



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño de cámara de separación  
por gravedad para partículas de  
hule y textil**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Industrial**

**P R E S E N T A**

Alfredo Enrique Benitez Gasca

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**

*“...he comprendido que la máxima obra propuesta al ser humano es la de forjarse un destino...”*

(Carpentier, 2014: 224)

## Dedicación

*A mis Padres, porque a través de un gran esfuerzo me han permitido llegar a este punto.*

## Agradecimiento

*A Dios por la oportunidad.*

*A mis Padres por su apoyo.*

*A la UNAM por el privilegio de permitirme estudiar.*

*A mi Asesor Dr. Alejandro Ramírez Reivich por su guía a través de la tesis.*

*A la Profesora Alejandra Medina Arevalo por darme la inspiración del tema y apoyarme con la información.*

*A mi tutor Ricardo Torres por su apoyo a través de la carrera.*

*A Q. Miguel Ángel Canseco Martínez por su apoyo en los estudios de laboratorio.*

*Al Profesor Jorge Luis Romero Hernández por su apoyo.*

*A mis sinodales por su tiempo y ser parte de este proceso.*

*A cada uno de mis Profesores, por su tiempo y dedicación para que los alumnos sean mejores personas.*

*Fecha publicación: 28 de Octubre del 2019*

## Abstract

*The following thesis tries to elaborate a prototype that will separate the fibers from the crumb rubber generated in the tire recycling process using a settling chamber.*

## Prólogo

Actualmente trabajo en la industria del reciclaje de llantas, he vivido las dificultades que se generan en este negocio; ya que al ser basura y en un ámbito poco claro, el camino que se requiere para el reciclador es muy extenuante y largo. Requiere de mucha paciencia y de mucho aprendizaje. Y como una vez me indicó un norteamericano que llevaba varios años en el negocio, *“los pioneros son los que reciben las flechas”*, habiéndolo experimentado; la ardua hazaña de emprender en un negocio que no tiene un mercado establecido y la carencia de tecnología dificulta mucho el paso. Pero por el otro lado, creo que he aprendido mucho y también he aprendido que cuando se está en un mercado nuevo, las innovaciones y las oportunidades están más cercanas, por lo que veo y siento; que existe todo un camino de posibilidades en el reciclaje de llantas que beneficiarán a la postre a la Nación.

Con este trabajo, espero acrecentar mi conocimiento como Ingeniero, desarrollar el aspecto empírico de todo el conjunto de clases y cuestiones teóricas que he estado llevado en nuestra apreciable Universidad y espero; que sea el inicio de una labor de la que se tenga siempre el concepto de honestidad, ética y que a partir de este trabajo, pueda desarrollar todos los que sigan en mi vida profesional bajo la misma línea, siempre velando por el medio ambiente y poniendo en alto el nombre de la Universidad.

Con esta máquina que pretende hacer una separación de textil y de grano, espero encontrar el desarrollo de un punto importante para mi trabajo: que con este prototipo puedan surgir más máquinas derivadas de la ingeniería mexicana que fomenten a la industria.

## Índice

1. Lista de Figuras	6
2. Lista de Tablas	8
3. Glosario de Términos	9
4. Resumen	11
5. Introducción	12
6. Antecedentes	14
6.1. Descripción de la problemática	14
7. Objetivos	14
7.1. Hipótesis	14
8. Justificación y alcance	14
9. Marco teórico	15
9.1. Industria del reciclaje de llantas	15
9.1.1. Tipo de tecnología	17
9.1.1.1. Procesamiento a temperatura ambiente	17
9.1.1.2. Criogenia	19
9.1.1.3. Pirólisis	20
9.1.2. Esquemas de gestión de llantas a nivel mundial	20
9.1.2.1. Esquema de impuestos	20
9.1.2.2. Esquema de mercado libre	21
9.1.2.3. Esquema de responsabilidad del productor	21
9.1.3. Reciclaje de llantas desechadas en México	22
9.1.4. Problemática generada	23
9.1.5. Productos generados a través del reciclaje	23
9.2. El aire en la industria	24
9.3. Mecanismos de control de partículas	25
9.3.1. Separadores ciclónicos	27
9.3.2. Colectores húmedos	28
9.3.3. Filtros de tela	28
9.3.4. Precipitadores electrostáticos	29
9.3.5. Cámaras de sedimentación por gravedad	30
10. Desarrollo	32
10.1. Metodología utilizada	32
10.2. Desarrollo teórico	34
10.3. Diseño de prototipo	39
10.4. Diseño de estructura de soporte del cuerpo del sedimentador	45
10.5. Dosificador	50
10.6. Costo del prototipo	62
11. Resultados	62
11.1. Datos obtenidos	62
11.2. Análisis de resultados	63
11.3. Trabajo a futuro	66
11.4. Lecciones aprendidas	67
12. Conclusiones	68
13. Bibliografía	70
Anexo	
1. Propiedades del grano derivado de llanta	72
2. Imágenes del grano derivado de llanta con microscopio	73
3. Metodología de estimación de diámetro de la partícula	75

4. Identificación de fibras textiles, determinación del tipo de nailon	80
5. Identificación de fibras textiles, por estudio de laboratorio	83
6. Determinación del grado de limpieza	85
7. Gráfico para determinar la velocidad terminal de sedimentación para partículas esféricas en el aire	88
8. Gráfico para el coeficiente de arrastre basado en el número de Reynolds	89
9. Cálculo de la fuerza arrastre del grano derivado de llanta desechada	89
10. Planos del prototipo	92
11. Galería de imágenes del prototipo	101
12. Hoja de datos del motor paso a paso, modelo PM55L-048	102
13. Diseño de circuito elaborado en Proteus v8	103
14. Código desarrollado en Arduino para el motor paso a paso, modelo PM55L-048	103
15. Marco legal (normas de seguridad)	106
16. Símbolos propuestos para la cámara de sedimentación por gravedad	108

## 1. Lista de Figuras

- Página 16 Figura 01. Construcciones básicas: a) capas diagonales, b) diagonal con cinturones y c) capas radiales.<sup>2</sup>
- Página 19 Figura 02. Procesamiento a temperatura ambiente.<sup>1</sup>
- Página 20 Figura 03. Criogenia.<sup>1</sup>
- Página 22 Figura 04. Sistema de gestión de llantas en Europa.<sup>17</sup>
- Página 25 Figura 05: Diagrama de flujo de las opciones para la reducción de emisiones.<sup>21</sup>
- Página 26 Figura 06: Mecanismos para la eliminación de partículas: a) Impactación por inercia, b) Intercepción directa, c) Difusión.<sup>1</sup>
- Página 27 Figura 07: Separador ciclónico.<sup>1</sup>
- Página 28 Figura 08: Ejemplos de equipos con colectores húmedos.<sup>25</sup>
- Página 29 Figura 09: Equipo de filtro de tela.<sup>23</sup>
- Página 30 Figura 10: Precipitador electrostático.<sup>23</sup>
- Página 31 Figura 11: Cámara de sedimentación por gravedad.
- Página 32 Figura 12: Cámara de sedimentación por gravedad con malla separadora.<sup>26</sup>
- Página 34 Figura 13. Metodología utilizada.
- Página 34 Figura 14. Cámara de sedimentación por gravedad.
- Página 38 Figura 15: Regímenes de acuerdo al coeficiente de arrastre contra el número de Reynolds.
- Página 38 Figura 16: Proyección horizontal de una partícula.
- Página 39 Figura 17. Zonas de partículas de la cámara de sedimentación por gravedad.
- Página 40 Figura 18. Diagrama de cuerpo de grano derivado de llanta en rampa de entrada.
- Página 41 Figura 19. Diagrama de cuerpo de grano derivado de llanta en rampa y curva.
- Página 44 Figura 20. Zonas de partículas de la cámara de sedimentación por gravedad y de granos.
- Página 44 Figura 21. Diseño de prototipo elaborado en Solid Edge ST7
- Página 45 Figura 22. Carga de estructura sobre el soporte principal.
- Página 46 Figura 23. Diagramas V y M en una solera de 1"x1/4".
- Página 47 Figura 24. Diagramas V y M en una solera de 1"x1/4" incluyendo el peso del material.
- Página 49 Figura 25. Determinación de x para reducir la deflexión.
- Página 50 Figura 26. Diseño de estructura, elaborado en Solid Edge ST7.
- Página 51 Figura 27. Partes del dosificador de grano.
- Página 52 Figura 28. Diagrama de cuerpo libre en dosificador.
- Página 52 Figura 29. Diagrama de cuerpo libre en segunda sección.
- Página 53 Figura 30. Cuello del dosificador.
- Página 55 Figura 31. Diagrama de cuerpo libre en la compuerta abierta.
- Página 56 Figura 32. Volumen de pirámide.
- Página 57 Figura 33. Pared de tolva superior del dosificador.
- Página 57 Figura 34. Diseño del dosificador, elaborado en Solid Edge ST7.
- Página 58 Figura 35. Diseño del rampa, elaborado en Solid Edge ST7.
- Página 58 Figura 36. Diseño de dosificador y de rampa, elaborado en Solid Edge ST7.

- Página 59 Figura 37. Obtención de la media de las aristas de la pirámide truncada.
- Página 59 Figura 38. Diagramas V y M en un PTR de 1" calibre 14 en el contenedor superior.
- Página 60 Figura 39. Diseño de estructura para el dosificador, elaborado en Solid Edge ST7.
- Página 60 Figura 40. Diseño de cámara de sedimentación por gravedad con dosificador, elaborado en Solid Edge ST7.
- Página 61 Figura 41. Prototipo alpha, de cámara de separación de gravedad.
- Página 61 Figura 42. Partes del diseño de la cámara de separación por gravedad.
- Página 64 Figura 43. Salida del material en diferentes tolva.
- Página 64 Figura 44. Acumulación del textil en el escape de la cámara de separación por gravedad.
- Página 65 Figura 45. Contenido de polvo y textil en la superficie del grano. a) Muestra sin procesar, b) Muestra manualmente procesada, c) Muestra filtrada por la cámara de separación por gravedad.
- Página 66 Figura 46. Contenido de polvo y textil desprendido del grano. a) Muestra sin procesar, b) Muestra manualmente procesada, c) Muestra filtrada por la cámara de separación por gravedad.
- Página 74 Figura 47: Foto de moneda de 10 centavos con microscopio digital.
- Página 76 Figura 48: Imágenes capturadas de partículas y mediciones efectuadas en Solid Edge.
- Página 77 Figura 49: Histograma de tamaño de partículas, unidades en mm.
- Página 80 Figura 50: Prueba 1, acercamiento de llama.
- Página 80 Figura 51: Prueba 2, Haciendo uso de una estación de soldar a 346°C la muestra no se fundía, descartando la clasificación de termoplástico.
- Página 80 Figura 52: Prueba 3, en la llama.
- Página 81 Figura 53: Prueba de tipo de nailon, en horno convencional a 230-250°C.
- Página 82 Figura 54: Estudio de cremación.
- Página 83 Figura 55: Estudio infrarrojo de textil.
- Página 84 Figura 56: Comparativa de estudio infrarrojo de textil.
- Página 85 Figura 57: Determinación del grado de limpieza: a) Peso del recipiente vacío. b) Peso del polvo, textil separados.
- Página 85 Figura 58: Muestras en la superficie del grano: a) Material sin procesar. b) Material limpiado manualmente.
- Página 86 Figura 59: Polvo que se cae del grano: a) Material sin procesar. b) Material limpiado manualmente.
- Página 87 Figura 60: Gráfico para determinar el coeficiente de arrastre basado en el diámetro de la partícula comprendido en un número de Reynolds de 1 a 500 (densidad expresada en gramos por centímetro cúbico).<sup>1</sup>
- Página 88 Figura 61: Gráfico para determinar el coeficiente de arrastre con base en el número de Reynolds.<sup>1</sup>
- Página 89 Figura 62: Fuerzas ejercidas en un cuerpo sumergido.<sup>1</sup>
- Página 90 Figura 63: Diagrama de cuerpo libre de fuerzas necesarias para mover el grano.
- Página 102 Figura 64: Diagrama de conexiones de circuito en Proteus.

## 2. Lista de Tablas

- Página 24 Tabla 01: Productos comunes derivados del reciclaje de neumáticos.
- Página 31 Tabla 02: Ejemplos de patentes de cámaras de sedimentación.<sup>31,32</sup>
- Página 32 Tabla 03: Principales factores para seleccionar el tipo de colector.<sup>28</sup>
- Página 33 Tabla 04. Especificaciones.
- Página 53 Tabla 05. Peso aplicado contra el motor generado por los 97.8N del contenedor superior, con diferentes ángulos de inclinación en el cuello.
- Página 62 Tabla 06. Costo para el desarrollo del prototipo.
- Página 62 Tabla 07. Resultados obtenidos.
- Página 71 Tabla 08: Propiedades del caucho natural vulcanizado.<sup>1</sup>
- Página 72 Tabla 09: Propiedades del grano de llanta.
- Página 76 Tabla 10: Medidas de dispersión del textil y polvo.
- Página 79 Tabla 11: Identificación de muestras homogéneas de textiles.<sup>1</sup>
- Página 79 Tabla 12: Identificación de muestras nailon y acrílicas.<sup>1</sup>
- Página 79 Tabla 13: Identificación de muestras nailon.<sup>1</sup>
- Página 82 Tabla 14: Valores  $T_g$  y  $T_m$  predeterminados para el Nylon 6 y Nylon 6,6.<sup>1</sup>



### 3. Glosario de términos

$H_0$ :	Hipótesis nula
$H_1$ :	Hipótesis alterna
$\mu_1$ :	Media del peso entrante en la cámara de sedimentación por gravedad
$\mu_2$ :	Media del peso saliente de la cámara de sedimentación por gravedad
$\alpha_s$ :	Nivel de significancia
$V$ :	Velocidad de entrada en la cámara de sedimentación por gravedad
$t$ :	Tiempo de recorrido de una partícula
$H$ :	Altura de la cámara de sedimentación por gravedad
$V_t$ :	Velocidad de sedimentación o velocidad terminal
$L$ :	Recorrido a través de la cámara de sedimentación por gravedad
$Q$ :	Caudal dentro de la cámara de sedimentación por gravedad
$W_c$ :	Ancho de la cámara de sedimentación por gravedad
$\eta_d$ :	Eficiencia de la cámara de sedimentación por gravedad
$Re$ :	Número de Reynolds
$\rho$ :	Densidad del fluido
$V_e$ :	Velocidad de entrada de la partícula
$d_p$ :	Diámetro de la partícula
$\mu_d$ :	Viscosidad dinámica del fluido
$\gamma_s$ :	Peso específico de la esfera
$\gamma$ :	Peso específico del fluido
$g$ :	Gravedad
$C_D$ :	Coefficiente de arrastre
$\rho_p$ :	Densidad de la partícula
$\rho_g$ :	Densidad atmosférica del fluido
$y_f$ :	Posición final del grano dentro de la cámara en la componente vertical
$y_o$ :	Posición inicial del grano al entrar en la cámara en la componente vertical
$V_{iy}$ :	Velocidad inicial en su componente vertical del grano al entrar en la cámara
$a_p$ :	Aceleración de la partícula en la cámara
$V_x$ :	Velocidad horizontal del grano en la cámara de sedimentación por gravedad
$d_x$ :	Posición final del grano dentro de la cámara en la componente horizontal
$t_e$ :	Espesor de la lámina de acero galvanizada calibre 28
$\rho_m$ :	Densidad del acero
$N$ :	Normal
$f$ :	Fricción
$\theta$ :	Ángulo de inclinación en la rampa
$W$ :	Peso
$E_c$ :	Energía cinética del grano en la rampa
$m$ :	Masa
$V_c$ :	Velocidad del grano dentro de la cámara
$E_p$ :	Energía potencial del grano en la rampa
$h_r$ :	Altura del recorrido del grano dentro de la rampa
$W_f$ :	Trabajo realizado por la fricción
$l_r$ :	Longitud de la rampa
$\mu_s$ :	Coefficiente de fricción estática
$l$ :	Longitud del tramo de entrada
$V_1$ :	Velocidad inicial del grano en el tramo de entrada
$V_2$ :	Velocidad final del grano en el tramo de entrada

$V_f$ :	Velocidad final en su componente vertical del grano al entrar en la cámara
$F_x$ :	Fuerzas en el eje horizontal
$F_y$ :	Fuerzas en el eje vertical
$R_a$ :	Reacción generada en el punto a
$R_b$ :	Reacción generada en el punto b
$M$ :	Momento
$S$ :	Módulo de sección
$\sigma_{perm}$ :	Esfuerzo normal permisible, esfuerzo de cedencia
$b$ :	Ancho de perfil
$h$ :	Alto de perfil
$\rho_{sol}$ :	Densidad de solera
$V_{sol}$ :	Volumen de solera
$\tau$ :	Esfuerzo cortante
$V_\tau$ :	Resultante de fuerza cortante interna
$Q_\tau$ :	Momento estático del área transversal
$I$ :	Momento de inercia de la sección transversal
$t_\tau$ :	Espesor de la sección transversal
$A$ :	Área
$P_{cr}$ :	Pandeo crítico
$E$ :	Módulo de elasticidad del material
$K$ :	Factor de efectividad de longitud
$L$ :	Longitud de la columna
$\delta$ :	Deflexión
$P$ :	Carga aplicada
$d$ :	Distancia
$\alpha$ :	Ángulo de inclinación en el dosificador
$o$ :	Segmento de cuello del dosificador
$a$ :	Distancia entre paredes del cuello del dosificador
$M_G$ :	Momento de inercia del cuerpo aplicado en el punto G.
$\alpha_a$ :	Aceleración angular que sufre el cuerpo
$r$ :	Radio
$\theta_f$ :	Ángulo final en radianes
$\theta_o$ :	Ángulo inicial en radianes
$\omega_o$ :	Velocidad angular inicial
$\alpha_c$ :	Aceleración angular constante
$V_{pirámide}$ :	Volumen de la pirámide
$c$ :	Ancho de la pirámide
$y$ :	Media de las aristas de la pirámide truncada
$Z$ :	Variable aleatoria normal estándar
$X$ :	Estimador
$\sigma$ :	Desviación estándar
$n$ :	Tamaño de la muestra
$t_e$ :	Valor de la muestra de dos medias
$\bar{X}$ :	Media del material entrante
$\bar{Y}$ :	Media del material saliente
$\delta$ :	Resultado de la hipótesis nula
$S_v^2$ :	Varianza de la muestra

#### 4. Resumen

La presente tesis elabora un diseño de una cámara de sedimentación por gravedad cuya aplicación se encuentra en la separación del grano y las fibras textiles encontradas en el proceso del reciclaje de llantas. Por lo que se efectuará un estudio y un prototipo que contempla los diferentes regímenes en un fluido aplicable a los diferentes tipos de partículas. Y se alcanzará la separación que permita el uso del grano y del textil en diversas actividades industriales.

## 5. Introducción

El reciclaje es un tema en boga que instiga a las nuevas generaciones a no sólo ver el tema como una situación necesaria, sino; como un negocio útil. Una forma de vida más armoniosa con la naturaleza que evite el detrimento de la huella del hombre sobre la misma. Una búsqueda de un camino parsimonioso entre nuestra existencia y el resto de los millones de seres vivos que existen en el mundo, aunando un estilo de vida que permita la obtención de recursos monetarios. El reciclaje, es el concepto industrial de seguir procesando pero con la posibilidad de limpiar y restituir lo utilizado. En el precepto utópico, sería tomar las materias primas y reutilizarlas sempiternamente, y aunque no sea asequible la idea, al menos; la regeneración de los procesos naturales tendrá el suficiente tiempo para permitir nuestra coexistencia. Es imperativo la acción ya que en la actualidad, existen tantos productos o desechos generados que carecen de este ciclo retroalimentador: cascajo, aceite, artículos electrónicos, desechos radiactivos, llantas, madera, aguas negras, compuestos orgánicos, minerales (ganga), cartón, PET (siendo como el cartón, sólo se puede reciclar hasta un límite número de veces), entre muchos otros, que en tiempo no muy largo; afectarán severamente a las futuras generaciones.

El enfoque del presente trabajo, es en uno de aquellos productos, las llantas, que con su existencia de millones y millones tiradas en México, a través de los diversos gobiernos, se han intentado esfuerzos de capitales privados para solventar la cuestión. Sin embargo; el problema subsiste y evidentemente se incrementa. Y una pregunta clave que se genera es: ¿Qué nos diferencia de aquellas naciones que si lo han logrado? Una de las respuestas subyace en la generación de tecnología interna, por lo que para generar el reciclaje de llantas es necesario de equipo generado con mano de obra mexicana; bajo ingeniería mexicana, que permita soslayar las dificultades y presentar resultados reales para que finalmente, podamos encontrar una solución a este problema. Dicha tecnología mexicana deberá utilizar en cada uno de los procesos internos, los conocimientos y experiencias de otros países, no empezar desde cero, pero tampoco rezagarse en los cambios, buscar y generar el conocimiento propio que permita seguir creciendo.

Una de las piezas claves para generar nuevos productos en el reciclaje de llantas, se encuentra en la separación correcta de los elementos que conforman a la llanta: hule, metal y textil. El metal es sencillamente atrapado con imanes. Pero; en el hule y el textil se presenta la dificultad por la similitud en la naturaleza de los componentes, ya que ambos son polímeros en el mismo estado, sólido. Por lo que, la separación a través de la densidad en un fluido, es una posibilidad que puede ser explotada. Siendo el aire el medio fluido más idóneo para el transporte del hule y el textil, se requiere estudiar los mecanismos de filtración a través del aire que permitan la separación buscada. Utilizando un mecanismo probado, la cámara de separación por gravedad, es una máquina utilizada mucho en los procesos de minería que permite la separación y limpieza del mismo aire.

Los conocimientos del funcionamiento de la cámara de separación por gravedad, han sido obtenidos de manera empírica, pero; no han sido desarrollados al grado suficiente para la obtención de modelos matemáticos que permitan modelar en computadora los posibles

resultados al introducir hule y textil. En el camino para el desarrollo, se encuentran fórmulas físicas que permiten la comprensión de la cámara de separación por gravedad y el trabajo de la misma con los diferentes regímenes en un fluido aplicable. Consecuentemente; para generar nuestra propia tecnología que realmente genere el cambio, el desarrollo del equipo deberá comprender y conjuntar las fórmulas físicas que alcancen la separación deseada, permitiendo la pureza en las materias primas, permitiendo el desarrollo de la industria del reciclaje de llantas y como tal, poner un grano de arena en beneficio del medio ambiente. Dicho esquema de trabajo, se pretende realizar bajo una tónica de bajo costo.

Derivado de lo previamente mencionado; se pretende desarrollar un prototipo económico de la cámara de separación por gravedad que permita la separación del hule y el textil generado de la industria del reciclaje de neumáticos.

## 6. Antecedentes

### 6.1 Descripción de la problemática

La incipiente industria del reciclaje de llantas en México se encuentra muy por debajo de las necesidades de la nación. La industria automotriz creciente, demanda que a su ritmo se recicle y se reutilice toda la materia prima para no tener una mayor afectación en el medio ambiente, es por tal; que los recicladores actuales deben de encontrar por vías económicas, la manera de transformar la basura en la materia prima; ofreciendo una alta calidad y que compita con aquella que son de nuevo origen. En la industria del reciclaje de llantas, la separación del hule y el textil utiliza equipo muy costoso; por lo que se pretende para solventar dicha problemática, y como primer punto, diseñar una máquina económica que permita la separación del hule y el textil.

Para el desarrollo de una cámara de sedimentación por gravedad se presenta como segunda problemática; el soslayar la cuestión de que no existe un modelo matemático que permita hacer una simulación por computadora de los diferentes tipos de partículas entrantes. Por lo que es necesario; realizar un análisis de los diferentes regímenes y la actividad de las diferentes partículas dentro de la cámara de separación por gravedad para conformar un equipo óptimo.

## 7. Objetivos

Mediante los modelos existentes de separación y limpieza de aire, se pretende diseñar una máquina económica de separación por gravedad la cual separe el textil y el grano generado de la industria de reciclado de llantas.

### 7.1 Hipótesis

La hipótesis que se plantea está basada en dos muestras de tamaño pequeño (ya que es todavía un prototipo) en una comparativa de dos medias, siendo la primera dada por el peso de las muestras que no han sido filtradas por la cámara de sedimentación por gravedad y la segunda dada por el peso de las muestras que fueron filtradas por la cámara de sedimentación por gravedad. Siendo:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$\alpha_s = 0.05$$

## 8. Justificación y alcance

La industria del reciclaje de llantas en nuestro país requiere que se desarrolle la ingeniería mexicana, es muy difícil que los toscos sistemas internacionales con grandes máquinas tengan éxito en nuestra economía, ya que para el beneficio de la nación y del reciclaje de llantas se requieren de equipos pequeños con procesos simples. Siendo un ejemplo de esto; la industria del reciclaje del PET, que a través de estos últimos 10 años, México se ha vuelto líder en el reciclaje del mismo. La diferencia con la llanta estriba no tanto en el proceso del reciclaje, sino que; cada intento del reciclador de llantas, al utilizar equipo extremadamente caro se le dificulta alcanzar un punto de retorno por la incertidumbre política y lo incipiente del mercado.

La incertidumbre política se genera por el esquema de la misma, ya que el cambio gubernamental a instancias municipales y estatales, dificulta más el proceso. Siendo que la llanta al ser considerada como un residuo de manejo especial, requiere de permisos que tienen que ser renovados en cada periodo, agregándose que los permisos a instancias federales son muy difíciles de obtener, por ende; la inversión es inviable. Lo incipiente del mercado se presenta también como parte del mismo efecto, al no existir recicladores, no se generan los productos derivados del mismo, por tal; cada reciclador debe de enfrentarse al reto de presentar al público los productos generados del reciclaje, que conlleva un costo adicional que dificulta ser competitivo en el mercado.

Sin embargo, el proceso de reciclaje no es imposible; requiere de un impulso que demuestre su competitividad y que poco a poco vaya creciendo para demostrar el gran potencial que guarda. Pero para hacerlo factible; se necesita un cambio en la estructura de acuerdo a la idiosincrasia de la nación, uso de mano de obra con equipos que tengan capacidades medianas-bajas que permitan con bajos costos de inversión, efectuar el reciclaje mientras se alcanza el capital de retorno.

El alcance de esta tesis es el de hacer un modelo físico que permita el desarrollo de una máquina de separación de grano-textil haciendo uso de la gravedad, se incluirán los planos y los cálculos necesarios para su construcción, así como todos los elementos que se crean necesarios para el control de la misma máquina. El diseño del sedimentador por gravedad normalmente es aplicado a partículas pequeñas, pero; se espera que con el presente trabajo se pueda alcanzar los mismos resultados de eficiencia con partículas grandes, por lo que; se espera que este trabajo pueda ser utilizado en otras industrias, y no se limite sólo al reciclaje de neumáticos.

## 9. Marco teórico

### 9.1 Industria del reciclaje de llantas

Las llantas son un factor muy importante en nuestros días, desde sus inicios; han sido una de las piezas esenciales para el vehículo y ha contribuido en gran parte en la industrialización a nivel mundial. El automóvil, se ha desarrollado como un instrumento fundamental para el conjunto de actividades de la humanidad ya que es necesario para cualquier sector de la industria, para la elaboración de los servicios, para las comunicaciones, transportes, entre otros. El vehículo motorizado, incluyendo camiones, motocicletas, metro, etc., es el medio masivo de movilización que rige a la sociedad por lo que para su desarrollo, se le ha adecuado una base sólida que permita el contacto del piso con la maquinaria, la llanta, que a través de un proceso de vulcanización, obtiene un enorme incremento en sus propiedades mecánicas, permite que el vehículo de manera confiable alcance velocidades muy altas con cargas muy pesadas. La clasificación principal de las llantas se define de acuerdo a su tamaño: llantas de coche, de camioneta, de camión, de agricultura y las OTR<sup>1</sup>, que por su acrónimo estadounidense (off road tires, llantas fuera de ruta); clasifica a todas aquellas llantas no comunes como llantas mineras, de aviones, etc. Otro factor importante en cuanto a la mejora de la llanta, comprende el uso de cuerdas metálicas, que para las dos primeras clasificaciones, las llantas de coche y de camioneta, las cuerdas metálicas se encuentran exclusivamente en la banda de rodamiento, esto es; en la superficie que tiene contacto con el piso. Pero en caso de las llantas de tráiler o de camión, las cuerdas incluyen las partes laterales de las llantas,

conocidas también como cachetes. Para darle un asentamiento sólido a la llanta, la parte de contacto con el vehículo requiere de un último soporte: el talón, que consta de una cinta de varios hilos metálicos ubicada en el extremo del cachete, en el diámetro interno de la llanta y sirve como soporte principal entre el vehículo y el suelo. La banda de rodamiento, el cachete y el talón constituyen las partes principales del neumático, pero realmente; la construcción de una llanta es mucho más compleja, ya que para la elaboración de una llanta de coche se requieren alrededor de 50 piezas individuales y de 175 piezas para una llanta de camión cuyas construcciones básicas son: a) capas diagonales, b) diagonal con cinturones, c) capas radiales.

La estructura interna, como se aprecia en la figura 1, tiene múltiples capas de caucho y se le conoce como *carcasa*. Dichas capas colocadas en direcciones perpendiculares contienen cuerdas de nailon, poliéster, fibra de vidrio y acero; cuyo fin, tienen el de restringir la elasticidad de la llanta para aumentar su rigidez además de limitar su expansión al momento de inflarse. La diferencia de las construcciones varía conforme al desempeño de la llanta, en el caso de las radiales que incluyen cuerdas de acero alineadas radialmente; ofrecen una mayor flexibilidad en las paredes laterales del neumático; reduciendo el esfuerzo en el resto de las capas y en el piso, conocido también como estrías, que en su mayoría; se encontrará este tipo de llantas para las aplicaciones de carga como camionetas y camiones.<sup>2</sup>

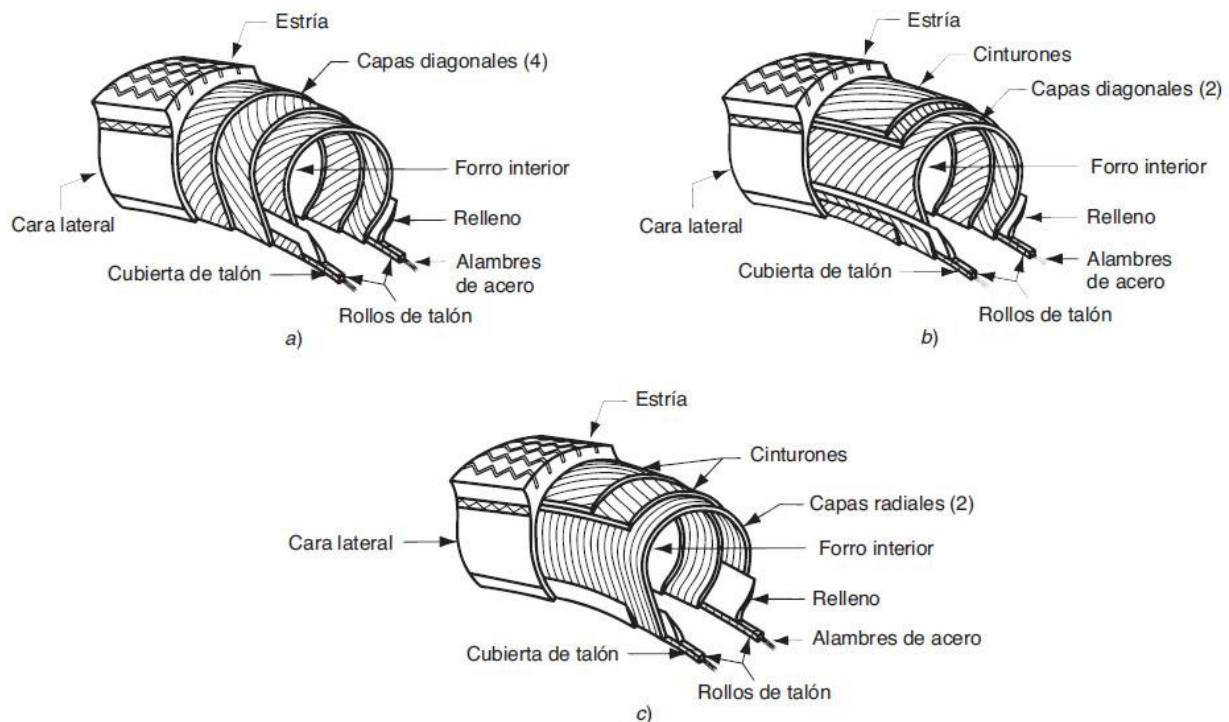


Figura 01. Construcciones básicas: a) capas diagonales, b) diagonal con cinturones y c) capas radiales.<sup>2</sup>

Sin embargo, dentro de este contraste de mejora de propiedades, se encuentra la desventaja en el desecho ya que al mejorarse el neumático en sus propiedades mecánicas, provoca por consecuencia que igualmente se tengan que aumentar los esfuerzos en su destrucción. Es por tal, que en la industria del reciclaje de llantas la maquinaria sea muy grande y costosa. Las



plantas de renombre a nivel internacional oscilan en precios de los \$2,000,000.00 - \$5,000,000.00 de USD, dependiendo de la capacidad y del tipo de tecnología empleada.

### 9.1.1 Tipo de tecnología

Los tipos de tecnologías principales para el procesamiento de llantas son:

- Procesamiento a temperatura ambiente
- Criogenia
- Pirólisis

#### 9.1.1.1 Procesamiento a temperatura ambiente

El procesamiento a temperatura ambiente consta de grandes molinos y granuladores con poderosos motores del orden de 30 caballos de potencia en adelante, que con cuchillas de un acero de alta resistencia, por ejemplo D2, a través de un proceso de rotación del eje o ejes principales; se segmenta al neumático a tal punto, en que puedan generar pequeños fragmentos que sean liberados por la criba interna del molino. Internacionalmente, las marcas como Eldan Recycling A/S de Dinamarca, la alemana Amandus Kahl GmbH & Co. KG y Granutech Saturn System Corporation de E.E.U.U. dominan el mercado y cuentan con una línea de operación genérica de un molino primario, que segmenta la llanta completa en tramos de 15.24 a 25.4 centímetros (6 a 10 pulgadas) y que pueden ser utilizados en la industria de ingeniería civil, como paredes anti-ruido, fosas sépticas o en las cementeras: como un producto conocido como TDF (*Tire derived fuel, combustible derivado de llantas*) que por su alto contenido energético de las llantas, es introducido en los hornos de cementeras para la generación del clínker, con esto se reduce el uso del carbón en un medio controlado; se contamina menos. Cabe mencionar, que a nivel mundial más del 60%<sup>3</sup> de los neumáticos reciclados tienen ese destino. Dicho proceso del molino primario es de alta capacidad, existiendo en la industria trituradores como los del marca Barclay Roto-Shred Inc.<sup>4</sup>, que con sus 60 – 100HP, pueden llegar a tener una capacidad de proceso de 16-20 toneladas por hora, es decir del orden de 1,600 – 2,000 neumáticos por hora.

La segunda parte del proceso, comprende cuando los tramos generados por el molino primario pasan a través de una trituración secundaria, aquí el tamaño de salida reducido del producto se encuentra en promedio de 0.6 a 2.54 centímetros (1/4 a 1 pulgada), esta salida tiene aplicación en la industria de adorno de jardines o en el uso de parques infantiles. La capacidad de producción se reduce significativamente, ya que en este proceso; el triturador consta de una criba que va clasificando los tamaños del grano generado y al no ser del tamaño requerido, reintroduce el material segmentado a la cámara principal de las cuchillas para que nuevamente sea segmentado y reducido el tamaño. Estos equipos también tienen un alto caballaje, por ejemplo; el equipo de Eco-Green ECO-137 que tiene dos motores Siemens de 100HP. Posterior a este proceso, entra la parte de granulación, en donde; un equipo similar al triturador secundario pero con una criba de menor tamaño, produce granos del orden de 0.6 a 0.084 centímetros (1/4" a malla 20). Posteriormente y para la obtención de una granulometría más fina, se requiere de un siguiente proceso, una pulverización en donde el tamaño es reducido a polvo que permite alcanzar tamaños de grano muy finos, comercialmente el grano es reducido

hasta la malla 400 que equivale a 0.037mm. Este proceso puede ser a través de tambores giratorios, como el Krumbuster<sup>5</sup> o un sistema de discos giratorio como el de Amandus Kahl.<sup>6</sup>

En cada proceso mencionado, los trozos generados deben ser enfriados y filtrados, el enfriamiento se efectúa con transportadores neumáticos, usando agua o utilizando sistemas de transporte prolongados que permitan la reducción de temperatura. Dicho enfriamiento se requiere para evitar la posibilidad de combustión de los trozos del neumático. El proceso de filtrado consta principalmente de dos tipos:

- Filtros magnéticos
- Filtros por clasificadores y textiles

Los filtros magnéticos como su nombre lo expresa consta de separadores con imanes que permiten la recuperación del metal de los trozos cortados; dichos filtros se dividen a su vez en dos tipos<sup>7</sup>: filtros magnéticos de tambor y filtros magnéticos de banda cruzada. El filtrado comúnmente se origina al pasar los trozos que fueron procesados por alguna de las etapas de molienda, a través de una banda transportadora, se encontrará el filtro magnético. Si es de tipo tambor, se encontrará al final de la banda y si es de tipo cruzado, el filtro se encontrará en los segmentos intermedios de la banda. Los filtros magnéticos de tambor, constan de un cilindro o tambor que tiene un giro constante y que en un solo segmento interno, alberga un imán de neodimio poderoso, que al momento de pasar cerca del tambor los trozos metálicos son atraídos por el imán, y tras adherirse al tambor y siguiendo el giro del mismo, encuentran los trozos un segmento del tambor en donde no existe un imán interno, por lo que; por su propio peso caen desprendiéndose del tambor y separándose del material no metálico. El otro sistema, el filtro magnético de banda cruzada consta similarmente de un imán ubicado en la parte superior a manera perpendicular de una banda transportadora que acarrea los trozos previamente molidos. La banda transportadora de filtro magnético, después de adherir los elementos metálicos, desplaza los trozos fuera del material no metálico.

Los filtros textiles principales se dividen en clasificadores y textiles. Los clasificadores o cribas son unidades tamizadoras que con diferentes mallas permiten mediante un movimiento vibratorio, clasificar los productos por su tamaño. Pero; al efectuar dicha acción, también recolecta una gran parte del textil, ya que este; tiende a juntarse formando grandes bolas que permiten su fácil recolección. Por otra parte, la tecnología exclusiva para el filtro del textil no está muy definida en el mercado, incluso empresas como Granutech de E.E.U.U. en sus muestras presentan un alto contenido de textil. La empresa Eldan Recycling A/S, maneja la limpieza con un sistema de aspirado con una capacidad de 4-6 toneladas, cuyo material es dividido en dos secciones, una de aspirado y otra que tiene tres clasificadores. La sección de aspirado con su modelo Aspirator Type UP1500 distribuye el material y discierne las partículas ligeras del resto, así el textil es extraído para su separación. El proceso completo de extracción de textil, para un 96 – 98% de pureza en el 2012 tenía un costo de €278,000.00. Otra unidad de separación conocida es la Forsberg Vacuum Gravity Separator<sup>8</sup> (Separador gravitacional por vacío Forsberg) que mediante su control de flujo de aire, velocidad de vibración y su capacidad para diferenciar las partículas; permite la recolección del textil. Una unidad usada en el 2011

modelo 200V con un motor de 1HP y una capacidad de aproximadamente 5.4 toneladas por hora tenía un costo de \$15,800.00USD.

El proceso completo para una planta con procesamiento a temperatura ambiente se muestra en la siguiente figura:

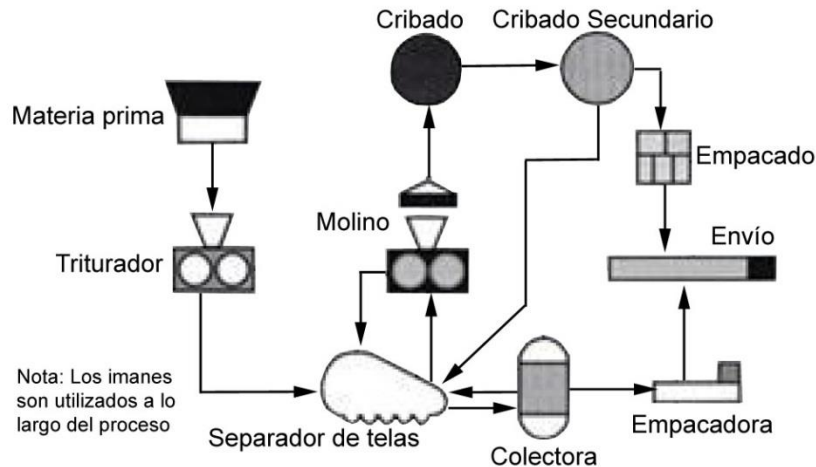


Figura 02. Procesamiento a temperatura ambiente.<sup>1</sup>

#### 9.1.1.2 Criogenia

Con el nitrógeno líquido, que es una de las sustancias que en su estado puro tiene una temperatura de  $-195.8^{\circ}\text{C}$ <sup>9</sup>, al hacer contacto con el hule de la llanta; cambia las propiedades de la misma haciéndola quebradiza. Para este proceso, en general; se cuenta con una unidad de molienda primaria y secundaria que reduce a la llanta a granos de 1.27cm (1/2 pulgada) que posteriormente son transportados a una cámara de enfriamiento. En dicho proceso, se le aplica el nitrógeno puro y el hule alcanza su punto de temperatura de transición vítrea de  $-80^{\circ}\text{C}$ <sup>10</sup>, cuyo fin es reducir las propiedades de densidad, dureza y rigidez del polímero<sup>11</sup> para entrar posteriormente a los molinos de tipo martillo que pulverizarán los trozos congelados y así alcanzar mallas muy finas en el proceso. El procesamiento de llantas desechadas con criogenia se aprecia en la figura 3.

La ventaja de estos sistemas, es que la maquinaria requerida sufre menos desgaste por lo que los costos operativos se reducen mucho, sin embargo; es necesario tener un suministro constante de nitrógeno líquido, asimismo; se debe de tener un mejor control en las instalaciones para el manejo de dicha sustancia.

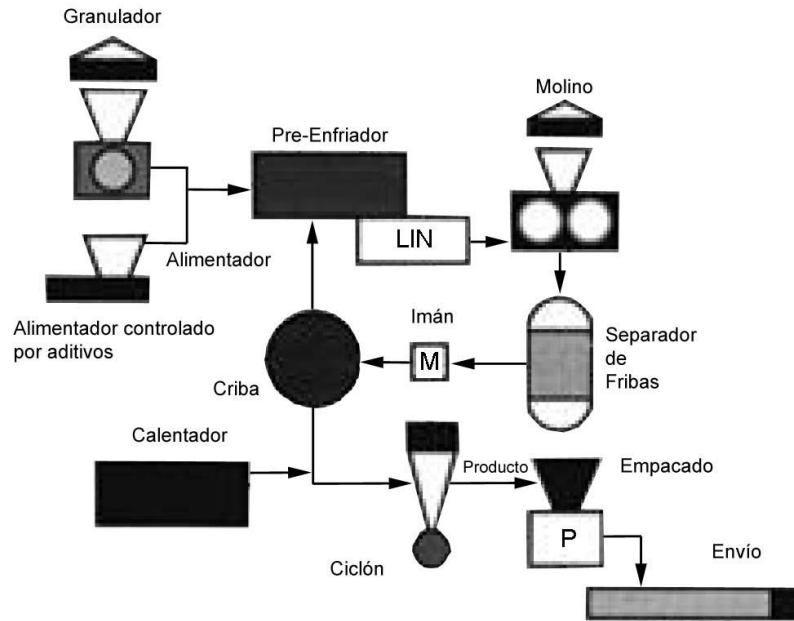


Figura 03. Criogenia.<sup>1</sup>

### 9.1.1.3 Pirólisis

El proceso de pirólisis consta de la descomposición del neumático en sus partes originales, se obtienen: aceites, carbón, acero.<sup>12</sup> Dicha descomposición se efectúa al elevar la temperatura del neumático en un medio controlado sin oxígeno; descomponiendo las cadenas principales poliméricas y obteniendo los componentes principales del neumático.

Una de las características de este tipo de tecnologías, es que; es muy costosa y por muchos años ha tenido la dificultad de desarrollo en E.E.U.U., sólo en recientes años las plantas actuales tienen un sustento suficiente para poder continuar sus operaciones.<sup>13</sup>

### 9.1.2 Esquemas de gestión de llantas a nivel mundial

Se ramifican tres grandes vertientes para el manejo de las llantas:

- Esquema de impuestos.
- Esquema de mercado libre.
- Esquema de responsabilidad del productor.

#### 9.1.2.1 Esquema de impuestos

Bajo este esquema, el gobierno recauda un monto al momento de efectuarse la compra de la llanta, dicho monto será enviado a un fondo estatal que incentivará a los recicladores y a aquellas personas que hagan uso del reciclaje derivado de las llantas (en E.E.U.U. conocido como “tipping fees”). Por lo que para los recicladores, aparte de recibir su compensación a través del mecanismo de ventas, reciben una aportación adicional gubernamental al demostrar la cantidad de neumáticos reciclados. E.E.U.U. es el principal ejemplo, en donde:

Llantas desechadas: 255.61 millones de llantas en el 2017.<sup>14</sup>

Destinos:

- 50.90 % Co-procesamiento
- 29.71 % Adorno de jardines, parques infantiles y productos aglomerados
- 9.26 % Productos de ingeniería civil: fosas sépticas, paredes de sonido, carreteras.
- 3.22 % Exportadas
- 1.15 % Proceso de recuperación: reencauchadas
- 5.76 % Otros

#### 9.1.2.2 Esquema de mercado libre

La legislación no dictamina algún responsable en el manejo de las llantas, asimismo; la disposición está a cargo de la entidad estatal o federal que permite a la iniciativa privada ser partícipe del proceso de reciclaje, requiriéndose un permiso gubernamental. Países que funcionan bajo este esquema son: México, Austria, Inglaterra, Alemania, Suiza, Serbia, entre otros. Los datos de la GAVS (Gesellschaft für Altgummi-Verwertung-Systeme mbH, Sociedad para el sistema de reciclaje de hule viejo)<sup>15</sup> indican que para Alemania:

Producción: 577 mil toneladas en el 2016

Destinos:

- 34.84 % Co-procesamiento
- 40.03 % Recicladas
- 1.39 % Reuso interno
- 18.89 % Exportadas
- 4.85 % Reencauchadas

#### 9.1.2.3 Esquema de responsabilidad del productor

Bajo este sistema, la empresa u organismo productor de los neumáticos es el encargado de darle un seguimiento en su disposición acorde a los lineamientos legales. El mejor ejemplo de este sistema se encuentra en Japón:

Llantas desechadas: 144.923 millones de llantas en el 2017.<sup>16</sup>

Destinos:

- 63.06 % Co-procesamiento
- 11.41 % Recicladas
- 0.58 % Otros usos
- 13.06 % Exportadas
- 5.22 % Reencauchadas
- 6.67 % Almacenaje, quema clandestina, etc.

Como se indica en la siguiente figura, en el 2017 en Europa el esquema de responsabilidad del productor es el más común.



Figura 04. Sistema de gestión de llantas en Europa.<sup>17</sup>

### 9.1.3 Reciclaje de llantas desechadas en México

En el 2013, la industria de la llanta en México cuenta con 8 plantas principales ubicadas en la zona centro del país, de las cuales; acorde al Plan Estatal de Manejo de Llantas Usadas de Vehículos Automotores para el Estado de Tabasco<sup>18</sup>, existe una proporción de un 27.64% aproximado de generación de llanta anual por cada vehículo registrado (se excluye a todas aquellas de importación legal o ilegal), quedando la proporción:

$$\text{millones de n. f. u.} \approx 27.64\% * (\text{Llantas por Vehículos registrados})$$

*n.f.u.: neumáticos fuera de uso*

En el 2019, por el INEGI, se registra un monto de 32,737,826 automóviles, 439,385 camiones para pasajeros con cuatro llantas, 11,268,314 camiones de carga con un promedio de 14 llantas y 3,574,402 motocicletas. Dando un total de llantas por vehículos registrados (*lvr*) de<sup>19</sup>:

$$lvr = 4(32,737,826 + 439,385) + 14(11,268,314) + 2(3,574,402) =$$

$$\text{Llantas por vehículos registrados} \approx 297,6 \text{ millones}$$

Aplicándolo en la proporción previamente mencionada:

$$n. f. u. = 0.2764 * 297,6 \text{ millones}$$

$$n. f. u. \approx 82.3 \text{ millones}$$

Como se puede apreciar el registro de llantas producidas refleja una clara necesidad, pero también se refleja una oportunidad; una posibilidad para generar la conciencia y tener un mercado firme con una sólida cantidad de materia prima.

La frontera es un punto focal de la situación presente, ya que existen tratos ilegales en donde desde el extranjero, los “galleros” compran por lotes enormes cantidades de neumáticos para darles re-uso a una sola minoría. Sin embargo; al efectuar dicha acción, el resto de los neumáticos comprados en el lote son desechados en sitios clandestinos, esto ha generado que lugares con poblaciones pequeñas como La Paz, Baja California Sur tengan enormes depósitos de llantas. Asimismo, en nuestro País tampoco existen normas que regulen el mercado del renovado. El renovado es aquel proceso en el que se reemplaza la banda de rodamiento por una nueva, por lo común se aplica a las llantas de camiones, pero para tal proceso; sólo es recomendable aplicarlo en una sola ocasión por llanta, siempre analizando las condiciones previas de uso del neumático. Sin embargo, como se mencionó, mucho de estos procesos no son regulados.

#### 9.1.4 Problemática generada

La problemática generada por la acumulación de llantas desechadas tiene grandes afectaciones a la Sociedad, entre ellas se puede mencionar:

- a) Incendios.- La quema de llantas en terrenos clandestinos tiene un alto impacto, ya que el contenido calorífico de la llanta provoca que sea muy difícil de controlar el incendio y del mismo; se generan dioxinas y furanos que pueden producir cáncer.
- b) Mosquito y fauna nociva.- Por su forma geométrica, las llantas almacenan el agua de las lluvias, generando el ambiente necesario para que prolifere la fauna nociva.
- c) Dificultad en el confinamiento.- Por las características voluminosas y su dificultad en la compresión, las llantas ocupan mucho espacio en los rellenos sanitarios provocando que estos pierdan rápidamente su vida útil.
- d) Impacto visual negativo.- Siendo como tal basura y bajo la perspectiva visual; la presencia voluminosa de llantas desechadas genera un impacto negativo en el entorno y el ecosistema.

La normatividad en nuestro país, dictamina que los residuos que compongan un alto valor económico y que genere beneficio a través del manejo integral, como: reutilización, reciclado, recuperación, co-procesamiento o recuperación de sus componentes, será comprendido como un tipo de residuo de manejo especial<sup>20</sup>; por lo que las llantas son consideradas como residuos de manejo especial que requieren de un plan de manejo y su gestión es competencia del Estado, pudiendo otorgar concesiones para el manejo a privados.

#### 9.1.5 Productos generados a través del reciclaje

La diversidad de los productos posibles generados en la industria del reciclaje, está basada principalmente en el tamaño del grano, como se indica en la siguiente tabla:

Medida		Malla	Tipo	Industria y aplicaciones
[cm]	[in]			
Más de 20 cm			Calzado	Huaraches
2.54 - 15.24	1-6		Combustible	Cementera, papelera, hornos eléctricos
			Ingeniería Civil	Paredes de sonido, fosas sépticas
2.54 - 5.08	1 - 2		Adorno	Adorno de jardines y parques infantiles
0.635 - 5.08	1/4 - 2		Aglomerados	Topes, bloques resistentes al golpe, otros
0.141 - 0.238	0.056 - 0.09	8-14	Deportiva	Canchas de fútbol
0.08	0.03	14-20	Aglomerados	Losetas (baja calidad), pista de carreras
0.04	0.016	40	Aglomerados	Azulejos, Losetas, Asfaltos
0.015	0.006	100	Otros	impearmeabilizante

Tabla 01: Productos comunes derivados del reciclaje de neumáticos.

Para la elaboración de los productos de aglomeración y de adorno de exteriores; es necesario que el grano que sale del molino tenga una limpieza; tal que, consuma menos del material aglomerante o de pintura. Por lo que, para el proceso de la limpieza del textil existe una gran dificultad para los recicladores pequeños, que como se mencionó previamente, los equipos de filtrado de textil son muy costosos.

## 9.2 El aire en la industria

El aire es una mezcla de gases vital para el hombre, no sólo para el precepto de supervivencia; sino también para el desarrollo de la industria. Con el aire, el hombre puede desarrollar diferentes actividades; desde surcar el cielo hasta generar energía. Es por tal; que las emisiones de control en la industria para preservar la calidad del aire se han reforzado y regulado a través de las últimas décadas para mantener una calidad de aire, las primeras leyes sobre el aire datan de 1955 con la Ley de Aire Limpio en los E.E.U.U., posteriormente para el control de partículas se promulgó la TA Luft alemana<sup>21</sup> en 1986. En 1990 se incluyó en E.E.U.U. el concepto de materia particulada y en 1992 se modifican los British Standards para el control del aire. Bajo este marco legal, las empresas y fabricantes se vieron en la necesidad de desarrollar técnicas de limpieza, por lo que en general, se plantearon tres opciones para la reducción de las emisiones:

- Minimizar los residuos ( en la materia prima, de un producto o de un subproducto derivado)
- Recuperar y reciclar
- Destruir y verter



Cada una de estas opciones se muestra en la siguiente figura:

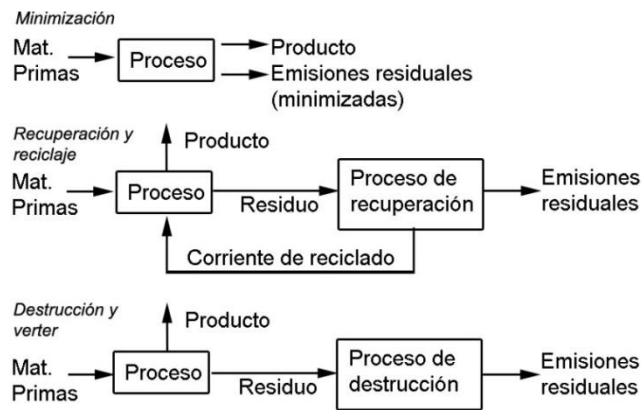


Figura 05: Diagrama de flujo de las opciones para la reducción de emisiones.<sup>21</sup>

Para la selección del equipo, se debe primero definir la categoría del compuesto a tratar, existiendo tres grandes categorías:

- COV (compuestos orgánicos volátiles)
- Compuestos orgánicos
- Materia particulada

El filtrado del textil y del grano derivado del reciclaje de llanta se encuentra ubicado dentro de la categoría de materia particulada, recuperándolo con posibilidad de reciclarlo.

### 9.3 Mecanismos de control de partículas

Existen principalmente seis mecanismos que tienen como fin la recolección de partículas:

- Impactación por inercia
- Intercepción directa
- Difusión
- Impactación centrífuga
- Efectos electrostáticos
- Sedimentación por gravedad

En los tres primeros métodos las partículas son desplazadas a una misma velocidad que el fluido y debido a su diferencia de ligereza con respecto al gas, al encontrarse un objeto; el gas se desplaza como un flujo laminar alrededor del objeto mientras que la partícula se resiste al cambio de dirección, por lo que será atrapada o interceptada en la circunferencia del objeto. En el primer mecanismo (figura 6a), la inercia de un objeto pesado que colisiona con un objeto o interceptor provoca que se quede fija en este punto, mientras el flujo soslaya el interceptor, las partículas de menor tamaño seguirán el flujo laminar y no serán atrapadas. En el mecanismo de la intercepción directa (figura 6b), ya que las líneas de flujo laminar tienden a converger al pasar alrededor del objeto y como el radio de la partícula es mayor que la distancia entre las

líneas de flujo y el objeto; esto provocará que la partícula sean llevadas a un punto de mayor acercamiento con el interceptor para que finalmente, quede atrapada la partícula en la circunferencia. En la difusión (figura 6c), las partículas de menor tamaño,  $1\mu\text{m}$ , por el efecto del movimiento browniano molecular aleatorio o difusión, chocarán directamente con el interceptor quedando así atrapadas; esto se origina ya que las moléculas del gas que transporta a las partículas colisionan con las mismas, transfiriendo energía cinética que permite la deflexión de la partícula hacia el interceptor.<sup>22</sup> Se requiere de un recubrimiento que agregue adherencia con el fin de evitar que las partículas reboten del choque con el interceptor y regresen al flujo laminar.

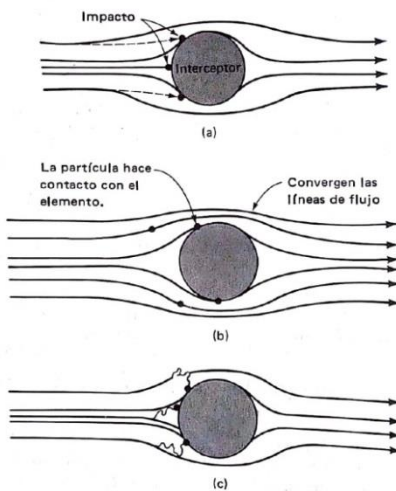


Figura 06: Mecanismos para la eliminación de partículas: a) Impactación por inercia, b) Intercepción directa, c) Difusión.<sup>23</sup>

Una de las características de las partículas a separar, es que; por la atracción intermolecular mutua, se genera un efecto de aglomeración que permite de manera más sencilla la separación. Dicho efecto, se presenta igual en el textil del reciclaje de llantas, por lo que; en mecanismos vibratorios se hace más sencilla la recolección y separación.

Los mecanismos de impactación centrífuga, de efectos electrostáticos y el de sedimentación por gravedad, se explican de manera más clara con los equipos de control de partículas.

Equipo de control de partículas<sup>23</sup>

Existen un cierto número de factores que determinan el equipo de control de partículas a utilizar, los datos más importantes son:

- Las propiedades físicas y químicas de las partículas
- El intervalos de la tasa de flujo volumétrico del gas
- El intervalo de concentraciones de partículas que se podrían esperar (cargas de polvo)
- La temperatura
- La presión
- La humedad

- La naturaleza de la fase gaseosa
- La condición requerida por el efluente tratado, la eficiencia de limpieza requerida

Los equipos básicos y su tipo de mecanismo para efectuar la separación de partículas son:

- Separadores ciclónicos (centrífugos), impactación centrífuga
- Colectores húmedos, impactación centrífuga
- Filtros de tela, combinación de mecanismos
- Precipitadores electrostáticos, efectos electrostáticos
- Cámaras de sedimentación por gravedad, sedimentación por gravedad

### 9.3.1 Separadores ciclónicos

El separador ciclónico que se indica en la siguiente figura es una estructura cilíndrica que tiene una sección cónica en la parte inferior, la entrada del fluido con partículas se encuentra en la parte superior y por su construcción geométrica se va a generar un efecto centrífugo en la corriente. La entrada tangencial del fluido provocará que las partículas de mayor tamaño sean llevadas al extremo del efecto centrífugo hacia las paredes del cuerpo cilíndrico y en la parte cónica, por la reducción de diámetros se generará en el fluido, una espiral que permitirá la salida de las partículas de mayor tamaño. Este efecto provocará que el fluido sin partículas encuentre al salir en la parte inferior una obstrucción generada por las partículas grandes; por lo que tenderá a generar un contra-flujo a la espiral buscando la salida por la parte superior del separador, generando igualmente una espiral pequeña que correrá internamente a lo largo del separador. Estas unidades centrífugas son las más utilizadas en la industria y su aplicación es para partículas de más de  $10\mu\text{m}$ . Sin embargo, para partículas menores de  $25\mu\text{m}$  raramente alcanzan una alta eficiencia de un 90%, por lo que es común en la industria; tener varios ciclones en serie. Su construcción es económica y requieren poco mantenimiento, su única desventaja es su baja eficiencia en partículas de menor tamaño. En la aplicación con el textil y el grano de la llanta, las partículas de textil no son lo suficientemente livianas para salir del efecto vórtice en el cono, por lo que son arrastradas a la parte inferior del separador junto con el grano, sin lograrse el filtrado.

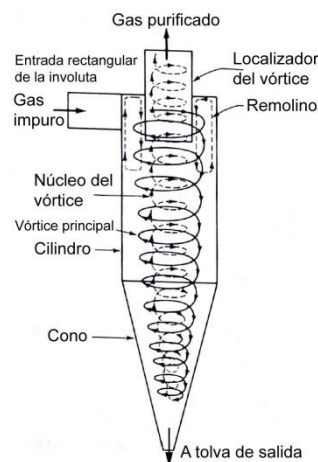


Figura 07: Separador ciclónico.<sup>23</sup>

### 9.3.2 Colectores húmedos<sup>24</sup>

Ejemplos de colectores húmedos son la torre de aspersion y la torre de aspersion ciclónica que se muestran en la siguiente figura, con estos equipos se puede separar partículas eficientemente entre  $0.1$  y  $20\mu\text{m}$ , utilizan un líquido que es generalmente agua, y es rociado en sentido contrario al flujo del fluido con partículas, esto provoca que las partículas aumenten en tamaño y se permita con mayor facilidad su remoción. El colector húmedo es utilizado como complemento en cualquiera de los equipos de separación de partículas, mejora la eficiencia en la recolección pero tiene la desventaja de generar lodos, asimismo; por el uso del agua, se genera corrosión y requiere de un mayor costo para el suministro del agua. En la cuestión del grano y el textil, al mojarse el grano; se genera un nuevo proceso ya que para el uso posterior del mismo se requiere que esté lo más seco posible en la aplicación de algún aglomerante o de pintura, por lo que; al implementarse los colectores húmedos se tendría que agregar un proceso de secado del grano.

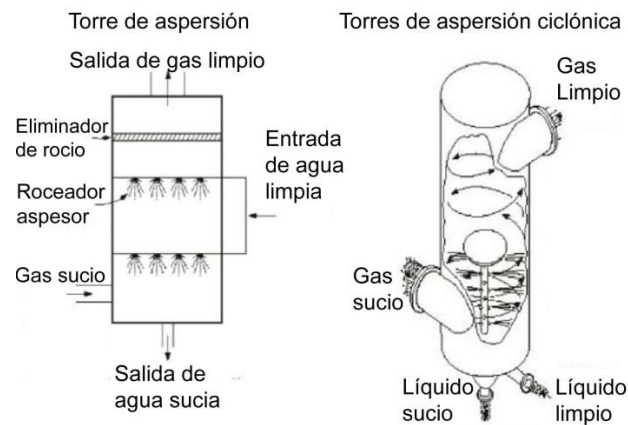


Figura 08: Ejemplos de equipos con colectores húmedos.<sup>25</sup>

### 9.3.3 Filtros de tela

Este es el método más antiguo y consiste en hacer pasar el fluido con partículas a través de un filtro poroso que permita atrapar a las partículas mientras el fluido sigue su trayectoria. Son utilizados para partículas muy finas de hasta  $0.01\mu\text{m}$  y alcanzan una alta eficiencia. Por lo general se hace uso de telas tejidas como filtro que tiene una relación entre el espacio de aire y el área en que se encuentra la tela de 1:1 hasta de 5:1. En cuanto al tipo de mecanismos de separación, cuando las partículas son mayores a  $1\mu\text{m}$ , el filtrado se logra por medio de la impactación e intercepción directa, mientras que cuando son las partículas menores a  $1\mu\text{m}$  hasta  $0.001\mu\text{m}$  se genera el efecto de difusión o un efecto de atracción electrostática que captura a la partícula en el filtro. Sin embargo, la dificultad de este sistema estriba en la limpieza del filtro, existen mecanismos vibratorios que por su movimiento, desprenden las partículas atrapadas en el filtro y las recolectan en la parte inferior, en una tolva. Asimismo, se puede limpiar el filtro al invertir el sentido del fluido o simplemente reemplazando los filtros, por lo que este equipo requiere de un constante mantenimiento. Se aprecia un ejemplo del filtro en la siguiente figura:

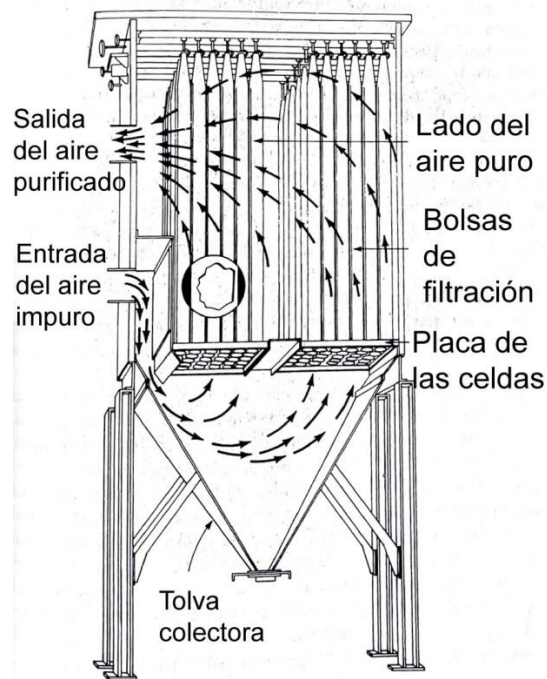


Figura 09: Equipo de filtro de tela.<sup>23</sup>

#### 9.3.4 Precipitadores electrostáticos

Son las unidades con mayor eficiencia; pueden alcanzar fácilmente un 98% de remoción incluyendo partículas menores a  $0.1\mu\text{m}$  y algunos modelos pueden alcanzar más del 99.9% de eficiencia teniendo un bajo costo de mantenimiento.<sup>26</sup> Dichas unidades funcionan mediante el uso de electrodos que generan cargas electrostáticas que atraen a las partículas mientras que el fluido sigue su trayectoria. Esto se logra mediante el posicionamiento alterno de placas y alambres que generan un diferencial de potencial de corriente directa de entre 30 a 75kV, provocando un campo iónico que permite que las partículas se les añadan los iones que conferirán una carga negativa a la partícula; esto provocará que sean atraídas a las placas con carga positiva mientras el aire limpio sigue su curso. Las placas con partículas son agitadas en diferentes intervalos para desechar la partícula en tolvas inferiores.<sup>27</sup>

Son equipos costosos ya que para procesar un gran caudal y preservar su eficiencia; se requiere de construcciones enormes con caudales de 100 hasta 4,000,000 de  $\text{ft}^3/\text{min}$ . Una de las desventajas de estos equipos es que al no ser eficientemente controladas las cargas electrostáticas y el electrodo, pueden generar ozono. Asimismo, es importante controlar el efecto electrostático en la partícula, ya que si es muy bajo; la partícula no será atraída por las placas recolectoras y si es muy alto; generará un efecto aislante que reducirá la eficiencia de recolección. Los precipitadores electrostáticos pueden encontrarse en industrias como: energía eléctrica, cementeras, acereras, papeleras, etc. Existen varias configuraciones geométricas: placa alambre, tubulares, placa placa, húmedos y dos etapas. Un ejemplo de un precipitador tipo placa placa es el que se muestra en la figura 10:

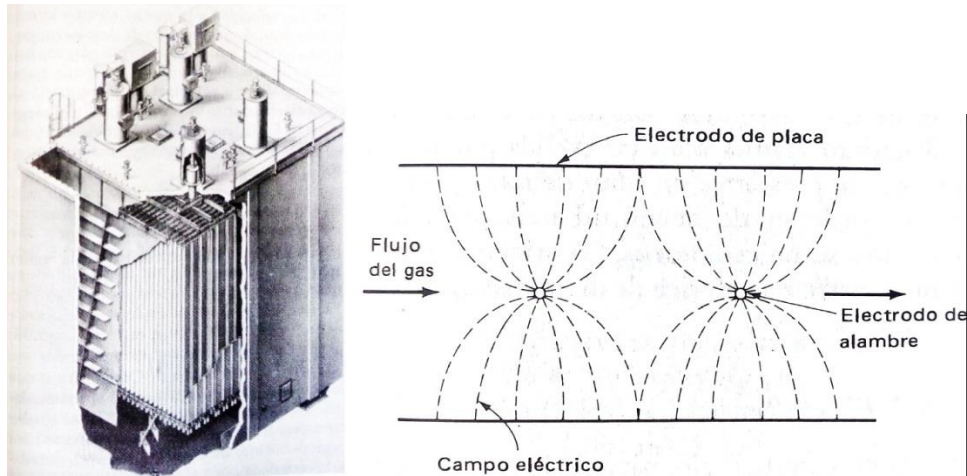


Figura 10: Precipitador electrostático.<sup>23</sup>

### 9.3.5 Cámaras de sedimentación por gravedad

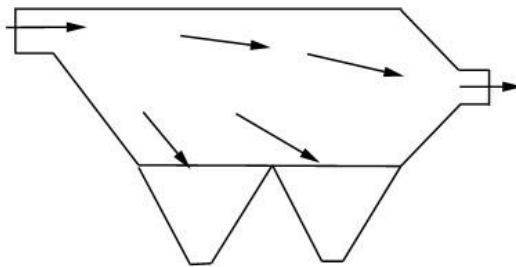


Figura 11: Cámara de sedimentación por gravedad.

Como se muestra en la figura 11, este equipo hace uso de la fuerza gravitacional para efectuar la separación de partículas. Al ser controlado el caudal del fluido a través de una cámara, las partículas de mayor densidad se separarán del flujo cayendo en tolvas en un efecto de sedimentación, esto se logra; ya que las partículas antes de entrar en el sedimentador tienen una misma velocidad que el fluido, pero al entrar en el cuerpo del sedimentador, la velocidad del fluido se reduce provocando que caigan las partículas de mayor peso. Al alcanzar su velocidad terminal (no se pueden acelerar más en el fluido contenido) tienden a caer lentamente hacia las tolvas recolectoras, mientras que el fluido sigue su curso regular hacia la boca de salida sin las partículas que se sedimentan. Siendo su aplicación común para partículas mayores a  $50\mu\text{m}$ . Para partículas pequeñas o de menor densidad, se requerirán unidades muy grandes para que se sostenga el efecto. Para que la cámara impida la reintroducción de las partículas asentadas, es necesario que el flujo del aire sea constante con una velocidad menor a  $300\text{cm/s}$ , siendo la velocidad preferente de trabajo de  $30\text{cm/s}$ . Teóricamente con una buena construcción geométrica, se pueden eliminar las partículas en un alto porcentaje de eficacia, siendo que para partículas mayores a  $300\mu\text{m}$ , se puede alcanzar una eficiencia de recolección de más del  $95\%$ <sup>28</sup>, la ventaja de estos equipos es su baja

inversión y sus bajos costos de mantenimiento, siendo las desventajas de que se requieran de grandes espacios para que se pueda originar la separación y que no puedan manejar materiales pegajosos.<sup>29</sup>

El método de separación por gravedad también se utiliza en procesos químicos, mediante el cual se puede aumentar la eficiencia usando métodos como la floculación, coagulación y la succión. Ejemplos del uso de la separación por gravedad se encuentran en la industria como la agricultura, en donde se utilizan mesas de gravedad para la remoción de impurezas de los alimentos, como: avena, cebada, guisantes, habas, cacao, linaza, otros. También se utiliza en la industria del reciclaje de diversos rubros: para la separación de metales y plásticos, hule del plástico, diferentes grados de plásticos, etc.<sup>30</sup> También se utiliza en el control del clinker en los hornos rotatorios para la producción de cemento.<sup>22</sup> Existen además diferentes patentes (o en trámite de patente) de la cámara de sedimentación con diferentes aplicaciones, como se muestra en la siguiente tabla:

Patente	Inventor	Fecha	Nombre
CN207871724	Kang Mintang	2018-09-18	Gravity settling chamber of fertilizer dust <i>Cámara de separación por gravedad de polvo fertilizante</i>
CN105311881 (A)	Wang Huihong	2016-02-10	High-efficient settling chamber for dust removal
			Cámara de sedimentación de alta eficiencia para la eliminación de polvo
CN204170521	Tiguo; Cai Yawei	2015-02-25	Settling chamber for nano calcium carbonate production line <i>Cámara de sedimentación para la línea de producción de nano carbonato de calcio</i>
RU2005128686	Bachurin Ivan Vasilievich (RU); Sobolev Alexey Alexandrovich (RU); Sobolev Veniamin Alekseevich (RU); Suslova	2007-03-20	Dust settling chamber.- Técnica de eliminación de polvo utilizada en sistemas de aspiración de eliminación de polvo.  <i>Cámara de sedimentación de polvo</i>
TW302762	Chen Pei-Yuan	1997-04-11	A dust-settling chamber for grains <i>Cámara de sedimentación para granos</i>
US 4950313	Dullien; Francis A. L. (Kitchener, CA), Spink; Donald R. (Waterloo, CA), Mortimer; Wendy (Toronto, CA)	1990-08-21	Fine dust removal device  <i>Dispositivo de eliminación de polvos finos</i>
US 4,717,404	Fore; Earl (South Plainfield, NJ)	1988-01-05	Dust separator <i>Separador de polvo</i>

Tabla 02: Ejemplos de patentes de cámaras de sedimentación.<sup>31, 32</sup>

Otro ejemplo utilizado de la separación por gravedad, se encuentra en la producción del almidón de yuca en Colombia, en donde; se investigaron los cambios en concentración y la distribución del tamaño de partícula. Y se aplicó un cambio en el flujo de 0.82 a 1.44L/s en un predominio de flujo laminar para evaluar el proceso y la capacidad del mismo.<sup>33</sup>

Para aumentar la eficiencia en el separado; cuando se tienen partículas de baja densidad o de naturaleza fibrosa, es recomendable el uso de una malla separadora que permita la separación por choque, como se muestra en la figura 12, entre más complejo sea el dispositivo (mayores cambios de dirección del fluido) mayor será la caída de presión a lo largo del dispositivo.

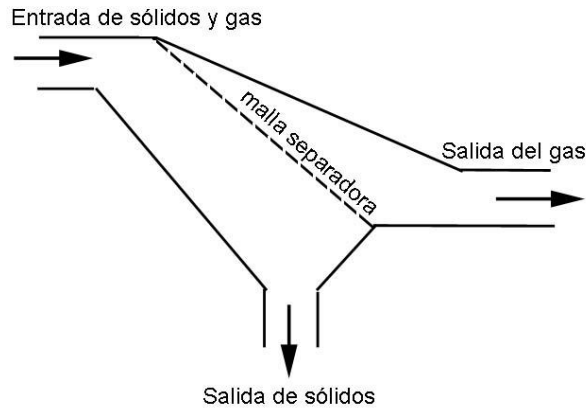


Figura 12: Cámara de sedimentación por gravedad con malla separadora.<sup>28</sup>

Existen otros conceptos asociados a la sedimentación por gravedad que son la clarificación y el engrosamiento. La clarificación es el nombre que recibe el método similar que pretende separar un fluido de las partículas de un sólo sólido y el engrosamiento es un método similar a la clarificación pero en sentido inverso.

En la tabla 3, se presenta un resumen de los mecanismos de control de partículas con sus particulares características:

Tipo de colector	Por tipo de partículas			De acuerdo a la temperatura				Preferencias del usuario			
	Mayores a 10 micra	1 - 10 micras	Sub-partículas	Arriba de 400°C	250-400°C	Arriba de la temperatura de rociado hasta 250°C	A la temperatura de rociado	Producto seco	Baja inversión	Bajos costos operativos	Mantenimiento sencillo
Ciclones	A	C	D	A	A	A	C	A	A	A	A
Húmedos de baja energía	A	C	D	C	A	A	A	D	A	A	A
Húmedos de alta energía	A	A	C	C	A	A	A	D	C	B	C
Precipitadores electrostáticos secos	A	A	A	C	A	A	C	A	B	A	C
Precipitadores electrostáticos húmedos	A	A	A	D	C	C	A	D	B	A	C
Filtros de tela	A	A	A	D	C	A	C	A	C	C	C

- A Generalmente satisfactorios
- B Buscar alternativas más económicas
- C Se requiere de especial atención en la operación
- D Posibles severas dificultades en la operación, pensar en otra alternativa

Tabla 03: Principales factores para seleccionar el tipo de colector.<sup>28</sup>

## 10. Desarrollo

### 10.1 Metodología utilizada

En el presente trabajo para alcanzar los objetivos y su análisis de hipótesis, hará uso de los siguientes pasos:



1. Diseño conceptual
2. Desarrollo de cálculos teóricos
3. Desarrollo de modelo computarizado
4. Desarrollo de prototipo
5. Prueba y obtención de resultados
6. Análisis de datos

1. Diseño conceptual.- Se pretenderá establecer la definición del proceso que permita la consecución de objetivos y comprobación de la hipótesis, analizando las alternativas posibles y sopesando a las mismas para el desarrollo del trabajo.

2. Desarrollo de cálculos teóricos.- En este punto, se revisarán el conjunto de fórmulas establecidas en la literatura que permitirá establecer todas las especificaciones requeridas para el diseño, mencionadas en la tabla 4:

Número	Especificación	Tolerancia	Unidad
1	Velocidad de entrada	$\pm 0.01$	m/s
2	Tiempo de recorrido	$\pm 0.01$	s
3	Masa de salida	$\pm 0.0005$	kg
4	Dimensiones de la cámara de sedimentación	$\pm 0.01$	m
5	Material del prototipo	Por definir	NA
6	Torque admisible	Por definir	N-m
7	Peso admisible	Por definir	N

Tabla 04: Especificaciones.

Por tal, se utilizará el sistema métrico internacional para el manejo de unidades; haciéndose alusión al sistema inglés en sus medidas comerciales para el manejo de materiales del prototipo.

3. Desarrollo de simulación o modelo computarizado.- Se pretende obtener y definir el conjunto de medidas que complementen a las especificaciones del segundo punto utilizando una herramienta de CAD.

4. Desarrollo de prototipo.- Con el modelo computarizado se efectuará un prototipo alpha, es decir; un prototipo a escala natural que permita comprobar y ajustar el modelo computarizado y en caso de que se requiera, se efectuarán las modificaciones pertinentes regresando al primer punto.

5. Prueba y obtención de resultados.- Se corroborarán todos los resultados y especificaciones teóricas obtenidas en el segundo punto, además; se efectuará un análisis de las problemáticas soslayadas en los cálculos teóricos. En caso de ser necesario y en caso de encontrarse algún error o problema, se tendrá que rediseñar, modificando los cálculos y analizar los preceptos del primer punto, siendo necesario repetir todos los puntos previos.

Se recopilarán los datos y se efectuarán todas las pruebas necesarias para comprobar la hipótesis.

6. Análisis de datos.- Se ordenarán los datos y se efectuará un análisis de las variables para comprender las mejoras aplicables al prototipo y determinar si se alcanzó el objetivo planteado.

Un esquema de la metodología a utilizar se presenta en la figura 13:

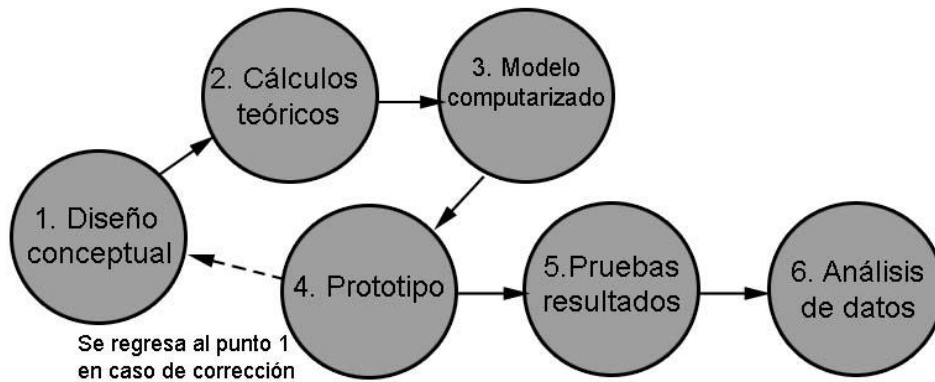


Figura 13: Metodología utilizada.

## 10.2 Diseño teórico

La velocidad  $V$  debe ser uniforme y relativamente baja, siendo<sup>23</sup>:

$$V = \begin{cases} \text{Max:} & 3.048 \frac{m}{s} \\ \text{de preferencia:} & 0.3048 \frac{m}{s} \end{cases}$$

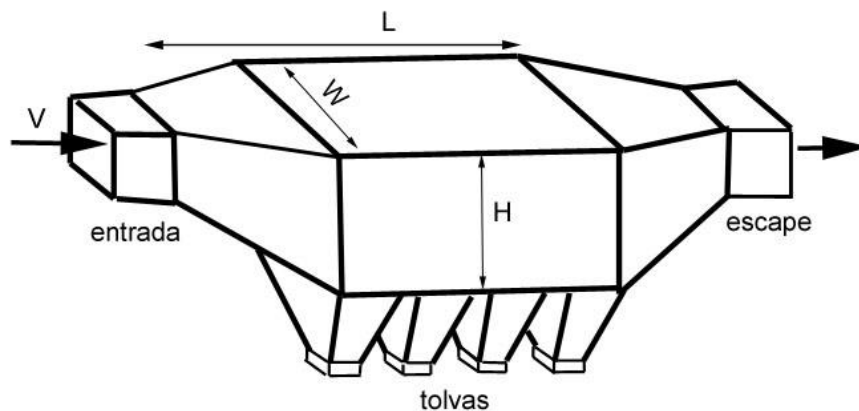


Figura 14: Cámara de sedimentación por gravedad.

En el desarrollo teórico de la cámara de separación por gravedad; como se muestra en la figura 14, la velocidad de entrada se encuentra dentro de un rango, se piensa que es conveniente dar inicio al diseño considerando la velocidad de preferencia  $V$  de 0.3048m/s.

Para que la eficiencia de separación sea en un alto porcentaje, el tiempo que recorre la partícula en entrar y salir por la boca de escape, debe de ser el mismo en que la partícula caiga una altura  $H$ , saliendo del flujo de aire y entrando en las tolvas colocadas en la parte inferior.

Por lo que, la corriente de aire debe recorrer una distancia  $L$  en igual o menor tiempo, expresándose en la siguiente relación:

$$t = \frac{H}{V_t} \quad \text{Ec. 1}$$

$$t = \frac{L}{V} \quad \text{Ec. 2}$$

Siendo:  $t$  el tiempo de recorrido de una partícula para que caiga a una altura  $H$  o que efectúe el recorrido por una distancia  $L$ ,  $V_t$  velocidad de sedimentación que obtiene una partícula al recorrer una distancia  $H$ ,  $V$  es la velocidad de entrada de la partícula.

Resolviendo la ecuación 1 para  $V_t$

$$V_t = \frac{H}{t} \quad \text{Ec. 3}$$

Sustituyendo el tiempo  $t$  de la ecuación 2 en la ecuación 3:

$$V_t = \frac{HV}{L} \quad \text{Ec. 4}$$

La distribución de las partículas se da a lo ancho  $W_c$  del sedimentador, por lo que se multiplica el término en el numerador y el denominador, quedando el término  $VHW_c = Q$ :

$$V_t = \frac{Q}{LW_c} \quad \text{Ec. 5}$$

Siendo  $Q$  el caudal y para determinar la eficiencia  $\eta_d$ , se divide la ecuación 2 sobre la ecuación 1, dando:

$$\eta_d = \frac{V_t L}{HV} (100\%) \quad \text{Ec. 6}$$

Siendo:  $\eta_d$  la eficiencia expresado en por ciento.

Resolviendo la ecuación 6 para  $L$ :

$$L = \frac{\eta_d HV}{V_t(100)} \quad \text{Ec. 7}$$

En este punto del diseño, se visualizó que había diferentes elementos conformados en la entrada del sedimentador: el grano, el textil con partículas grandes y el textil con partículas pequeñas (polvo), ver Anexo 3, por lo que se determinó que la entrada no es homogénea, esto; provocaría que se tenga que analizar diferentes velocidades terminales dando como consecuencia diferentes longitudes de asentamiento de las partículas. Por tal, se tuvo que empezar a hacer un análisis del régimen del fluido basado en el tipo tamaño de la partícula, por lo que se tiene que analizar el número de Reynolds de los elementos entrantes.

Para determinar la velocidad terminal  $V_t$  del grano, primero debemos determinar el flujo laminar de la corriente para saber si se rige por la ley de Stokes, por lo que se obtiene el número de Reynolds  $Re$ :

$$Re = \frac{\rho V_e d_p}{\mu_d} \quad \text{Ec. 8}$$

Siendo:  $\rho$  es la densidad del fluido,  $V_e$  es la velocidad de entrada de la partícula,  $d_p$  es la longitud característica como el diámetro de la partícula a separar y  $\mu_d$  es la viscosidad dinámica del fluido.

En este punto se encontró la dificultad de que la velocidad terminal buscada para el polvo era fácil de ser determinada bajo el régimen de Stokes, pero para mayores partículas como el textil o el mismo grano, era complejo por la falta de modelos y de la necesidad de agregarse el coeficiente de arrastre. Para encontrar una respuesta, se debe de analizar que el grano y el textil no se encuentran muy lejos del régimen laminar, por lo que se pudieron encontrar dos formas para determinar la velocidad terminal para las partículas de diferentes tamaños y una para el grano. Una es el uso directo del peso específico como se verá en el siguiente párrafo y otra envuelve el uso de tablas o el cálculo del coeficiente de arrastre hasta un determinado tamaño del número de Reynolds en regímenes de transición. Resta determinar el comportamiento del grano, que se verá posteriormente.

Para describir la velocidad de sedimentación de las partículas con un número de Reynolds mayor a 1 y que no saldrán por la boca de escape, se hace uso de la velocidad terminal de una esfera que comprende la fuerza de arrastre y de flotación de gravedad; que nos indica la velocidad máxima que alcanza un cuerpo estando en un fluido con propiedades constantes. (Es importante destacar, que en este punto, son consideradas las partículas como esferas, en cambio; y como se verá posteriormente, las partículas mayores, los granos, por su simetría encontrada y para determinar el coeficiente de arrastre, se consideran discos). Comprendiéndose para el régimen de Stokes<sup>34</sup>:

$$V_t = \frac{d_p^2}{18\mu_d} (\gamma_s - \gamma) \quad \text{Ec. 9}$$

Siendo:  $V_t$  la velocidad terminal o de asentamiento,  $d_p$  el diámetro de la partícula,  $\mu_d$  viscosidad dinámica del fluido,  $\gamma_s$  peso específico de la esfera,  $\gamma$  peso específico del fluido.

Siendo, el peso específico<sup>35</sup>:

$$\gamma = \rho g \quad \text{Ec. 10}$$

Para partículas menores a  $100\mu\text{m}$  se puede utilizar la ecuación 9 aunque salgan las partículas fuera del régimen laminar, pero para mayores tamaños con números de Reynolds desde 1 hasta 500 se puede utilizar la gráfica del anexo 7 y 8 o las siguientes ecuaciones, para determinar el coeficiente de arrastre  $C_D$ <sup>23</sup> y  $V_t$ :

$$C_D = 0.22 + \frac{24}{Re} [1 + 0.15(Re)^{0.6}] \quad \text{Ec. 11}$$

Cabe destacar, que para la facilidad de los cálculos se consideran a las partículas comprendidas entre 80µm y 185µm como discos, siendo que tienen formas irregulares. Por tal, y para una mayor precisión se requeriría construir experimentalmente una gráficas  $C_D$  VS  $Re$ .

Quedando la velocidad de terminal  $V_t$ :

$$V_t = \sqrt{\frac{4gd_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_D}} \quad \text{Ec. 12}$$

Siendo:  $g$  la gravedad,  $d_p$  el diámetro de la partícula,  $\rho_p$  la densidad de la partícula,  $\rho_g$  la densidad del fluido (atmosférica),  $C_D$  coeficiente de arrastre.

Para los granos el número de Reynolds es mayor, siendo:

$$\rho_{\text{aire } 20^\circ\text{C}} = 1.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu_{\text{aire } 20^\circ\text{C}} = 1.8 \times 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$$

$$d_p \text{ promedio grano} = 1.1 \text{cm} \text{ (Ver anexo 1)}$$

$$V_{\text{preferencia}} = 0.3048 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re_{\text{granos}} = \frac{\left(1.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(0.3048 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \left(1.1 \text{cm} \frac{0.01 \text{m}}{1 \text{cm}}\right)}{\left(1.8 \times 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}\right)}$$

$$Re = 225.38$$

Y el coeficiente de arrastre de la ecuación 11, es:

$$C_D = 0.22 + \frac{24}{225.38} [1 + 0.15(225.38)^{0.6}]$$

$$C_D = 0.74$$

Se puede apreciar en la siguiente figura que con un coeficiente de arrastre de 0.74 y un número de Reynolds de 225.38, el grano se encuentra en un régimen de transición:

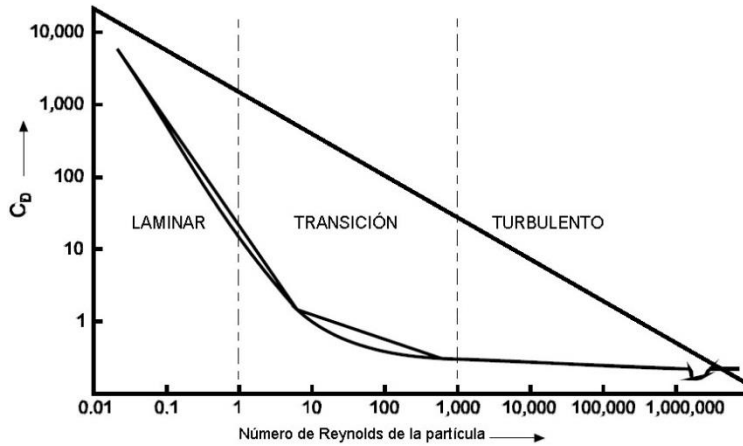


Figura 15: Regímenes de acuerdo al coeficiente de arrastre contra el número de Reynolds.<sup>37</sup>

En este punto, se tuvo que comprender la necesidad del cálculo de la velocidad terminal y se comprendió que los granos, a diferencia del textil y del polvo, su caída no se vería afectada por la pequeña altura de la cámara, por lo que; se entendió que el grano seguiría el incremento en su aceleración. Con esto; se pudo entender que el análisis de los granos podría ser simplificado como se expresará a continuación:

Para que el flujo de corriente se encuentre dentro del régimen de Stokes o del flujo laminar, el número de Reynolds debe ser comprendido entre  $10^{-4}$  y  $1$ .<sup>23</sup> Entonces, para analizar los movimientos de transición del grano, se puede analizar el movimiento de la partícula como un movimiento curvilíneo bidimensional, como se muestra en la siguiente figura:

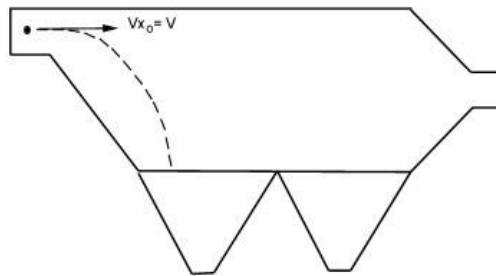


Figura 16: Proyección horizontal de una partícula.

Para conocer la distancia que recorre el grano, se determina primero el tiempo necesario para efectuar la trayectoria<sup>38</sup>, usando la ecuación del movimiento de proyectil<sup>39</sup>:

$$y_f = y_o + Vi_y t + \frac{1}{2} a_p t^2 \tag{Ec. 13}$$

Al no tener velocidad inicial  $Vi_y$  en la componente vertical y la posición inicial  $y_o$  es cero, junto con la aceleración de la partícula,  $a_p$ , igual a la gravedad negativa (va cayendo), resolviendo para el tiempo  $t$  e igualando la posición final  $y_f$  con la altura de la cámara  $H$ :

$$t = \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad \text{Ec. 14}$$

La distancia que recorre horizontalmente, se obtiene:

$$V_x = \frac{d_x}{t} \quad \text{Ec. 15}$$

Resolviendo para la distancia  $d_x$  y siendo  $d_x = L$ , y  $V_x = V$ , de acuerdo a las mismas siglas utilizadas para partículas de menor tamaño:

$$L = Vt \quad \text{Ec. 16}$$

### 10.3 Diseño de Prototipo

Para la estructura, se trabajará con lámina calibre 28 de acero galvanizado, cuyas características son:

$$t_e = 0.474\text{mm}^{40}$$

$$\rho_m = 7850\text{kg/m}^3^{41}$$

Acorde al anexo 3, la zonas de separación se generarán a partir de las partículas de diámetro de  $80\mu\text{m}$ , buscando con esto; que todas aquellas partículas menores a  $80\mu\text{m}$  salgan por la boca de escape, mientras que aquellas mayores de  $80\mu\text{m}$  caerán en las tolvas, en donde; con un proceso de cribado se separará fácilmente el grano del textil. Por lo que; para el diseño se generan dos zonas de trabajo expresadas en la figura 17:

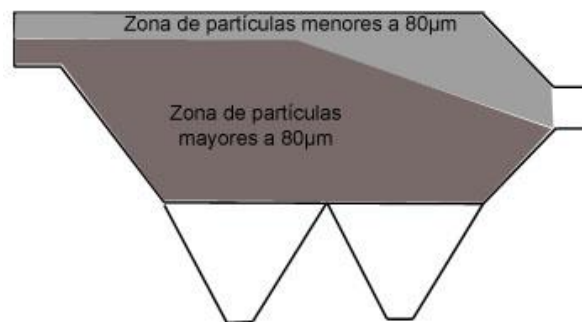


Figura 17: Zonas de partículas de la cámara de sedimentación por gravedad.

Para partículas mayores a  $50\mu\text{m}$  no es válida la ley de Stokes<sup>23</sup>,  $V_t = \frac{gd_p^2\rho}{18\mu_d}$  (siendo,  $g$  es Ec. 17

la gravedad,  $d_p$  es el diámetro de la partícula,  $\rho_p$  es la densidad del fluido (atmósfera),  $\mu_d$  es la viscosidad dinámica del fluido), por lo que se debe de obtener la velocidad de sedimentación  $V_t$  de la curva en el Anexo 7 con la densidad del nailon 6,6 (ver anexo 4 y 5) de  $1.15\text{g/cm}^3$ <sup>42</sup>, obteniéndose:

$$V_t = 0.18 \frac{m}{s}$$

Considerando un nivel de confianza planteada en la hipótesis del 95%, una velocidad de preferencia de 0.3048m/s y una altura de lámina galvanizada de tamaño comercial de 90cm para la altura en la ecuación 7, se obtiene:

$$L = \frac{(95)(0.9m) \left(0.3048 \frac{m}{s}\right)}{\left(0.18 \frac{m}{s}\right) (100)}$$

$$L = 1.45m$$

Acorde al anexo 9, el arrastre generado por la velocidad de entrada no es suficiente para mover grandes cantidades de grano, por lo que; se elaborará una entrada de rampa para que el grano por su propio peso llegue a la boca de entrada sin la interferencia de la velocidad inicial, asimismo; se escalonará la rampa para que al momento de hacer caer y pegar en la rampa el grano, se separen las partículas textiles del grano y el polvo y sean arrastradas por la velocidad del fluido.

En este punto, se tuvo la complicación por la baja velocidad de entrada del fluido y se pudo percatar de una relación lineal con respecto a lo largo de la cámara, siendo que si se consideraba al grano como parte del fluido, era necesario incrementar su velocidad de entrada a casi la máxima permisible, entonces se requeriría construir un prototipo de más de 11 metros. Además, con la máxima velocidad permisible de 3.048m/s la cantidad de granos posibles a mover era demasiado baja. Por lo que, se pensó conveniente, sacar de los cálculos al grano, pero quedaba la cuestión de la entrada del mismo. Entonces, se pudo plantear la cuestión de la rampa que permite la entrada del grano a una velocidad mayor, sin la dependencia del fluido.

Por lo que para determinar la velocidad de entrada del grano, se utiliza el siguiente diagrama:

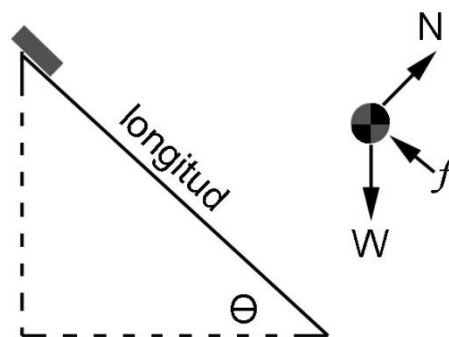


Figura 18: Diagrama de cuerpo libre del grano derivado de llanta en la rampa de entrada.

Siendo,  $W$  es el peso del grano,  $f$  es la fricción del grano contra el acero galvanizado,  $\theta$  es el ángulo de inclinación y  $N$  es la normal.

Siendo las fórmulas de energía de conservación de energía mecánica<sup>39</sup>:



$$Ec = \frac{1}{2}mV_c^2 \quad \text{Ec. 18}$$

Siendo  $Ec$  es la energía cinética,  $m$  la masa y  $V_c$  la velocidad.

$$Ep = mgh_r \quad \text{Ec. 19}$$

Siendo  $Ep$  es la energía cinética,  $m$  la masa  $g$  la gravedad y  $h_r$  la altura.

$$W_f = l_r f \quad \text{Ec. 20}$$

Siendo,  $W_f$  es el trabajo realizado por la fricción,  $l_r$  la longitud de la rampa y  $f$  es la fricción del grano contra el acero galvanizado.

Igualando las ecuaciones de energía:

$$Ep - W_f = Ec \quad \text{Ec. 21}$$

Utilizando  $W_f = mgl\cos\theta$  y considerando que la  $f = \mu_s N$  para resolver la velocidad de la ecuación 18:

$$V_c = \sqrt{2g(h_r - \mu_s l_r \cos\theta)} \quad \text{Ec. 22}$$

Para el desarrollo, se utiliza  $l_r = 12\text{cm}$ , quedando por Pitágoras:  $h_r = 12\text{sen}(55^\circ)$ , que resulta  $9.83\text{cm}$ . Sabiendo que  $\mu = 0.83$  (anexo 1) se utiliza  $\theta = 55^\circ$ , porque como se indica en el anexo 1 el ángulo de fricción está dado por  $\tan^{-1}(0.83) = 39.7^\circ$ , así; se asegura que el grano se deslice por la rampa, permitiéndose resolver la ecuación 22:

$$V_c = \sqrt{2 \left(9.78 \frac{m}{s^2}\right) (0.0983m - (0.83)(0.12m)\cos 55^\circ)}$$

$$V_c = 0.9 \frac{m}{s}$$

La velocidad en el plano inclinado se descompone en su componente horizontal  $V_{horizontal} = 0.9\cos 55^\circ$  que resulta  $0.52\text{m/s}$ . En el último tramo, se piensa poner una curvatura que permita obtener sólo la componente horizontal de la velocidad del plano de la rampa, acorde a la siguiente figura:

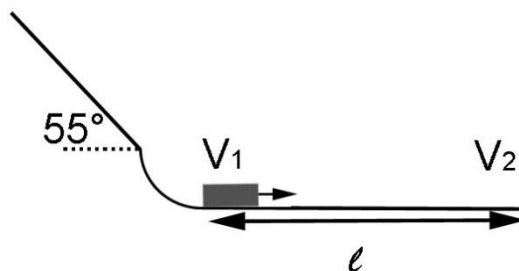


Figura 19: Diagrama de cuerpo de grano derivado de llanta en rampa y curva.

Se piensa que agregando esta entrada  $l$ , el grano entrará casi a la misma velocidad que el fluido, por lo que no se afectarán los cálculos del textil y del polvo por la entrada del grano.

Quedando la ecuación de energía para este tramo:

$$Ec_1 - W_f = Ec_2 \quad \text{Ec. 23}$$

$$\frac{1}{2}mV_1^2 - lf = \frac{1}{2}mV_2^2 \quad \text{Ec. 24}$$

Siendo  $f = mg\mu_s$  y resolviendo para la longitud  $l$ :

$$l = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g\mu_s} \quad \text{Ec. 25}$$

Con  $V_1 = 0.52\text{m/s}$  que es la componente horizontal de la velocidad de inclinación y  $V_2 = 0.3048\text{m/s}$ , que es la velocidad de entrada deseada:

$$l = \frac{\left(0.52 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(0.3048 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(9.78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.83)}$$

$$l = 0.011\text{m}$$

Para los granos, el tiempo de caída se obtiene con la ecuación 14:

$$t = \sqrt{\frac{2(0.9\text{m})}{\left(9.78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}}$$

$$t = 0.429\text{s}$$

Dando el desplazamiento horizontal, con la ecuación 16:

$$L = 0.3048 \frac{\text{m}}{\text{s}} (0.429\text{s})$$

$$L = 0.131\text{m}$$

Para determinar el posicionamiento de las tolvas, una dirigida a los granos y la otra al resto de partículas mayores a  $80\mu\text{m}$ , se conocerá la velocidad terminal de las partículas de  $80\mu\text{m}$  y de  $185\mu\text{m}$  que es el tamaño más grande registrado en el muestreo del anexo 3, usando la ecuación 9:

Siendo:

$$\mu_{d \text{ aire } 20^\circ\text{C}} = 1.8 \times 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$$

$$\gamma_{s \text{ nailon}} = 11247 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \text{ (Ver anexo 4)}$$

$$\gamma_{aire} = 11.61 \frac{N}{m^3}$$

$$V_{80\mu m} = \frac{(80 \times 10^{-6} m)^2}{18 \left(1.8 \times 10^{-5} \frac{Ns}{m^2}\right)} \left(11247 \frac{N}{m^3} - 11.61 \frac{N}{m^3}\right)$$

$$V_{80\mu m} = 0.2219 \frac{m}{s}$$

Para las partículas de 185 $\mu$ m se requiere calcular el número de Reynolds con la ecuación 8, estableciendo su longitud característica de 185 micrómetros:

$$Re = \frac{\left(1.21 \frac{kg}{m^3}\right) \left(0.3048 \frac{m}{s}\right) (185 \times 10^{-6} m)}{\left(1.8 \times 10^{-5} \frac{Ns}{m^2}\right)}$$

$$Re = 3.8$$

Por lo que se tiene que calcular el coeficiente de arrastre con la ecuación 11:

$$C_D = 0.22 + \frac{24}{3.8} [1 + 0.15(3.8)^{0.6}]$$

$$C_D = 8.65$$

Que se comprueba con la gráfica del anexo 8, usando la ecuación 12 se obtiene la velocidad de asentamiento:

$$V_t = \sqrt{\frac{4 \left(9.78 \frac{m}{s^2}\right) (185 \times 10^{-6} m) \left(1150 \frac{kg}{m^3} - 1.21 \frac{kg}{m^3}\right)}{3 \left(1.21 \frac{kg}{m^3}\right) (8.65)}}$$

$$V_{t185\mu m} = 0.515 \frac{m}{s}$$

La altura en que se alcanzará la velocidad terminal, está dada por la ecuación de tiro parabólico:

$$V_f^2 - V_{i_y}^2 = 2gH \quad \text{Ec. 26}$$

Resolviendo para  $H$  y considerando a  $V_f$  igual que  $V_t$  y  $V_{i_y}$  igual a  $V$ :

$$H = \frac{V_t^2 - V^2}{2g} \quad \text{Ec. 27}$$

Dando de resultado que:  $H_{80\mu m} = 0.223$ cm,  $H_{185\mu m} = 0.88$ cm

Dado que a través de los 90cm de la altura de la estructura de la cámara de sedimentación, se alcanza a los 0.88cm una velocidad constante para las partículas de 185µm, por lo que se puede igualar los tiempos con respecto a la altura  $H$  y la longitud recorrida  $L$ , de acuerdo a la ecuación 15 y resolviendo para  $L$ , que es la ecuación 4:

$$L_{80\mu m} = \frac{(0.9m) \left(0.3048 \frac{m}{s}\right)}{\left(0.2219 \frac{m}{s}\right)}$$

$$L_{80\mu m} = 1.24m$$

$$L_{185\mu m} = \frac{(0.9m) \left(0.3048 \frac{m}{s}\right)}{\left(0.515 \frac{m}{s}\right)}$$

$$L_{185\mu m} = 0.5327m$$

De la figura 17 se genera una zona para las partículas comprendidas entre 80µm y 185µm, como se aprecia en la figura 20:

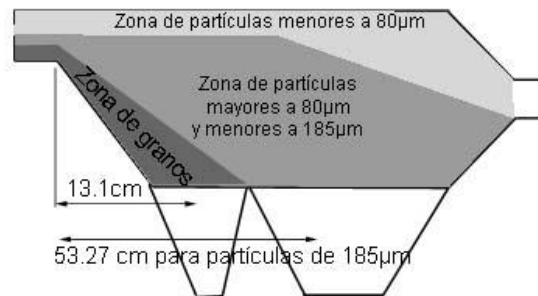


Figura 20: Zonas de partículas de la cámara de sedimentación por gravedad y de granos.

Para la elaboración de los cálculos de estática, se considera el ancho del sedimentador  $W$  de 0.45 metros que es la mitad de uno de los tamaños comerciales de la lámina de acero galvanizado de calibre 28. El diseño del cuerpo principal de la cámara se aprecia en la figura 21:

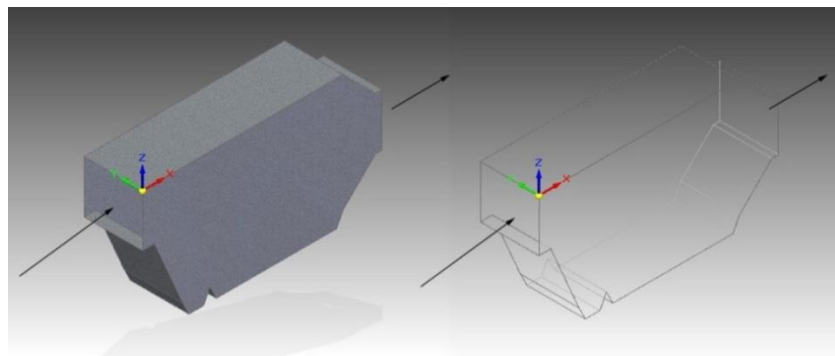


Figura 21: Diseño de prototipo elaborado en Solid Edge ST7.

#### 10.4 Diseño de estructura que soporta al cuerpo del sedimentador.

Acorde al anexo 10 se obtiene que el área de lámina de acero galvanizada a utilizar es aproximadamente de  $4.83\text{m}^2$ , multiplicada por el espesor medio de  $0.474\text{mm}$ , nos da un volumen de  $2.29 \times 10^{-3}\text{m}^3$ , que al multiplicarse por la densidad de  $7800\text{kg/m}^3$ , se obtiene una masa del acero galvanizado de  $17.85\text{kg}$ , multiplicado por la gravedad  $9.78\text{m/s}^2$ , se obtiene una fuerza aproximada de  $175\text{N}$  dividido entre dos por el número de soportes; igual a  $87.5\text{N}$ , considerando un análisis para la viga principal de  $1.23$  metros; que es el punto en donde se intersectan las tolvas con el cuerpo principal de la cámara, como se desarrolla en la figura 22 y figura 23 el análisis sobre la viga:

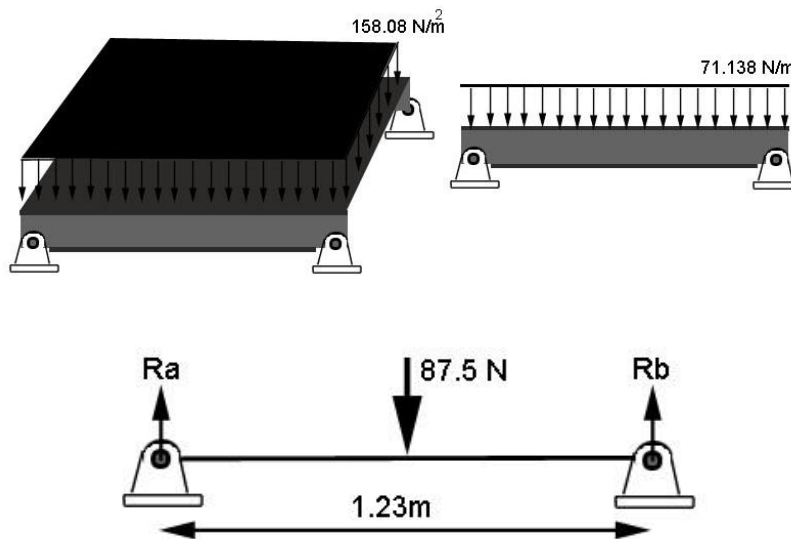


Figura 22: Carga de estructura sobre el soporte principal.

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_a + R_b = 87.5\text{N}$$

$$\sum M_a = 0$$

$$87.5\text{N} \left( \frac{1.23\text{m}}{2} \right) - R_b(1.23\text{m}) = 0$$

$$R_b = R_a = 43.75\text{N}$$

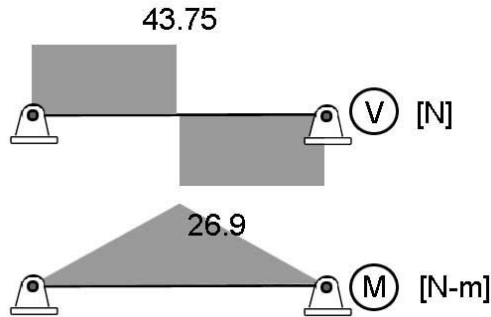


Figura 23: Diagramas V y M en una solera de 1"x1/4".

Cuyo diseño de la viga se analiza comparando el módulo de sección:

$$S_{req} = \frac{M_{max}}{\sigma_{perm}} \quad \text{Ec. 28}$$

Siendo:  $S_{req}$  el módulo de sección requerido,  $M_{max}$  es el momento máximo y  $\sigma_{perm}$  es el esfuerzo normal permisible, que es el esfuerzo de cedencia entre el factor de seguridad, que para un acero estructural A-36, el esfuerzo de cedencia es de 250MPa<sup>44</sup> con un factor de seguridad de 2.5:

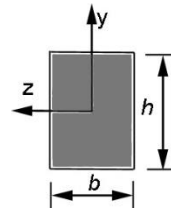
$$S_{req} = \frac{26.9Nm}{250MPa/2.5}$$

$$S_{req} = 2.69 \times 10^{-7} m^3$$

Se desarrolla el soporte en una solera de 1"x 1/4", por lo que el módulo de sección se obtiene<sup>45</sup>:

$$S = \frac{bh^2}{6}$$

$$S = \frac{(6.35 \times 10^{-3} m)(0.0254 m)^2}{6}$$



$$S = 6.83 \times 10^{-7} m^3$$

Ec. 29

Se considera el uso de una solera de 1"x1/4" por su bajo costo.

Considerando el peso de la propia solera, que de acuerdo a su densidad de 7850kg/m<sup>3</sup>, se obtiene su peso:

$$W_{solera} = \rho_{sol} g V_{sol} \quad \text{Ec. 30}$$

Siendo:  $W_{solera}$  es el peso de la solera,  $\rho_{sol}$  es la densidad del acero,  $g$  es la gravedad y  $V_{sol}$  es el volumen:

$$W_{solera} = 7850 \frac{kg}{m^3} \left( \frac{9.78m}{s^2} \right) (0.0254m \times 0.00635m \times 1.23m)$$

$$W_{solera} = 15.23N$$

Agregando los 15.23N a los 87.5N del peso de la estructura de la cámara de sedimentación; dando un total de 102.73N, por lo que el ajuste se expresa en la siguiente figura:

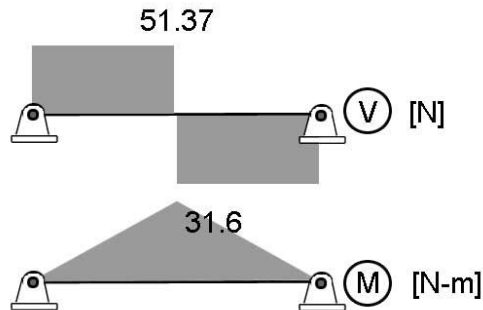


Figura 24: Diagramas V y M en una solera de 1"x1/4" incluyendo el peso del material.

Con la ecuación 28 se calcula el módulo de sección que incluye el peso de la solera.

$$S_{req} = \frac{31.6Nm}{250MPa/2.5}$$

$$S_{req} = 3.16 \times 10^{-7} m^3$$

Siendo  $6.83 \times 10^{-7} m^3 > 3.16 \times 10^{-7} m^3$ , indica que la solera de 1"x1/4" soporta satisfactoriamente la flexión generada. La carga máxima que soportaría, respetando el factor de seguridad de 2.5, es de 222.14N que restando los 102.73N de la estructura; se tiene 119.41N (aproximadamente 12.2kg) para que sea procesado el material en un solo instante. Para el análisis de la cortante; se hace uso de la fórmula del esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{V_{\tau} Q_{\tau}}{I t_{\tau}} \quad \text{Ec. 31}$$

Cuya igualación en un perfil rectangular<sup>44</sup> (el de la solera):

$$\frac{V_{\tau} Q_{\tau}}{I t_{\tau}} = \frac{\frac{V}{2} \left[ \frac{h^2}{4} - y^2 \right] b}{\left( \frac{1}{12} b h^3 \right) b} \quad \text{Ec. 32}$$

Simplificando:

$$\tau = 1.5 \frac{V_{\tau}}{A} \quad \text{Ec. 33}$$

Siendo,  $\tau$  es el esfuerzo cortante,  $V_r$  es la fuerza cortante interna,  $A$  es el área de la sección transversal del perfil rectangular.

$$\tau = 1.5 \frac{51.37N}{(0.0254m \times 0.00635m)}$$

$$\tau = 0.478MPa$$

Que para un acero estructural A-36, el esfuerzo cortante admisible  $\tau$  con un factor de seguridad de 2.5 es de 52.4MPa, y como:

$$52.4MPa > 0.478MPa$$

Por lo que la solera de 1" x 1/4" soportará el esfuerzo cortante. Considerando la carga máxima permisible para la flexión  $V_{f \text{ máxima}}$  de 222.14N, el nuevo esfuerzo cortante con dicha carga sería de 2.07MPa, que se encuentra muy por abajo de lo permisible del material. Por lo que en la viga, primero se afecta por los esfuerzos de flexión que por los esfuerzos cortantes.

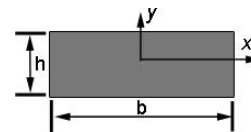
Se piensa tener una altura de 1 metro para el soporte; porque se piensa que para las pruebas y prototipos se pueden poner contenedores en la parte inferior de las tolvas, considerándose que la solera bajo ciertas circunstancias; es un elemento endeble. Por eso, se hace el análisis del pandeo para conocer el alcance permisible de la estructura con una solera de 1" x 1/4".

En el análisis de la carga crítica para evitar el pandeo crítico  $P_{cr}$ , se obtiene<sup>44</sup>:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad \text{Ec. 34}$$

Siendo,  $E$  es el módulo de elasticidad del material,  $I$  es el mínimo momento de inercia de la sección transversal de la columna,  $K$  es el factor de efectividad de longitud,  $L$  es la longitud de la columna. Considerando la solera de acero A-36, con 1 metro de largo y con una  $K = 1$  (extremos sujetos) y considerando el módulo de inercia para el perfil rectangular:

$$I = \frac{1}{12} bh^3$$



Ec. 35

Aplicando la ecuación 35 en la ecuación 34, se resuelve:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 (200 \times 10^9 Pa) \left( \frac{1}{12} (0.0254m)(0.00635m)^3 \right)}{(1(1m))^2}$$

$$P_{cr} = 1070N$$

Ya que se consideran cuatro soportes que dividirán la carga equitativamente, y considerando que  $P_{cr} > V_{f \text{ máxima}}$ , por lo que no se pandeará el soporte de la estructura. Además, se



posicionará paralelamente un soporte a la viga principal, para evitar el desplazamiento y el vaivén; considerando la deflexión de una viga en voladizo  $\delta$  <sup>45</sup> indicado en la figura 25:

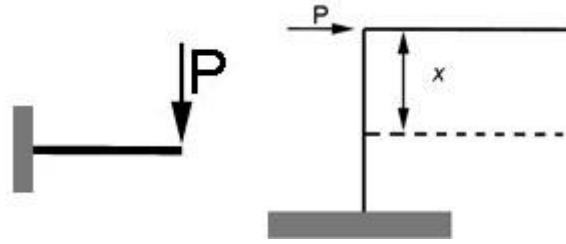


Figura 25: Determinación de  $x$  para reducir la deflexión.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad \text{Ec. 36}$$

Siendo,  $P$  es la carga aplicada,  $L$  es el largo de la viga,  $E$  es el módulo de elasticidad del material e  $I$  es el momento de inercia.

Considerando la carga aplicada de una persona al apoyarse de 250N, para un largo  $L$  de 1 metro menos el valor de  $x$  de 35cm (asignación personal), módulo de elasticidad de un acero A-36 de 200GPa y haciendo uso de la ecuación 35; rotando el perfil de la solera y teniendo de base los 6.35mm (la carga se aplicaría en sentido de la boca de entrada de la cámara):

$$\delta = \frac{(250N)(1m - 0.35m)^3}{3(200 \times 10^9 Pa) \left( \frac{1}{12} (0.00635m)(0.0254)^3 \right)}$$

$$\delta = 0.0132m$$

Nota: Se maneja la distancia de  $x$  de 35cm de soporte en la parte superior para que de esta forma se permita el posicionamiento de un contenedor que capture el material separado.

Siendo aceptable el desplazamiento de 1.32cm cuando se empuja la estructura con 250N lateralmente. Se aúna el diseño del soporte mostrándose en la figura 26:

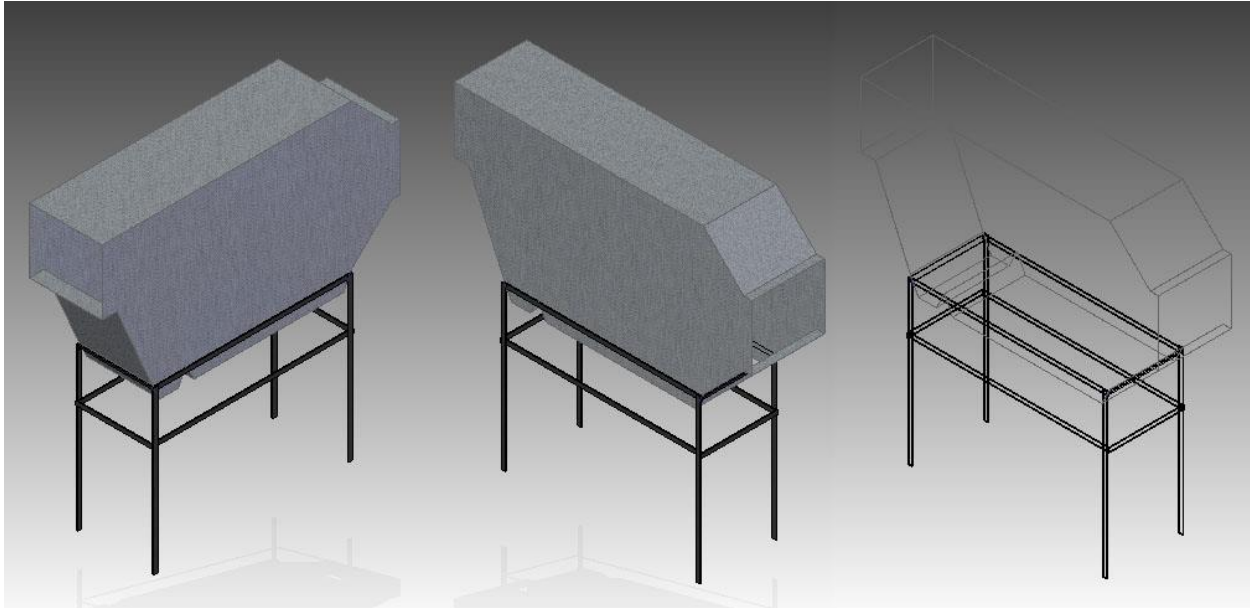


Figura 26: Diseño de estructura, elaborado en Solid Edge ST7.

Como se mencionó previamente, 119.41N (12.2kg) de material pueden ser soportados en la cámara, e igualmente como se calculó previamente, el tiempo de recorrido de un grano de hule a través de la cámara de sedimentación es de 0.429 segundos y de una partícula de 185 $\mu$ m es de 0.515 segundo; por lo que se tendría un límite máximo e ideal de proceso de 85.28 toneladas por hora que sobrepasa la capacidad de trabajo de cualquier molino y en cualquier etapa, primaria, secundaria, granulado o pulverizado, como se indicó en el marco teórico. Este valor es excesivo para el propósito de la presente tesis y del prototipo, por lo que se reducirá la capacidad del proceso a 100 kilogramos por hora (27.78 gramos por segundo) con la posibilidad de aumentar la capacidad, por lo que se requiere de un dosificador que permita el control de la alimentación.

Como la entrada del material: grano, textil y polvo, se efectuaría a través de una rampa, se consideró importante controlar el ingreso del material, ya que; al momento de pasar el grano por la rampa, sino se controla y se introducen grandes cantidades, el textil quedará atrapado con el grano, por lo que caerá con la misma velocidad hacia la primera tolva de salida, no lográndose el objetivo de limpieza. Dado dicho punto; para solventar esta cuestión, se pensó en el desarrollo de un dosificador que permita controlar las cantidades de entrada. Asimismo; un operador al momento de trabajar en la máquina no será necesaria su permanencia para alimentar la máquina, por lo que se reduce también el uso de personal con un dosificador.

#### 10.5 Dosificador

Se diseñará una compuerta que con un motor paso a paso unipolar; se abrirá y cerrará en un ángulo máximo de 45°. El material se almacenará temporalmente, hasta que se abra la compuerta que retiene a los granos en un contenedor inferior que a su vez será alimentado por un cuello conectado a otro contenedor superior más grande que almacene grandes cantidades del material, el esquema principal se muestra en la figura 27:

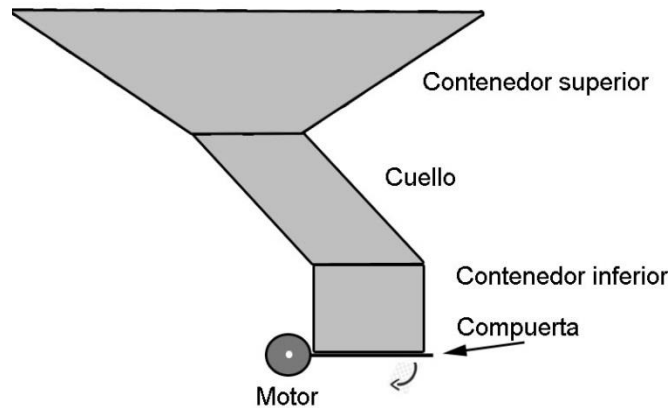


Figura 27: Partes del dosificador de grano.

Se podrá controlar la frecuencia de alimentación con los pulsos transmitidos al motor, por lo que; para el diseño se hará uso del modelo: PM55L-048 (Anexo 12) que a 24 volts, 48 pasos, con frecuencias menores de 100 PPS (pulse per second) y con un material de imán plástico de ferrita se tiene un torque de  $1600 \times 10^{-4} \text{Nm}$ ; acorde a la tabla del anexo mencionado. El diseño se efectuará al 85% de eficiencia (para no forzar al motor), dando un torque de diseño del motor de  $0.136 \text{Nm}$ , cuyo código en Arduino se indica en el Anexo 14.

En este punto de diseño, se tuvo la complicación del bajo torque que otorga el motor paso a paso, por lo que se tuvo que idear la forma en que se disminuyera el torque que proporciona el material a la compuerta. Se pensó inicialmente en tener una compuerta pequeña de 2cm por 2.5cm. Ocasionalmente que el grano; al no ser constante en sus medidas, provocaba en los diseños iniciales un atasco. Posteriormente, se duplicó el tamaño de la compuerta a 4cm x 4.5cm, obteniéndose la misma dificultad. Y finalmente; con la medida de la compuerta de 8cm x 8.5cm y usando un pequeño motovibrador en la tolva, se redujo el atasco del material en el cuello del dosificador.

Otro problema que se encontró fue el calentamiento de los componentes electrónicos (anexo 13), requiriéndose el uso de disipadores de calor para: el regulador 7824, el driver L293D y el mismo motor paso a paso que a la media hora de uso presentaba un anormal calentamiento. También, por cuestiones de prueba, se programó un intervalo de descanso de minuto y medio cada cinco minutos de uso para que los componentes mencionados no sufran algún daño durante las pruebas.

Con los 27.78 gramos de capacidad buscada que serán colocados en el contenedor inferior y con la densidad de  $396.95 \text{kg/m}^3$  del grano, utilizando una placa de 1.5875mm (1/16" ancho) de espesor con 8.5cm de ancho por 8 centímetros de largo para las dimensiones del contenedor, se obtiene que la altura del contenedor inferior es de 1 centímetro, el diagrama de cuerpo libre incluyendo al contenedor superior, que tendrá una capacidad de 10 kilogramos, se muestra en la siguiente figura:

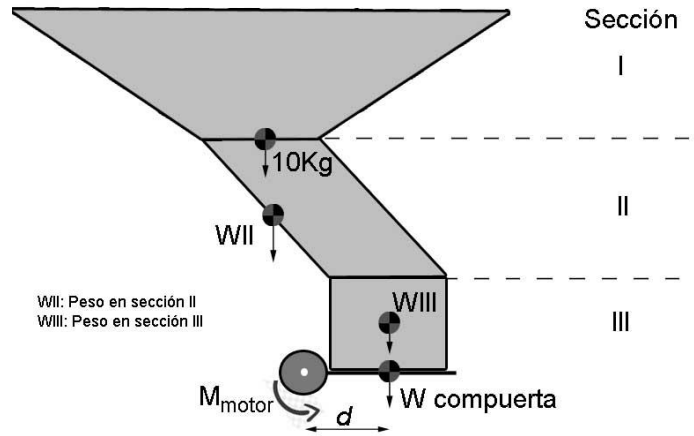


Figura 28: Diagrama de cuerpo libre en dosificador.

$$M_{motor} \geq d[W_{compuerta} + W_{III} + W_{II} + W_{10kg}]$$

Ec. 37

Siendo  $d$  la distancia en que se aplica la sumatoria de los pesos.

El peso de la compuerta  $W_{compuerta}$  y  $W_{III}$  se encuentran aplicados directamente contra el par de la compuerta, por lo que se obtienen directamente por sus dimensiones:

$$W_{compuerta} = \left(7850 \frac{kg}{m^3}\right) (0.08m \times 0.085m \times 0.00159m) \left(9.78 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$W_{compuerta} = 0.83N$$

$$W_{III} = \left(396.95 \frac{kg}{m^3}\right) (0.08m \times 0.085m \times 0.01m) \left(9.78 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$W_{III} = 0.264N$$

Los 10 kilogramos y  $W_{II}$  se encuentran aplicados en un plano inclinado, por lo que; para determinar el peso aplicado sobre el par de la compuerta; se calcula primero el peso ejercido en el plano paralelo al del cuello; y así obtener su componente vertical que se encontrará en el punto  $P$ , que es el punto de interconexión de la sección II y III. El diagrama de cuerpo libre en la sección II para la masa de 10 kilogramos cuyo peso es de 97.8N, se muestra en la figura 29:

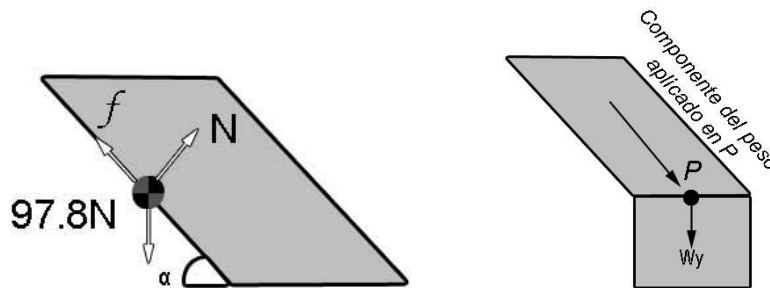


Figura 29: Diagrama de cuerpo libre en segunda sección.

La componente perpendicular al plano del cuello de los 97.8N es cancelada por la normal, aplicando sólo la componente paralela al mismo plano, posteriormente en el punto *P*, la componente horizontal es cancelada por la normal generada por la pared del contenedor, aplicando sólo la componente vertical  $W_y$ , sabiendo que la fricción es igual al coeficiente de fricción estática (Anexo 1) de 0.83 multiplicada por la normal, se puede expresar  $W_y$  en términos del ángulo  $\alpha$ :

$$W_y = [97.8\text{sen}\alpha - (0.83)(97.8\text{cos}\alpha)]\text{sen}\alpha \quad \text{Ec. 38}$$

Considerando que el ángulo mínimo para vencer al coeficiente de fricción estática (Anexo 1) es de  $39.69^\circ$  ( $\tan^{-1}(0.83)$ ) y que el momento par aplicado del motor con el factor de seguridad es de 0.136Nm, los valores más convenientes asignados para los ángulos; se encuentran en la siguiente tabla:

Ángulo [°]	$W_y$ [N]
41	1.902
42	3.424
43	5.001
44	6.631
45	8.313

Tabla 05: Peso aplicado contra el motor generado por los 97.8N del contenedor superior, con diferentes ángulos de inclinación en el cuello.

Tomando el ángulo de  $41^\circ$ , las medidas para el cuello se muestran en la figura 30:

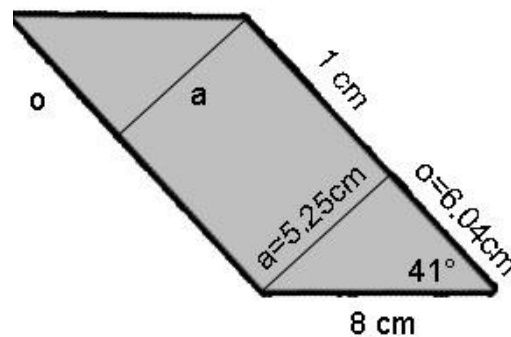


Figura 30: Cuello del dosificador.

Obteniéndose  $W_{II}$ :

$$W_{II} = \left[ (0.01\text{cm} \times 0.0525\text{cm}) + 2 \left( \frac{0.0604\text{cm} \times 0.0525\text{cm}}{2} \right) \right] [0.085\text{cm}] \left[ 396.95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \left[ \frac{9.78\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

$$W_{II} = 1.22\text{N}$$

$$W_{II\text{en}P} = (1.22\text{sen}41^\circ - 0.83(1.22\text{cos}41^\circ))\text{sen}41^\circ$$

$$W_{II\text{en}P} = 0.024N$$

Considerando las dimensiones del cuello, se obtiene que  $W_{II}$  es 1.22N y aplicado en el punto P en la interconexión de la sección II y III es 0.024N; que al ser tan bajo con respecto al peso producido por los 10kg del contenedor superior, no modifica el ángulo alfa calculado para la inclinación del cuello, se puede hacer uso de la ecuación 37, obteniéndose:

$$0.136Nm \geq 0.04m[0.83 + 0.264 + 0.024N + 1.902N]$$

$$0.136Nm \geq 0.1208Nm$$

En cuanto al momento de inercia necesario para mover la flecha alrededor de un eje fijo, se tiene<sup>46</sup>:

$$\sum M_G = I_G \alpha_a \quad \text{Ec. 39}$$

Siendo,  $M_G$  es el momento de inercia del cuerpo en el punto G,  $I_G$  es el momento de inercia del eje en el punto G y  $\alpha_a$  es la aceleración angular que sufre el objeto. El momento de inercia y la aceleración angular se pueden obtener mediante las siguientes fórmulas<sup>46</sup>:

$$I_{\text{cilindro sólido}} = \frac{1}{2}mr^2 \quad \text{Ec. 40}$$

Siendo,  $m$  es la masa y  $r$  el radio.

$$\theta_f = \theta_o + \omega_o t + \frac{1}{2} \alpha_c t^2 \quad \text{Ec. 41}$$

Siendo  $\theta_f$  es el ángulo final en radianes,  $\theta_o$  es el ángulo inicial en radianes,  $\omega_o$  es la velocidad angular inicial,  $\alpha_c$  es la aceleración angular constante y  $t$  es el tiempo.

Resolviendo para  $\alpha_c$ :

$$\alpha_c = \frac{2(\theta_f - \theta_o - \omega_o t)}{t^2} \quad \text{Ec. 42}$$

Juntando las ecuaciones 42 y 40 en la ecuación 39, se obtiene:

$$\sum M_G = \left(\frac{1}{2}mr^2\right) \frac{2(\theta_f - \theta_o - \omega_o t)}{t^2} \quad \text{Ec. 43}$$

Considerando las dimensiones de la flecha del anexo 10, junto a la densidad del aluminio 6061<sup>48</sup> de 2700kg/m<sup>3</sup>, se obtiene una masa de 0.0513kg, con un radio de 6.35x10<sup>-3</sup>m, ángulo inicial y velocidad inicial de cero. Y para el ángulo final, se toma lo expresado en el anexo 12, que indica que cada paso es de 7.5° lo que equivale a 0.1309 radianes, asimismo, en el código del anexo 14 se obtiene que el tiempo  $t$  entre cada paso es de 0.01s:

$$\sum M_G = \left( \frac{1}{2} (0.0513 \text{kg}) (0.00635 \text{m})^2 \right) \frac{2(0.1309)}{(0.01 \text{s})^2}$$

$$\sum M_G = 2.71 \times 10^{-3} \text{Nm}$$

Que sumados a los 0.1208Nm que aplica el peso del grano, se tiene:

$$0.136 \text{Nm} \geq 0.1235 \text{Nm}$$

Indicándose que el motor de paso a paso cumple satisfactoriamente. Inicialmente, se consideró agregar un perfil redondo de 1 pulgada, pero por recomendaciones del tornero se utilizó un perfil de aluminio para facilitar la acción del motor. Sin embargo, se modifica la unión entre la compuerta de entrada y la flecha, requiriéndose el uso de opresores en vez de soldadura.

Para determinar el tiempo que debe de estar abierta la compuerta, consideramos los 7.5° de cada paso que otorga el motor (anexo 12), por lo que para vencer a la fricción y a los 39.69° de pendiente (anexo 1), se requieren de 6 pasos para alcanzar un ángulo de 45° de la compuerta. Considerando, que al momento de estar abierta la compuerta, se generara una carga triangular aplicada sobre la misma, cuyo diagrama de cuerpo libre para la trayectoria del grano se aprecia en la siguiente figura:

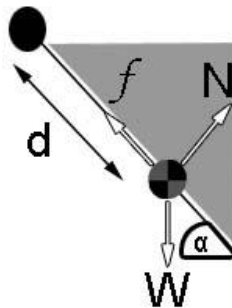


Figura 31: Diagrama de cuerpo libre en la compuerta abierta.

Que al aplicar la segunda ley de Newton, respectivamente en el eje vertical y horizontal y utilizando el ángulo de 45°:

$$N - W_y \cos 45^\circ = m a_y \tag{Ec. 44}$$

$$-f + W_x \sin 45^\circ = m a_x \tag{Ec. 45}$$

Como  $a_y$  es cero en la ecuación 44, y utilizando las ecuaciones 44 y 45 para resolver con respecto a  $t$  de la ecuación 13, considerando que  $V_{iy}$  y  $y_0$  son cero y que  $y_f$  es el tamaño de la compuerta menos la distancia,  $d$ :

$$t = \sqrt{\frac{2(0.08 - d)}{g \cos 45^\circ (1 - \mu)}}$$

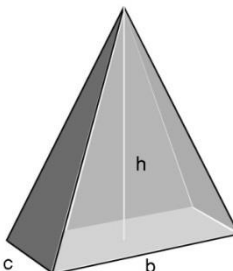
$$t = \sqrt{\frac{2(0.08m - 0.0533m)}{9.78 \frac{m}{s^2} \cos 45^\circ (1 - 0.83)}}$$

$$t = 0.213s$$

Ajustando el paso necesario para alcanzar los 45°, ida y vuelta (restando 0.02s), se determina que la compuerta tiene que permanecer 0.193s abierta, para la salida completa de la zona sombreada en la figura 31, que equivale a 121.47 gramos. Pero, al requerir sólo 27.78 gramos de entrada, se multiplica el tiempo obtenido por el 22.89% (por la proporción de tiempos), obteniéndose que la compuerta debe estar abierta por 0.044 segundos.

En el desarrollo del prototipo, al integrarse los 0.044 segundos en el programa de Arduino (línea 243 anexo 14); se tuvo la complicación de que la compuerta no cerraba. Esto se originó ya que en la elaboración del prototipo del dosificador, la compuerta no hacía bien contacto con el contenedor inferior, dejando un mayor espacio para que se albergara el material. Asimismo, la división de pasos del motor, generaba otro espacio, al no poder ser completamente horizontalmente posicionado. Dicho incremento de espacio, por las dos razones previas, provocó que una mayor cantidad de grano se juntara en la zona sombreada de la figura 31, provocando que el torque del motor no fuese suficiente para cerrar la compuerta. Por lo que, se tuvo que adecuar la línea 8 (incremento entre el tiempo de paso) y la línea 243 (reducción en el tiempo de espera para el regreso de la compuerta) del programa para obtener una salida lo más cercana posible a los 27.78 gramos, quedando la salida en un promedio de 42 gramos. El movimiento de inercia  $M_g$  se reduce, por lo que no se consideró necesario recalcularlo el torque.

Con respecto al contenedor superior y para mantener la silueta rectangular de la entrada en la interconexión de la sección I y II, se hará uso de una pirámide, cuyo volumen  $V_{pirámide}^{48}$  está expresado en la figura 32:



$$V_{pirámide} = \frac{1}{3}cbh^c$$

Figura 32: Volumen de pirámide.

Ec. 46

Siendo:  $c$  un lado de la base de la pirámide,  $b$  un lado de la base de la pirámide y  $h$  la altura de la pirámide. Y haciendo uso de la masa de los 10kg y teniendo una altura  $h$  de 50cm que es menor que el tamaño comercial y asignando un lado de la base  $c$  de 45cm, se resuelve la ecuación 46 para la base  $b$  (Figura 33):

$$b = \frac{3V}{ch}$$

Ec. 47



$$b = \frac{3 \left( 10 \text{ kg} / 396.95 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{(0.5 \text{ m})(0.45 \text{ m})}$$

$$b = 0.3359 \text{ m}$$

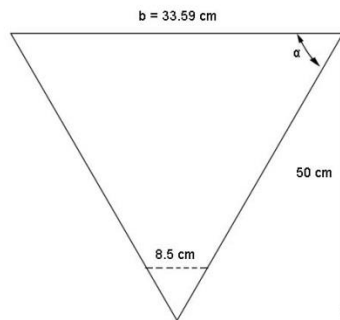


Figura 33: Pared de tolva superior del dosificador.

Que al obtenerse el ángulo de inclinación  $\alpha$  de la figura 33 de  $71.43^\circ$ , se obtiene el volumen de la pequeña parte truncada de la pirámide cuya altura calculada es de 12.65cm con un volumen de  $286.73 \text{ cm}^3$ , indicando que de los 10kg del volumen; se restan 113.82 gramos.

La unidad de dosificación se aúna a la bandeja de entrada, señalándose en las figuras 34, 35 y 36:

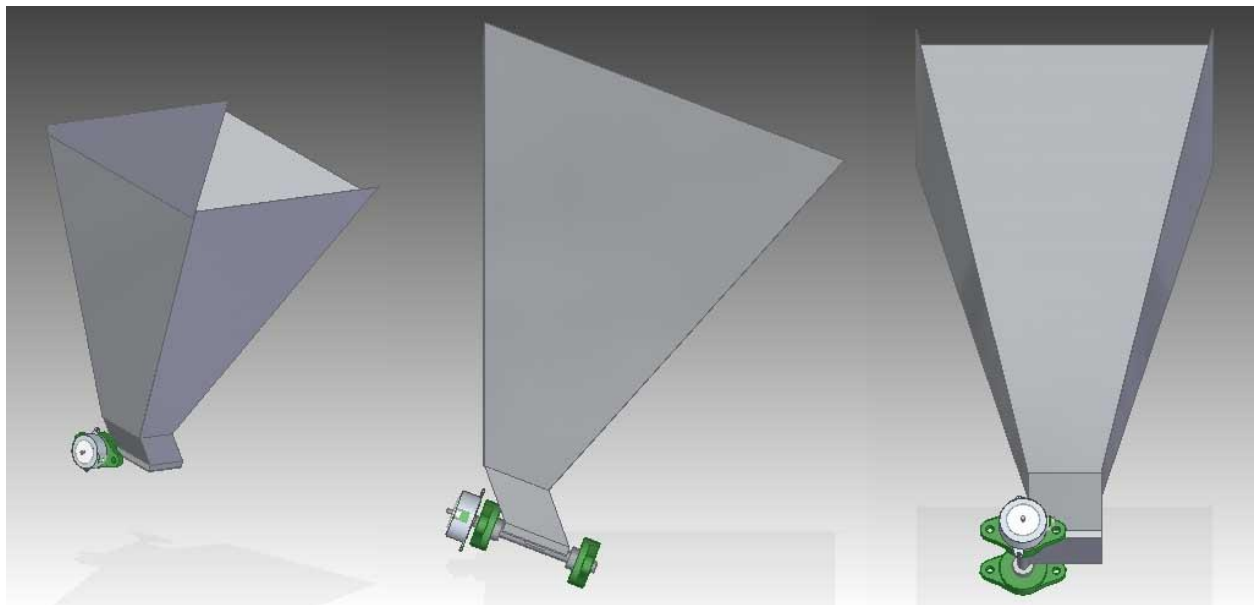


Figura 34: Diseño del dosificador, elaborado en Solid Edge ST7.

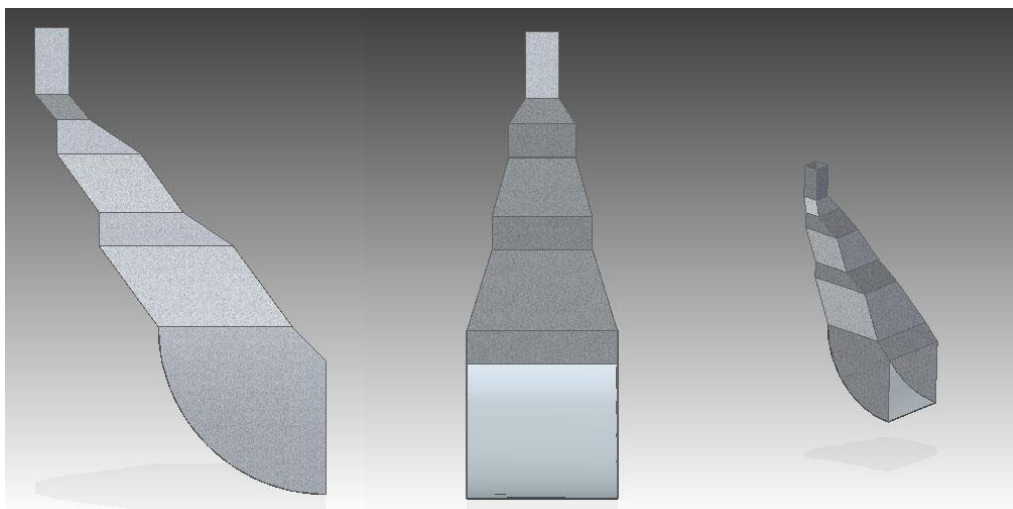


Figura 35: Diseño del rampa, elaborado en Solid Edge ST7.

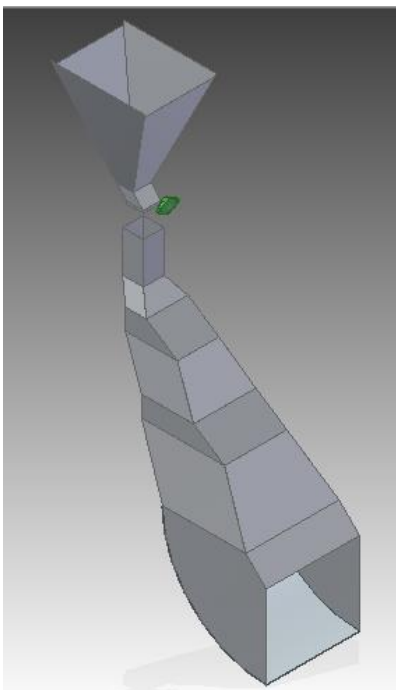


Figura 36: Diseño de dosificador y de rampa, elaborado en Solid Edge ST7.

Para el cálculo de la estructura que soporta a la rampa y al dosificador, el punto principal de análisis se encuentra en el soporte de los 10 kilogramos que es el contenedor superior, dividido entre dos soportes, el peso aplicado es de 48.9N. La estructura analizada tendrá un PTR de 1" calibre 14 cuyo módulo de sección es  $1.3\text{cm}^3$  ( $1.3 \times 10^{-6}\text{m}^3$ )<sup>49</sup>. Que al unir la distancia media de las aristas de la pirámide truncada, nos da una viga de 21.04cm, que se muestra en la figura 37:

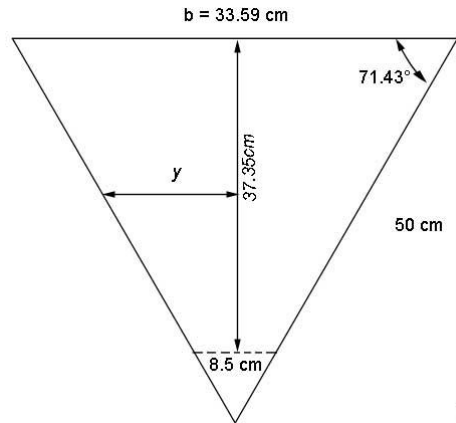


Figura 37: Obtención de la media de las aristas de la pirámide truncada.

$$y = \frac{50\text{cm} - (37.35\text{cm}/2)}{\tan 71.43^\circ}$$

$$y = 10.52\text{cm}$$

Cuyo análisis de vigas se muestra en la siguiente figura, considerando un soporte por cada lado:

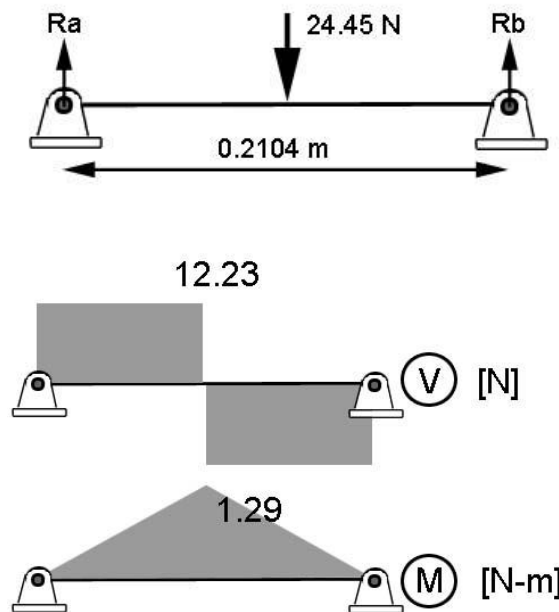


Figura 38: Diagramas V y M en un PTR de 1" calibre 14 en el contenedor superior.

Aplicando la ecuación 28, se obtiene:

$$S_{req} = \frac{1.29\text{N} - \text{m}}{250\text{MPa}/2.5}$$

$$S_{req} = 1.29 \times 10^{-8} m^3$$

Al ser de los módulos de sección del PTR y el requerido respectivamente de  $1.3 \times 10^{-6} m^3 >> 1.29 \times 10^{-8} m^3$ , no se considera necesario hacer el análisis del peso de la pieza. Quedando el soporte del dosificador y rampa expresado en la siguiente figura:

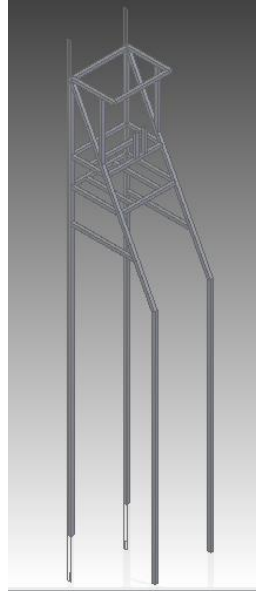


Figura 39: Diseño de estructura para el dosificador, elaborado en Solid Edge ST7.

En las figuras 40 y 41 se integran todos los diseños:

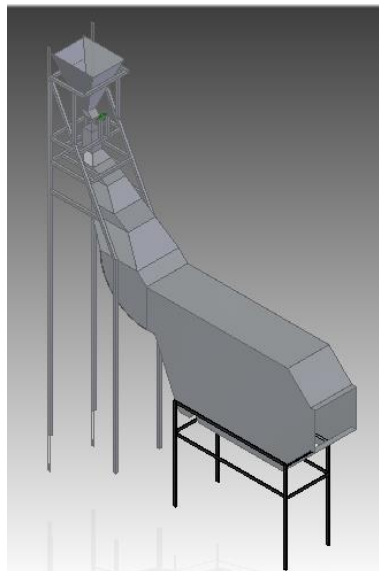


Figura 40: Diseño de cámara de sedimentación por gravedad con dosificador, elaborado en Solid Edge ST7.



Figura 41: Prototipo alpha, de cámara de separación por gravedad.

Para la entrada del aire, se utilizó un soplador de la marca Makita UB1101, cuyas características son:

- 120V
- 5.5A
- 60Hz
- 16000rpm

En la siguiente figura se muestran las partes diseñadas para la cámara de separación por gravedad:

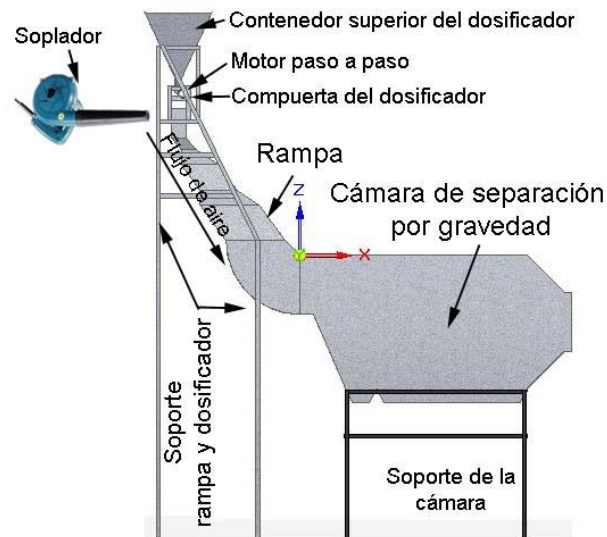


Figura 42: Partes del diseño de la cámara de separación por gravedad.

En el anexo 15 se hace un resumen del marco legal aplicable.

## 10.6 Costo del prototipo

Partida	Material	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Importe
1	Lámina	7	m	\$ 118.88	\$ 832.13
2	Remache pop 1/8"	800	PZA	\$ 0.46	\$ 368.00
3	Tornillos con rondana 1/8"	316	PZA	\$ 0.62	\$ 195.92
4	Chumaceras de pisos	2	PZA	\$ 60.00	\$ 120.00
5	Flecha torneada de aluminio	1	PZA	\$ 450.00	\$ 450.00
6	Arduino UNO genérico	1	PZA	\$ 206.00	\$ 206.00
7	Protoboard	1	PZA	\$ 140.00	\$ 140.00
8	Cableado 22awg	1	m	\$ 4.00	\$ 4.00
9	Solera de 6x25mm 1/4 x 1	2	PZA	\$ 174.00	\$ 348.00
10	Disco corte	2	PZA	\$ 13.00	\$ 26.00
11	PTR 1x1 cal 14	3	PZA	\$ 202.00	\$ 606.00
12	Transformador 24V@1A	1	PZA	\$ 165.00	\$ 165.00
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 3,461.05</b>

Tabla 06: Costo para el desarrollo del prototipo.

## 11. Resultados

### 11.1 Datos obtenidos

Partida	Material en diversos segmentos				Salida [kg] +/- 0.0005	Textil filtrado [kg] +/- 0.0005	% textil filtrado
	Entrada [kg] +/- 0.0005	Rampa [kg] +/- 0.0005	Primera tolva [kg] +/- 0.0005	Segunda tolva [kg] +/- 0.0005			
1	2	0.350	0.630	0.960	1.940	0.0600	3.00%
2	2	0.670	0.621	0.679	1.970	0.0300	1.50%
3	2	0.635	0.607	0.732	1.974	0.0260	1.30%
4	2	0.429	0.518	1.010	1.957	0.0430	2.15%
5	2	0.288	0.483	1.190	1.961	0.0390	1.95%
Promedio		0.474	0.572	0.914	1.960	0.0396	1.98%
		23.72%	28.59%	45.71%			

Tabla 07: Resultados obtenidos.

De acuerdo a la hipótesis planteada, para dos muestras pequeñas en un gráfico  $t^{50}$ :

$$t_e = \frac{\bar{X} - \bar{Y} - \delta}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad \text{Ec. 48}$$

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_{v1}^2 + (n_2 - 1)S_{v2}^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad \text{Ec. 49}$$

$$\text{Grados de libertad} = n_1 + n_2 - 2$$

Para:  $\mu_1 - \mu_2 = 0$ , el rechazo de la hipótesis es:  $t < -t_{\alpha_s/2}$  ó  $t > t_{\alpha_s/2}$

En dónde;  $t_e$  es el valor de la muestra de dos medias,  $\bar{X}$  es la media entrante,  $\bar{Y}$  es la media del material saliente,  $\delta$  es el resultado expuesto en la hipótesis nula,  $S_v$  es la varianza,  $n_1$  es el tamaño de la muestra 1 y  $n_2$  es el tamaño de la muestra 2.

Obteniéndose a partir de los resultados, los siguientes datos:

$\bar{X} = 2$ ;  $\bar{Y} = 1.9604$ ;  $S_{v1}^2=0$ ;  $S_{v2}^2=0.00018$ ;  $\delta = 0$ , Grados de libertad = 8

De tabla t-student  $t_{\alpha_s/2} = 2.3060$

Sustituyendo los valores en ecuaciones 48 y 49:

$$S_p^2 = \frac{(5-1)0 + (5-1)0.00018}{5+5-2}$$

$$S_p^2 = 9 \times 10^{-5}$$

$$t_e = \frac{2 - 1.9604 - 0}{\sqrt{9 \times 10^{-5}} \sqrt{\frac{1}{5} + \frac{1}{5}}}$$

$$t_e = 6.6$$

Como  $6.6 > 2.306$ , no se rechaza la hipótesis nula; indicándose que las medias del producto entrante no son iguales a las medias que salen con un nivel de  $\alpha_s$  igual a 0.05.

## 11.2 Análisis de resultados

Cómo se aprecia en la tabla 7; el filtrado del textil de la cámara de separación por gravedad, es en promedio 1.98%. Es decir, que por cada kilogramo entrante de material se va a separar 19.8 gramos de textil (Figura 44). Asimismo, se indica que un 23.72% del material entrante es atrapado en el último punto de la curvatura, provocando que no se filtre completamente y un 28.59% cae correctamente en la primera tolva. Ya que el material tiende a rebotar en la parte inferior de la cámara, provocando que el material caiga en la segunda tolva en un alto porcentaje de 45.71%, como se muestra en la figura 43.



Figura 43: Salida del material en diferentes tolva.

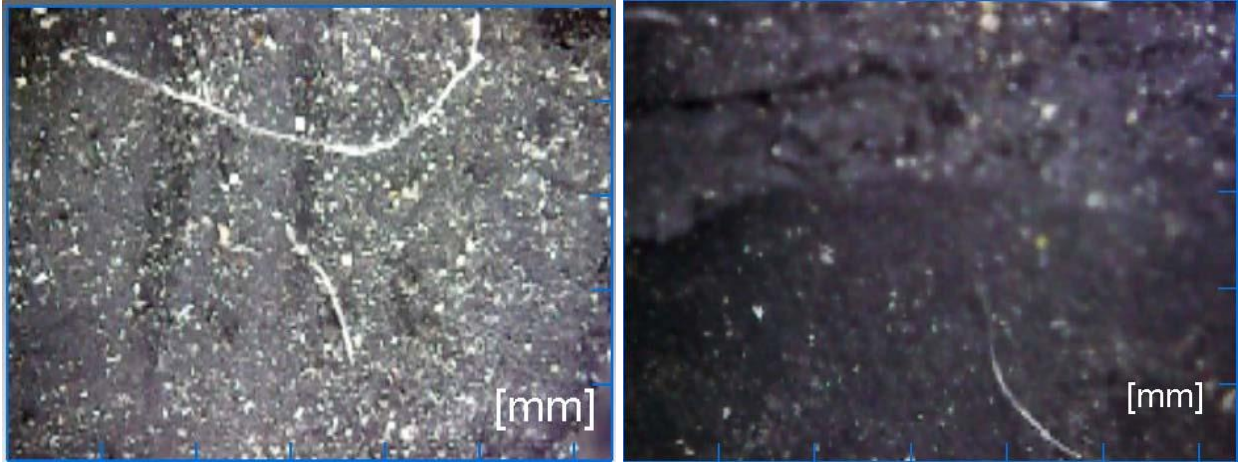


Figura 44: Acumulación del textil en el escape de la cámara de separación por gravedad.

Conforme a lo expresado en el anexo 6, podemos notar que del 1.98% separado en el prototipo contra el porcentaje ideal de separación de 0.9072%, existe un monto extra separado en el prototipo de 1.0728% del peso del material entrante. Dicha diferencia estriba en la construcción del prototipo, ya que al momento de efectuar las pruebas y al no estar bien ensamblado el prototipo, por su material endeble y por el tipo de unión seleccionado (remaches), existen pequeños trozos de grano que se salieron de la cámara de separación por gravedad.

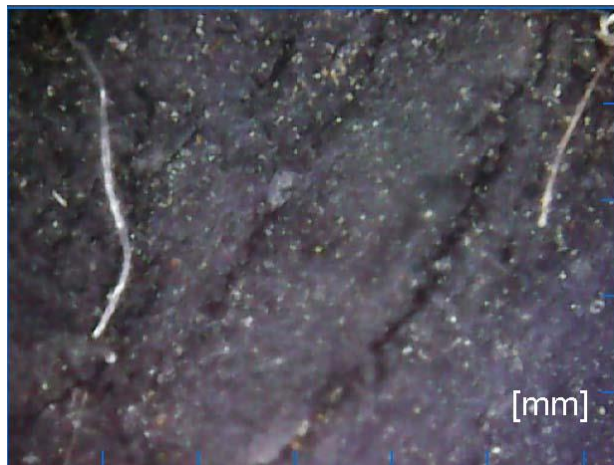
Sin embargo, en un examen cuantitativo con el microscopio, se aprecia en las figura 45 y 46, la diferencia entre las muestras:





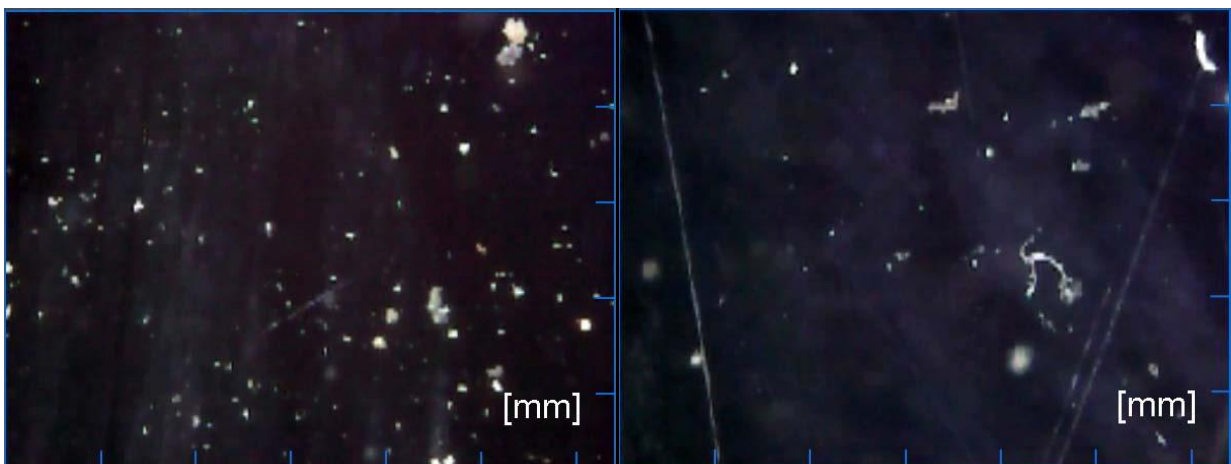
a)

b)



c)

Figura 45: Contenido de polvo y textil en la superficie del grano. a) Muestra sin procesar, b) Muestra manualmente procesada, c) Muestra filtrada por la cámara de separación por gravedad.



a)

b)

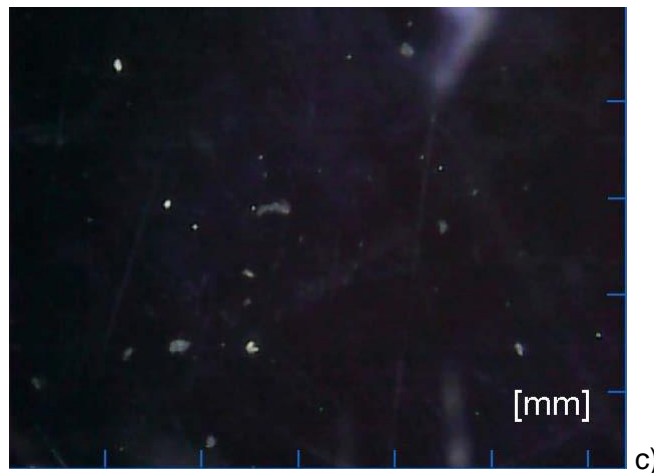


Figura 46: Contenido de polvo y textil desprendido del grano. a) Muestra sin procesar, b) Muestra manualmente procesada, c) Muestra filtrada por la cámara de separación por gravedad.

Como se aprecia en la figura 45, para el grano que fue filtrado a través de la cámara de separación por gravedad, inciso c, la cantidad de polvo y textil encontrados en la superficie se encuentra más limpia que aquel material mostrado en el inciso a; que es el grano sucio, pero el inciso c es más sucio que el material en el inciso b. Asimismo, en la figura 46, se aprecia que el inciso c es muy similar al inciso b. Por lo que se aprecia en las figuras, la separación se aproxima a la efectuada manualmente en el anexo 6. Esto es muy positivo, ya que posterior al proceso del filtrado con la cámara de separación por gravedad, se puede utilizar una máquina tamizadora que con su movimiento vibratorio, permita la clasificación del material y además; obtener una mayor limpieza para procesar el grano reciclado de llanta. Incrementar los procesos de limpieza es normal en el reciclaje de llantas y en general en el proceso de la limpieza de los fluidos, ya que al poner en serie diversos equipos permite alcanzar un alto grado de pureza.

### 11.3 Trabajo a Futuro

La separación del textil y del hule con la cámara de separación por gravedad, puede servir para la industria, para esto; deben efectuarse pruebas de volumen que permitan definir más los parámetros de la cámara y corregir aquellas cuestiones y problemáticas que surjan. Se tendría que implementar un sistema de alimentación continua; como un transportador helicoidal, que permita una continua alimentación para alcanzar la capacidad de varias toneladas por hora. Asimismo, se podía integrar una unidad de colector de polvos en el escape de la cámara con el fin captar a la partículas y a los textiles evitando cualquier propagación al medio.

Otro punto a probar, es lo referente a la ecuación 5; con respecto al ancho de la cámara, cuya fuente indica que no afecta en las ecuaciones de diseño y en la capacidad del proceso. Por lo que; se propone variar los anchos de la cámara para constatar si existe alguna variación en cuanto a la capacidad y a la limpieza del grano.

Otro punto, es implementar una salida con transportadores helicoidales o con una banda de cangilones en la parte inferior de la cámara, para evitar el uso de cajas y evitar ralentizar el proceso. También, para evitar el atasco en el dosificador, que eventualmente se presenta con la salida de 8cm x 8.5cm, se recomienda incrementar el tamaño de salida a 10cm x 10.5cm para evitar ésta eventualidad. Y se recomienda, integrar un disipador de calor en el motor paso a paso para evitar los intervalos de descanso programados. Otro punto importante, es implementar dispositivos de transmisión de par en el motor paso a paso, ya que en el diseño; no se consideró la resistencia de los cojinetes, provocándose que el sistema se encuentre al límite con respecto a la eficiencia del 85% planteada, e incluso; en ocasiones el paso del grano vencía al motor paso a paso. Por lo que, se recomienda implementar un sistema de poleas que incrementen el torque, haciéndose necesario la reducción de pasos (grados) en la apertura de la compuerta o incrementándose el tiempo de transición entre la apertura y el cierre.

Para un mejor desempeño de la cámara, se puede integrar una optimización en la alimentación del grano y en el flujo del aire. Para la alimentación del grano, se puede modificar la frecuencia en que trabaja el Arduino para el control del motor paso a paso, y en el caso del flujo del aire, en la sección que se ubica en la rampa y el cuerpo de la cámara de separación por gravedad, se puede reducir con motores controlados el área de sección transversal. Con esto; se pueden establecer, con base en la cantidad de grano y textil entrante, los valores óptimos para el mejor desempeño de la cámara. Cuyo fin y a través de los sensores de polvo de los sistemas Arduino, es elaborar un sistema de control de lazo abierto que permita a las variables acercarse en todo momento al valor óptimo previamente calculado.

Por gráficos se determinó el coeficiente de arrastre que permitió el diseño de la cámara. Sin embargo; para obtener un valor más preciso, se debe de componer una gráfica propia  $C_d$  vs  $Re$  con respecto al grano y el textil que permita obtener un valor más exacto en el coeficiente y así; poder definir mejor las distancias correspondientes de las tolvas.

Por último, se puede desarrollar un modelo computacional que permita eventualmente modificar la estructura para encontrar los parámetros óptimos que aplican a la separación del textil y el grano derivados del proceso del reciclaje de llantas sin la necesidad de prototipos físicos.

#### 11.4 Lecciones aprendidas

El diseño de la cámara no ha sido una cuestión sencilla, se han involucrado muchas materias como sistemas de mejoramiento ambiental, estadística, mecánica de sólidos, electrónica, mecánica de fluidos, entre otras. Muchos conceptos de mecánica de fluidos me eran nuevos, como el coeficiente de arrastre y el de la velocidad terminal. Asimismo, desde que empecé con la presente tesis, nunca pensé que me era necesario el uso del número de Reynolds, por lo que; creo que en esta área es en donde más lecciones aprendí.

En la electrónica, pude desarrollar una aplicación más compleja de aquellas vistas en las aulas, en donde; al enfrentarme al reto de la disipación del calor me permitió buscar diferentes maneras y métodos para soslayar el problema. También se tuvo que hacer uso del EEPROM para que se guardara la última posición en la cual había trabajado el Arduino y con esto;

regresar al punto inicial programado con el fin de evitar que el motor girase en diferentes posiciones cada vez que se iniciara el mismo.

En cuanto al conocimiento del reciclaje de llantas, se pudo acrecentar el conocimiento sobre la caracterización del grano, la composición y caracterización del textil, cuyos fines pueden ser aplicados en la industria.

Pero, creo que el mayor aprendizaje consta de la elaboración de la propia tesis, de la cual; se tiene que desarrollar una metodología, un estado de arte específicos que vayan relacionados con un desarrollo que permita la clarificación de un objetivo. Ergo, son necesarias la búsqueda y aplicación de los conocimientos estructuradamente que permitan la solución de un problema.

## 12. Conclusiones

El presente trabajo representó un reto; un reto que me permitió aprender y aplicar los conocimientos aprendidos a través de la carrera de Ingeniería Industrial. Como se indicó previamente, la separación del textil promedio por cada kilo de grano filtrado es de 19.8 gramos, es decir el 1.98% del peso promedio entrante. Y como se aprecia en la figura 44 y 45; el polvo y el textil son removidos del grano lo que permite un uso posterior en la industria, ya que; permite por ejemplo, un ahorro de hasta 50% al momento de aplicar pinturas para la decoración de jardines y parques infantiles. Al remover el textil y el polvo, se pueden aplicar menos aglomerantes que permiten el desarrollo de diversos productos, por ejemplo: losetas, adoquines, etc.

El 74.3%, que es la sumatoria de los porcentajes de la salida de la primera tolva y de la segunda tolva expresada en la tabla 7, permite tener una sólida base para reducir costos en la producción, ya que; actualmente el proceso de limpieza con el que se cuenta en la Empresa; pierde 1 de cada 5 granos entrantes. Es decir, que se tienen pérdidas del material del 20%, pero; con la cámara de separación de gravedad y logrando recuperar el material de la rampa, se espera obtener un 98.02% del material entrante, que equivale a una reducción en costos, tiempo y en procesos, de al menos \$10,000.00 pesos, m.n. en cuanto a mano de obra y de \$15,000.00 pesos, m.n. de pintura. Dando un total de ahorro mínimo de \$25,000.00 pesos m.n. mensuales; con la posibilidad de incrementar fácilmente la producción y la capacidad de la cámara. Por lo que; creo que es importante seguir trabajando con la cámara de separación por gravedad para seguir mejorando el proceso del reciclaje de llantas.

Dicho valor, puede ser mejorado al soslayar las diferentes cuestiones presentadas en el prototipo, siendo:

- Mejorar el material de construcción, ya que para el prototipo se utilizó lámina calibre 28 por su fácil manejo, pero en la práctica es un material endeble y difícil de unir. Es recomendable utilizar placa delgada que permita la unión a través de soldadura. Con esto; se puede también evitar los desniveles presentados en el prototipo que causaron que el 23.72% del material se quedara en el cuello de la rampa y también se reduciría el 1.073% del material debido a las pérdidas.

- Otro punto importante es el comportamiento de la rampa, en dónde; el grano no está siguiendo cabalmente el trazo mencionado en el desarrollo, provocando que un 45.71% del material entrante caiga en la segunda tolva. Para esto, se debe de agregar una placa interna en la rampa que permita guiar al material entrante en la trayectoria esperada en la rampa; evitando que rebote el material para caer dentro de la primera tolva. Así mismo, como se expresó en el marco teórico, se puede implementar una malla separadora en la parte inferior que permita atrapar el grano que rebota en la pared o ampliar la primera tolva, para que tenga una mayor captación del grano.
- La altura del diseño provocó una dificultad en el desarrollo, por lo que; se puede reducir el tamaño al implementar transportadores en la parte inferior en vez de contenedores. Se puede poner un transportador neumático o un tornillo transportador que reduzca la altura del diseño al menos 70 centímetros.
- Para obtener una mayor eficiencia en el proceso, se pueden poner colectores de polvo en el escape y para futuras investigaciones se puede establecer un control del flujo a través de la reducción del tamaño entrante de la cámara. También se puede obtener un control, a través de la frecuencia del motor paso a paso, que permitirá buscar el valor óptimo del material entrante para su separación.
- En las mejoras también, se incluye la eliminación del vaivén a lo ancho de la cámara, como se planteó en la ecuación 34, se pudo eliminar el vaivén a lo largo pero a lo ancho se tiene que reforzar a la solera para evitar el desplazamiento.
- Efectuar una mejor conectividad entre los disipadores de calor y los elementos electrónicos que se calientan: L293D y el motor paso a paso, con esto; se puede eliminar el tiempo intervalo que se programó. El regulador 7824, al ser unido con una placa de aluminio de 4mm ya no tuvo ningún problema de calentamiento.

De acuerdo al presente trabajo, se demuestra que no se rechaza la hipótesis nula, se demuestra que es posible la separación del grano y el textil y también se puede demostrar que con un presupuesto bajo, se puede desarrollar una aplicación que pueda ser útil en la industria. Al no ser rechazada la hipótesis nula, como se indicó en la sección 11.1, al ser dos muestras pequeñas con el gráfico t, se puede entender que de todo el grano con textil y polvo entrante, en vez de caer en conjunto en la primera tolva, tiende a caer en distintas regiones asignadas en la cámara. Existe mucho material conformado por granos que caerá dentro de las tolvas asignadas, pero también existe material que saldrá por el escape asignado, es su mayoría textil y polvo. Lográndose la separación buscada.

En la presente tesis, se desarrollaron múltiples temas, se introdujeron múltiples fórmulas para el diseño de la cámara. La teoría expresada requirió el análisis de las partículas a través de los diferentes regímenes para poder entender su proceder al ingresar a la cámara. Sin embargo, es difícil dar una cabal seguimiento y cálculos precisos para determinar exactamente lo que harán decenas de miles de granos entrantes, es decir; habrá textil que salga por la primera tolva e incluso pequeños granos que salgan por el escape. Esto quiere decir, que el conjunto teórico permite dar un buen acercamiento, un acercamiento base que sirve para el desarrollo y el diseño, pero que todavía carece del toque de la realidad. Con esta idea, quiero expresar, que cuando al desarrollo teórico se le aúna un planteamiento práctico, entonces; y a través de trabajo, uno se puede acercar un poco más a la solución para dilucidar el problema y dicha

combinación, nos permite acercarnos más al proceso de control deseado. Como Ingeniero Industrial, se me ha inculcado que todo proceso es mejorable, por lo que creo que este trabajo es un punto de apoyo que espero que sirva a la Industria Mexicana.

### 13. Bibliografía

1. Scrap tirenews.com (2009) Scrap Tire & Rubber 2009 User Directory, (18), 9.
2. Groover, M. P. (2007) *Fundamentos de Manufactura Moderna Materiales, procesos y sistemas*. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
3. 20170905---etrma-annual-report-2016-17---final.pdf (2018, Diciembre 12) Página 18 Recuperado de: <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20170905---etrma-annual-report-2016-17---final.pdf>
4. Barclay Roto-shred (2019, Julio 4) Recuperado de: <http://www.tireshredders.com/index.html>
5. Eco Krumbuster ® | Eco Green Equipment | Tire Shredders (2018, Diciembre 12) Recuperado de: <http://ecogreenequipment.com/equip/eco-krumbuster/>
6. AK84-Recycling-16e.pdf (2018, Diciembre 12) Página 2 Recuperado de: [https://www.akahl.de/fileadmin/media/akahl/downloads/Prospekte/Prospekte\\_englisch/AK84-Recycling-16e.pdf](https://www.akahl.de/fileadmin/media/akahl/downloads/Prospekte/Prospekte_englisch/AK84-Recycling-16e.pdf)
7. Recycling of tyre – Youtube (2019, Marzo 9) Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=32Mt2FAroX8>
8. De. K. S., Isayev A. I., Khait K. (2005). *Rubber Recycling*. U.S.A.: CRC Press Taylor & Francis Group
9. PowerPoint Presentation (2018, Diciembre 12) quinta hoja Recuperado de: [https://www.ustires.org/system/files/USTMA\\_scrap\\_tire\\_summ\\_2017\\_072018.pdf](https://www.ustires.org/system/files/USTMA_scrap_tire_summ_2017_072018.pdf)
10. Nitrógeno líquido – Wikipedia, la enciclopedia libre (2019, Julio 4) Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Nitrógeno\\_líquido](https://es.wikipedia.org/wiki/Nitrógeno_líquido)
11. Primary Tire Recycling – RTI Cryogenics – “Tires to Polymers” (2019, Julio 4) Recuperado de: <http://www.rticryocanada.com/technologies/primary-tire-recycling/>
12. Temperatura de transición vítrea – Wikipedia, la enciclopedia libre (2019, Julio 4) Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura\\_de\\_transición\\_vítrea](https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_transición_vítrea)
13. Scrap tirenews.com (2009, Agosto) McKinstry Reclaim Technologies, En *Scrap Tire News*, 23(8), 14.
14. Scrap tirenews.com (2019, Enero) Emerging Technologies Are Advancing ELT Material as Tire Raw Material, Smithers Rapra Report Says, En *Scrap Tire News*, 33(1), 10-11.
15. Erstmal mehr Altreifen recycelt als verbrannt | EUWID Recycling und Entsorgung (2018, Diciembre 12) Recuperado de: <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/erstmal-mehr-altreifen-recycelt-als-verbrannt.html>
16. tyre\_industry\_2018.pdf (2018, Diciembre 12) Tabla 13 en la hoja 16 Recuperado de: [http://www.jatma.or.jp/media/pdf/tyre\\_industry\\_2018.pdf](http://www.jatma.or.jp/media/pdf/tyre_industry_2018.pdf)
17. 20170905---etrma-annual-report-2016-17---final.pdf (2018, Diciembre 12) Página 26 Recuperado de: <http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/20170905---etrma-annual-report-2016-17---final.pdf>

18. Plan Estatal de Manejo de Llantas Usadas de Vehículos Automotores par... (2018, Diciembre 12) Recuperado de: <https://es.slideshare.net/DanielDelgado2/plan-estatal-de-manejo-de-llantas-usadas-de-vehiculos-automotores-para-el-estado-de-tabasco>
19. Consulta interactiva de datos (2019, Octubre 20) Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>
20. NOM-161-SEMARNAT-2011, sección 7
21. Kiely G. (1999) *Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnología y sistemas de gestión*. España: McGraw-Hill
22. Environmental Protection Agency (1972) *Emission Factor Documentation FOR AP-42 Section*. USA: Autor.
23. Wark K., Warner C. F., (1998) *Contaminación del aire Origen y Control*. México: Editorial Limusa, S.A. de C.V.
24. Instituto Mexicano del Seguro Social (1987) *Guía de saneamiento básico industrial*. México: Autor.
25. sect1 chap1 (2019, Julio 8) Recuperado de: <https://www3.epa.gov/ttnca1/cica/files/cs6ch2-s.pdf>
26. Masters. G. M. (1991) *Introduction to Environmental Engineering and Science*. U.S.A.: Prentice Hall
27. Davis M. L., Masten S. J. (2005) *Ingeniería y ciencias ambientales*. México: McGraw Hill
28. Woodcock C.R., Mason J.S. (1987) *Bulk Solids Handling*. USA: Leonard Hill
29. CONTROL DE PARTÍCULAS – YouTube (2019, Julio 9) Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=09le4Wbzlls>
30. Castil L. M. (2017) *Handbook of separation Process Technology*. USA: Delve Publishing LLC
31. Espacenet – Home page (2019, Julio 9) Recuperado de: <https://worldwide.espacenet.com>
32. patft >> Page 1 of 1 (2019, Julio 9) Recuperado de: <http://patft.uspto.gov>
33. Torres-Lozada P., Mamolejo-Rebellón L. F., Cajigas-Cerón A.A. (2014) Cassava starch separation: evaluation of sedimentation by gravity in channels, En *Ingeniería e Investigación* 34(1), 42-47, 10.15446/ing.investig.v34n1.40049
34. Streeter V. L.(1988) *Mecánica de los Fluidos*. México: McGraw Hill
35. Peso específico – Wikipedia, la enciclopedia libre (2019, Julio 10) Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Peso\\_específico](https://es.wikipedia.org/wiki/Peso_específico)
36. White F. M. *Mecánica de Fluidos ISBN: 968-451-581-2*.
37. Environmental Protection Agency [EPA] (2000) *Control of Particulate Matter Emission, Student Manual, APTI Course 413 3<sup>rd</sup>* USA: Autor
38. Tiro parabólico horizontal ejemplo 1 de 3 | Física – Virtual – YouTube (2019, Julio 10) Recuperado de: [https://www.youtube.com/watch?v=7PHLOFylz\\_I](https://www.youtube.com/watch?v=7PHLOFylz_I)
39. Serway R. A. (2001) *Física*. México: Pearson Educación

40. Sheet Metal Gauge Chart | Metal Supermarkets – Steel, Aluminum, Stainless, Hot-Rolled, Cold-Rolled, Alloy, Carbon, Galvanized, Brass, Bronze, Copper (2019, Julio 10) Recuperado de: <https://www.metalsupermarkets.com/sheet-metal-gauge-chart/>

41. Sheet Metal Density Table (Common Materials) | MachineMfg.com (2019, Julio 10) Recuperado de: <https://www.machinemfg.com/metal-density/>

42. Nailon – Wikipedia, la enciclopedia libre (2019, 11 Julio) Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Nailon>

43. Air Density and Specific Weight Table, Equations and Calculator | Engineers Edge | [www.engineersedge.com](http://www.engineersedge.com) (2019, Julio 11) Recuperado de: <https://www.engineersedge.com/calculators/air-density.htm>

44. Hibbeler R.C. (2014) *Mechanics of Material*. USA: Prentice Hall

45. Gere, J.M. (2009) *Mechanics of Materials*. USA: Cengage Learning

46. Hibbeler R.C. (2016) *Dynamics*. USA: Prentice Hall

47. Totten G. E., Mackenzie D. S. (2003) *Handbook of Aluminum Volume 1 Physical Metallurgy and Process* USA: Marcel Dekker Inc.

48. Volumen de una pirámide rectangular (2019, Julio 13) Recuperado de: <https://www.universoformulas.com/matematicas/geometria/volumen-piramide-rectangular/>

49. Desarrollo de tablas de características estructurales de Perfiles LM (2019, Julio 13) Recuperado de: [http://pyhlm.com/assets/tablas\\_itesm.pdf](http://pyhlm.com/assets/tablas_itesm.pdf)

50. Johnson R. A. (2011) *Miller & Freund's probability and statistics for engineers* USA: Pearson Education, Inc.

#### Anexo 1: Propiedades del grano derivado de llanta

Los polímeros en general; están conformados por cadenas largas de moléculas basadas en carbono, se dividen en plásticos (termoplástico y termofijos) y los cauchos en elastómeros. Las llantas son elaboradas con elastómeros; que son polímeros que pueden tener alargamientos extremos teniendo una estructura molecular similar a la de los termofijos. A su vez, los cauchos se dividen en naturales y sintéticos. Los naturales son cauchos derivados de ciertos vegetales, principalmente del árbol del hule (*Hevea brasiliensis*), que consiste sobre todo en poliisopreno (un polímero del isopreno  $C_5H_8$ ), que al momento de agregarse negro de humo y otros componentes y aditivos; se refuerzan sus propiedades para la vulcanización (Tabla 8).

Polímero	Poliisopreno	Graveda específica	0.93
Símbolo	CN	Límite superior de temperatura	80°C
Módulo de elasticidad	18 MPa con elongación de 300%	Límite inferior de temperatura	-150°C
Resistencia a la tensión	25 MPa	Participación aproximada en el mercado	22%
Elongación	700% antes de fallar		

Tabla 08: Propiedades del caucho natural vulcanizado.<sup>1</sup>

También el caucho sintético se utiliza en los proceso para conformar la llanta, sobre todo el caucho de butadieno. Y el caucho estireno-butadieno (SBR) que está compuesto por un 25% de estireno y 75% de butadieno, tiene características similares al del caucho natural; por lo que al ser vulcanizado es utilizado en la producción de llantas de carro.



Propiedades del grano derivado de llanta.

Con base en las mediciones registradas para la presente tesis, se obtuvieron las propiedades que se muestran en la tabla 9:

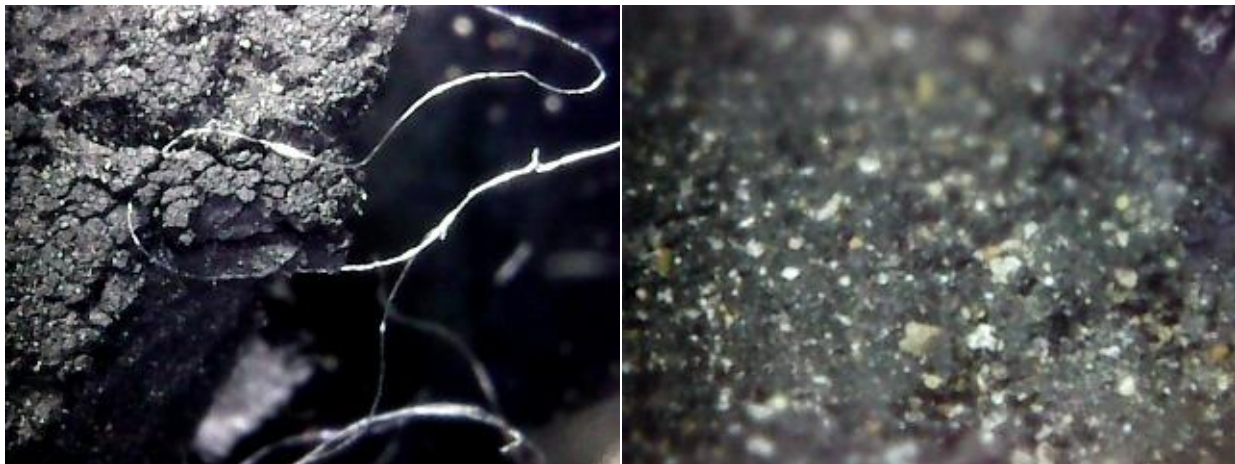
Concepto	Valor	Unidad
Peso por grano promedio	0.26	<i>gr</i>
Densidad	396.95	$\frac{kg}{m^3}$
Medida de grano*	11.061 x 4.35	<i>mm</i>
Coefficiente de fricción estática	0.83	

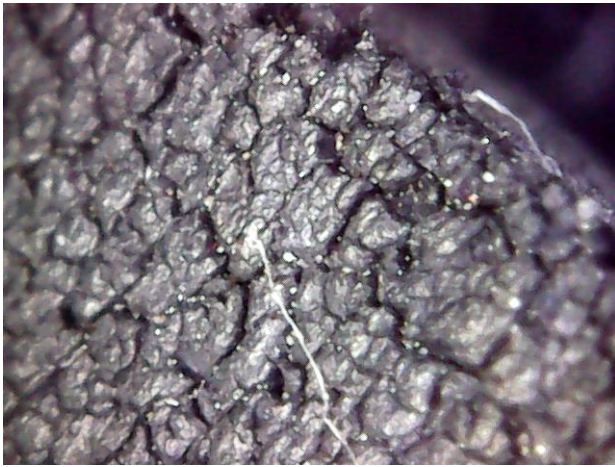
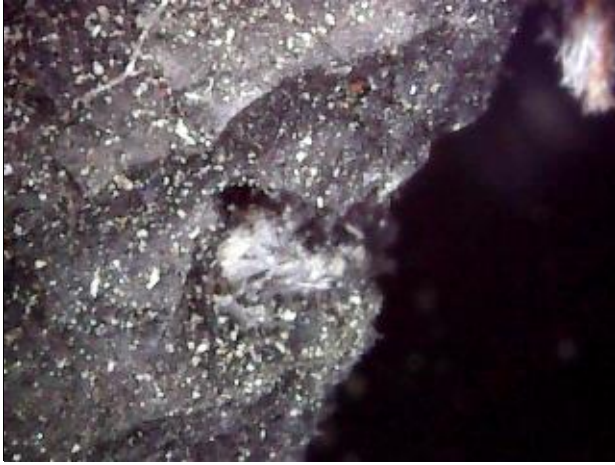
Tabla 09: Propiedades del grano de llanta.

\*El concepto de la medida del grano, se determinó al obtener el ancho, largo y alto promedio; dando los valores de: 13.432, 8.69 y 4.35 milímetros respectivamente, cuya forma que prepondera es la del rectángulo (como una especie de hojuela de hule) por lo que se conceptualizó a la hojuela en una silueta de un disco para obtener el coeficiente de arrastre, promediando los valores del ancho y largo para obtener 11.061mm de diámetro con 4.35mm de alto.

1. Groover M. P. (2007) *Fundamentos de Manufactura Moderna*. México: McGraw-Hill Interamericana.

Anexo 2: Imágenes de grano derivado del reciclaje de llantas con microscopio





### Anexo 3: Metodología de estimación del diámetro de la partícula

Se hizo uso de un microscopio digital que por su naturaleza no indicaba el aumento de la imagen, por lo que se tuvo que establecer una relación de imágenes capturadas por el microscopio y la medida real, estableciendo la siguiente imagen de una moneda de 10 centavos como patrón de conversión, como se muestra en la figura 47:

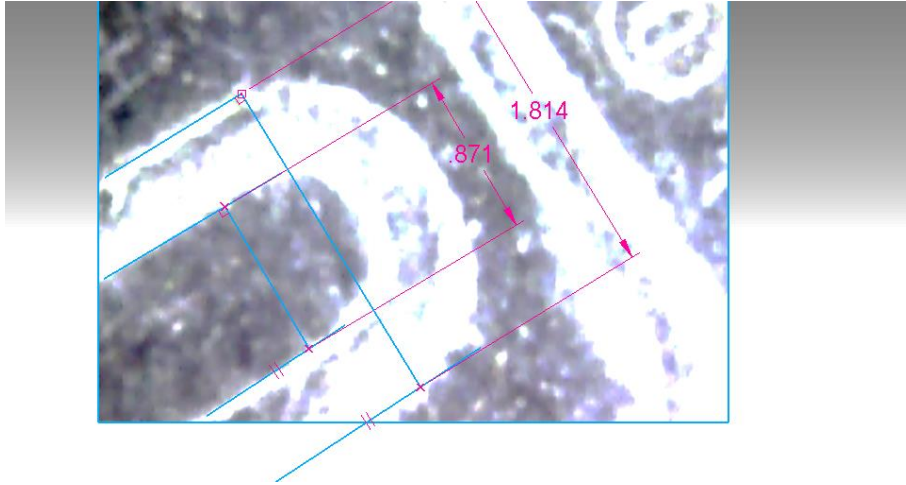
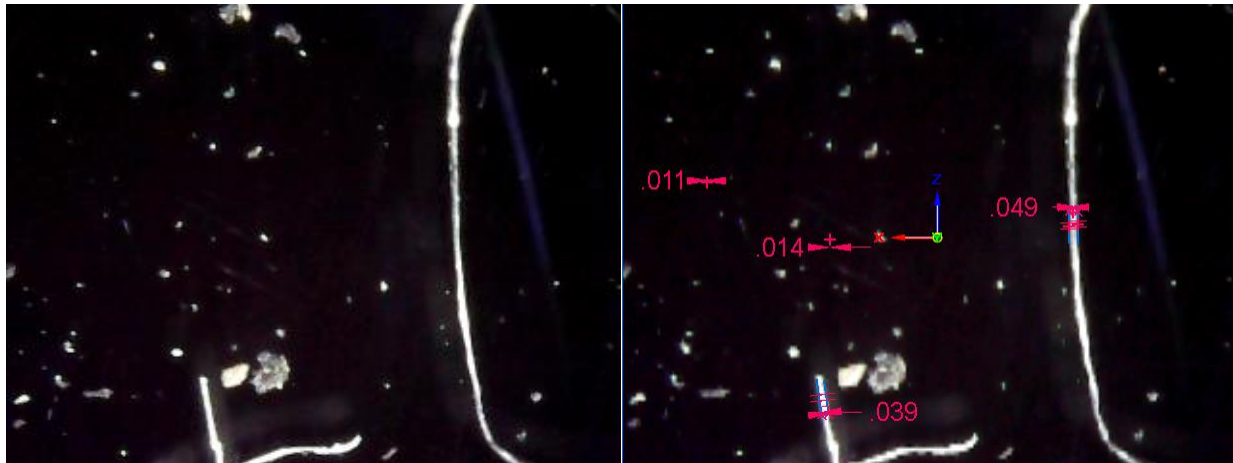
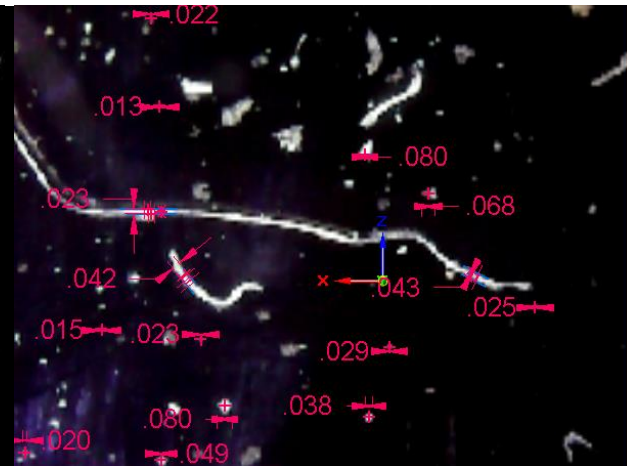
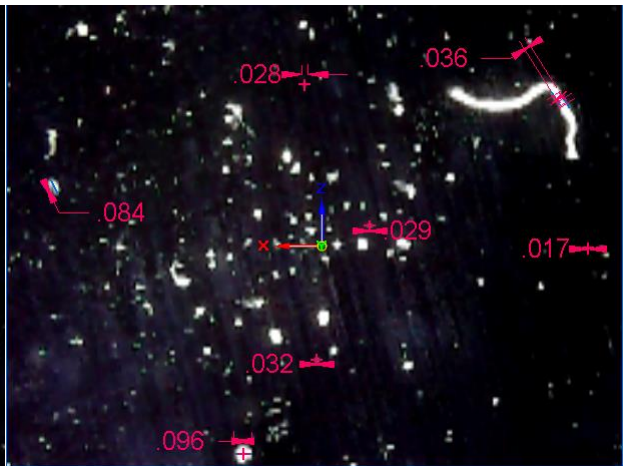
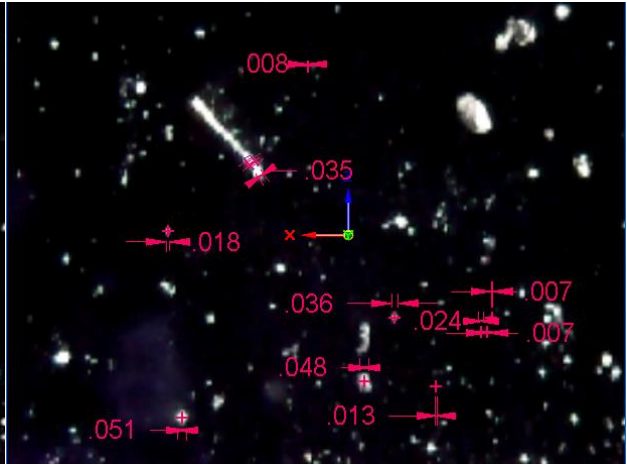


Figura 47: Foto de moneda de 10 centavos con microscopio digital.

Con el uso de Solid Edge para establecer correctamente las líneas paralelas y perpendiculares, se pudo establecer la relación que por cada 1.814 unidades medidas en Solid Edge equivalen a 3.48mm reales. A continuación se tomaron varias imágenes de las partículas desprendidas (textil y polvo) y se efectuaron mediciones aleatorias en Solid Edge para determinar su escala real como se muestra en la figura 48.





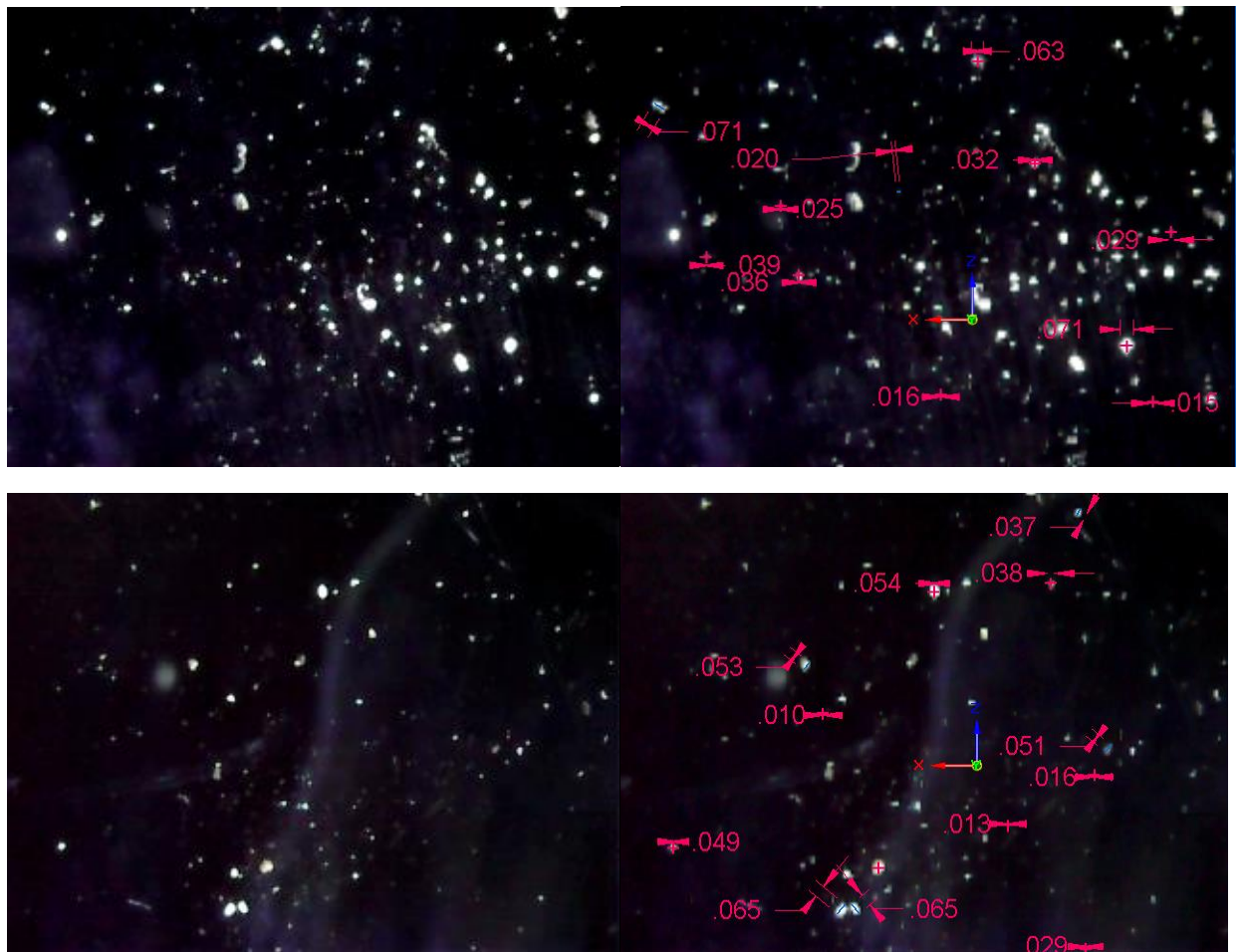


Figura 48: Imágenes capturadas de partículas y mediciones efectuadas en Solid Edge

Con 53 muestras se establecieron los datos estadísticos que componen la tabla 10 y la figura 49:

<i>Real</i>	
Media	0.070293524
Error estándar	0.005996389
Mediana	0.061389195
Moda	0.055633958
Desviación estándar	0.043654371
Varianza	0.001905704

Tabla 10: Medidas de dispersión del textil y el polvo.

Clase	Frecuencia
0.013428886	2
0.037820129	13
0.062211372	13
0.086602615	8
0.110993857	7
0.1353851	4
0.159776343	4
Mayor tamaño	2

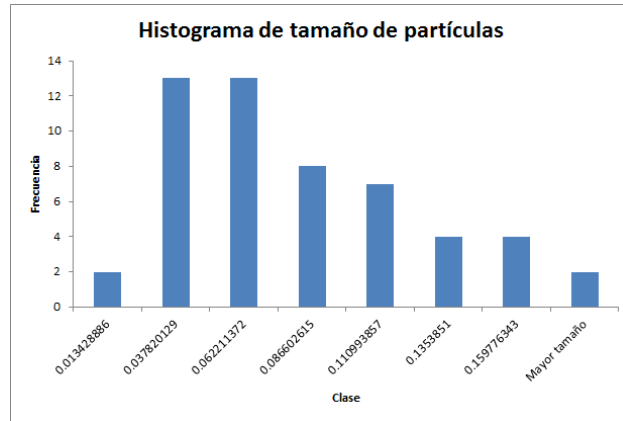


Figura 49: Histograma de tamaño de partículas, unidades en mm.

Considerando que el valor máximo obtenido fue de 184.168  $\mu\text{m}$  y el mínimo de 13.429  $\mu\text{m}$ .

Como se puede apreciar, se tiene una distribución no definida, sin embargo<sup>1 2 3</sup>; “Si la distribución poblacional es no normal, la distribución muestral de  $\bar{x}$  estará distribuida normalmente en forma aproximada para muestras grandes (por el teorema del límite central)” (Mendenhall, Beaver, Beaver, 2010:267).

Por lo que, acorde al teorema del eje central:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$$

Ec. 50

Siendo:  $Z$  la variable aleatoria normal estándar,  $X$  es el estimador,  $\mu$  es la media muestral,  $\sigma$  es la desviación estándar muestral y  $n$  es el tamaño de la muestra. Cabe señalar que: “Se debe de usar  $\sigma / \sqrt{n}$  (no  $\sigma$ ) en la fórmula para  $z$  porque estamos buscando un área bajo la distribución muestral para  $\bar{x}$ , no bajo la distribución de probabilidad para  $x$ .” (Mendenhall, Beaver, Beaver, 2010:269).

Como en la hipótesis se planteó un nivel de riesgo de 0.05, quiere indicar que el nivel de confianza es del 95% para las partículas, dando un valor de  $Z$  de 1.65 y quedando la solución de la ecuación 50, en términos de  $X$ :

$$X = Z \left( \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) + \mu$$

$$X = 1.65 \left( \frac{0.04365}{\sqrt{53}} \right) + 0.0703$$

$$X = 0.0802$$

Que quiere decir que para limpiar en un 95% del grano derivado del reciclaje, se requiere separar las partículas menores de  $80\mu\text{m}$ .

Para el posicionamiento de la segunda tolva y con base en las partículas menores al grano y mayores a  $80\mu\text{m}$ , se considerará la de mayor tamaño registrada de  $185\mu\text{m}$ , que es más que el 95% que son contenidas dentro de la distribución normal, ya que:

$$\mu + 2\sigma = 157\mu\text{m}$$

Otra medida obtenida es la del diámetro de las fibras de textil, dando un promedio de:

$$\mu_{\text{diámetro textil}} = 71.94\mu\text{m}$$

Al ser menores a los  $80\mu\text{m}$ , serán también separadas del grano de hule y saldrán por la boca de escape.

Nota: La prueba de hipótesis es bilateral o de dos colas y en el anexo 3 se maneja una prueba unilateral, ambas pruebas con el mismo nivel de confianza.

1. Teorema del límite central – Wikipedia, la enciclopedia libre (2019, Julio 16) Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Teorema\\_del\\_límite\\_central](https://es.wikipedia.org/wiki/Teorema_del_límite_central)

2. Tabla de distribución normal acumulada (2019, Julio 16) Recuperado de: <http://www.elosiodelosantos.com/sergiman/div/tablnorm.html>

3. El teorema del límite central: las medias de muestras grandes y aleatorias son aproximadamente normales – Minitab (2019, Julio 16) Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/data-concepts/about-the-central-limit-theorem/>

#### Anexo 4: Identificación de fibras textiles, determinación del tipo de nailon<sup>1</sup>

Una forma para identificar a las fibras, está basada en el uso de espectroscopia infrarroja, cromatografía gaseosa o el análisis térmico diferencial. Sin embargo, existe otro método para la distinción entre las muestras de textil, aplicada a las muestras homogéneas que consta de tres pruebas expresadas en la tabla 11, 12 y 13:

1	2	3	Clasificación
Al acercarse a la llama	En la placa caliente	En la llama	
Ni encoge ni funde.	Se carboniza por debajo de 337°C. No funde	Arde con llama irregular chisporroteante, dejando un residuo negro, hinchado, fácilmente pulverizable y emite un olor parecido al pelo quemado	Proteína
		Arde fácilmente, con un olor a papel quemado, dejando una pequeña cantidad de cenizas (o a veces con un olor a pescado, dejando un residuo esquelético oscuro).	Celulosa o celulosa tratada con resinas
		Arde fácilmente, apagándose al quitarlo de la llama, y dejando un residuo incandescente.	Alginato cálcico
	Ni funde ni carboniza	Funde en una bola clara y dura.	Vidrio
			Se pone incandescente pero conserva su forma original
Encoge o funde en una bola.	Funde por debajo de 337°C	Arde y gotea en la llama.	Termoplástico a baja temperatura
	No funde hasta 337°C	Arde y gotea en la llama. No arde	Nómex (Nylon HT-1) Teflón

Tabla 11: Identificación de muestras homogéneas de textiles.<sup>1</sup>

De los cuales, se obtuvo que al acercarse a la llama una muestra (figura 50); ésta se encogía. Se fundía pasando los 337°C (figura 51). Ardiendo y goteando en la llama (figura 52). Que con respecto a la tabla 11, se determina en este punto, la posibilidad de Nómex (Nylon HT-1) y de Teflón. Por lo que se hace un análisis de nailon y acrílicas, con la siguiente tabla:

m-Cresol a temperatura ambiente	Dimetil formamida a ebullición	La muestra es
Se disuelve		Nylon 6; 6,6 u 11
No se disuelve	Se disuelve	Acrílicas
	No se disuelve	Nómex (Nylon HT-1)

Tabla 12: Identificación de muestras nailon y acrílicas.<sup>1</sup>

Por el costo del m-Cresol y el dimetil formamida se soslayó esta prueba, Trabajando sólo con la mencionada en la siguiente tabla. Sin embargo; al ser alto el costo del ácido clorhídrico, se utilizó ácido muriático (drano) que contiene ácido clorhídrico<sup>2</sup>, pero con número desconocido de moles.



Ácido clorhídrico 4.4N	Ácido clorhídrico 5N	Punto de fusión	La muestra es
Se disuelve		230°C	Nylon 6
No se disuelve	Se disuelve	260°C	Nylon 6,6
	No se disuelve	185°C	Nylon 11
		400°C	Nómex (Nylon HT-1)

Tabla 13: Identificación de muestras nailon.<sup>1</sup>

En un horno convencional, en un rango de 230 - 250°C se empezó a disolver el textil (Figura 53); por lo que clasifica la muestra entre el **nylon 6 y 6,6** cuya densidad es la misma de 1150kg/m<sup>3</sup> y el peso específico con una gravedad de 9.78m/s<sup>2</sup> es de  $\gamma = 11247\text{N/m}^3$ .

Fotos de exámenes:



Figura 50: Prueba 1, acercamiento de llama.



Figura 51: Prueba 2, Haciendo uso de una estación de soldar a 346°C la muestra no se fundía, descartando la clasificación de termoplástico.



Figura 52: Prueba 3, en la llama.

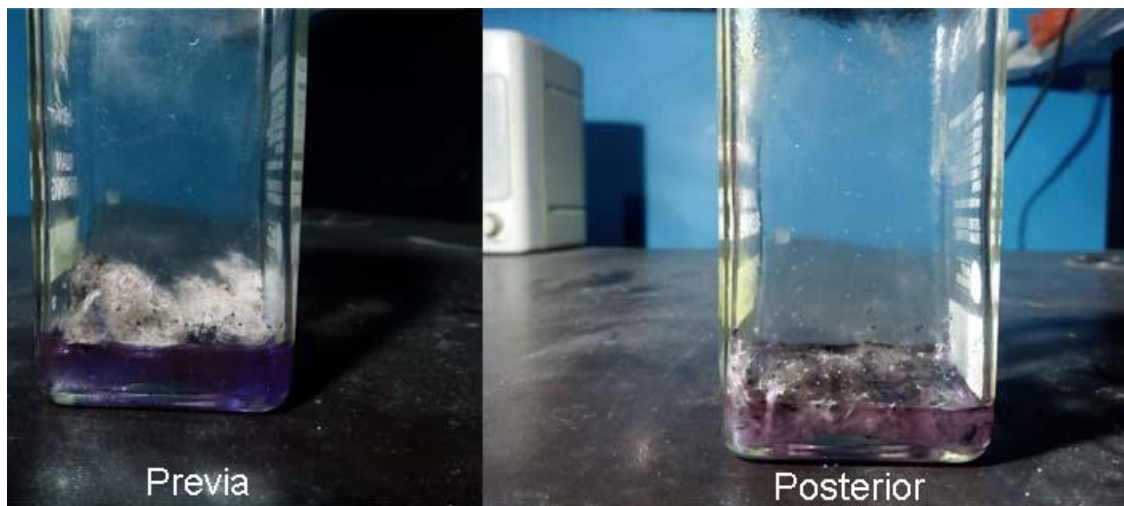


Figura 53: Prueba de tipo de nailon, en horno convencional a 230-250°C.

1. The Textile Institute (1968) *Identificación de fibras textiles*. Barcelona: Editorial Blume
2. Ácido clorhídrico – Wikipedia, la enciclopedia libre (2019, Julio 16) Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Ácido\\_clorhídrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Ácido_clorhídrico)

### Anexo 5: Identificación de fibras textiles, por estudio de laboratorio

Se efectuó un estudio de cremación\*, cuya gráfica DSC (diferencia escala calorimetría) se muestra en la figura 54 y nos muestra que para derretir un gramo de la fibra textil ( $\Delta H$ ) se requieren 38.32J/g, y su punto de fusión,  $T_m$ , es de 257.89°C. La temperatura de transición vítrea,  $T_g$ , se encuentra en el primer valle y es aproximadamente a los 45°C.

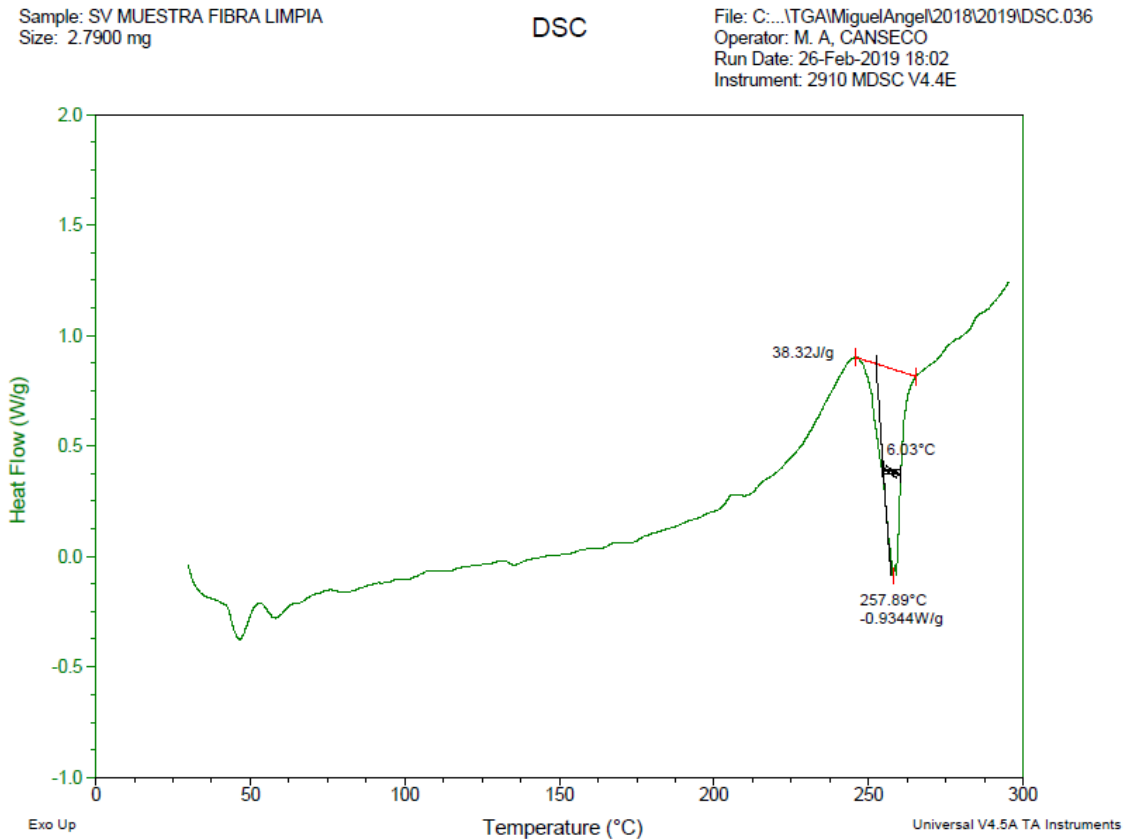


Figura 54: Estudio de cremación.

\* Estudio que al aplicar calor, muestra las diferentes transiciones del material hasta su punto de fusión.

Comparando la información con el tipo de nailon en la tabla 14:

Acrónimo	Polímero	$T_g$ [°C]	$T_m$ [°C]
Nylon 6	Nylon 6	40 - 87°	210 - 220°
Nylon 6,6	Nylon 6,6	50°	255 - 265°

Tabla 14: Valores  $T_g$  y  $T_m$  predeterminados para el Nylon 6 y Nylon 6,6.<sup>1</sup>

Por lo que se define que el textil es Nylon 6,6.

La figura 55 muestra un estudio de infrarrojo:

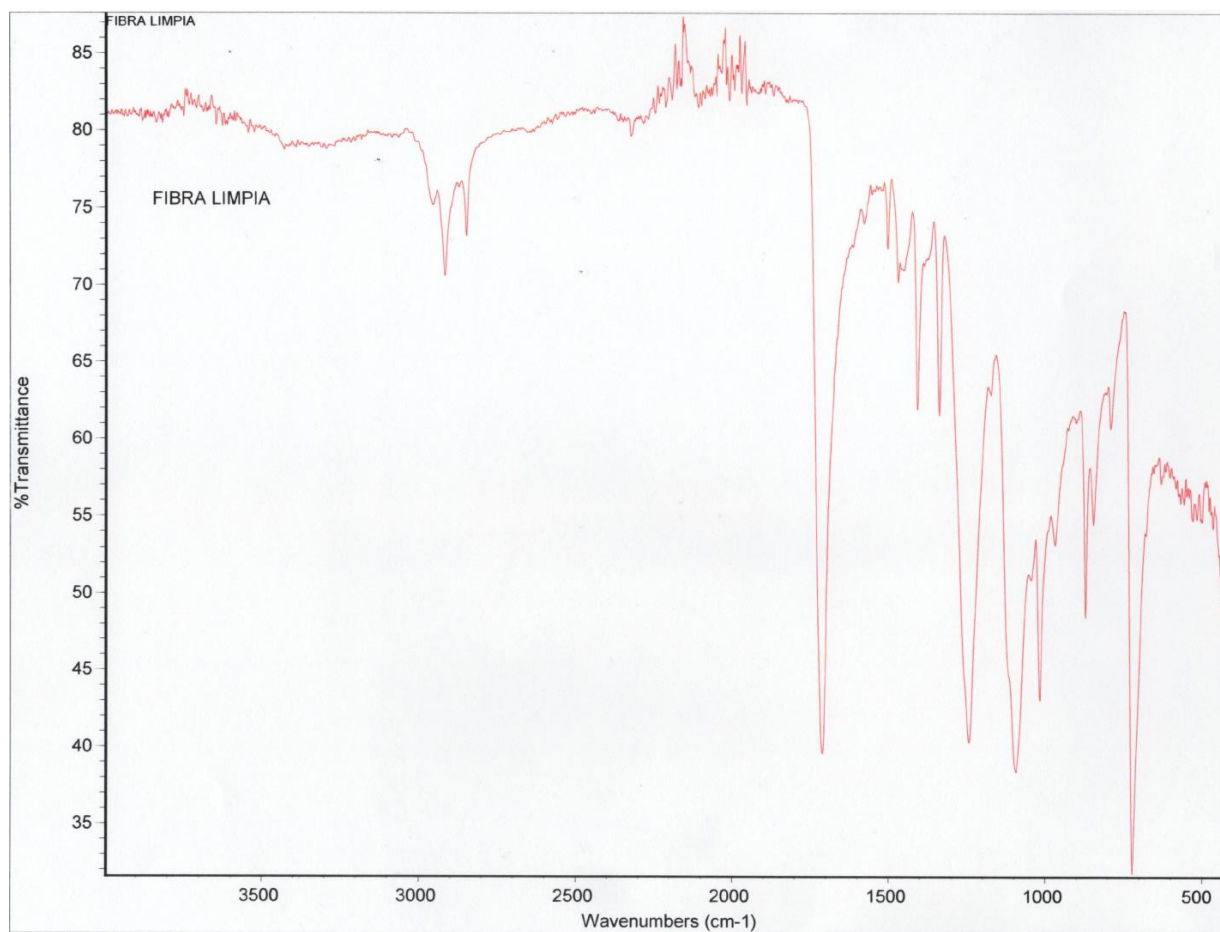


Figura 55: Estudio infrarrojo de textil.

Que muestra una correlación del 39.35% con respecto al tereftalato de polietileno (PET), como se muestra en la siguiente figura:

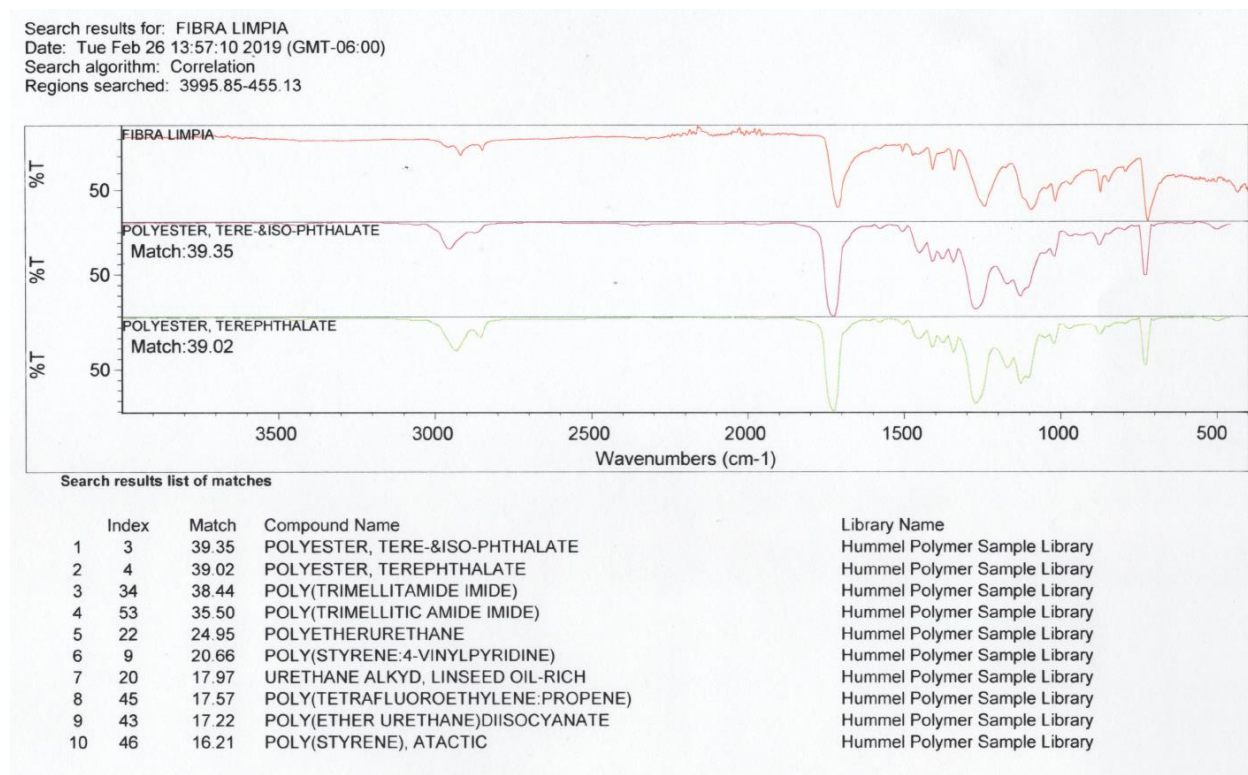


Figura 56: Comparativa de estudio infrarrojo de textil.

Se obtuvieron estos resultados, ya que las muestras textiles utilizadas tenían pequeñas partículas de grano de hule. Permittiéndose concluir que el textil con el que se trabaja para el diseño de la cámara no es puramente nylon 6,6; ya que contiene dichas partículas de granos que modifican sus propiedades.

1. Modern Plastics Encyclopedia Mid-October, Issue, Vol. 66. No 11 (1989) E.U.A: McGrawHill, Inc

#### Anexo 6: Determinación del grado de limpieza

Para determinar el grado de limpieza requerido para utilizar el grano en un proceso posterior de pintado o de aglomerado en el ámbito del reciclaje de neumáticos. Manualmente se limpió una muestra de 50 gramos. Y se trabajó con una báscula digital en libras por su mayor precisión en dichas unidades, obteniéndose las figuras 57 y 58.



a)

b)

Figura 57: Determinación del grado de limpieza: a) Peso del recipiente vacío. b) Peso del polvo y textil separados manualmente.

Como se muestra en la figura 56 inciso a y b, se puede notar que la diferencia en cuanto al peso del polvo y el textil en la muestra para estar limpia es de 0.001lb, que equivale a 0.4536gr, es decir; el 0.9072% del peso de la muestra de 50 gramos. Por lo que en una muestra de un kilo, se esperan 9.072 gramos de textil y polvo para considerar una muestra limpia.



a)

b)

Figura 58: Muestras en la superficie del grano: a) Material sin procesar. b) Material limpiado manualmente.



a)

b)

Figura 59: Polvo que se cae del grano: a) Material sin procesar. b) Material limpiado manualmente.

Anexo 7: Gráfico para determinar la velocidad terminal de sedimentación para partículas esféricas en el aire<sup>1</sup>

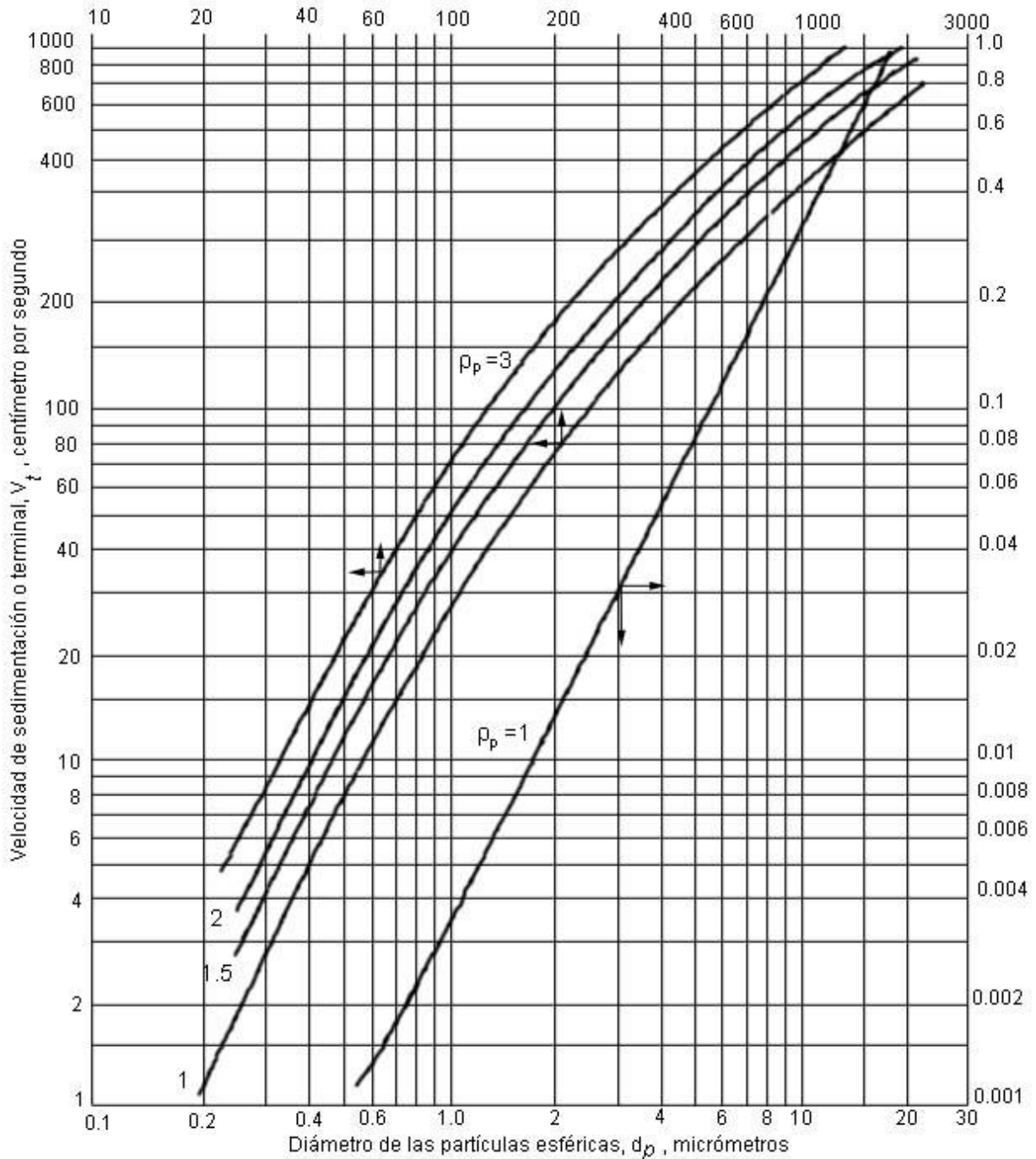


Figura 60: Gráfico para determinar el coeficiente de arrastre basado en el diámetro de la partícula comprendido en un número de Reynolds de 1 a 500 (densidad expresada en gramos por centímetro cúbico).<sup>1</sup>



1. Wark K., Warner C. F., (1998) *Contaminación del aire Origen y Control*. México: Editorial Limusa, S.A. de C.V.

Anexo 8: Gráfico para el coeficiente de arrastre basado en el número de Reynolds<sup>1</sup>

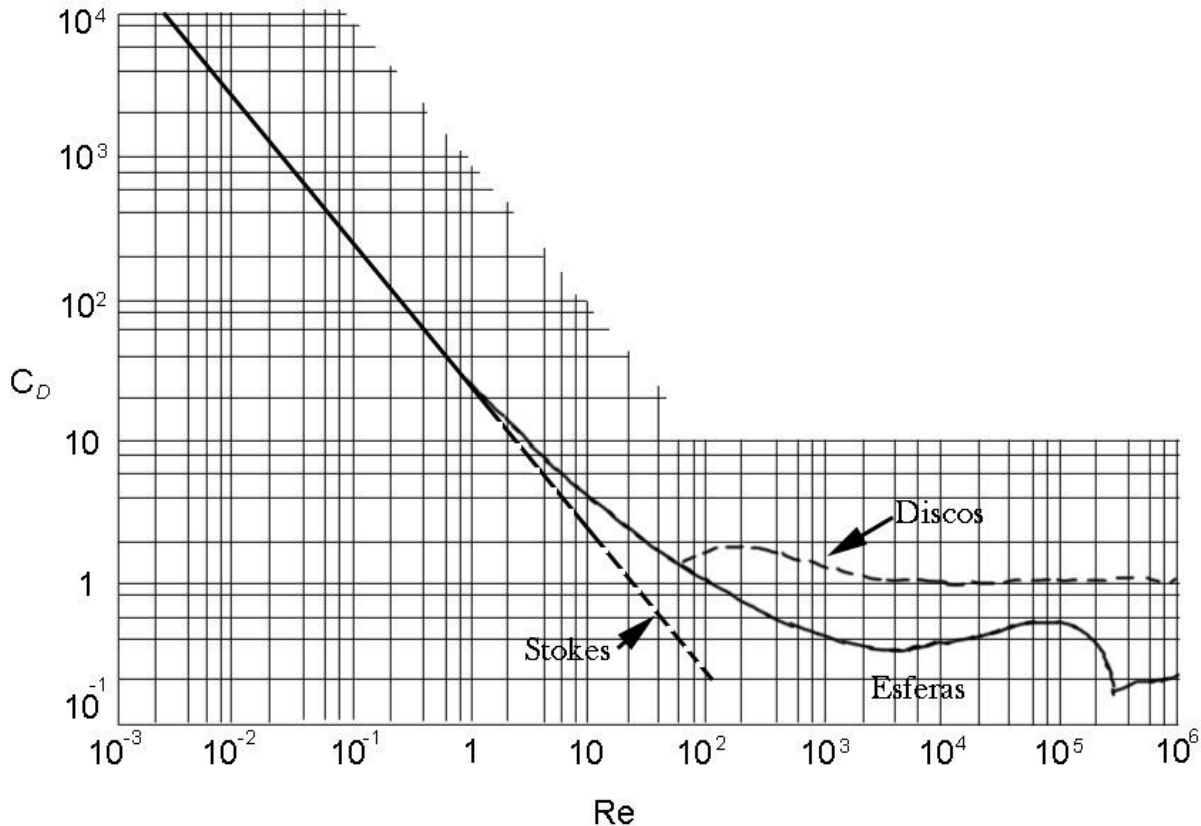


Figura 61: Gráfico para determinar el coeficiente de arrastre con base en el número de Reynolds.<sup>1</sup>

1. Streeter V. L.(1988) *Mecánica de los Fluidos*. México: McGraw Hill

Anexo 9: Cálculo de la fuerza de arrastre del grano derivado de llanta desechada

Cuando un objeto se encuentra sumergido en un fluido; existen dos componentes principales de fuerza que son ejercidas sobre el cuerpo, el arrastre y la sustentación (Figura 62). El arrastre se ejerce de manera paralela a la velocidad relativa del fluido y la sustentación se ejerce de manera normal. Dichas fuerzas son provocadas por la acción dinámica del fluido al rodear el cuerpo ya que la velocidad del fluido entrante, al rodear al cuerpo y por las características de las zonas; aumentará reduciendo la presión, esto provocará los esfuerzos cortantes y presiones sobre el área del cuerpo que es la aplicación de la ecuación de Bernoulli generada sobre el cuerpo sumergido. La sustentación es derivada de la presión y el arrastre se deriva de los efectos de la presión y de los esfuerzos cortantes.

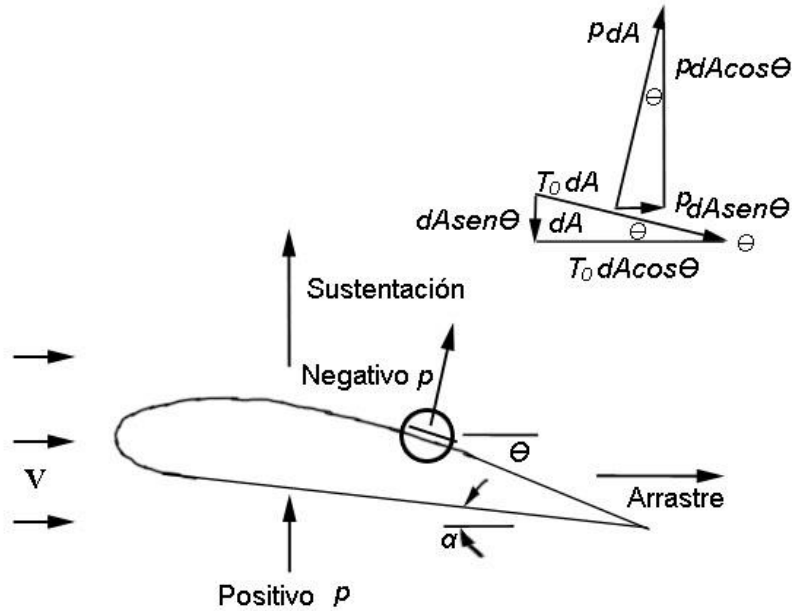


Figura 62: Fuerzas ejercidas en un cuerpo sumergido.<sup>1</sup>

El diferencial del arrastre  $d(\text{Arrastre})$  y el diferencial de sustentación  $d(\text{Sustentación})$  están dados por:

$$d(\text{Arrastre}) = \tau_0 dA \cos\theta + pdA \sin\theta$$

$$d(\text{Sustentación}) = -\tau_0 dA \sin\theta + pdA \cos\theta$$

Siendo,  $\tau$  es el esfuerzo cortante,  $dA$  es el diferencial del área y  $\theta$  es el ángulo en el que se generan las presiones. Integrando con respecto a la superficie:

$$\text{Arrastre} = \int (\tau_0 dA \cos\theta + pdA \sin\theta) dA$$

$$\text{Sustentación} = \int (-\tau_0 dA \sin\theta + pdA \cos\theta) dA$$

Se puede expresar el arrastre en términos del coeficiente de arrastre  $C_D$  y la presión de estancamiento  $\frac{\rho V^2}{2}$ :

$$\text{Arrastre} = C_D A \frac{\rho V^2}{2} \tag{Ec. 51}$$

Siendo  $A$ , el área proyectada del cuerpo en un plano paralelo al flujo.

En el desarrollo de la presente tesis se obtuvo un número de Reynolds para el grano de 225.38 y haciendo uso de la ecuación 11:

$$C_D = 0.22 + \frac{24}{225.38} [1 + 0.15(225.38)^{0.6}]$$

$$C_D = 0.7387$$

Aplicado en la ecuación 51, considerando la forma de disco del grano y la densidad mencionadas en el anexo 1, así como la velocidad de preferencia para la cámara de sedimentación, se obtiene:

$$Arrastre = 0.7387(0.011m \times 0.00435m) \left( 396.95 \frac{kg}{m^3} \right) \frac{\left( 0.3048 \frac{m}{s} \right)^2}{2}$$

$$Arrastre = 6.52 \times 10^{-4} N$$

Para conocer la fuerza necesaria para mover el grano de la llanta sobre la lámina galvanizada, se efectuó un análisis de cuerpo libre que se muestra en la figura 63:

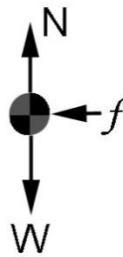


Figura 63: Diagrama de cuerpo libre de fuerzas necesarias para mover el grano.

Cuya fricción a vencer está dada por:

$$f = \mu_s mg$$

Ec. 52

Sustituyendo en la fórmula 52 con los datos del anexo 1:

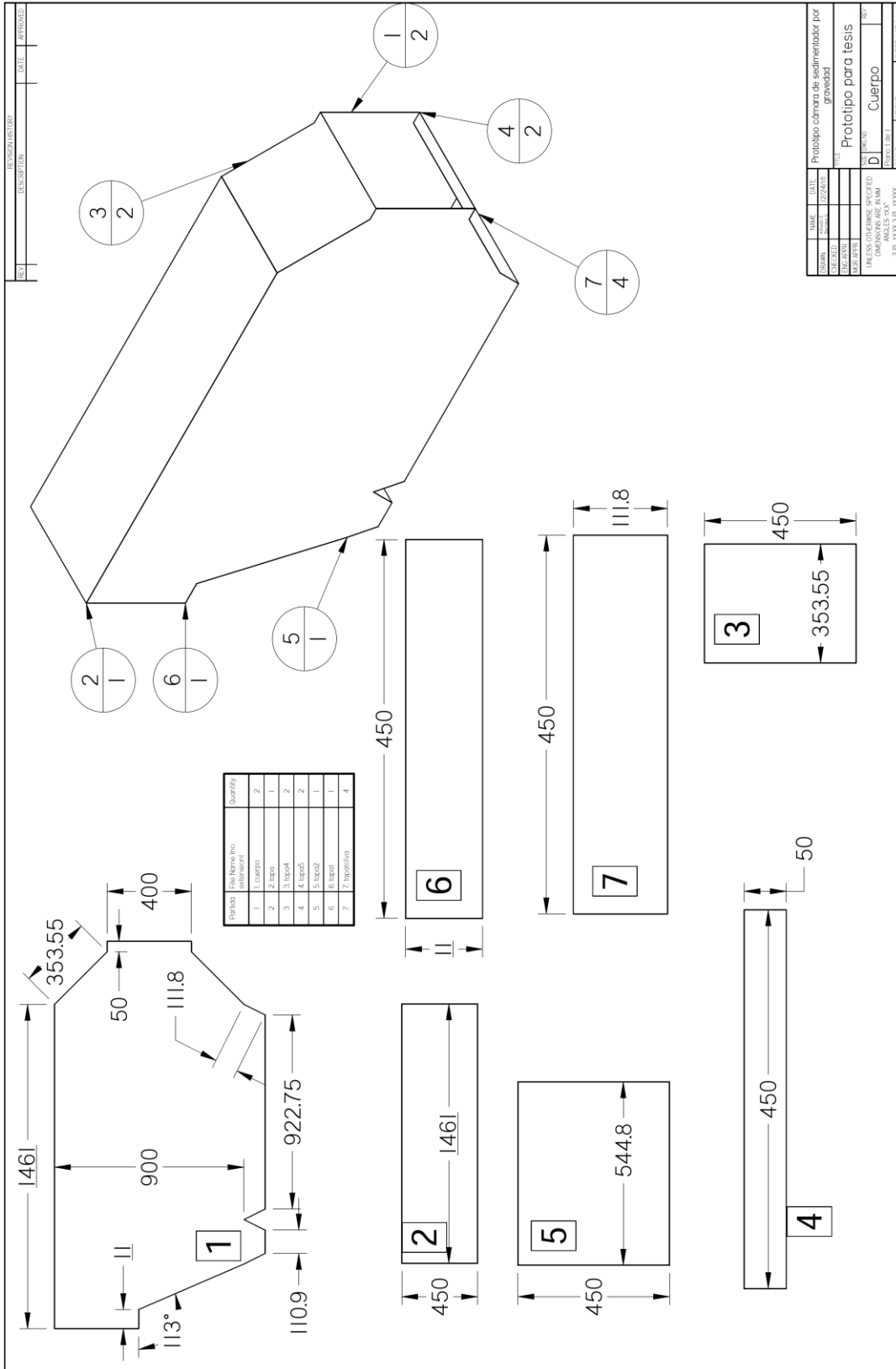
$$f = (0.83)(0.26 \times 10^{-3} kg) \left( 9.78 \frac{m}{s^2} \right)$$

$$f = 2.11 \times 10^{-3} N$$

Por lo que al relacionar la fuerza de arrastre con la fricción ( $Arrastre < Fricción$ ), se aprecia que con la velocidad de entrada de 0.3048m/s, no es posible mover un grano.

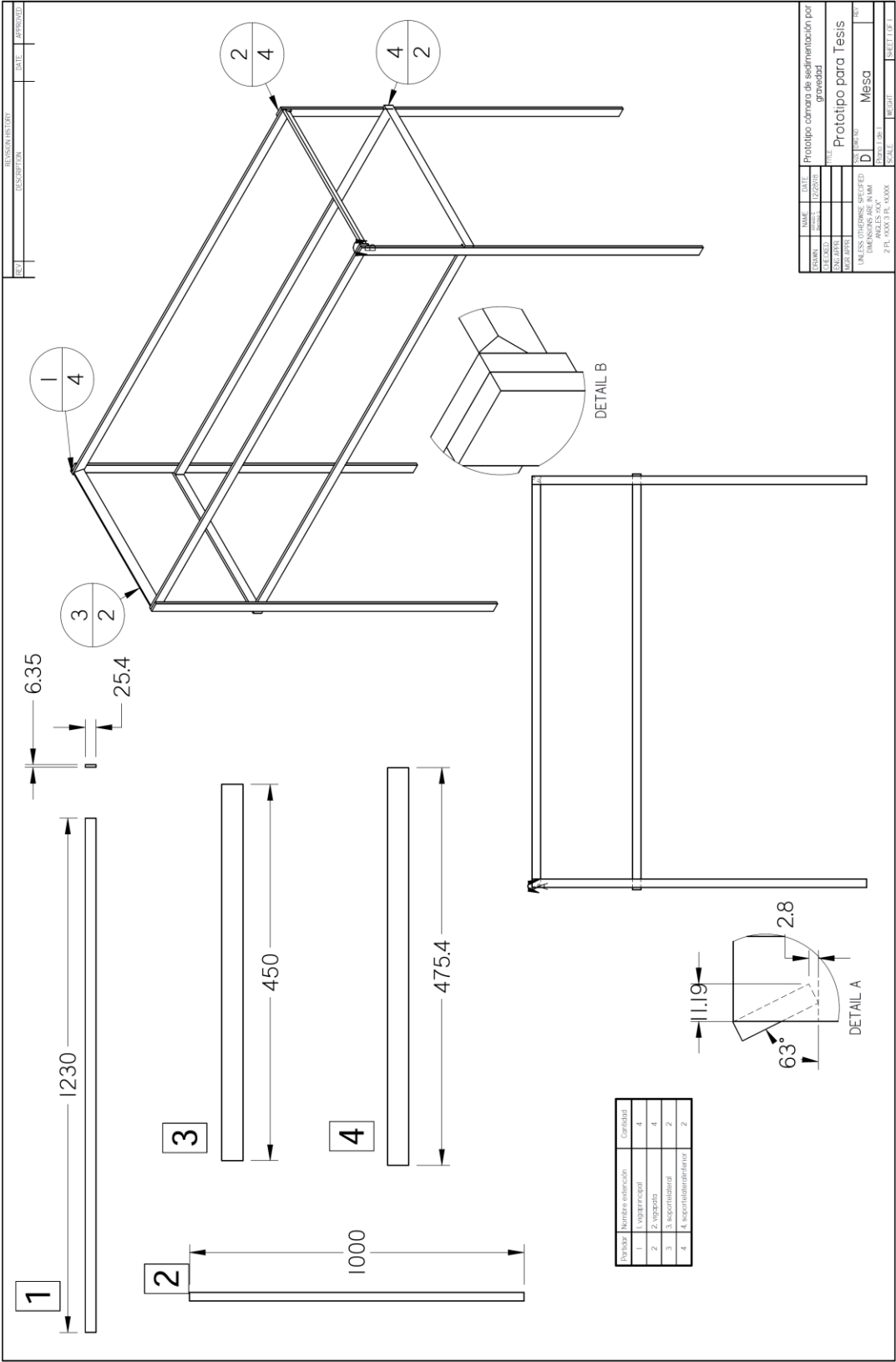
1. Streeter V. L.(1988) *Mecánica de los Fluidos*. México: McGraw Hill

### Anexo 10: Planos del prototipo\*

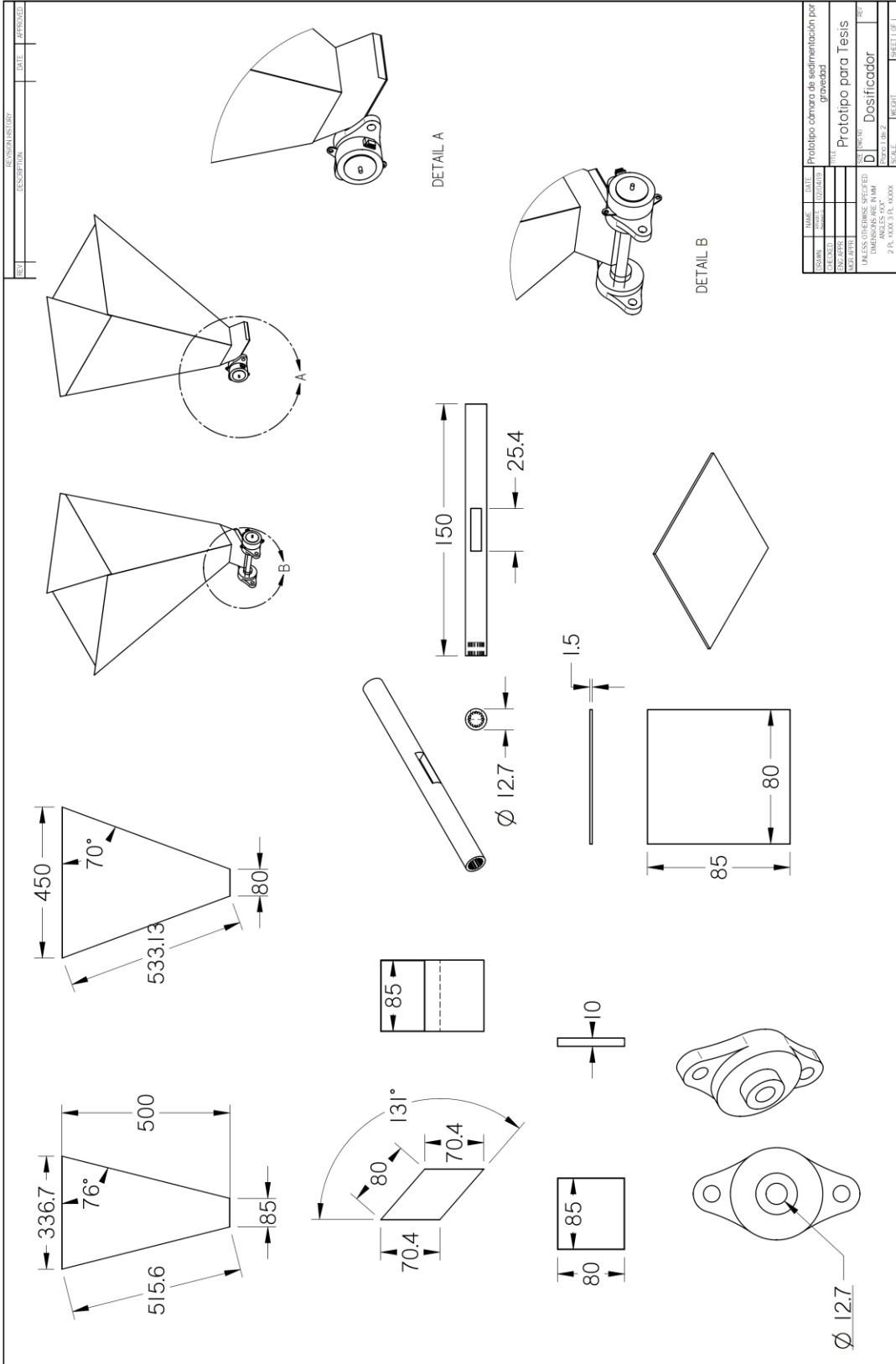


NO.	NOMBRE	FECHA	PROYECTO
1	PROYECTO	22/02/16	Prototipo cámara de sedimentación por gravedad
2	DESARROLLO		Prototipo para tesis
3	REVISIÓN		
4	REVISIÓN		
5	REVISIÓN		
6	REVISIÓN		
7	REVISIÓN		
8	REVISIÓN		
9	REVISIÓN		
10	REVISIÓN		
11	REVISIÓN		
12	REVISIÓN		
13	REVISIÓN		
14	REVISIÓN		
15	REVISIÓN		
16	REVISIÓN		
17	REVISIÓN		
18	REVISIÓN		
19	REVISIÓN		
20	REVISIÓN		
21	REVISIÓN		
22	REVISIÓN		
23	REVISIÓN		
24	REVISIÓN		
25	REVISIÓN		
26	REVISIÓN		
27	REVISIÓN		
28	REVISIÓN		
29	REVISIÓN		
30	REVISIÓN		
31	REVISIÓN		
32	REVISIÓN		
33	REVISIÓN		
34	REVISIÓN		
35	REVISIÓN		
36	REVISIÓN		
37	REVISIÓN		
38	REVISIÓN		
39	REVISIÓN		
40	REVISIÓN		
41	REVISIÓN		
42	REVISIÓN		
43	REVISIÓN		
44	REVISIÓN		
45	REVISIÓN		
46	REVISIÓN		
47	REVISIÓN		
48	REVISIÓN		
49	REVISIÓN		
50	REVISIÓN		
51	REVISIÓN		
52	REVISIÓN		
53	REVISIÓN		
54	REVISIÓN		
55	REVISIÓN		
56	REVISIÓN		
57	REVISIÓN		
58	REVISIÓN		
59	REVISIÓN		
60	REVISIÓN		
61	REVISIÓN		
62	REVISIÓN		
63	REVISIÓN		
64	REVISIÓN		
65	REVISIÓN		
66	REVISIÓN		
67	REVISIÓN		
68	REVISIÓN		
69	REVISIÓN		
70	REVISIÓN		
71	REVISIÓN		
72	REVISIÓN		
73	REVISIÓN		
74	REVISIÓN		
75	REVISIÓN		
76	REVISIÓN		
77	REVISIÓN		
78	REVISIÓN		
79	REVISIÓN		
80	REVISIÓN		
81	REVISIÓN		
82	REVISIÓN		
83	REVISIÓN		
84	REVISIÓN		
85	REVISIÓN		
86	REVISIÓN		
87	REVISIÓN		
88	REVISIÓN		
89	REVISIÓN		
90	REVISIÓN		
91	REVISIÓN		
92	REVISIÓN		
93	REVISIÓN		
94	REVISIÓN		
95	REVISIÓN		
96	REVISIÓN		
97	REVISIÓN		
98	REVISIÓN		
99	REVISIÓN		
100	REVISIÓN		

\* Diseñado en Solid Edge ST7



DESIGNER	NAME	DATE	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
		12/2016	Prototipo cámara de estabilización por gravedad		
DESIGN	TITLE				
DATE	PROJECT NO.				
SCALE	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED				
	DIMENSIONS ARE IN MM				
	2 PT, 0.003 PL, 0.000				
	COLOR	1.00	1.00		
	SHEET		TOTAL		



NO.	NAME	DATE	DESCRIPTION

Prototipo cámara de sedimentación por gravedad

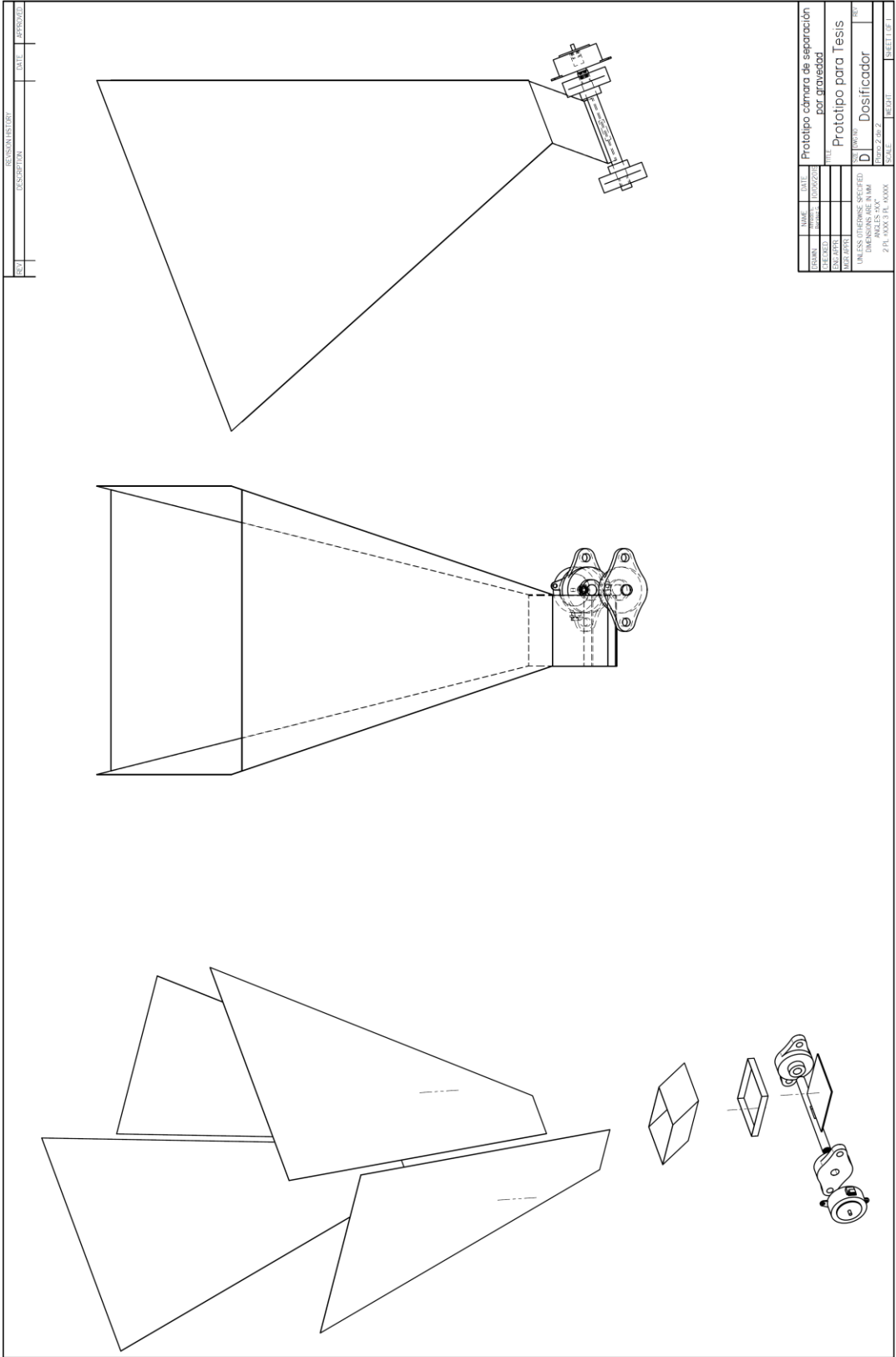
NO.	NAME	DATE	DESCRIPTION

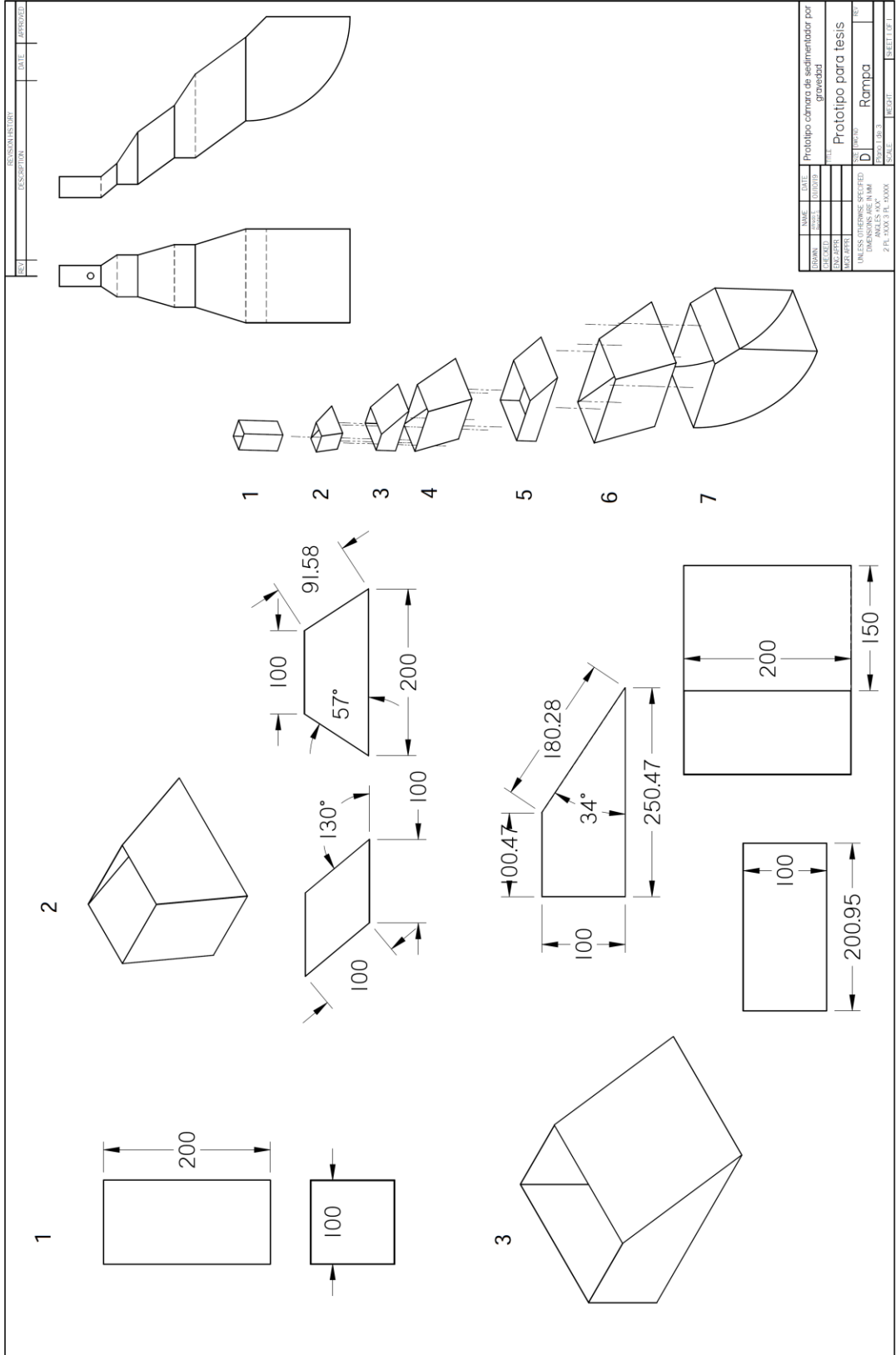
Prototipo para Tesis

NO.	NAME	DATE	DESCRIPTION

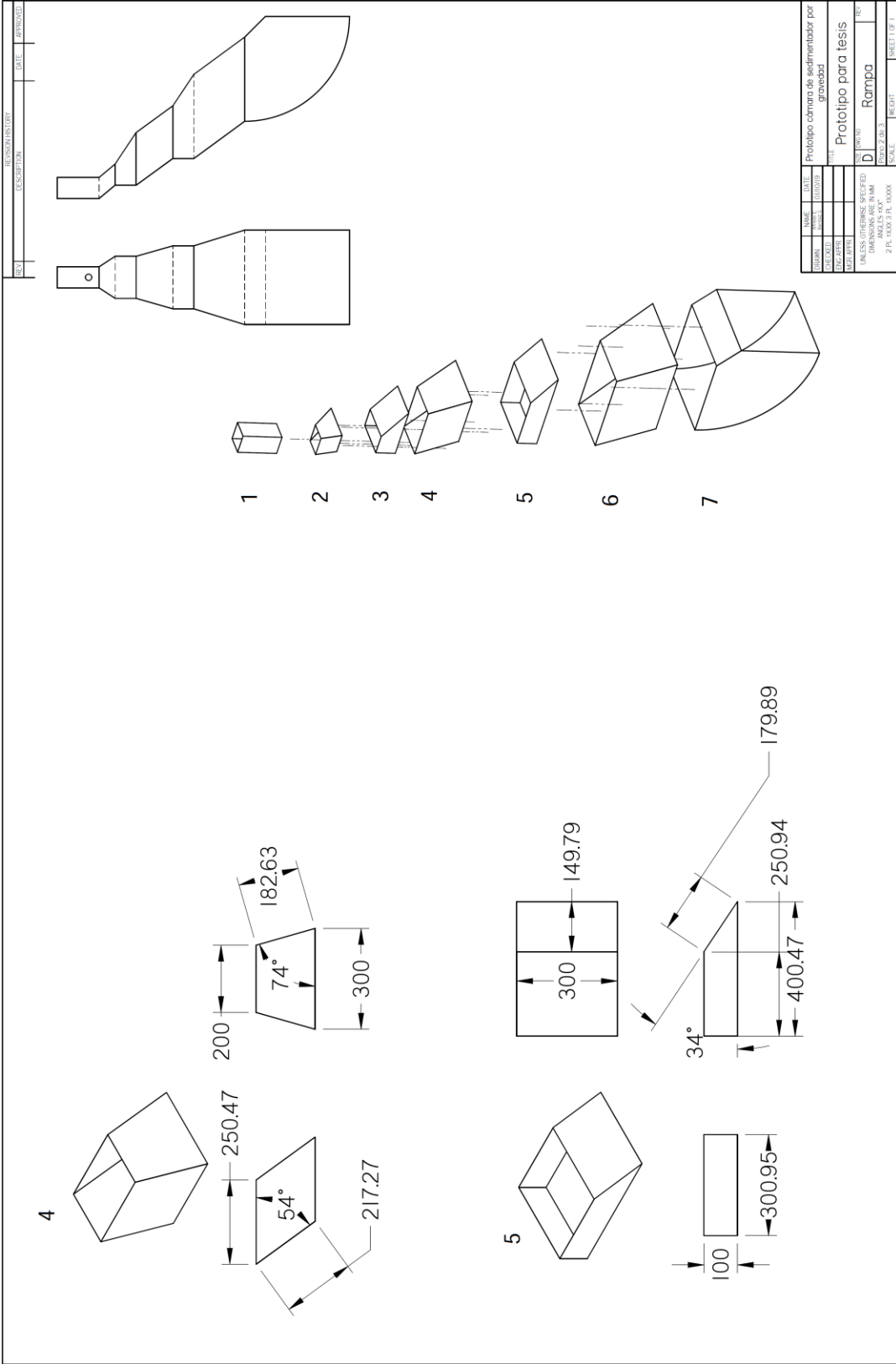
D Dosificador

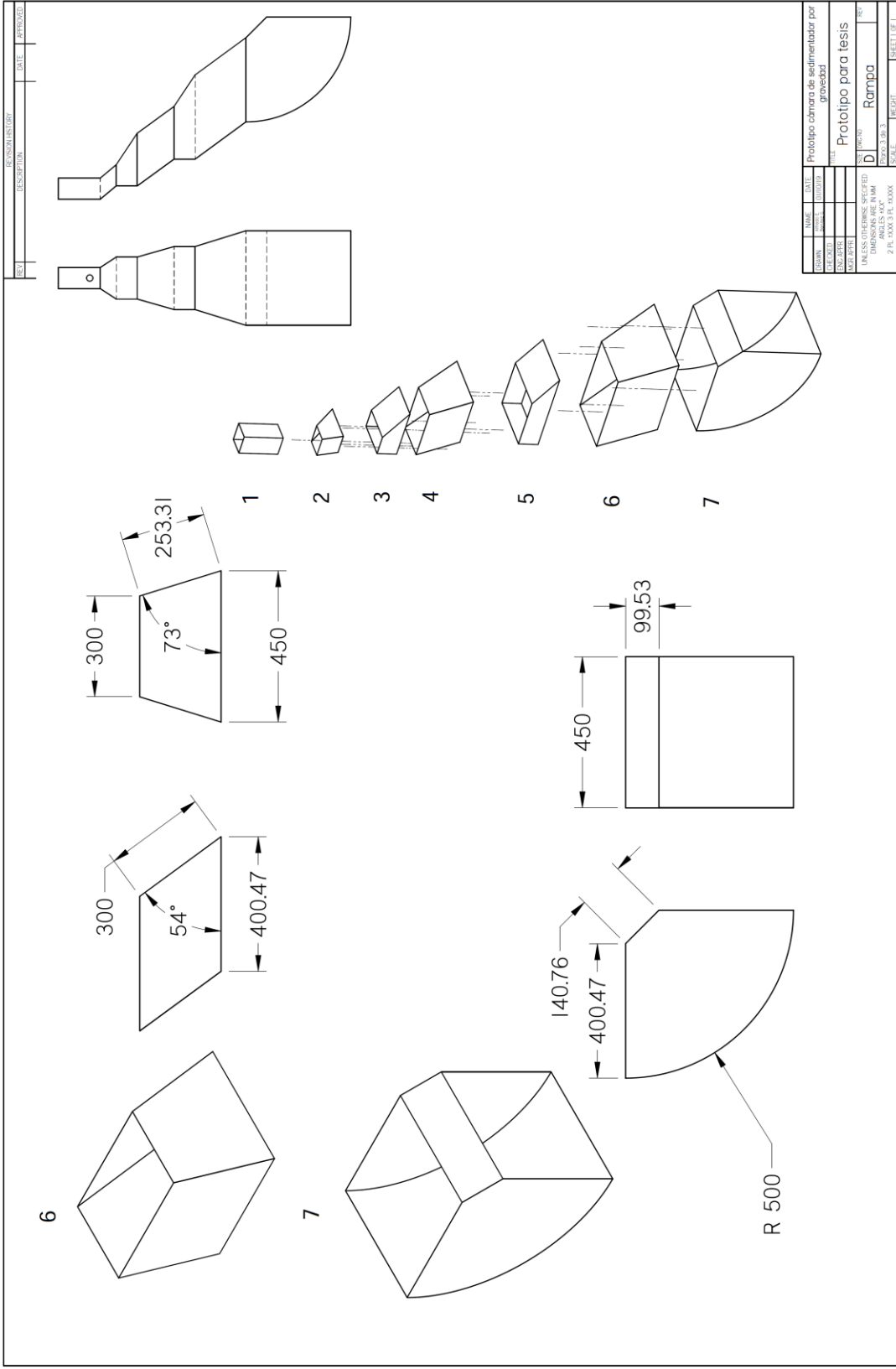
NO.	NAME	DATE	DESCRIPTION

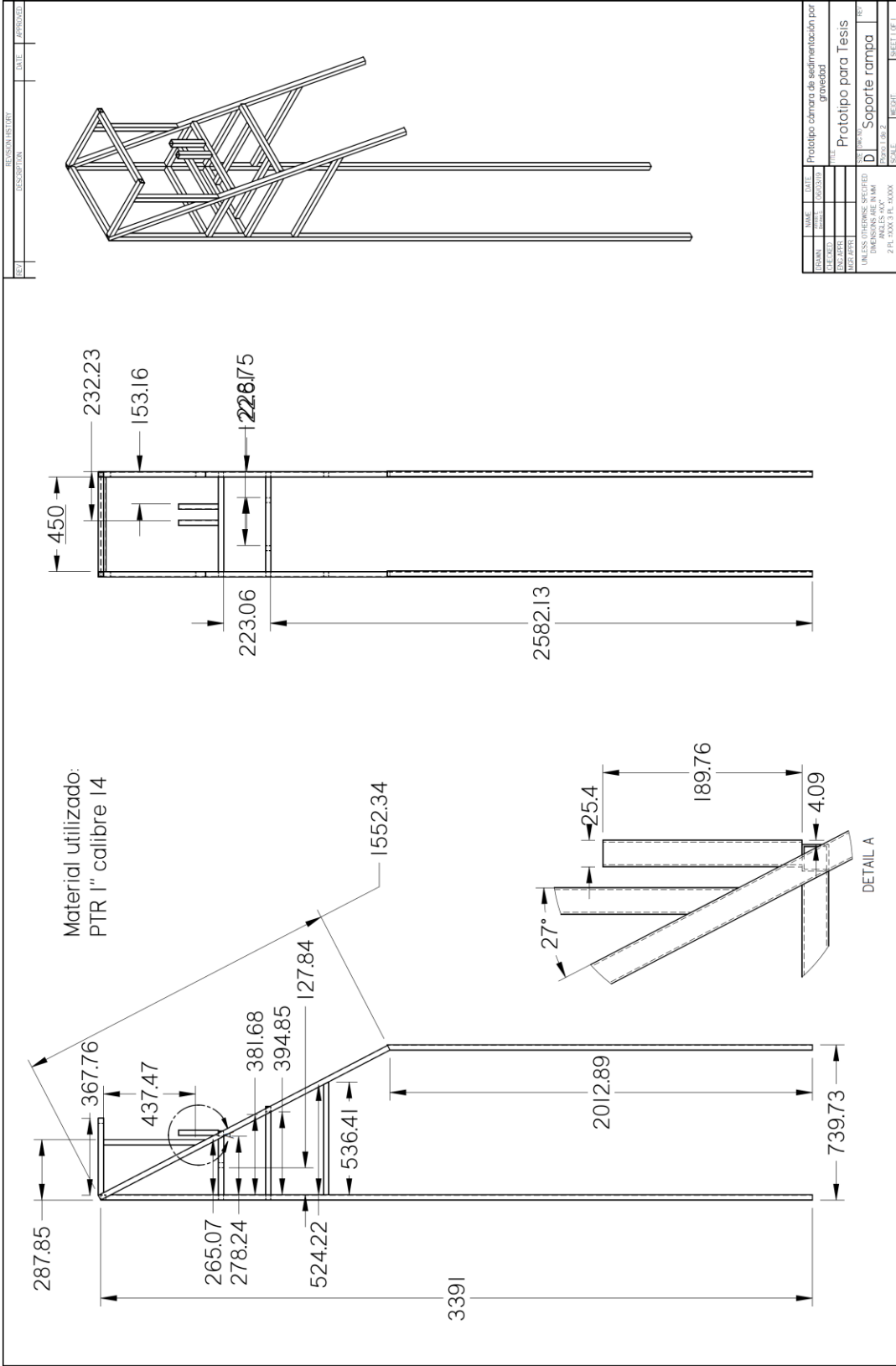






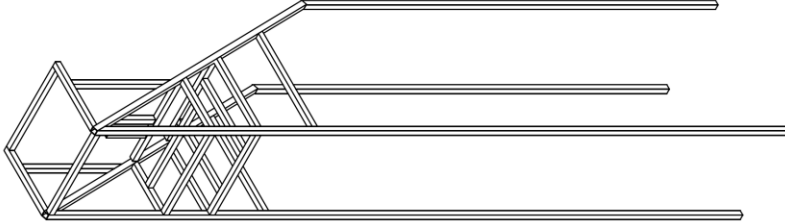


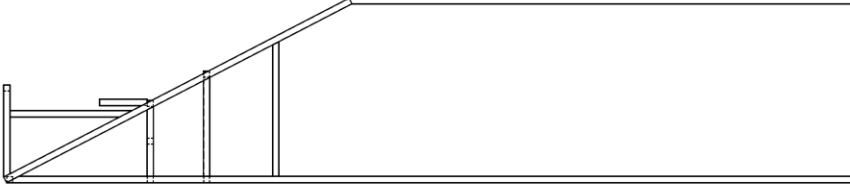


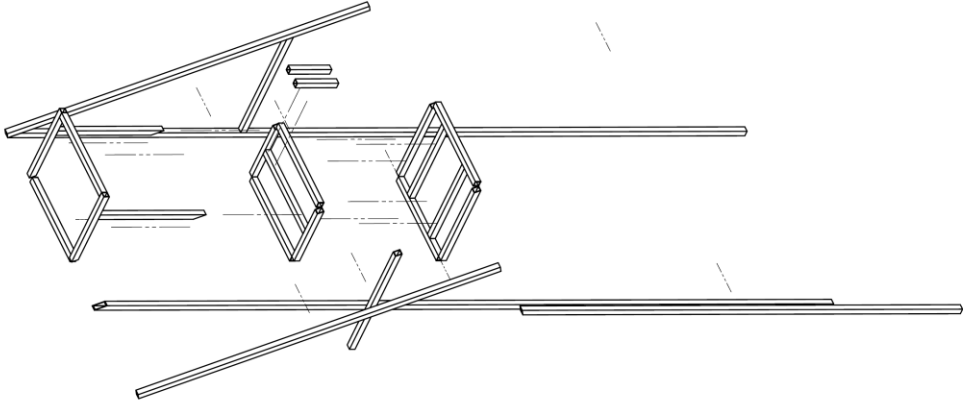


REV.	DESCRIPTION	DATE	APPROVED







DRAWN	NAME	DATE	TITLE
			Prototipo cámara de separación por gravedad
			Prototipo para Tesis

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED	DIMENSIONS ARE IN MM	SCALE	HEIGHT	SHEET NO.	SHEET TOTAL

Anexo 11: Galería de imágenes del prototipo



## Anexo 12: Hoja de datos del motor paso a paso, modelo PM55L-048<sup>1</sup>



Minebea Motor Manufacturing Corporation  
eMINEBEA.COM

# PM55L-048



PM Motor  
PM Type

### Reference Characteristics

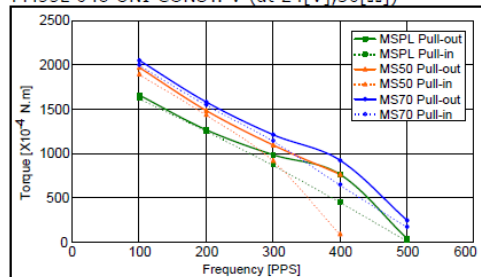
Motor Size	PM55L-048	
Number of Steps per Rotation	48(7.5°/Step)	
Drive Method	2-2 PHASE	
Drive Circuit	UNIPOLAR CONST. VOLT.	BIPOLAR CHOPPER
Drive Voltage	24[V]	24[V]
Current/Phase		800[ <i>mA</i> ]
Coil Resistance/Phase	30[ $\Omega$ ]	5.5[ $\Omega$ ]
Drive IC	25C3346	UDN2916B-V
Magnet Material	Ferrite plastic magnet (MSPL) Polar anisotropy ferrite sintered magnet (MS50) Nd-Fe-B bonded magnet (MS70)	
Insulation Resistance	100M[ $\Omega$ ] MIN	
Dielectric Strength	AC 500[V] 1[ <i>min</i> ]	
Class of Insulation	CLASS E	
Operating Temp.	-10[ $^{\circ}$ C] ~ 50[ $^{\circ}$ C]	
Storage Temp.	-30[ $^{\circ}$ C] ~ 80[ $^{\circ}$ C]	
Operating Hum.	20[%] RH ~ 90[%] RH	

### Applications

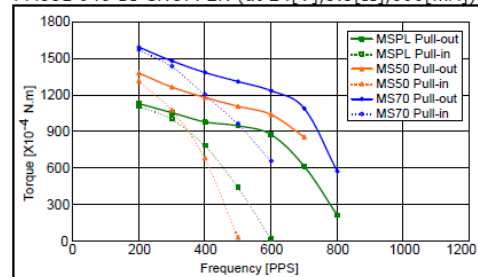
OA Equipment : Printers / Scanners  
Industrial equipment : Flow control valves  
Toys : Slot machines  
Home automation appliances : Sewing machines

### Torque Characteristics

PM55L-048 UNI-CONST. V (at 24[V],30[ $\Omega$ ])

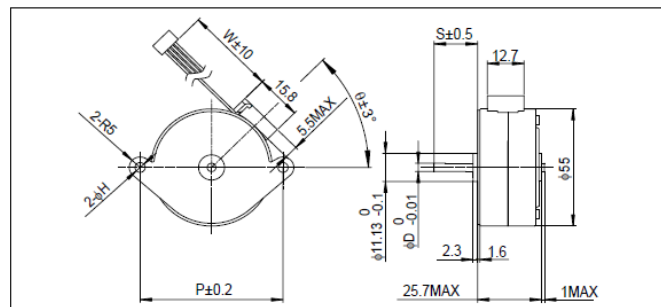


PM55L-048 BI-CHOPPER (at 24[V],5.5[ $\Omega$ ],800[*mA*])



These torque values are reference only. Heat radiation conditions and temperature rise effect by duty are different on each equipment, therefore please select motors after considering the heat conditions in the actual equipment.

### Dimensions



If you would like to know this Dimensions(D,S,W, $\theta$ ), Please see Standard Dimensions in our Home Page.

Copyright 2004, Minebea Co., Ltd.

1. PM10S020.ai (2019, Julio 16) Recuperado de:  
<https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/2209254.pdf>

### Anexo 13: Diseño de circuito elaborado en Proteus v8

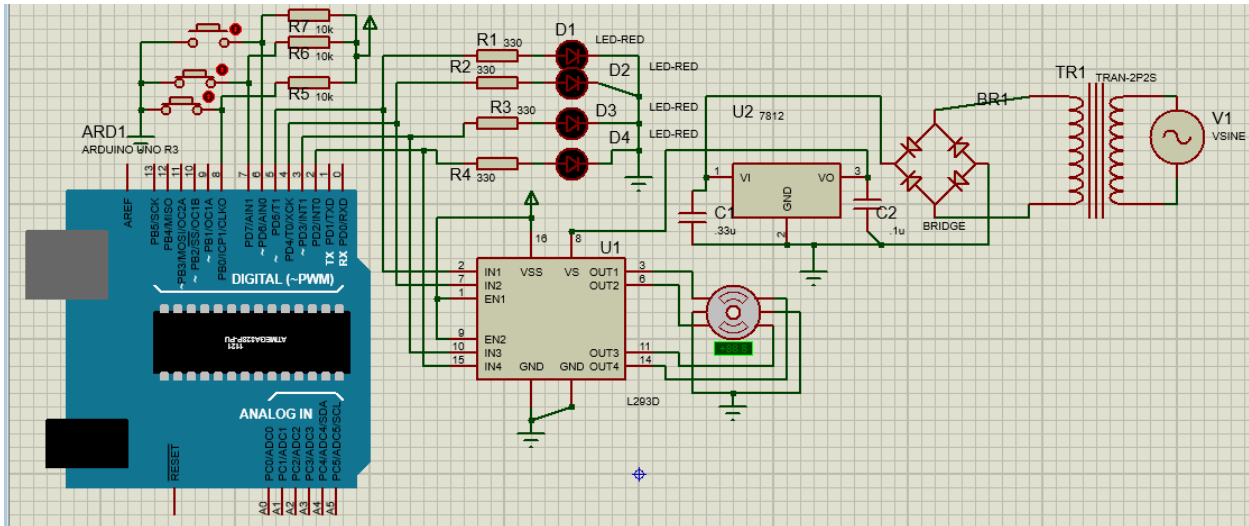


Figura 64: Diagrama de conexiones de circuito en Proteus.

### Anexo 14: Código desarrollado en Arduino para el motor paso a paso, modelo PM55L-048

```

#include <EEPROM.h>
int varCiclo=0;
int varCiclo2=0;
int A =2;
int B=3;
int C=4;
int D=5;
int TIEMPO =21; //10
int v_adeatras = 1; //determina si se avanzó o se está regresando
int addr = 0; //Dirección del eeprom para guardar.
int inAbre = 6;
int inCierra = 7;
int inParo = 8;
int var_BanderaCierra = 0;
long duration;
int reseteo_duracion = 0;

void(* Resetea) (void) = 0;

void setup()
{
  pinMode(A,OUTPUT);
  pinMode(B,OUTPUT) ;
  pinMode(C,OUTPUT);
  pinMode(D,OUTPUT);

  pinMode(inAbre,INPUT); //Cierra siempre
  pinMode(inCierra,INPUT) ; //Abre siempre
  pinMode(inParo,INPUT) ; //Detiene, botón de paro.
  Ajustainicio();
}

void Paso1(){//1100
  digitalWrite(A,HIGH);
  digitalWrite(B,HIGH);
  digitalWrite(C,LOW);
  digitalWrite(D,LOW);
  delay(TIEMPO);
}

void Paso2(){//0110
  digitalWrite(A,LOW);
  digitalWrite(B,HIGH);
  digitalWrite(C,HIGH);
  digitalWrite(D,LOW);
  delay(TIEMPO);
}

void Paso3(){//0011
  digitalWrite(A,LOW);
  digitalWrite(B,LOW);
  digitalWrite(C,HIGH);
  digitalWrite(D,HIGH);
  delay(TIEMPO);
}

void Paso4(){//1001
  digitalWrite(A,HIGH);
  digitalWrite(B,LOW);
  digitalWrite(C,LOW);
  digitalWrite(D,HIGH);
  delay(TIEMPO);
}

void Ciclo() { //Si se apaga o queda el ciclo a la mitad,
  regresa al punto inicial para empezar el proceso de abrir y
  cerrar.
  Paso4();Paso3();Paso2();Paso1();
}

void Ajustainicio(){ //Si se apaga o queda el ciclo a la mitad,
  regresa al punto inicial para empezar el proceso de abrir y
  cerrar.
  int valor = 0;
  int ade_atra = 0;
  int vaca = 0;
  ade_atra = EEPROM.read(v_adeatras);
  valor = EEPROM.read(addr);
  if(ade_atra == 0){

```

```

    vaca = (-1 * (valor-7));
}
if(ade_atra == 1){
    vaca = valor-1;
}
    switch(vaca){
    case 1: //1100
        Paso1(); break;
    case 2: //0011
        Paso2(); Paso1();break;
    case 3:
        Paso3();Paso2(); Paso1(); break;
    case 4:
        Ciclo();break;
    case 5:
        Paso1();Ciclo();break;
    case 6:
        Paso2();Paso1();Ciclo();break;
    case 7:
        Paso3();Paso2();Paso1();Ciclo();break;
    case 8:
        Ciclo();Ciclo();break;
    case 9:
        Paso1();Ciclo();Ciclo();break;
    case 10:
        Paso2();Paso1();Ciclo();Ciclo();break;
    case 11:
        Paso3();Paso2();Paso1();Ciclo();Ciclo();break;
    default: break;
    }
    EEPROM.write(addr, 1);
    EEPROM.write(v_adeatras, 1);
    var_BanderaCierra = 0;
}

void Abrepuerta(){ //Si se apaga o queda el ciclo a la mitad,
regresa al punto inicial para empezar el proceso de abrir y
cerrar.
    int valor = 0;
    int ade_atra = 0;
    int vaca = 0;
    ade_atra = EEPROM.read(v_adeatras);
    valor = EEPROM.read(addr);
    if(ade_atra == 0){
        vaca = (-1 * (valor-12));
    }
    if(ade_atra == 1){
        vaca = valor-1;
    }
    }
    switch(vaca){
    case 11: //1100
        Paso1(); break;
    case 10: //0011
        Paso2(); Paso1();break;
    case 9:
        Paso3();Paso2(); Paso1(); break;
    case 8:
        Ciclo();break;
    case 7:
        Paso1();Ciclo();break;
    case 6:
        Paso2();Paso1();Ciclo();break;
    case 5:
        Paso3();Paso2();Paso1();Ciclo();break;
    case 4:
        Ciclo();Ciclo();break;
    case 3:
        Paso1();Ciclo();Ciclo();break;
    case 2:
        Paso2();Paso1();Ciclo();Ciclo();break;

```

```

    case 1:
        Paso3();Paso2();Paso1();Ciclo();Ciclo();break;
    default: break;
    }
    EEPROM.write(addr, 1);
    EEPROM.write(v_adeatras, 1);
    var_BanderaCierra = 0;
}

void ChecarBotones(){
    int Var_a;
    //Si funciona esta rutina, pero está presentando falsos el
    arduino, en puertos 8, 9 , 13
    Var_a = digitalRead(inParo);
    if(Var_a == 1){ //Botón de paro
        for(int i = 1; i<=7; i++){
            Var_a = digitalRead(inParo);
            if(Var_a != 1){
                Var_a = 0;
                break;
            }
            i--;
        }
    }
    int Var_b;
    Var_b = digitalRead(inCierra);
    if(Var_b == 1 && var_BanderaCierra == 0){
        var_BanderaCierra = 1;
        for(int i = 1; i<=7; i++){ //18Abr19 sirve para que se
        quede en este ciclo, para siempre hasta que pase por
        resetea que manda al void
            Var_b = digitalRead(inCierra);
            if (var_BanderaCierra == 1){
                if (0 == EEPROM.read(v_adeatras) &&
                EEPROM.read(addr)!= 1){
                    int varTmp=0;
                    varTmp = EEPROM.read(addr) - 1;
                    EEPROM.write(addr, varTmp );
                }
                Ajustainicio(); //Después de que termina el
                Ajustainicio, se pone en esa rutina var_BanderaCierra = 0
            }
            if(Var_b != 1 && var_BanderaCierra == 0){
                Resetea();
            }
            i--;
        }
    }
}

/*
    int Var_c; //Primero checa si está el switch cerrado, tiene
    prioridad.
    Var_c = digitalRead(inAbre);
    if(Var_c == 1 && var_BanderaCierra == 0){
        var_BanderaCierra = 1;
        for(int i = 1; i<=12; i++){ //18Abr19 sirve para que se
        quede en este ciclo, para siempre hasta que pase por
        resetea que manda al void
            Var_b = digitalRead(inCierra);
            if (var_BanderaCierra == 1){
                if (0 == EEPROM.read(v_adeatras) &&
                EEPROM.read(addr)!= 1){
                    int varTmp=0;
                    varTmp = EEPROM.read(addr) - 1;
                    EEPROM.write(addr, varTmp );
                }
            }
            Abrepuerta(); //Después de que termina el
            Ajustainicio, se pone en esa rutina var_BanderaCierra = 0
        }
        if(Var_c != 1 && var_BanderaCierra == 0){

```



```

    Resetea();
  }
  i--;
}
}*/
}

void loop()
{
  varCiclo = 0;
  for(int i = 1; i<=7; i++)
  {
    EEPROM.write(v_adeatras, 1); // 1 es avanza 0 es
regresa
    EEPROM.write(addr, i);
    varCiclo++;
    switch(varCiclo){

      case 1: //1100
        Paso1();
        break;

      case 2: //0110
        Paso2();
        break;

      case 3://0011
        Paso3();
        break;

      case 4: //1001
        Paso4();
        varCiclo = 0;
        break;

      default:
        break;
    }
  }
  delay(2); //45
  varCiclo2 = 0;
  for(int j = 1; j<=7; j++)
  {
    EEPROM.write(v_adeatras, 0); // 1 es avanza 0 es
regresa
    EEPROM.write(addr, j);
    varCiclo2++;
    switch(varCiclo2){

      case 1:
        //Paso4();//1001
        Paso3();//0011
        break;

      case 2: //0011
        //Paso3();
        Paso2(); //0110
        break;

      case 3:
        //Paso2();
        Paso1();//1100
        break;

      case 4: //1100
        //Paso1();
        Paso4();//1001
        varCiclo2 = 0;
        break;

      default:
        break;
    }
  }
  delay(3000); //5000 tiempo de descanso después de
  cerrar, 50000 para prueba de peso de grano
  duration = millis() - (300000*reseteo_duracion);
  if(duration >300000){ //Es en milis, descanso cada 5
  minutos para 1 y medio de toma de aire.
    digitalWrite(A,HIGH);
    digitalWrite(B,HIGH);
    digitalWrite(C,HIGH);
    digitalWrite(D,HIGH);

    delay(90000); //descanso minuto y medio
    digitalWrite(A,HIGH);
    digitalWrite(B,HIGH);
    digitalWrite(C,LOW);
    digitalWrite(D,LOW);
    reseteo_duracion++;
    reseteo_duracion++;
  }
}
}

```

## Anexo 15: Marco legal (normas de seguridad)

Con base en las necesidades del desarrollo de una máquina eficiente, se tiene en mente que para el mismo desarrollo y diseño es necesario considerar todos los parámetros operativos y funcionales de la máquina, sin embargo; se pretende no excluir los del ámbito legal, que son de carácter obligatorio y además que beneficiara integralmente al diseño en todo los lineamientos y en el estudio del contexto que se atribuye en la elaboración de una máquina de cámara de separación por gravedad.

A continuación se enuncian los puntos principales y resumidos a atenderse en la elaboración e instalación de una máquina de cámara de separación por gravedad:

*NOTA: Es importante, recalcar que en la operación del filtrado del textil, sino se sella bien el equipo; se desprenderá al ambiente el textil puede causar problemas en los pulmones a los operadores, como neumoconiosis u otro problema.*

**NOM-004-STPS-1999** Sistema de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilicen en los centros de trabajo.

5.2 Elaborar un plan de estudio del riesgo.

5.3 Elaborar un plan de Seguridad y de Higiene para la Operación.

5.4 Capacitar a los trabajadores para la operación de la máquina.

7.1 Operación de la maquinaria y equipo.

El programa debe contener procedimientos para que:

- a) los protectores y dispositivos de seguridad se instalen en el lugar requerido y se utilicen durante la operación;
- b) se mantenga limpia y ordenada el área de trabajo;
- c) la maquinaria y equipo estén ajustados para prevenir un riesgo;
- d) las conexiones de la maquinaria y equipo y sus contactos eléctricos estén protegidos y no sean un factor de riesgo;
- e) el cambio y uso de la herramienta y el herramental se realice en forma segura;
- f) el desarrollo de las actividades de operación se efectúe en forma segura;
- g) el sistema de alimentación y retiro de la materia prima, subproducto y producto terminado no sean un factor de riesgo.

7.2 Darle mantenimiento al equipo.

7.2.1 Darle capacitación para el mantenimiento.

7.2.2 La periodicidad y el procedimiento para realizar el mantenimiento preventivo y, en su caso, el correctivo, a fin de garantizar que todos los componentes de la maquinaria y equipo estén en condiciones seguras de operación, y se debe cumplir, al menos, con las siguientes condiciones:

- a) al concluir el mantenimiento, los protectores y dispositivos deben estar en su lugar y en condiciones de funcionamiento;
- b) cuando se modifique o reconstruya una maquinaria o equipo, se deben preservar las condiciones de seguridad;
- c) el bloqueo de energía se realizará antes y durante el mantenimiento de la maquinaria y equipo, cumpliendo además con lo siguiente:
  - 1) deberá realizarse por el encargado del mantenimiento;

- 2) deberá avisarse previamente a los trabajadores involucrados, cuando se realice el bloqueo de energía;
- 3) identificar los interruptores, válvulas y puntos que requieran inmovilización;
- 4) bloquear la energía en tableros, controles o equipos, a fin de desenergizar, desactivar o impedir la operación de la maquinaria y equipo;
- 5) colocar tarjetas de aviso;
- 6) colocar los candados de seguridad;
- 7) asegurarse que se realizó el bloqueo;
- 8) avisar a los trabajadores involucrados cuando haya sido retirado el bloqueo. El trabajador que colocó las tarjetas de aviso, debe ser el que las retire.

7.2.3 Se debe llevar un registro del mantenimiento preventivo y correctivo que se le aplique a la maquinaria y equipo, indicando en que fecha se realizó; mantener este registro, al menos, durante doce meses.

**NOM-006-STPS-2014** Manejo y almacenamiento de materiales-condiciones de seguridad y salud en el trabajo.

5.8 Contar con un manual de primeros auxilios para la atención a emergencias, con base en el tipo de riesgos a que están expuestos los trabajadores que realizan el manejo y almacenamiento de materiales.

5.9 Efectuar la vigilancia a la salud de los trabajadores que llevan a cabo el manejo y almacenamiento de materiales, expuestos a sobreesfuerzo muscular o postural.

7. Manejo y almacenamiento de materiales por medio del uso de maquinaria.

7.4 Los procedimientos para la instalación de la maquinaria empleada en el manejo y almacenamiento de materiales en los centros de trabajo deberán considerar, según aplique, lo siguiente:

- a) Las condiciones de estabilidad y resistencia del terreno de la zona, área o lugar donde se ubicará;
- d) Las medidas de seguridad señaladas por el fabricante, según aplique para:
  - 1) El ensamble y desensamble de sus componentes;
  - 2) La fijación de sus componentes;
  - 3) El montaje y suspensión de cables, cadenas y partes en movimiento;
  - 4) La alimentación de energía o suministro de combustibles;
  - 5) La delimitación o señalización del área de operación;
  - 6) La conexión a tierra, y
  - 7) El acceso seguro del operador.

7.8 En los centros de trabajo se deberá cumplir con las medidas de seguridad de la maquinaria empleada para realizar las actividades de manejo y almacenamiento de materiales, según corresponda, que a continuación se indican:

7.8.1 Medidas generales de seguridad.

- a) Realizar al inicio de cada jornada una revisión visual y prueba funcional de la maquinaria, según aplique, para verificar el buen estado y funcionamiento de los elementos siguientes:
  - 1) Controles de operación y de emergencia;
  - 2) Dispositivos de seguridad;
  - 3) Sistemas neumáticos, hidráulicos, eléctricos y de combustión;
  - 4) Señales de alerta y control;
  - 5) Estado físico que guarda la estructura en general, y
  - 6) Cualquier otro elemento especificado por el fabricante;
- b) Contar con dispositivos de paro de emergencia de la maquinaria, y con avisos sobre su capacidad máxima de carga;
- c) Disponer de al menos un extintor del tipo y capacidad específica a la clase de fuego que se pueda presentar;

- d) Delimitar y evitar el acceso a las áreas de operación de la maquinaria a trabajadores o personas ajenas a los trabajos de manejo de materiales, así como mantener dichas áreas libres de obstáculos;
- g) Supervisar que los trabajadores usen el equipo de protección personal durante el desempeño de sus actividades;
- h) Dar seguimiento al programa específico de revisión y mantenimiento para la maquinaria;
- i) Revisar la maquinaria por personal capacitado, en los casos siguientes:
  - 1) Cuando se detecten condiciones anormales durante su operación;
  - 2) Después de la sustitución o reparación de alguna pieza sometida a esfuerzos, y
  - 3) Con base en el programa específico de revisión y mantenimiento, establecido, conforme a la frecuencia indicada por el fabricante;
- j) Contar con protecciones en las partes de la maquinaria que puedan generar riesgos a los trabajadores, de acuerdo con lo que prevé la NOM-004-STPS-1999, o las que la sustituyan;
- k) Prohibir que se exceda la carga máxima de utilización de la maquinaria empleada en el manejo de materiales;
- n) Prohibir que menores de 18 años y mujeres en estado de gestación realicen actividades de instalación, operación o mantenimiento de la maquinaria utilizada en el manejo de materiales.

**NOM-017-STPS-2008** Equipo de protección selección, uso y manejo en los centros de trabajo.

- 5.2 Identificar los riesgos del trabajo.
- 5.4 Dotar de equipo al obrero para atenuar los riesgos.
- 5.5 Comunicar los riesgos al trabajador.
- 5.6 Capacitar al operador para el uso del equipo.
- 5.7 Supervisar que se utilice el equipo de seguridad.
- 5.6 Señalizar.

**NOM-026-STPS-2008** Colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos por tuberías. (Ver anexo 16)

- 5.2 Proporcionar a los trabajadores la capacitación sobre la correcta interpretación.
- 5.4 Ubicar bien las señales.

Que adviertan:

- Acción obligatoria.
- Existencia de riesgos y peligros.
- Prohibición.

Anexo 16: Símbolos propuestos para la cámara de sedimentación por gravedad.



Prohibido generar llama abierta e introducir objetos incandescentes.



No exceder de 10 kg de carga.

Prohibido exceder el límite de carga de la máquina de 10 kg.

Propia elaboración (sugerencia).



Uso obligatorio de protección respiratoria.



Uso obligatorio de protección ocular.

