—4: Materia prima de PET Molido</i> .....                               | 11 |
| <i>Figura 2—5: Contaminacion terrestre</i> .....                                   | 12 |
| <i>Figura 2—6: Contaminacion por plasticos en el oceano</i> .....                  | 12 |
| <i>Figura 2—7: Comparativo de basura plastica en los eceanos</i> .....             | 13 |
| <i>Figura 2—8: Isla de plastico entre Hawai y California</i> .....                 | 14 |
| <i>Figura 2—9: Consumo Nacional Aparente de Envases de PET</i> .....               | 15 |
| <i>Figura 2—10: Tasa de acopio de botellas de PET en Mexico (historico)</i> .....  | 16 |
| <i>Figura 2—11: Material recuperado en Mexico</i> .....                            | 16 |
| <i>Tabla 2—1: Arreglo ortogonal <math>AO_8</math> (2<sup>7</sup>)</i> .....        | 19 |
| <i>Tabla 3—1: Características de cubeta</i> .....                                  | 21 |
| <i>Tabla 3—2: Ficha tecnica motor SIEMENS HP 3/4</i> .....                         | 22 |
| <i>Tabla 3—3: Ficha tecnica Tornillo Acme 5/8" 6 hpp</i> .....                     | 23 |
| <i>Tabla 3—4: Ficha tecnica PTR 1" x 1" Calibre 10</i> .....                       | 24 |
| <i>Tabla 3—5: Ficha tecnica esmeriladora angular</i> .....                         | 24 |
| <i>Tabla 3—6: Ficha tecnica maquina de soldar</i> .....                            | 25 |
| <i>Tabla 3—7: Ficha tecnica taladro</i> .....                                      | 26 |
| <i>Tabla 3—8: Ficha tecnica lamina de aluminio calibre 12</i> .....                | 27 |
| <i>Tabla 3—9: Ficha tecnica lamina de acero</i> .....                              | 27 |
| <i>Tabla 3—10: Ficha tecnica disco de corte</i> .....                              | 28 |
| <i>Tabla 3—11: Ficha tecnica Resistol 5000</i> .....                               | 28 |
| <i>Tabla 3—12: Ficha tecnica Electrodo revestido E-6011</i> .....                  | 29 |
| <i>Tabla 3—13: Ficha tecnica Lija grano 36</i> .....                               | 30 |
| <i>Tabla 3—14: Ficha tecnica Lija grano 80</i> .....                               | 30 |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tabla 3—15: Descripción de los factores y niveles a utilizar</i> ..... | 32 |
| <i>Tabla 3—16: AO L8 (2<sup>7</sup>)</i> .....                            | 32 |
| <i>Figura 4—1: Prototipo #1</i> .....                                     | 34 |
| <i>Figura 4—2: Sistema de transmisión de movimiento</i> .....             | 34 |
| <i>Figura 4—3: Prototipo #2</i> .....                                     | 35 |
| <i>Figura 4—4: Contenedor de la pulverizadora de PET</i> .....            | 36 |
| <i>Figura 4—5: Diseño 3D del sistema de compactación</i> .....            | 37 |
| <i>Figura 4—6: Buje de sujeción</i> .....                                 | 38 |
| <i>Figura 4—7: Sistema de compactación</i> .....                          | 38 |
| <i>Figura 4—8: Diseño 3D Estructura base</i> .....                        | 39 |
| <i>Figura 4—9: Estructura base de la pulverizadora de pet</i> .....       | 40 |
| <i>Figura 4—10: Pulverizadora de pet</i> .....                            | 41 |
| <i>Tabla 4—1: Gramos pulverizados por cada experimento</i> .....          | 42 |
| <i>Tabla 4—2: Tamaño de partículas de polvo de PET</i> .....              | 43 |
| <i>Tabla 4—3: Porcentajes de pulverización</i> .....                      | 44 |
| <i>Tabla 4—4: Arreglo ortogonal</i> .....                                 | 45 |
| <i>Tabla 4—5: Coeficientes estimados del modelo lineal</i> .....          | 45 |
| <i>Tabla 4—6: Análisis de varianza (ANOVA)</i> .....                      | 46 |
| <i>Tabla 4—7: Respuesta promedio por niveles y diferencia</i> .....       | 46 |

# **1 INTRODUCCION**

La contaminación ambiental representa en la actualidad uno de los problemas mas graves a nivel mundial. Este fenómeno surge cuando se introducen sustancias o materiales ajenos al entorno natural en cantidades que superen ciertos niveles de tolerancia, provocando efectos negativos a los seres vivos expuestos a dicha contaminación.

Ante el incremento constante de los niveles de contaminación, se vuelve indispensable el desarrollo de soluciones orientadas a disminuir los desechos de botellas plásticas (PET), con el propósito de fomentar su reutilización y reciclaje.

El reciclaje de PET no solo contribuye a reducir el volumen de residuos plásticos acumulados en basureros y ecosistemas, sino que también juega un papel importante en la conservación de recursos naturales y en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

Al reciclar ese material, se requiere un consumo energético menor para fabricar nuevos productos, lo que implica un ahorro significativo de recursos. De hecho, se estima que el reciclaje de una sola botella puede generar la energía suficiente para mantener encendida una bombilla durante seis horas, lo cual reduce tanto el gasto energético como la huella de carbono asociada a la producción de materias primas vírgenes

De igual manera, la disminución de botellas enviadas a los basureros contribuye a limitar la liberación de gases de efecto invernadero, principalmente metano, generados en la descomposición de los desechos, los cuales contribuyen directamente en el cambio climático y en múltiples desequilibrios ambientales.

A nivel económico, el reciclaje de PET ofrece beneficios relevantes, ya que las plantas de reciclaje generan empleo y el material reciclado puede transformarse en diversos productos, como fibras textiles, alfombras o nuevas botellas, incrementando la demanda de insumos reciclados y fortaleciendo la economía circular.

Finalmente, el reciclaje de PET constituye una parte fundamental en la gestión sostenible de residuos, pues fomenta una economía circular donde los materiales se reciclan y reutilizan en lugar de desecharse y desperdiciarse. Con ello, no solo se mitigan los impactos ambientales, sino que también se potencia la innovación y el desarrollo económico sostenible.

## **1.1 Planteamiento del problema**

Con el paso de los años, la acumulación de residuos de tereftalato de polietileno (PET) se ha convertido en un problema crítico a nivel mundial, debido a su creciente dispersión y al incremento exponencial de su producción y desecho. Uno de los principales focos de contaminación se localiza en los océanos, donde los envases y bolsas de PET afectan de manera directa tanto la vida marina como a los ecosistemas terrestres. Esta situación ha impulsado la necesidad de desarrollar equipos como la pulverizadora de PET, cuyo propósito es lograr una reutilización más eficiente de mayor pureza.

Los métodos tradicionales empleados para la transformación del PET no siempre han resultado sostenibles ni recomendables en la actualidad. Sin embargo, numerosas industrias han comenzado a adoptar procesos de reciclaje debido a la necesidad de reducir pérdidas de material y de gestionar de manera responsable los residuos generados, evitando con ellos mayores impactos ambientales.

Una alternativa viable es la pulverización del plástico residual, ya que este procedimiento permite convertirlo nuevamente en materia prima y simplificar así su reintegración en distintos procesos productivos. Además, la versatilidad del material pulverizado posibilita la formulación de compuestos personalizados con propiedades y características específicas, lo que amplía sus aplicaciones industriales.

En este contexto, México se ha consolidado como un referente en el reciclaje de plásticos, con un enfoque estratégico en la recolección, procesamiento y reintegración del PET, contribuyendo de manera significativa al fortalecimiento de la economía circular y a la reducción de la contaminación ambiental.

## **1.2 Objetivo general**

Diseñar y construir una pulverizadora de pet, para transformar los desechos de botellas en pequeñas partículas y facilitar su reciclaje.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Diseñar el sistema mecánico el cual las botellas van a ser pulverizadas
- Seleccionar la lija del grano adecuado para una correcta pulverización
- Diseñar un sistema que logre aumentar la producción de polvos de PET
- Comprobar el buen funcionamiento de la Pulverizadora de PET
- Medir el tamaño de los polvos generados
- Calcular la cantidad de polvo generada en base al tiempo

#### 1.4 Justificación

Uno de los principales retos asociados al tereftalato de polietileno es su adecuado manejo y reciclaje. Cuando este material no se procesa de manera correcta puede generar impactos ambientales significativos, contribuyendo a la contaminación de océanos, ríos, mares y suelos. Por ello, resulta imprescindible diseñar sistemas eficientes de reciclaje que permiten su reutilización en diversas aplicaciones.

En la actualidad, el crecimiento poblacional y la falta conciencia sobre la importancia de una ecología sustentable han ocasionado problemas como el deterioro de los suelos y la aparición de enfermedades que afectan la salud humana.

En el caso de México una de las iniciativas más destacadas en materia de reutilización de PET ha sido impulsada por Plastics Technology México, medio especializado que ha publicado artículos de alto impacto en los canales con la síntesis, polimerización y reciclaje de PET, así como con los desafíos técnicos en procesos de moldeo por soplado de botellas. Estos contenidos también incluyen casos de éxito en el reciclaje de PET en el país, el cual ha sido posicionado como líder mundial en acopio y reciclaje botella a botella de grado alimenticio.

Otros temas tratados incluyen los procesos de inyección soplado y extrusión de película y fibra en el procesamiento de PET, así como la relevancia de la cristalinidad de los polímeros para mejorar tanto la eficiencia de producción como la calidad de los productos fabricados a partir de PET.

En este caso el PET se puede encontrar generalmente en cualquier parte ya que es un producto que todas las personas lo utilizan en su día a día, químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido Tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos conocidos como poliésteres. Se trata de un polímero termoplástico lineal con un elevado grado de cristalinidad. Como la mayoría de los termoplásticos, puede ser procesado mediante extrusión, inyección, soplado, soplado de preforma y termoformado. Para evitar un crecimiento excesivo de las esferulitas y lamelas cristalinas, es necesario enfriar rápidamente el material. Este enfriamiento rápido favorece una mayor

transparencia, ya que los cristales no se desarrollan completamente y su tamaño no interfiere con la trayectoria de la luz visible, según lo explica la teoría cuántica.

Gracias a sus propiedades fisicoquímicas el PET ha sido consolidado como un material de gran relevancia industrial con aplicaciones que abarcan desde fibras textiles hasta envases, botellas, bandejas, flejes y láminas.

Por lo tanto, se hace necesario el diseño y construcción de una máquina pulverizadora de PET con condiciones estructurales adecuadas, capaz de transformar este material en partículas finas facilitando así su reciclaje y posterior aprovechamiento de nuevas aplicaciones industriales.

### **1.5 Alcance**

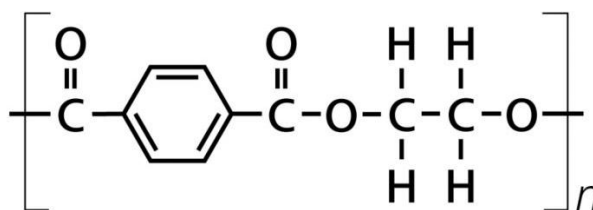
La elaboración de la pulverizadora de PET se realizará de cero, hasta su funcionamiento y cumpliendo con su objetivo, este proyecto esta echo con fines estudiantiles, no se elaborará para alguna compañía ni con fines lucrativos.

- Diseñar y elaborar un dispositivo que favorezca la pulverización de PET
- Comprobar el correcto funcionamiento de la maquina pulverizadora de PET.
- Generar un entendimiento del reciclaje de PET para así establecer parámetros si es mejor obtener el PET en pellets o en su pulverización completa para un mejor reciclaje.

## 2 FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Teraftalato de polietileno (PET)

El PET es un polímero termoplástico el cual se obtiene a partir de derivados del petróleo, gas y aire. Este polímero se distingue de los demás porque tiene la cadena polimérica más rígida posible para un termoplástico con una excelente combinación de propiedades mecánicas y térmicas. Estas cualidades le dan al PET la posibilidad de utilizarse para aplicaciones en distintas áreas como la eléctrica y la electrónica, y en productos como envases para bebidas, películas, cintas magnéticas, aislantes eléctricos, fibras, perfiles decorativos, tuberías y componentes automotrices, entre otros. (Baldenebro 2015).



*Figura 2—1: Estructura molecular del Tereftalato de Polietileno (PET).  
Fuente: (Donini y Zanin, 1999).*

### 2.2 Propiedades y características básicas del PET

- Procesable por soplado, inyección y extrusión. Apto para producir frascos, botellas, laminas, planchas y piezas.
- Transparencia y brillo con efecto lupa
- Excelentes propiedades mecánicas
- Barrera de gases
- Biorientable – cristizable
- Esterilizable por gamma y oxido de etileno
- Costo – rendimiento
- Ranqueado N°1 en reciclado
- Liviano

## 2.3 Ventajas y desventajas del PET

El PET como fue mencionado anteriormente se le conoce como tereftalato de polietileno o polietileno de tereftalato, es una resina termoplástica que, desde el punto de vista químico, es un polímero resultante de una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Por esta razón, forma parte del grupo de materiales sintéticos conocidos como poliésteres, y estas son algunas de sus características positivas y negativas.

### 2.3.1 Versatilidad

El polietileno provee un gas fuerte y una barrera contra la humedad, haciéndola una opción popular para las botellas plásticas de bebidas, salsas, aderezos de ensalada, bandejas de comida y paquetes para comida. Las botellas hechas con tereftalato de polietileno no se rompen por su composición, es un producto maleable y pesan alrededor de la décima parte de su homólogo de vidrio. (Mundo plástico, 2015)

### 2.3.2 Seguridad

Un estudio dirigido por el *International Life Sciences Institute* indica que el polietileno y sus compuestos asociados son “biológicamente inertes si se ingieren”. Por lo tanto, no es un riesgo para la salud humana.

### 2.3.3 Reciclabilidad

El polietileno es fácil de reprocesar y se rompe fácilmente en sus monómeros básicos. El polietileno reciclado es un ingrediente común en las botellas, empaques, sombreros, equipajes, aislantes, muebles y contenedores de productos para el cuidado de la salud.

### 2.3.4 Comportamiento térmico

Los poliésteres no mantienen buenas propiedades cuando se les somete a temperaturas superiores a los 70° C, sin embargo, se han logrado mejoras modificando los equipos y se ha logrado que el PET cristalizado (opaco) alcance temperaturas de hasta 230° C.

### 2.3.5 Limitaciones del RPET

El PET puede reciclarse para obtener un material denominado RPET, sin embargo, este no es apto para la fabricación de envases destinados a la industria alimentaria, ya que el proceso de reciclaje no alcanza temperaturas lo suficientemente altas para garantizar la esterilización del producto.

### 2.3.6 Impacto ambiental

La producción de plástico incluidos el PET es uno de los procesos de fabricación más intensivos en energía del mundo. Este material se fabrica a partir de combustibles fósiles, como el petróleo crudo, que se transforma mediante calor y diversos aditivos en un polímero.

En 2019, los plásticos incluidos el PET generaron 1,800 millones de toneladas métricas de emisiones de gases de efecto invernadero, el 3.4% del total mundial. (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2019)

## 2.4 Proceso de reciclaje de PET

El proceso de reciclaje de envases de PET consta de tres etapas principales, cada una de las cuales cumple una función específica para transformar los residuos plásticos en un material reutilizable.

### 2.4.1 Recolección

En esta etapa el material es recolectado y transportado a algún centro de acopio, donde después se procede a su segregación, descontaminación, compactación o molido para luego almacenarlo. El resultado de esta etapa es la hojuela sucia y las pacas de botellas.



*Figura 2—2: Pacas de botellas de PET.  
Fuente: (Recicla Mexico, 2024).*

#### 2.4.2 Reciclado

El reciclado es un proceso industrial a partir de procesos físicos, químicos y térmicos, en el cual a las hojuelas sucias pasan a otro tipo de industrias donde se lleva a cabo la segunda etapa, que consta de molido, lavado de la hojuela, separación, secado, pelletizado, post - condensación y almacenaje. (eindustria, 2012)



*Figura 2—3: PET Molido.  
Fuente: (LlobreGats, 2023).*

#### 2.4.3 Manufactura

La tercera etapa consiste en trasladar y comercializar la hojuela de PET limpia y libre de impurezas con los fabricantes de nuevos productos, quienes la utilizan como materia prima para elaborar una variedad de productos. Entre estos se encuentran botellas, almohadas, tapabocas, cofias, flejes, rodillos para pintar, fibras térmicas para chamarras, cepillos de dientes, bolsas para dormir, así como fibra de poliéster para prendas de vestir e incluso envases nuevos aptos para uso alimenticio.



*Figura 2—4: Materia prima de PET Molido.  
Fuente: (La red, reciclados plasticos, 2017).*

## 2.5 Contaminación ambiental causada por el PET

En los últimos años, el uso de plástico principalmente el Polietileno tereftalato (PET) ha incrementado de manera exponencial debido a su bajo costo, ligereza y durabilidad. Este material es ampliamente utilizado en la fabricación de botellas, envases y textiles, convirtiéndose en una parte esencial de la vida cotidiana. Sin embargo, su masiva producción y uso desmesurado han generado un gigantesco problema ambiental.

El PET, al ser un plástico no biodegradable, puede permanecer en el medio ambiente durante siglos, acumulándose en ecosistemas terrestres y marinos, afectando la biodiversidad y contribuyendo al cambio climático.



*Figura 2—5: Contaminación terrestre.  
Fuente: (National Geographic España, 2022).*



*Figura 2—6: Contaminación por plásticos en el océano.  
Fuente: (SEMARNAT, 2018).*

México se encuentra entre los países que produce mayor cantidad de polietileno tereftalato (PET), debido al alto consumo de refrescos y de agua embotellada. Se estima que al año se producen 200 botellas de PET por cada mexicano. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2018)

Esto quiere decir que al año mas de ocho millones de toneladas de plásticos van a dar a los océanos, lo que es equivalente a la carga de un camión de basura cada minuto. Con la radiación del sol, el plástico libera toxinas en el agua que afectan a los organismos que se encuentran a distintos niveles de profundidad y también a distintas aves marinas.

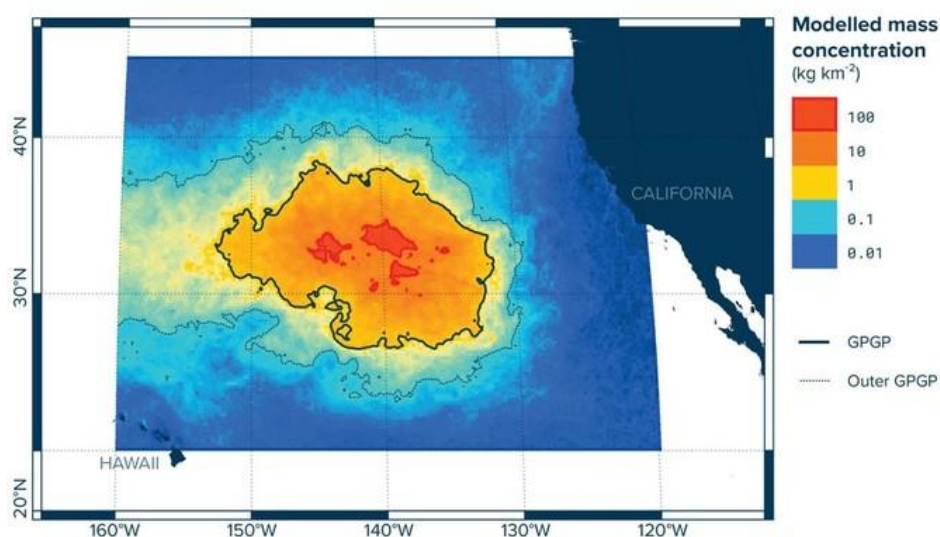


Figura 2—7: Comparativo de basura plastica en los eceanos.  
Fuente: (Aquae, 2018).

Los plásticos de gran tamaño pueden causar asfixia o atragantamiento en los animales, mientras que los micro plásticos (partículas sintéticas diminutas y de difícil degradación) son ingeridos involuntariamente por muchas especies marinas. Estos se encuentran en productos como detergentes, pasta de dientes, cosméticos, exfoliantes, bloqueadores solares o incluso en diversas prendas de ropa fabricada con fibras sintéticas. Una vez ingeridos, afecta la alimentación y la producción de la fauna marina. Además, estos residuos continúan su trayecto a lo largo de la cadena alimentaria, llegando eventualmente al ser humano a través del consumo de alimentos.

De los millones de toneladas de plástico que se producen, sólo el 14% de envases y embalajes es recogido para ser reciclado en todo el mundo. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2018)

En el Océano Pacífico, debido a las corrientes marinas, se ha formado una isla de basura conocida como el “vórtice de plástico”. Su tamaño es comparable con la superficie de Francia y está ubicada cerca de Hawái y la costa oeste de Estados Unidos. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2018)

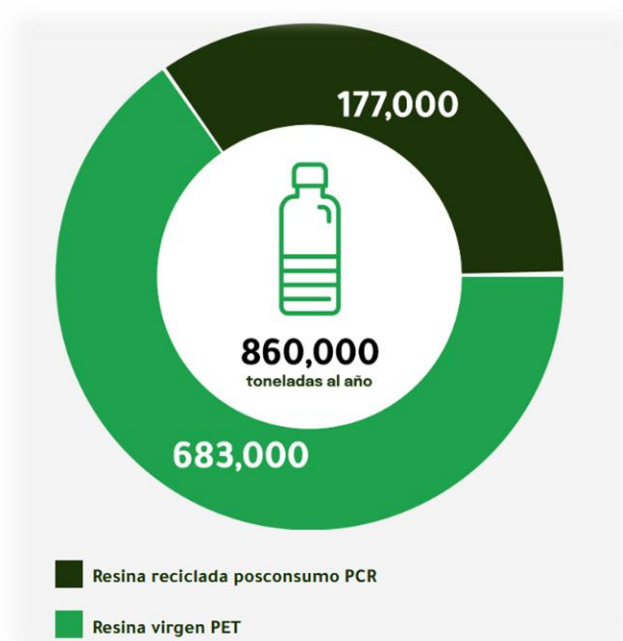


*Figura 2—8: Isla de plástico entre Hawai y California.  
Fuente: (The Ocean Cleanup, 2024).*

El aumento en el uso de este material amenaza el medio ambiente, lo que pone en peligro nuestra salud, la de los ecosistemas (incluyendo los acuáticos) y las especies que los habitan. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2018)

## 2.6 Consumo y acopio de PET

Hoy en día el consumo de envases de PET en México es alto, cerca de 860,000 toneladas al año en 2024, de esa cantidad se recuperaron 578,000 toneladas, eso quiere decir que se recupero el 64%.

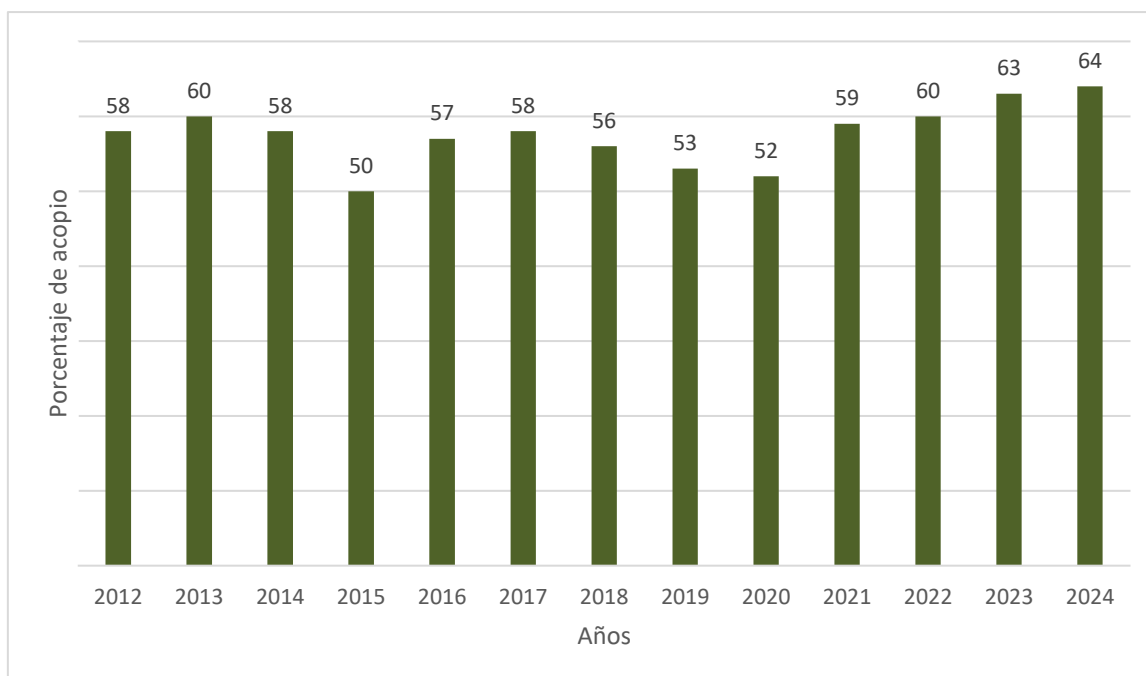


*Figura 2—9: Consumo Nacional Aparente de Envases de PET.  
Fuente: (ECOCE, 2024).*

En los últimos 12 años, México ha logrado recuperar más del 50% de los envases de PET que se mandan al mercado anualmente, posicionándose como uno de los países líderes en América Latina en el reciclaje de este material. (ECOCE, 2024)

Gracias a los esfuerzos conjuntos entre la industria, organizaciones civiles y gobiernos locales, se ha construido una sólida infraestructura de acopio y reciclaje que ha permitido transformar millones de botellas en nuevos productos.

La meta para el año 2030 es alcanzar una tasa de recuperación del 80% (ECOCE, 2024), lo que implicaría no solo aumentar la eficiencia de los sistemas actuales, sino también fomentar una mayor conciencia ambiental entre los consumidores, impulsar la innovación en envases sustentables y fortalecer los esquemas de economía en el país.



*Figura 2—10: Tasa de acopio de botellas de PET en Mexico (historico)*  
*Fuente: (ECOCE, 2024)*

En Mexico el 89% del PET recuperado (514,420 toneladas) se aprovecha para fabricar nuevos productos. (ECOCE, 2024)



*Figura 2—11: Material recuperado en Mexico*  
*Fuente: (ECOCE, 2024)*

## 2.7 Regulación ambiental

En noviembre de 2021, México aprobó la Ley General de Economía Circular que afectará la fabricación, elaboración, producción, importación y manufactura de empaques y envases.

Esta nueva ley exige que las empresas registren ante la SEMARNAT un Plan General de Economía Circular, aumenten gradualmente el porcentaje de contenido reciclado y puedan lograr la meta de cero desperdicios.

Ahora más que nunca es de vital importancia que las empresas reevalúen la composición de sus empaques y envases; sobre todo en aquellos que sean de un solo uso, de ciclo de vida corto, no reciclables, o con multi materiales como laminados complejos. (*Plastics Technology México*, 2023).

### 2.7.1 Ley general de economía circular

Unos de los principales propósitos de esta ley es llevar a cabo el uso responsable y eficiente de productos, servicios, materiales y subproductos así priorizando la reutilización, reciclaje y transformación de PET.

De acuerdo con la ley, las empresas están obligadas a:

- Registren un plan general de economía circular ante la Agencia Federal Ambiental (SEMARNAT).
- Incorporen 20 % de contenido reciclado para el año 2025. 19
- Incorporen 30 % de contenido reciclado para el año 2030.
- Logren cero desperdicios para el año 2030.

## 2.8 Economía circular

Hoy en día hay muchas razones por las cuales el PET es un material de elección para empresas que buscan una circularidad (minimizar desperdicios).

**El PET es infinitamente reciclable:** El PET puede reciclarse al 100 % una y otra vez para regresar de nuevo al mismo empaque.

**Ampliamente reciclado hoy en día:** El PET es uno de los plásticos más reciclados en todo el mundo, puede restablecerse fácilmente y regresar al mercado con los mismos estándares de higiene, seguridad y desempeño que el material original. (*Plastics Technology México*, 2023).

**Empaque más liviano:** A comparación con otros materiales, el PET ofrece la oportunidad de producir el empaque más liviano del mercado. Su alta resistencia y flexibilidad de diseño es la clave para la eficiencia energética.

**Ahorros maximizados:** El aligeramiento y la reducción energética requerida para producir un empaque de PET. (*Plastics Technology México*, 2023).

**Suministro seguro y ampliamente disponible:** Con los costos de energía cada vez más altos y alteraciones en la cadena de suministro, el PET es una excelente solución ya que posee un constante y estable suministro.

**Libertad de diseño y diferenciación de productos:** El PET permite la producción de empaques en una variedad más amplia de tamaños, volúmenes y formas. (*Plastics Technology México*, 2023).

## **2.9 Diseño de experimentos con matrices ortogonales (método Taguchi)**

Una matriz experimental consiste en un conjunto de experimentos en los que la configuración de los diversos parámetros de un producto o proceso de interés se cambian de un experimento a otro y, de los cuales, los datos obtenidos se analizan para determinar los efectos de los parámetros en la respuesta del producto o proceso. (Phadke, 2000). Es decir, un experimento con un arreglo ortogonal consiste en una matriz experimental que utiliza estructuras especiales conocidas como matrices ortogonales, este método es sumamente útil en la ingeniería de calidad en general y especialmente en el diseño robusto para optimizar productos y procesos.

El método Taguchi cuenta con un conjunto de 20 matrices especiales, de las cuales 18 son de uso común, mientras que las otras dos restantes requieren de una explicación especial. Cada matriz organiza de manera adecuada las distintas combinaciones de niveles de los factores, cumpliendo con el principio básico y fundamental de ortogonalidad.

Taguchi utiliza la notación  $AON(sm)$  para referirse al arreglo ortogonal, con la notación  $LN(sm)$ , donde **L** corresponde a la inicial de la palabra en ingles *Layout* que significa diseño, **N** representa numero de corridas, **s** indica los niveles de los factores dentro del arreglo ortogonal. Cuando el factor esta a dos niveles, el numero “1” se asigna para el nivel bajo y el numero “2” para nivel alto. Finalmente, **m** señala el número de columnas.

Tabla 2—1: Arreglo ortogonal  $AO_8(2^7)$

| Numero de filas | Numero de columnas |   |   |   |   |   |   |
|-----------------|--------------------|---|---|---|---|---|---|
|                 | 1                  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1               | 1                  | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2               | 1                  | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3               | 1                  | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 4               | 1                  | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 5               | 2                  | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 6               | 2                  | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 7               | 2                  | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 8               | 2                  | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |

### 2.9.1 Concepto de Ortogonalidad

Se considera que dos columnas son ortogonales cuando su producto punto es igual a cero, lo que indica que son linealmente independientes y permiten evaluar el efecto de cada factor de forma individual. La ortogonalidad garantiza que los efectos de los factores sean independientes entre sí, de manera que cada columna aporta información única al diseño.

(Vuchkov & Boyadjieva, 2001) y (Roy, 2001) indican que una matriz de diseño es ortogonal si en cada par de columnas la combinación de niveles aparece en el mismo número de veces.

(Barker, 2005) dice que hay ortogonalidad cuando en un experimento tiene covarianza de cero en cualquier par de columnas. Entre más grande la covarianza habrá una relación más grande entre variables, lo cual indica que, si se tiene una covarianza de cero, el análisis matemático producirá resultados que son independientes para cada variable.

### 2.9.2 AO L8 ( $2^7$ )

El método Taguchi emplea arreglos ortogonales para analizar como los factores afectan tanto los medios como la variabilidad de la respuesta. Un arreglo ortogonal supone que el diseño es equilibrado, lo que implica que los niveles de los factores se distribuyen de manera equitativa. Así, cada factor puede ser evaluado de forma independiente de los demás, lo que asegura que el impacto de un factor no influye con la estimación de otro. Además, los diseños de arreglos ortogonales se centran en los efectos principales, lo que puede reducir tanto el tiempo como los costos del experimento cuando se aplican diseños factoriales fraccionados.

La letra Mayúscula L representa a la inicial de la palabra *Layout* que en español significa diseño, el subíndice 8 significa que son 8 corridas, el 2 representa el numero de niveles para cada factor y el exponente 7 indica el numero de factores. En pocas palabras, este arreglo es una matriz en la que están representados 7 factores que están colocados como columnas y cada uno de ellos tiene dos niveles. Esto representa 1/16 de las 128 combinaciones posibles (8 de 128) de un experimento factorial completo.

El arreglo L8 ( $2^7$ ) únicamente requiere de 8 corridas, lo que constituye una fracción del diseño factorial completo. Este arreglo es ortogonal, lo que significa que los niveles de los factores se distribuyen de manera equitativa a lo largo del diseño. Las columnas de la tabla corresponden a los factores de control, las filas representan las corridas (combinación de niveles de los factores) y cada celda muestra el nivel del factor en esa corrida. En este caso, los niveles 1 y 2 se repiten 4 veces en cada factor dentro del arreglo.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Recolección y selección de los materiales

La recolección y selección de los materiales necesarios para la construcción de este proyecto es una de las etapas fundamentales para llevar a cabo la Pulverizadora de pet, elegir los materiales adecuados no solo influye en la funcionalidad y eficiencia del equipo, sino también su durabilidad, seguridad, costo y facilidad de fabricación.

Durante esta etapa, se analizan las exigencias operativas de la máquina, como la velocidad a la que debe girar, el volumen de masa que deberá contener, sistemas adicionales como el de compactación para aumentar la eficiencia, entre otros detalles que facilitan el uso de esta máquina.

##### 3.1.1 Contenedor

Inicialmente, se seleccionó un recipiente con una geometría cilíndrica, específicamente una cubeta metálica, con el objetivo de emplearla como unidad de almacenamiento. Esta elección se basó en su resistencia mecánica, capacidad volumétrica y compatibilidad con las condiciones operativas del proceso.



| Características       |        |
|-----------------------|--------|
| Modelo                | Cubeta |
| Capacidad volumétrica | 20L    |
| Material              | Lamina |
| Altura                | 34cm   |

Tabla 3—1: Características de cubeta

3.1.2 Motor

Se tomó la decisión de seleccionar un motor eléctrico, dado que este componente es el encargado de generar el movimiento mecánico necesario para accionar el mecanismo de pulverización. La función del motor es transformar la energía eléctrica en energía cinética, permitiendo así el funcionamiento eficiente del sistema encargado de pulverizar las botellas de pet en partículas finas. La elección del motor determinó parámetros como la potencia requerida y la velocidad de rotación.



| Especificaciones técnicas             |  | Página de Catálogo: 82                       |
|---------------------------------------|--|----------------------------------------------|
| Amperaje de Carga Total 2.5/1.3       |  | Servicio Continuo                            |
| HP 3/4                                |  | Cojinetes Balero de Bolas                    |
| RPM Nominal 3470                      |  | Material del Armazón Lámina Rolada           |
| Eficiencia Nominal 0.0074             |  | Normas ANCE                                  |
| Clase de Aislamiento B                |  | Temperatura Ambiente 40 Degrees C            |
| Factor de Servicio 1.25               |  | Armazón 56                                   |
| Fase 3                                |  | Periodo de Garantía del Fabricante 1-1/2 yr. |
| Hz 60                                 |  | Temperatura Máx. del Ambiente 40 Degrees C   |
| Tipo de Montaje del Motor Base Rígida |  | Cojinetes del Motor Bolas                    |
| Eje de Rotación del Motor SMR/SCMR    |  | Factor de Servicio del Motor 1.25            |
| Voltaje 220/440                       |  | Clasificación de Aislamiento B               |
| Artículo Motor                        |  | Diseño NEMA B                                |
| Protección Térmica Ninguna            |  |                                              |

Tabla 3—2: Ficha tecnica motor SIEMENS HP 3/4  
Fuente: (Grainger Mexico, 2025)

### 3.1.3 Sistema de compactacion

Con el fin de lograr la compactación eficiente de las botellas dentro del recipiente metálico, se decidió diseñar e implementar un sistema mecánico basado en un tornillo tipo Acme de 5/8" de diámetro y un paso de 6 hpp (hilos por pulgada). Este tipo de rosca fue seleccionado debido a su capacidad para transmitir grandes cargas axiales con alta eficiencia mecánica, características ideales para aplicaciones de compresión. El tornillo Acme actúa como elemento principal en la conversión del movimiento rotacional en movimiento lineal, permitiendo así aplicar una fuerza controlada y uniforme sobre las botellas para reducir su volumen y presionarlas a la lija.



#### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

- **Diámetro:** 5/8"
- **Longitud total:** 1 Metro
- **Paso de rosca:** 6 hilos por pulgada
- **Tipo de rosca:** Rosca ACME trapezoidal
- **Material:** Acero Inoxidable 18-8 (Grado 304)
- **Aplicaciones:** Maquinaria industrial, equipos alimenticios, ambientes corrosivos, sistemas de desplazamiento lineal

#### PROPIEDADES MECÁNICAS – ACERO INOXIDABLE 18-8:

- **Resistencia a la tracción:** ~75,000 psi (515 MPa)
- **Límite elástico:** ~30,000 psi (205 MPa)
- **Dureza:** Rockwell B80 – B95
- **Alargamiento mínimo:** ~40%

*Tabla 3—3: Ficha tecnica Tornillo Acme 5/8" 6 hpp  
Fuente: (Tornillos Torec, 2025)*

### 3.1.4 Estructura base

Con la finalidad de proporcionar un soporte sólido y confiable a la máquina, se tomó la decisión de diseñar y fabricar una estructura base que garantice la estabilidad general del sistema. Asimismo, se consideran aspectos ergonómicos y funcionales en el diseño, con el objetivo de facilitar el manejo y la operación de la máquina por parte del usuario, permitiendo un acceso cómodo a la tolva de llenado y puntos de mantenimiento.

Para la realización de dicha estructura se utilizó PTR de 1" x 1" calibre 10



| Dimensiones<br>AxB | Calibre | Espesor | Largo | Pieza x<br>Paquete | Kg/m | Norma  | NEG | GVZ | GVZ<br>VRD | PINT |
|--------------------|---------|---------|-------|--------------------|------|--------|-----|-----|------------|------|
| 1/2" x 1/2"        | 20      | 0.036   | 6.00  | 231                | 0.34 | A513   | *   | *   | *          | *    |
|                    | 18      | 0.048   | 6.00  | 231                | 0.44 | A513   | *   | *   | *          | *    |
| 5/8" x 5/8"        | 20      | 0.036   | 6.00  | 252                | 0.43 | A513   | *   | *   | *          | *    |
|                    | 18      | 0.048   | 6.00  | 252                | 0.56 | A513   | *   | *   | *          | *    |
| 3/4" x 3/4"        | 20      | 0.036   | 6.00  | 121                | 0.52 | A513   | -   | -   | ■          | ●    |
|                    | 18      | 0.048   | 6.00  | 121                | 0.68 | A513   | ●   | -   | ■          | ●    |
|                    | 16      | 0.060   | 6.00  | 121                | 0.84 | A513   | ●   | -   | -          | -    |
| 1" x 1"            | 14      | 0.075   | 6.00  | 121                | 1.02 | A513   | ●   | -   | -          | -    |
|                    | 20      | 0.036   | 6.00  | 100                | 0.70 | A513   | -   | -   | ■          | ●    |
|                    | 18      | 0.048   | 6.00  | 100                | 0.92 | A513   | ●   | -   | ■          | ●    |
|                    | 16      | 0.060   | 6.00  | 100                | 1.14 | A513   | ●   | -   | ■          | ●    |
|                    | 14      | 0.075   | 6.00  | 100                | 1.40 | A513   | ●   | ●   | -          | -    |
|                    | 13      | 0.090   | 6.00  | 100                | 1.65 | A513   | ●   | -   | -          | -    |
|                    | 12      | 0.105   | 6.00  | 100                | 1.90 | A513   | ●   | -   | -          | -    |
|                    | 11      | 0.120   | 6.00  | 100                | 1.94 | A500'B | ●   | -   | -          | -    |
|                    | 10      | 0.135   | 6.00  | 100                | 2.12 | A500'B | ●   | -   | -          | -    |

Tabla 3—4: Ficha tecnica PTR 1" x 1" Calibre 10  
Fuente: (Fortacero, 2025)

### 3.2 Herramientas utilizadas

#### 3.2.1 Regulete

Para llevar a cabo los procesos de corte en materiales metálicos destinados a la fabricación de la máquina, fue necesario emplear una herramienta de corte angular, conocida como regulete o esmeril angular, equipada con un disco abrasivo de corte adecuado para metal.

Esta herramienta portátil fue seleccionada por su versatilidad, facilidad de manejo y capacidad para realizar cortes precisos en distintos tipos de materiales ferrosos.



| CARACTERÍSTICAS                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Motor: 120 V C.A., 60Hz, 660 W</li><li>• Eje: 15,88 mm (5/8 pulg.) x 279,4 mm (11 pulg.) UNC</li><li>• RPM: 11000 (velocidad en vacío)</li><li>• Disco: 4-1/2" (115 mm)</li><li>• Cable: 2,43 m (8 pies)</li><li>• Peso: 1,81 kg (4 lb)</li></ul> |

Tabla 3—5: Ficha tecnica esmeriladora angular  
Fuente: (RYOBI, 2025)

### 3.2.2 Máquina de soldar

La soldadura es un proceso fundamental en la fabricación y ensamblaje de estructuras metálicas, ya que permite la unión permanente de componentes mediante la fusión de los materiales base.

En este proyecto, se hizo uso de una máquina de soldar como herramienta principal para asegurar la integridad estructural de las uniones entre materiales metálicos y otros elementos constructivos.



#### FICHA TÉCNICA

|                           |                          |
|---------------------------|--------------------------|
| POTENCIA DE ENTRADA       | 220/1/50-60              |
| SALIDA NOMINAL            | 160A@60%<br>110A@60%     |
| RANGO SALIDA              | 5-160A                   |
| DIMENSIONES (AL X AN X L) | 270 mm x 220 mm x 400 mm |
| PESO NETO                 | 9 kg                     |

Tabla 3—6: Ficha tecnica maquina de soldar  
Fuente: (WELDING, 2025)

### 3.2.3 Taladro

Se empleó un taladro como instrumento para la creación de orificios que permitieran el montaje de componentes mediante tornillería, pernos y opresores. La elección del tipo de taladro, así como de las brocas adecuadas, se basa en el tipo de material a perforar, el diámetro requerido y la profundidad de las perforaciones.



#### ESPECIFICACIONES

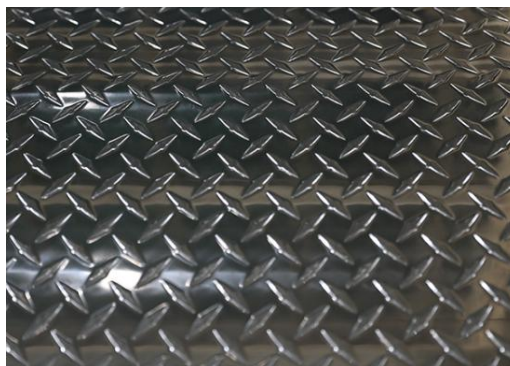
Modelo: STDH8013-B3  
Potencia: 800 W  
Voltaje: 127 V~ 60 Hz  
Velocidad: 0-3,200 rpm  
Impacto: 57,600 ipm  
Mandril: 1/2 pulg (13 mm)  
Capacidad de perforación:  
Madera: 32 mm  
Metal: 13 mm  
Concreto: 16 mm

Tabla 3—7: Ficha técnica taladro  
Fuente: (Ferrepac, 2025)

## 3.3 Materia prima utilizada

### 3.3.1 Lamina de aluminio

Para la creación de la base la cual será impulsada por el tornillo sin fin en el sistema de compactación se considero una lámina de aluminio calibre 12 debido que su peso es más ligero a comparación del acero entonces el tornillo tendrá que soportar menos fuerza y no se pandeará tanto.



| Clave Producto | Calibre (BWG) | Calibre (Inch) | Calibre (mm) | Dimensiones (Pies) | Dimensiones (metros) | Peso aprox (por hoja) | Peso aprox (por m2) |
|----------------|---------------|----------------|--------------|--------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| ALA1D0012410   | 12            | 0.109          | 2.77         | 4 x 10             | 1.22 x 3.05          | 27.91                 | 7.5                 |
| ALA1D0014410   | 14            | 0.83           | 2.11         | 4 x 10             | 1.22 x 3.05          | 21.25                 | 5.71                |
| ALA1D0016410   | 16            | 0.065          | 1.65         | 4 x 10             | 1.22 x 3.05          | 16.63                 | 4.47                |
| ALA1D0019410   | 19            | 0.042          | 1.07         | 4 x 10             | 1.24 x 3.05          | 12.7                  | 3.68                |
| ALA1D0020410   | 20            | 0.035          | 0.89         | 4 x 10             | 1.22 x 3.05          | 8.97                  | 2.41                |
| APA1D01/4410   | 1/4           | 0.25           | 6.35         | 4 x 10             | 1.22 x 3.05          | 64                    | 17.2                |
| APA1D01/8410   | (1/8)=11      | 0.125          | 3.18         | 4 x 10             | 1.22 x 3.05          | 32                    | 8.6                 |
| APA1D3/16410   | 3/16          | 0.187          | 4.75         | 4 x 10             | 1.22 x 3.05          | 47.87                 | 12.87               |

*Tabla 3—8: Ficha tecnica lamina de aluminio calibre 12*  
*Fuente: (METALMEX, 2025)*

### 3.3.2 Lamina de acero

Para la fabricación de las tolvas de entrada y salida de material, se optó por el uso de láminas de acero de calibre 12, debido a su adecuada resistencia mecánica, las láminas fueron sometidas a un proceso de corte, utilizando herramientas adecuadas para garantizar que las dimensiones se ajusten al diseño previamente establecido, posteriormente, las piezas fueron unidas mediante soldadura, asegurando una estructura resistente y alineada con los ángulos y geometrías definidas en los planos técnicos.



| Calibre | MM.   | Pulg.  | KM/M2  | 3x8    | 3x10   | 4x8    | 4x10    |
|---------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 10      | 3.43  | 0.135  | 27.783 | 61.909 | 77.399 | 82.568 | 103.228 |
| 11      | 3.05  | 0.120  | 24.705 | 55.050 | 68.824 | 73.421 | 91.791  |
| 12      | 2.67  | 0.105  | 21.627 | 48.192 | 60.250 | 64.273 | 80.355  |
| 14      | 1.90  | 0.075  | 15.390 | 34.294 | 42.874 | 45.737 | 57.181  |
| 16      | 1.52  | 0.0595 | 12.312 | 27.435 | 34.299 | 36.590 | 45.745  |
| 18      | 1.22  | 0.048  | 9.882  | 22.020 | 27.529 | 29.368 | 36.716  |
| 20      | 0.89  | 0.035  | 7.209  | 16.064 | 20.083 | 21.424 | 26.785  |
| 22      | 0.74  | 0.0291 | 5.994  | 13.356 | 16.698 | 17.813 | 22.270  |
| 24      | 0.61  | 0.024  | 4.941  | 11.010 | 13.764 | 14.684 | 18.358  |
| 26      | 0.455 | 0.018  | 3.685  | 8.212  | 10.267 | 10.953 | 13.693  |

*Tabla 3—9: Ficha tecnica lamina de acero*  
*Fuente: (Inoxidables victoria, 2025)*

3.4 Consumibles utilizados

3.4.1 Disco de corte

El disco de corte utilizado estaba específicamente diseñado para trabajar con acero, lo cual garantizó un corte limpio, eficiente y sin deformaciones significativas en los extremos del material.



| Especificaciones             |                  |
|------------------------------|------------------|
| Características              |                  |
| Velocidad de rotación (máx.) | 13300 RPM        |
| Tipo                         | Corte del disco  |
| Tipo de centro               | Centro deprimido |
| Color del producto           | Negro/Naranja    |
| Diámetro                     | 2.22 cm          |
| Grosor                       | 1.6 mm           |
| Adecuado para materiales     | Metal/Acero      |
| Velocidad periférica (máx.)  | 80 m/s           |

Tabla 3—10: Ficha tecnica disco de corte  
Fuente: (Abasteo, 2025)

3.4.2 Resistol 5000

Para la sujeción de las lijas se utilizó adhesivo de contacto tipo Resistol 5000, es un pegamento de alto rendimiento formulado a base de poli-cloropreno. Este adhesivo fue seleccionado por su excelente capacidad de adherencia en materiales como madera, metal y plástico, así como por su resistencia al calor y la humedad.



Características Físicas y Químicas

| PROPIEDAD                      | VALOR TÍPICO   |
|--------------------------------|----------------|
| Olor                           | A solvente     |
| Color                          | Amarillo Claro |
| Viscosidad (Brookfiel) (cPs)   | 3000 a 4500    |
| Contenido de sólidos (%)       | 22 a 24        |
| Densidad @ 25°C (g/ml)         | 0.84 a 0.86    |
| Tiempo abierto (minutos)       | 5 a 7          |
| Tiempo de secado total (horas) | 24 a 48        |
| Temperatura de aplicación (°C) | 5 a 40         |
| Temperatura de servicio (°C)   | Hasta 100      |
| Tenor VOC (g/ml)               | 640            |

Tabla 3—11: Ficha tecnica Resistol 5000  
Fuente: (Henkel, 2025)

### 3.4.3 Soldadura

Las uniones entre piezas se realizaron mediante soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido tipo E-6011, este tipo de electrodo permite una soldadura versátil porque es adecuado para trabajos que requieren buena penetración en materiales con óxidos, suciedad o distintos contaminantes.



#### Composición química (típica) del metal depositado:

C 0,11 – 0.15 %; Mn 0,45 – 0.55 %; Si 0,25 – 0.35%; P 0,010 %; S 0,017 %

#### Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04):

|                                                                   |                |                        |                |                        |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|------------------------|----------------|------------------------|
| Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte | Requerimientos | Energía Absorbida Ch-v | Requerimientos |                        |
| Resistencia a la tracción : 495 MPa                               | 430 MPa        | 34J a -30°C            | 27J a -30°C    |                        |
| Límite de fluencia : 424 MPa                                      | 330 MPa        |                        |                |                        |
| Alargamiento en 50 mm : 27%                                       | 22%            |                        |                |                        |
| Amperajes recomendados:                                           |                |                        |                |                        |
| Diámetro mm                                                       | Longitud mm    | Amperaje               |                | Electrodos x kg aprox. |
|                                                                   |                | mín.                   | máx.           |                        |
| 2,4                                                               | 300            | 50                     | 90             | 74                     |
| 3,2                                                               | 350            | 80                     | 120            | 34                     |
| 4,0                                                               | 350            | 120                    | 160            | 24                     |

Tabla 3—12: Ficha técnica Electrodo revestido E-6011

Fuente: (ARAD ELECTRODOS, 2025)

### 3.4.4 Lijas

Se emplearon lijas grano 36 y grano 60 con el objetivo de evaluar su desempeño en el proceso de pulverización del material PET.

La elección de dos tipos de grano se basó en sus características abrasivas: el grano 36, de mayor tamaño, proporciona una acción de desbaste más agresiva, ideal para remover material rápidamente, mientras que el grano 60, permite un acabado más uniforme y controlado.

Hoja de Lija

|                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| <b>Dimensiones (in):</b> | 9" x 11"               |
| <b>Dimensiones (mm):</b> | 230 x 279              |
| <b>Especificación:</b>   | X FLEX-36              |
| <b>Grano:</b>            | 36                     |
| <b>Abrasivo:</b>         | Óxido de Aluminio      |
| <b>Respaldo:</b>         | XF Tela Súper Flexible |
| <b>Línea:</b>            | X-flex®                |



*Tabla 3—13: Ficha tecnica Lija grano 36  
Fuente: (TENAZIT, 2025)*

Hoja de Lija

|                          |                        |
|--------------------------|------------------------|
| <b>Dimensiones (in):</b> | 9" x 11"               |
| <b>Dimensiones (mm):</b> | 230 x 279              |
| <b>Especificación:</b>   | X FLEX-80              |
| <b>Grano:</b>            | 60                     |
| <b>Abrasivo:</b>         | Óxido de Aluminio      |
| <b>Respaldo:</b>         | XF Tela Súper Flexible |
| <b>Línea:</b>            | X-flex®                |



*Tabla 3—14: Ficha tecnica Lija grano 60  
Fuente: (TENAZIT, 2025)*

### 3.5 Optimización del proceso de obtención del polvo de pet

Con el propósito de optimizar los parámetros del proceso de pulverización de pet, se propuso aplicar un diseño experimental basado en la metodología de arreglos ortogonales desarrollada por Genichi Taguchi, con la finalidad de alcanzar un diseño robusto que permita determinar las condiciones experimentales más favorables.

Con la experiencia obtenida en la construcción de la pulverizadora de pet, se identificaron 5 factores principales; el tamaño del grano de la lija, la velocidad de desplazamiento con el sistema de compactación, si las botellas dentro de la pulverizadora están completas o están en trozos, el numero de masa dentro de la pulverizadora y si las botellas llevan algún contaminante esto quiere decir si están limpias o si se pulverizan directamente a como se obtienen.

Por esta razón, se estableció un arreglo ortogonal L8, el cual incluyó 5 factores, teniendo como resultado 8 experimentos para su análisis.

Variable de respuesta:

- Tamaño de partícula < 450  $\mu\text{m}$

Factores para considerar:

- Tamaño de grano de lija: al una ser un grano mayor y otro menor la capacidad de desgaste es mucho menor una con la otra el cual podría afectar el tamaño de las partículas
  - Lija grano 36
  - Lija grano 60
- Velocidad de desplazamiento: al momento de estar compactando las botellas contra la lija girando a gran velocidad podría afectar con nuestra variable de respuesta
  - Rápido
  - Lento
- Tamaño de botellas
  - Enteras
  - Cortadas en trozos
- Numero de masa: este factor puede ser importante porque dependiendo de la cantidad de botellas dentro del recipiente de la pulverizadora podría afectar nuestra variable de respuesta
  - 108gr
  - 116gr
- Estado de limpieza
  - 100% limpias
  - Con algún contaminante

| Factor | Descripción                 | Nivel 1      | Nivel 2                |
|--------|-----------------------------|--------------|------------------------|
| A      | Tamaño de grano en lija     | Grano 36     | Grano 60               |
| B      | Velocidad de desplazamiento | Rápido       | Lento                  |
| C      | Tamaño de botellas          | Enteras      | En trozos              |
| D      | Numero de masa              | 108gr        | 116gr                  |
| E      | Estado de limpieza          | 100% limpias | Con algún contaminante |

Tabla 3—15: Descripción de los factores y niveles a utilizar

| No. De experimentos | Numero de columnas      |                             |                    |                |                    |   |   | Condición experimental                                                     | Y <sub>respuesta</sub> |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|----------------|--------------------|---|---|----------------------------------------------------------------------------|------------------------|
|                     | 1                       | 2                           | 3                  | 4              | 5                  | 6 | 7 |                                                                            |                        |
| 1                   | 1                       | 1                           | 1                  | 1              | 1                  | 1 | 1 | A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub> E <sub>1</sub> |                        |
| 2                   | 1                       | 1                           | 1                  | 2              | 2                  | 2 | 2 | A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> |                        |
| 3                   | 1                       | 2                           | 2                  | 1              | 1                  | 2 | 2 | A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub> E <sub>1</sub> |                        |
| 4                   | 1                       | 2                           | 2                  | 2              | 2                  | 1 | 1 | A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub> E <sub>2</sub> |                        |
| 5                   | 2                       | 1                           | 2                  | 1              | 2                  | 1 | 2 | A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>1</sub> E <sub>2</sub> |                        |
| 6                   | 2                       | 1                           | 2                  | 2              | 1                  | 2 | 1 | A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub> D <sub>2</sub> E <sub>1</sub> |                        |
| 7                   | 2                       | 2                           | 1                  | 1              | 2                  | 2 | 1 | A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>1</sub> E <sub>2</sub> |                        |
| 8                   | 2                       | 2                           | 1                  | 2              | 1                  | 1 | 2 | A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub> D <sub>2</sub> E <sub>1</sub> |                        |
| Asignación          | A                       | B                           | C                  | D              | E                  |   |   |                                                                            |                        |
|                     | Tamaño de grano en lija | Velocidad de desplazamiento | Tamaño de botellas | Numero de masa | Estado de limpieza |   |   |                                                                            |                        |

Tabla 3—16: AO L8 (2<sup>7</sup>)

Para un mejor entendimiento se puede explicar de esta manera:

|                      |                                                            |
|----------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Experimento 1</b> | Grano 36, rápido, enteras, 108gr, 100% limpias             |
| <b>Experimento 2</b> | Grano 36, rápido, enteras, 116gr, con algún contaminante   |
| <b>Experimento 3</b> | Grano 36, lento, en trozos, 108gr, 100% limpias            |
| <b>Experimento 4</b> | Grano 36, lento, en trozos, 116gr, con algún contaminante  |
| <b>Experimento 5</b> | Grano 60, rápido, en trozos, 108gr, con algún contaminante |
| <b>Experimento 6</b> | Grano 60, rápido, en trozos, 116gr, 100% limpias           |
| <b>Experimento 7</b> | Grano 60, lento, enteras, 108gr, con algún contaminante    |
| <b>Experimento 8</b> | Grano 60, lento, enteras, 116gr, 100% limpias              |

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Construcción de la maquina pulverizadora de pet**

La construcción de la pulverizadora de pet representa una fase clave dentro del desarrollo del proyecto, ya que materializa el diseño previamente elaborado y permite verificar su funcionamiento en condiciones reales.

Durante esta etapa se contemplan aspectos como la selección de materiales adecuados para la estructura, la fabricación de componentes como el sistema de pulverización y compactación, las tolvas y el contenedor, así como la instalación del motor y algunas fallas técnicas que surgieron en el proceso.

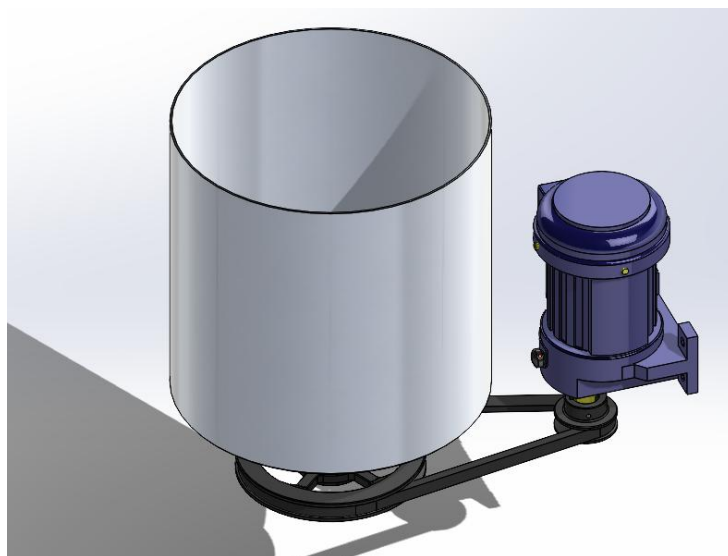
#### **4.1.1 Diseños de prototipos del contenedor**

El contenedor de almacenamiento es una parte fundamental en el diseño de una maquina pulverizadora de PET, ya que tiene la función de recibir y contener el material plástico que será pulverizado.

El diseño debe garantizar la correcta recolección del material, evitando perdidas o algún tipo de contaminación no deseada. Además, debe ser resistente, fácil de limpiar y compatible con el funcionamiento general de la máquina.

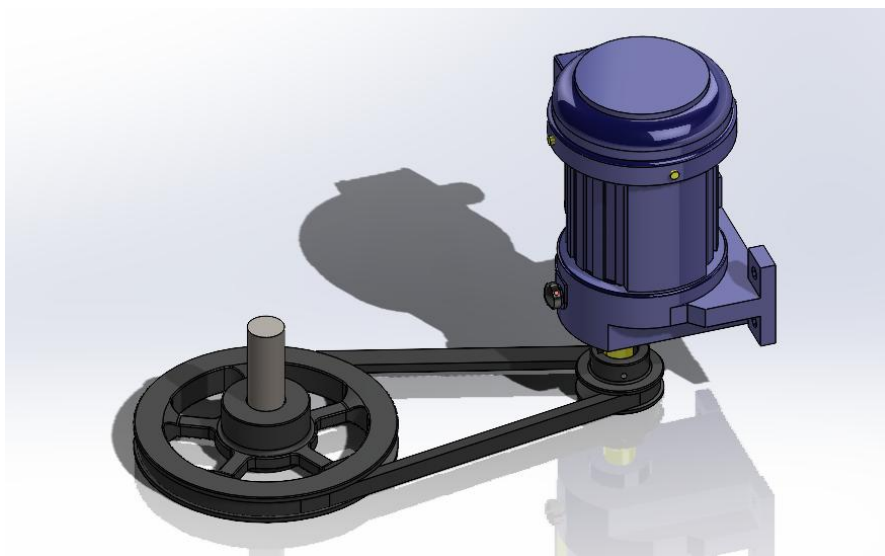
En esta etapa del proyecto se plantearon distintos prototipos y criterios de diseño que tuvieron que ver con la capacidad volumétrica, la orientación de la maquina (horizontal y vertical) y algunos factores como la facilidad de montaje y desmontaje, además de la ergonomía en su manipulación.

#### 4.1.1.1 Prototipo #1 del contenedor



*Figura 4—1: Prototipo #1*

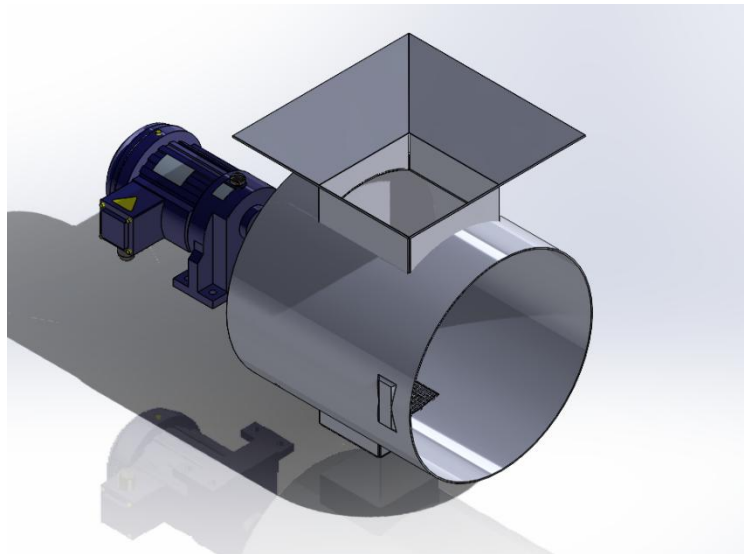
En este diseño se optó por usar un sistema de poleas y bandas para transmitir el movimiento del motor al eje de la pulverizadora, en el cual estará colocado un disco con lijas encargadas de pulverizar el material de PET. Esta configuración permite una transmisión de potencia eficiente y reduce el esfuerzo directo sobre el motor, prologando su vida útil.



*Figura 4—2: Sistema de transmisión de movimiento*

Como se puede observar en este prototipo el contenedor está colocado de manera vertical el cual tiene un excelente espacio para depositar el material a pulverizar. No obstante, se presenta una dificultad en la recolección del polvo generado, ya que este se acumula en la parte inferior del contenedor y el sistema de poleas ubicado en esa zona interfiere con el acceso, lo que complica considerablemente la extracción del material pulverizado. Este aspecto representa una oportunidad de mejora en el diseño para facilitar la recolección del polvo de PET.

#### 4.1.1.2 Prototipo #2 del contenedor



*Figura 4—3: Prototipo #2*

En este diseño se optó por conectar directamente el eje del motor con el disco en el que se conectan las lijas pulverizadoras, eliminando el uso de poleas y bandas para lograr una transmisión de movimiento mas directa y compacta.

En este prototipo, el contenedor se encuentra en posición horizontal, lo cual puede dificultar el deposito de material, sin embargo, se incorporaron dos tolvas para optimizar este proceso, la tolva superior permite depositar el material de PET de manera practica y sencilla, mientras que la tolva inferior facilita la salida del material ya pulverizado. Además, se integró una rejilla en la parte inferior que permite la expulsión de polvo fino, mejorando la eficiencia en la recolección del material pulverizado.

#### 4.1.2 Propuesta seleccionada (Contenedor)

Después de analizar las dos propuestas de diseño para la maquina pulverizadora de PET, se decidió seleccionar el prototipo #2 como la opción a construir ya que facilita en mayor medida la recolección del material pulverizado, además elimina la necesidad de utilizar poleas y bandas, lo cual reduce los costos y los requerimientos de mantenimiento, y permite reducir el tamaño general de la máquina.



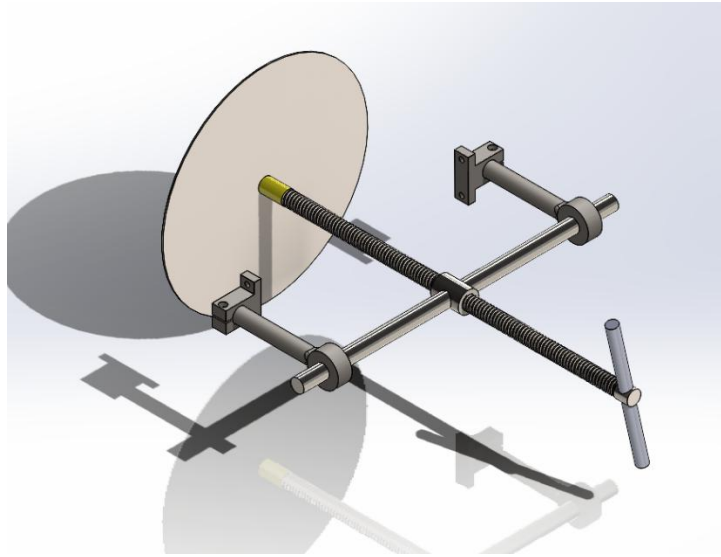
*Figura 4—4: Contenedor de la pulverizadora de PET*

#### 4.1.3 Diseño del sistema de compactación

El sistema de compactación permite desplazar un disco mediante un tornillo sin fin el cual empuja las botellas hacia un disco contrario que esta cubierto con las lijas y el cual gira a altas revoluciones por minuto.

Este sistema genera una fricción constante y controlada que permite pulverizar el material de PET de manera rápida y efectiva.

Se opto por este sistema debido a que incrementa significativamente la eficiencia de la máquina, disminuye el tiempo total del proceso de pulverización y mejora el rendimiento general del equipo.



*Figura 4—5: Diseño 3D del sistema de compactación*

#### 4.1.4 Construcción del sistema de compactación

Para la construcción de este sistema se necesitaron diferentes materiales como:

- Varilla 5/8"
- Tornillo Acme 5/8" 6hpp
- Barra de metal de 2"

Además, se usaron diferentes maquinas para facilitar el mecanizado como:

- Torno
- Rectificadora
- Fresadora

Para la fabricación del soporte del tornillo acmé o tornillo sin fin, se comenzó cortando la barra metálica de 2" con la rectificadora hasta obtener el espesor deseado, posteriormente, se mecanizaron los barrenos necesarios utilizando el torno, ajustándolos al diámetro requerido para el montaje. Finalmente, en la fresadora se realizó un barreno adicional con rosca interna, donde se colocó un opresor que permite una fijación firme.



*Figura 4—6: Buje de sujeción*

Una vez mecanizado el buje de sujeción, se procedió a soldarlo a la varilla de 5/8" como parte del ensamblaje estructural. Esta unión permitió conformar la base del soporte del tornillo sin fin, elemento clave del sistema de compactación.

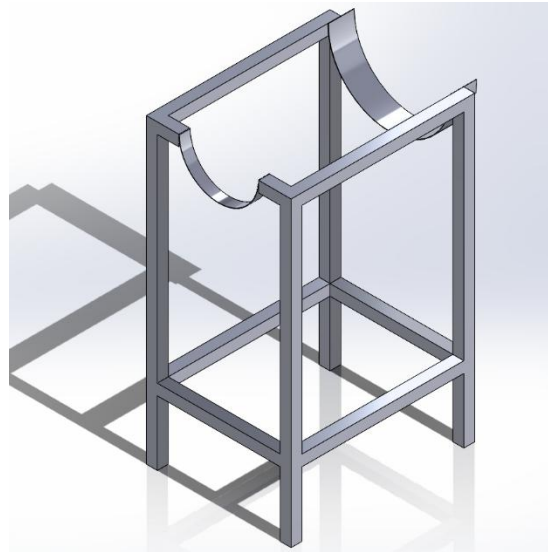
Luego, se ensambló y montó el tornillo sin fin en su posición final, con lo cual se dio por concluida la construcción del sistema de compactación, dejando el conjunto listo para su integración en la máquina pulverizadora de PET.



*Figura 4—7: Sistema de compactación*

## 4.2 Estructura base

La estructura base constituye el soporte principal de la maquina pulverizadora de PET. Su función es proporcionar estabilidad, rigidez y resistencia a todos los componentes que conforman el sistema. Esta base fue diseñada considerando facilitar el manejo y la operación de la maquina por parte del usuario.



*Figura 4—8: Diseñó 3D Estructura base*

Con este diseño se busca lograr una óptima distribución de cargas, garantizando así la estabilidad estructural de la maquina durante su operación, la posición y distribución de los perfiles fue pensada para soportar de manera eficiente el peso del motor y todo el sistema de compactación.

Además, se priorizo la facilidad de montaje y mantenimiento, permitiendo un montaje y desmontaje sencillo de los diferentes componentes de la máquina, así como un acceso rápido a los distintos puntos de mayor importancia.

### 4.2.1 Construcción de la Estructura base

La mesa de soporte diseñada y fabricada presenta una estructura robusta y estable, capaz de soportar la máquina pulverizadora de PET sin vibraciones ni movimientos excesivos. La base sólida y el soporte curvo aseguran que la pulverizadora se mantenga en su lugar, garantizando una operación segura y eficiente. La mesa está diseñada para soportar las cargas y vibraciones generadas por la máquina, lo que la hace ideal para su uso en entornos industriales.

Pasos para su construcción:

1. **Corte de los Elementos Estructurales:** Se realizaron cortes en los perfiles tubulares rectangulares (PTR) a una altura de 70 cm para crear las patas de la mesa.
2. **Refuerzo de la Estructura:** Para aumentar la rigidez y estabilidad de la mesa, se soldaron cuatro tubos adicionales de PTR de 31 cm de longitud en la parte inferior de las patas, creando una base sólida y robusta.
3. **Fabricación del Soporte para la Pulverizadora:** Se utilizó una lámina de acero calibre 12 para crear un soporte curvo con dos radios de curvatura: 15 cm y 35 cm. Este soporte se diseñó para proporcionar un perímetro adecuado para la pulverizadora, evitando movimientos excesivos o inestabilidad.
4. **Refuerzo Superior:** Para minimizar las vibraciones y movimientos no deseados durante la operación de la pulverizadora, se soldaron dos PTR adicionales de 31 cm de longitud en la parte superior de la mesa, proporcionando una mayor rigidez y estabilidad a la estructura.



*Figura 4—9: Estructura base de la pulverizadora de pet*

### 4.3 Ensamblaje

El proceso de ensamblaje de la máquina pulverizadora de PET consistió en la unión estructural y funcional de los distintos componentes mecánicos que conforman el equipo, basados en los prototipos 3D desarrollados en la etapa del diseño. Esta fase fue fundamental para asegurar la correcta alineación, rigidez y operatividad del sistema completo.

Posteriormente, se colocó en su respectiva estructura base el contenedor que sostiene el motor eléctrico, asegurándolo mediante pernos y soportes metálicos que garantizan su fijación firme y estable durante el funcionamiento.

Una vez instalado el motor y el contenedor, se procedió a montar el sistema de compactación, el cual fue alineado cuidadosamente para asegurar un avance estable y sin esfuerzos excesivos que podrían provocar atascos.

Se verificó la correcta alineación del tornillo sin fin con respecto al orificio del contenedor, utilizando herramientas de medición y pruebas de rotación manual para asegurar un desplazamiento uniforme.



*Figura 4—10: Pulverizadora de pet*

#### 4.4 Puesta en marcha

Una vez concluida la etapa de ensamblaje y verificación de todos los componentes mecánicos y eléctricos de la máquina pulverizadora de PET, se procedió a realizar la puesta en marcha del equipo con el objetivo de validar su correcto funcionamiento y detectar posibles fallas antes de iniciar las pruebas.

Previo al encendido, se llevó a cabo una inspección visual de las uniones soldadas, fijaciones y ejes giratorios para asegurar que no existieran interferencias, holguras excesivas o elementos mal colocados.

El arranque inicial se realizó sin carga, es decir, sin introducir material PET, para observar el comportamiento del sistema en vacío.

#### 4.5 Pulverización mecánica de botellas de pet

Como resultado del proceso de pulverización mecánica aplicado a las botellas de tereftalato de polietileno (PET), se obtuvo un total acumulado de 352.9 gr de polvo de PET, dicha cifra fue alcanzada tras la ejecución de ocho experimentos controlados. Cada ensayo permitió evaluar el rendimiento de la máquina, así como su eficiencia de pulverización.

| No. De experimento | Gramos pulverizados |
|--------------------|---------------------|
| 1                  | 34.5                |
| 2                  | 67.4                |
| 3                  | 28.6                |
| 4                  | 50                  |
| 5                  | 29                  |
| 6                  | 62.8                |
| 7                  | 27.7                |
| 8                  | 52.9                |
| <b>TOTAL</b>       | <b>352.9</b>        |

Tabla 4—1: Gramos pulverizados por cada experimento

#### 4.6 Medición de tamaño de partículas de polvo de PET

Los polvos obtenidos fueron sometidos a un análisis granulométrico mediante tamizado, con el objetivo de determinar la distribución de tamaños de partículas. Para ello se utilizó una serie de tamices normalizados con aberturas decrecientes, lo que permitió clasificar el polvo en diferentes fracciones según su diámetro.

Este procedimiento resulta de mucha importancia, ya que la granulometría influye directamente en la calidad del material reciclado y en sus posibles aplicaciones.

Dichos resultados de medición se representan en la siguiente tabla:

| No. Experimento | Total (gr)   | Polvo de 850 $\mu\text{m}$<br>(gr) | Polvo de 600 $\mu\text{m}$<br>(gr) | Polvo de 425 $\mu\text{m}$<br>(gr) | Polvo menor a 425 $\mu\text{m}$<br>(gr) |
|-----------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1               | 34.5         | 7.4                                | 1.3                                | 1.5                                | 14.2                                    |
| 2               | 67.4         | 17.7                               | 4.5                                | 5.9                                | 29.3                                    |
| 3               | 28.6         | 9.1                                | 2.1                                | 2.5                                | 14.3                                    |
| 4               | 50           | 17.2                               | 3.6                                | 4                                  | 24.7                                    |
| 5               | 29           | 7.3                                | 1.6                                | 1.1                                | 19.4                                    |
| 6               | 62.8         | 17                                 | 5                                  | 9.1                                | 30                                      |
| 7               | 27.7         | 7.7                                | 1.3                                | 1.9                                | 16.1                                    |
| 8               | 52.9         | 15.9                               | 2.6                                | 3.7                                | 29.5                                    |
| <b>TOTAL</b>    | <b>352.9</b> | <b>99.3</b>                        | <b>22</b>                          | <b>29.7</b>                        | <b>177.5</b>                            |

*Tabla 4—2: Tamaño de partículas de polvo de PET*

En la *Tabla 4—2* se observa que la mayor proporción de partículas de polvo de PET se concentra en tamaños inferiores a 425  $\mu\text{m}$ , lo que indica que el proceso de pulverización fue eficiente. Este resultado confirma que se alcanzó una adecuada reducción del material, ya que aproximadamente el 50% de la masa total obtenida corresponde a partículas menores a 425  $\mu\text{m}$ , rango considerado óptimo para favorecer su reutilización en procesos de reciclaje.

#### 4.7 Optimización

Analizando los datos obtenidos, tanto el total de gramos pulverizados, como de los gramos correspondientes a partículas con un tamaño inferior a 425  $\mu\text{m}$  (considerado como rango óptimo de pulverización), es posible calcular porcentajes que permitan establecer un indicador cuantitativo no solo de la eficiencia de la máquina para pulverizar adecuadamente las botellas de PET, sino también la proporción de material resultante con un tamaño de partícula menor a 425  $\mu\text{m}$ .

De esta manera, la comparación de los gramos totales pulverizados frente a los gramos que cumplen con el criterio de tamaño óptimo posibilita la obtención de un índice de eficiencia, expresado en porcentaje. Dicho índice no solo evalúa la efectividad del sistema de reducción de tamaño, sino que también permite identificar cuál de los experimentos realizados presenta un mejor desempeño, es decir, aquel en el que la máquina entrega la mayor proporción de polvo con granulometría inferior a 425  $\mu\text{m}$ .

| Experimento | Porcentaje total del polvo pulverizado | Porcentaje de polvo inferior a 425 $\mu\text{m}$ |
|-------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1           | 32%                                    | 13%                                              |
| 2           | 58%                                    | 25%                                              |
| 3           | 26%                                    | 13%                                              |
| 4           | 43%                                    | 21%                                              |
| 5           | 27%                                    | 18%                                              |
| 6           | 54%                                    | 26%                                              |
| 7           | 26%                                    | 15%                                              |
| 8           | 46%                                    | 25%                                              |

*Tabla 4—3: Porcentajes de pulverización*

Considerando que la variable de respuesta es la cantidad de polvo generado inferior a 425  $\mu\text{m}$ , medido en porcentaje, tomaremos los datos de la *Tabla 4—3* para la columna de resultados del arreglo ortogonal propuesto, quedando:

| No. De experimento | 1        | 2      | 3         | 4     | 5                      | 6 | 7 | Porcentaje de polvo inferior a 425 $\mu\text{m}$ |
|--------------------|----------|--------|-----------|-------|------------------------|---|---|--------------------------------------------------|
| 1                  | Grano 36 | Rápido | Enteras   | 108gr | 100% limpias           | 1 | 1 | 13%                                              |
| 2                  | Grano 36 | Rápido | Enteras   | 116gr | Con algún contaminante | 2 | 2 | 25%                                              |
| 3                  | Grano 36 | Lento  | En trozos | 108gr | 100% limpias           | 2 | 2 | 13%                                              |
| 4                  | Grano 36 | Lento  | En trozos | 116gr | Con algún contaminante | 1 | 1 | 21%                                              |
| 5                  | Grano 60 | Rápido | En trozos | 108gr | Con algún contaminante | 1 | 2 | 18%                                              |
| 6                  | Grano 60 | Rápido | En trozos | 116gr | 100% limpias           | 2 | 1 | 26%                                              |
| 7                  | Grano 60 | Lento  | Enteras   | 108gr | Con algún contaminante | 2 | 1 | 15%                                              |
| 8                  | Grano 60 | Lento  | Enteras   | 116gr | 100% limpias           | 1 | 2 | 25%                                              |

*Tabla 4—4: Arreglo ortogonal*

La *Tabla 4—5* muestra los coeficientes calculados a partir del modelo lineal, así como los valores de “P” que es la probabilidad de que el efecto observado se deba al azar y no a un efecto real del factor.

$P < 0.05 \rightarrow$  El factor sí es significativo (su efecto es real con un 95% de confianza).

$P \geq 0.05 \rightarrow$  El factor no es significativo (su efecto puede deberse al azar).

Se observa que el número de masa es el único factor con efecto estadísticamente significativo, mientras que los demás factores no alcanzan niveles de mucha significancia.

| <b>Factor</b>               | <b>Coeficiente</b> | <b>T</b> | <b>P</b> | <b>Interpretación</b>                  |
|-----------------------------|--------------------|----------|----------|----------------------------------------|
| Constante                   | 19.5               | 34.88    | 0.001    | Valor base del modelo                  |
| Tamaño de grano en lija     | -1.5               | -2.68    | 0.115    | Efecto moderado, no significativo      |
| Velocidad de desplazamiento | 1                  | 1.78     | 0.216    | Aumenta la respuesta, no significativo |
| Tamaño de botellas          | 0                  | 0        | 1        | Sin efecto                             |
| Número de masa              | -4.75              | -8.49    | 0.014    | Efecto significativo                   |
| Estado de limpieza          | -0.25              | -0.45    | 0.698    | Efecto despreciable                    |

*Tabla 4—5: Coeficientes estimados del modelo lineal*

En la *Tabla 4—6* se detalla la contribución de cada factor a la variabilidad total del modelo, el número de masa sobresale al presentar la suma de cuadrados mas elevada (180.5) y un valor F de 72.2, el valor F compara la variabilidad explicada por un factor contra la variabilidad aleatoria (error residual), cuanto mas grande sea F, mas probable es que el factor tenga un efecto real sobre la respuesta.

| Fuente de variación         | DF       | Seq SS     | Adj SS   | Adj MS   | F        | P        |
|-----------------------------|----------|------------|----------|----------|----------|----------|
| Tamaño de grano en lija     | 1        | 18         | 18       | 18       | 7.2      | 0.115    |
| Velocidad de desplazamiento | 1        | 8          | 8        | 8        | 3.2      | 0.216    |
| Tamaño de botellas          | 1        | 0          | 0        | 0        | 0        | 1        |
| Número de masa              | 1        | 180.5      | 180.5    | 180.5    | 72.2     | 0.014    |
| Estado de limpieza          | 1        | 0.5        | 0.5      | 0.5      | 0.2      | 0.698    |
| Error residual              | 2        | 5          | 5        | 2.5      | —        | —        |
| <b>Total</b>                | <b>7</b> | <b>212</b> | <b>—</b> | <b>—</b> | <b>—</b> | <b>—</b> |

*Tabla 4—6: Análisis de varianza (ANOVA)*

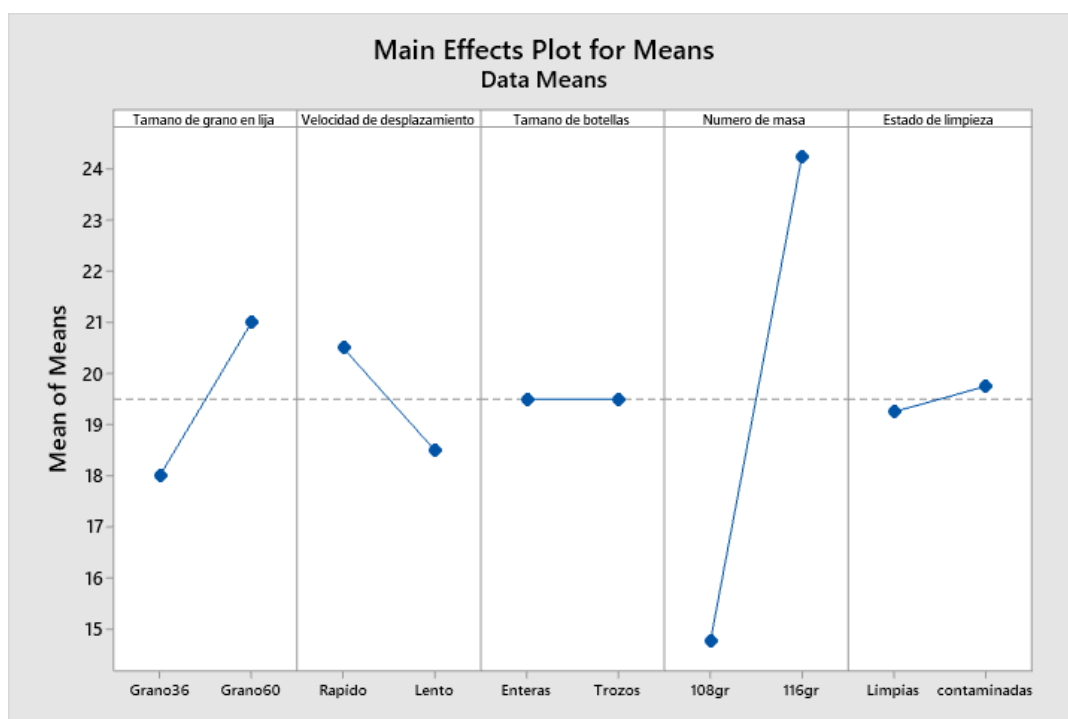
La *Tabla 4—7* resume las diferencias de medias entre los niveles de cada factor, se observa que el número de masa presenta la mayor variación ( $\Delta = 9.50$ ), seguido por el tamaño del grano en lija ( $\Delta = 3.00$ ) y la velocidad de desplazamiento ( $\Delta = 2.00$ ), mientras que el estado de limpieza y el tamaño de las botellas no implican ninguna o casi ninguna diferencia.

| Factor                      | Nivel 1 | Nivel 2 | $\Delta$<br>(Diferencia) | Ranking |
|-----------------------------|---------|---------|--------------------------|---------|
| Tamaño de grano en lija     | 18      | 21      | 3                        | 2       |
| Velocidad de desplazamiento | 20.5    | 18.5    | 2                        | 3       |
| Tamaño de botellas          | 19.5    | 19.5    | 0                        | 5       |
| Número de masa              | 14.75   | 24.25   | 9.5                      | 1       |
| Estado de limpieza          | 19.25   | 19.75   | 0.5                      | 4       |

*Tabla 4—7: Respuesta promedio por niveles y diferencia*

Se puede representar gráficamente la contribución específica dentro de cada factor. Esta visualización permite identificar de forma inmediata cuales niveles tienen mayor influencia sobre la variable de interés y comparar la magnitud de su efecto en relación con los demás factores, facilitando el análisis y la interpretación de resultados del experimento.

De tal manera:



La elección del nivel de acuerdo con la característica de calidad y con los resultados obtenidos en el análisis de varianza donde el número de masa (D) es el parámetro mas influyente en el proceso de pulverización, los factores del tamaño de grano en lija (A) y velocidad de desplazamiento (B) muestran cierta variación, y por ultimo el tamaño de botellas (C) y el estado de limpieza (E) resultan irrelevantes en el desempeño de la máquina, por lo tanto, la selección de estos dos niveles se realizara considerando criterios de optimización del proceso, priorizando aquellos que minimicen el consumo energético, reduzcan tiempo de operación y disminuyan el uso de recursos auxiliares como el agua utilizada en la limpieza de las botellas.

- El nivel **A<sub>2</sub>** es mejor que el nivel **A<sub>1</sub>**
- El nivel **B<sub>1</sub>** es mejor que el nivel **B<sub>2</sub>**
- El nivel **C<sub>1</sub>** es mejor que el nivel **C<sub>2</sub>**
- El nivel **D<sub>2</sub>** es mejor que el nivel **D<sub>1</sub>**
- El nivel **E<sub>2</sub>** es mejor que el nivel **E<sub>1</sub>**

Por consiguiente, la condición experimental optima es:

**A<sub>2</sub> B<sub>1</sub> C<sub>1</sub> D<sub>2</sub> E<sub>2</sub>**

Tamaño de grano en lija: Grano 60

Velocidad de desplazamiento: Rápido

Tamaño de botellas: Enteras

Numero de masa: 116gr

Estado de limpieza: Contaminadas

## 5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que el número de masa constituye el parámetro más influyente en la eficiencia del proceso de pulverización, ya que presenta un aspecto tanto significativo como cuantitativamente superior en comparación con los demás factores analizados. La magnitud de su suma cuadrados, así como su elevado valor F y un valor  $P < 0.5$ , confirman que este factor afecta la mayor parte de la variabilidad observada en la respuesta, por lo que se establece como variable crítica en la operación de la máquina.

En comparación de los factores tamaño de grano en lija y velocidad de desplazamiento muestran una ligera variación entre niveles, pero sin alcanzar significancia estadística. Esto indica que, aunque podrían influir de manera secundaria en la calidad o uniformidad del material pulverizado su efecto es mucho menor en comparación con el número de masa.

Por otra parte, los factores tamaños de botellas y estado de limpieza resultan irrelevantes dentro del modelo, pues sus diferencias entre niveles son mínimas y sus valores de P superan ampliamente el rango de significancia. Esto indica que la pulverizadora mantiene un desempeño similar independientemente de la condición inicial de las botellas en términos de tamaño o de limpieza.

La medición de las partículas mediante tamizado con mallas 20, 30 y 40 permitió cuantificar la proporción de polvo fino, proporcionando un indicador de la eficiencia de la máquina. Esto evidenció la importancia de implementar métodos de medición que respalden los resultados experimentales con datos concretos y validen el desempeño del diseño.

En síntesis, el análisis estadístico respalda que el control del número de masa introducida en el sistema es el aspecto fundamental para garantizar la eficiencia de la pulverización, mientras que los demás factores poseen un papel complementario o irrelevante. Este resultado es de gran importancia para el diseño y la operación de la máquina, pues orienta los esfuerzos de optimización hacia el factor con mayor importancia en el desempeño global.

El proyecto no sólo alcanzó su objetivo (transformar botellas de PET en polvo), sino que también representó una experiencia de aprendizaje completa. Se reforzaron competencias en diseño mecánico, en selección de materiales, análisis de fallos y control de parámetros de operación, además de fomentar habilidades de trabajo en equipo, adaptabilidad y resolución de problemas.

Finalmente, la construcción de la pulverizadora de PET contribuye al enfoque sustentable en la gestión de residuos plásticos, al ofrecer una alternativa viable para su reutilización. La experiencia adquirida demuestra que, mediante la dedicación, la precisión técnica y la mejora continua, es posible convertir una idea en una solución funcional con un impacto real, tanto en el ámbito profesional como en el cuidado del medio ambiente.

## 6 BIBLIOGRAFIA

1. Vázquez, B. (2010). Tecnología de Polímeros . Editora Alfaomega Grupo.
2. Rosato, DV (2004). Manual de selección de materiales y procesos para productos plásticos.
3. Andrady, AL, y Neal, MA (2009). Aplicaciones y beneficios sociales de los plásticos . Philosophical Transactions of the Royal Society B.
4. Aguilar. M. (2009) Reciclamiento de basura: una opción ambiental comunitaria.1ª Edición. México: Editorial Trillas.
5. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2018). Noviembre 2018 [Con-su-mismo plastico]. [www.gob.mx/conanp/es/articulos/con-su-mismo-plastico](http://www.gob.mx/conanp/es/articulos/con-su-mismo-plastico)
6. Plastics technology México (2023). Transición hacia la economía circular en México: beneficios del pet.
7. ECOCE (2024). Acopio de pet, cifras y estadísticas.
8. ONU (2023). Programa para el medio ambiente
9. Phadke, M. (2000). Quality engineering using robust design. En M. Phadke, Quality engineering using robust design. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
10. Vuchkov, I., & Boyadjieva, L. (2001). Quality improvement with design of experiments (Vol. 7).
11. Roy, R. (2001). Design of experiments using the taguchi approach 16 steps to productand process improvement. New York: Jhon Wiley & Sons, Inc.
12. Barker, T. B. (2005). Quality by experimental design. New York: Chapman & Hall/CRC.
13. Tania C, Efrain C, Margarito G, Verenice H. (2016). ACOPIO LOGÍSTICO INTELIGENTE DE ENVASES DE PLÁSTICO (PET), PARA SU TRITURACIÓN ESBELTA Y MARKETING. Instituto Politécnico Nacional
14. Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). Diseño y desarrollo de productos (5ª edición ed.). México, D.F.: Mc Graw Hill.
15. Stratasy Inc. (2025). GRABCAD. [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com)

## 7 ANEXOS

### 7.1 Experimento 1, medición y pesaje de partículas



Tamiz 20, 7.4gr



Tamiz 30, 1.3gr



Tamiz 40, 1.5gr

### 7.2 Experimento 2, medición y pesaje de partículas



Tamiz 20, 17.7 gr



Tamiz 30, 4.5gr



Tamiz 40, 5.9gr

### 7.3 Experimento 3, medición y pesaje de partículas



Tamiz 20, 9.1 gr

Tamiz 30, 2.1 gr

Tamiz 40, 2.5 gr

### 7.4 Experimento 4, medición y pesaje de partículas



Tamiz 20, 17.2 gr

Tamiz 30, 3.6 gr

Tamiz 40, 4 gr

### 7.5 Experimento 5, medición y pesaje de partículas



Tamiz 20, 7.3 gr

Tamiz 30, 1.6 gr

Tamiz 40, 1.1 gr

### 7.6 Experimento 6, medición y pesaje de partículas



Tamiz 20, 17 gr

Tamiz 30, 5 gr

Tamiz 40, 9.1 gr

### 7.7 Experimento 7, medición y pesaje de partículas



Tamiz 20, 7.7 gr

Tamiz 30, 1.3 gr

Tamiz 40, 1.9 gr

### 7.8 Experimento 8, medición y pesaje de partículas



Tamiz 20, 15.9 gr

Tamiz 30, 2.6 gr

Tamiz 40, 3.7 gr