



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño y Cálculo de una Separadora Óptico-neumática de
Residuos Plásticos

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Rojas Parodi, Franco Orlando

Tutor/a: Masiá Vañó, Jaime

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Resumen

En la mayoría de los países del mundo la gestión de residuos es un problema de gran importancia. Las personas no reciclan aun teniendo la oportunidad. Las tecnologías de la industria del reciclado deben desarrollarse para dar abasto de la materia residual que todos los días se acumula. Este texto académico pretende aportar al avance de la apropiada gestión de residuos a nivel mundial, mediante el desarrollo de una máquina cuyo objetivo es clasificar residuos sólidos urbanos de tipo plástico.

En el siguiente trabajo se elabora el diseño y cálculo de una máquina clasificadora de residuos, que funciona mediante un sistema integrado con sensores (óptica) y actuadores electroneumáticos (neumática). Estos módulos trabajan en conjunto con una cinta transportadora y una estructura, consiguiendo el denominado proceso de separación.

Se procura abarcar temas de diseño mecánico, incluidos: resistencia de materiales, ciencia de materiales, diseño de elementos de máquina, teoría de máquinas & mecanismos, dinámica, estática, energía y manufactura.

Palabras Clave: Separadora, Reciclaje, Residuos, Diseño, Plásticos.

Abstract

In most countries of the planet waste management is a mayor issue. People don't recycle, even when they have the opportunity. Technologies concerning the recycling industry need to develop for the sufficiency of management of residual matter, that day after day keeps on accumulating. This academic text plans to contribute to the advance of the appropriate handling of solid waste worldwide, through the development of a machine whose purpose is to classify plastic-type urban solid waste.

This thesis aims to elaborate in the design and analysis of an opto-pneumatic sorter of residues, that works with an integrated system of sensors (optics) and electropneumatic actuators (pneumatics). These modules work in conjunction with a conveyor belt and a structure frame, accomplishing the sorting process.

It attempts to englobe mechanical design subjects, such as: mechanics of materials, material science, machine elements design, theory of machines & mechanisms, dynamics, statics, energy and manufacturing.

Keywords: Sorter, Recycling, Residues, Design, Plastics.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.2.1 Objetivos Generales	1
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
2. Antecedentes	2
2.1 Historia del Reciclaje	3
2.2 Reciclaje en los Siglos XX & XXI.....	5
3. Estado del Arte.....	8
3.1 Funcionamiento	8
3.2 Plantas de Recuperación de Residuos Sólidos Urbanos.....	9
3.2.1 Capacidad de la Planta	10
3.3 Separadoras Ópticas en el 2021.....	12
3.3.1 Comparativa	15
4. Metodología	16
5. Alcance.....	17
6. Normativa.....	18
7. Diseño Conceptual	19
7.1 Problemática	19
7.2 Variables, Criterios & Restricciones	19
7.2.1 Variables de Entrada	19
7.2.2 Variables de Salida.....	21
7.2.3 Variables Solución	22
7.2.4 Criterios & Restricciones	22

7.3 Síntesis y Análisis de Diseño	23
7.3.1 Matriz Morfológica	23
7.3.1.1 Concepto de Diseño 1: Separadora Óptica de Eyección Simple	25
7.3.1.2 Concepto de Diseño 2: Separadora Óptica Vertical	27
7.3.1.3 Concepto de Diseño 3: Separadora Óptica de Eyección Doble.....	28
7.4 Selección.....	28
7.4.1 Evaluación Técnica	29
7.4.2 Evaluación Económica.....	30
7.4.3 Gráfica de Resultados.....	31
8 Diseño Preliminar.....	32
8.1 Dimensiones Envolventes.....	32
8.2 Cinta de Aceleración	34
8.2.1 Potencia de Accionamiento.....	39
8.2.2 Banda Transportadora	42
8.2.3 Tambores.....	45
8.2.4 Rodillos	49
7.2.5 Transmisión.....	52
8.2.6 Estructura de Cinta.....	57
8.3 Estructura de Separación	64
8.3.1 Configuración Cinemática	64
8.3.1.1 Movimiento Parabólico: Producto Resto.....	64
8.3.1.2 Movimiento Parabólico: Producto Objetivo 1.....	66
8.3.1.3 Movimiento Parabólico: Producto Objetivo 2.....	70
8.3.2 Dimensiones Generales	71
8.4 Circuito Neumático	72

8.5 Chasis / Carcasa.....	78
9 Diseño Detallado.....	81
9.1 Materiales & Procesos de Fabricación.....	81
9.2 Presupuesto.....	88
10 Conclusiones	90
Referencias	91



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Símbolo del Reciclaje	4
Figura 2: Gráfico de Tratamiento Global de Residuos en Porcentajes.....	5
Figura 3: Gráfico de Composición Global de Residuos en Porcentajes.....	6
Figura 4: Cifras Acumulativas de Residuos Plásticos	7
Figura 5: Esquema de una Planta de Recuperación de Residuos Sólidos Urbanos.....	9
Figura 6: Residuos Sólidos Generados en España per Cápita	10
Figura 7: Gráfico de Residuos Sólidos Generados Anualmente por Persona	11
Figura 8: Separadora Óptica MSS PlasticMax	13
Figura 9: Separadora Óptica Picvisa Ecopack.....	13
Figura 10: Separadora Óptica Pellenc ST Mistral +	14
Figura 11: Etapas del Diseño Mecánico	16
Figura 12: Distribución del Uso de Polímeros por Tipo	20
Figura 13: Cinta <i>Easikit Flatbed</i>	21
Figura 14: Esquema de Separadora de Eyección Simple	25
Figura 15: Esquema Isométrico de Separadora Óptica	26
Figura 16: Esquema de Separadora Óptica Vertical.....	27
Figura 17: Esquema de Separadora de Eyección Doble.....	28
Figura 18: Gráfica Evaluación Técnica Económica.....	31
Figura 19: Envoltentes de Separadora Óptica	32
Figura 20: Partes de una Cinta Transportadora	34
Figura 21: Dimensiones Envases de PP	36
Figura 22: Productos de PELD.....	36
Figura 23: Productos de PEHD	37
Figura 24: DCL de Productos sobre Cinta.....	39
Figura 25: Sección Parcial de Banda <i>DUNLOFLEX</i>	44
Figura 26: Esquema de Poleas & Designación <i>DUNLOFLEX</i>	45
Figura 27: Dimensiones de Ensamblaje Tambor Motriz.....	45
Figura 28: Conjunto Tambor Motriz	46
Figura 29: Sección del Conjunto Tambor Motriz.....	47

Figura 30: Dimensiones de Ensamblaje Tambor Conducido	47
Figura 31: Conjunto Tambor Conducido.....	48
Figura 32: Sección del Conjunto Tambor Conducido	48
Figura 33: Dimensiones de Conjunto Rodillo	49
Figura 34: Conjunto Rodillo.....	50
Figura 35: Sección del Conjunto Rodillo	50
Figura 36: Vista Seccionada de Componentes del Rodillo	51
Figura 37: Espaciamiento entre Rodillos	51
Figura 38: Distancia entre Rodillos	52
Figura 39: Diagrama de Cuerpo Libre de Banda.....	53
Figura 40: Resultado de Sistema de Ecuaciones para T1 & T2	54
Figura 41: Motorreductor con Variador de Velocidad Seleccionado.....	56
Figura 42: Posición de Montaje de Motorreductor Variador	56
Figura 43: Estructura de Cinta.....	57
Figura 44: Vista de Perfilera	57
Figura 45: Estructura con Rodillos & Tambores.....	58
Figura 46: Sección de Viga UPN	58
Figura 47: Análisis por Resistencia de Viga UPN 60	59
Figura 48: Análisis por Deflexión de Viga UPN 60.....	60
Figura 49: Análisis por Deflexión de Viga UPN 80.....	61
Figura 50: Rodillo con Estructura	62
Figura 51: Pieza de Soporte de Tambor Montada	62
Figura 52: Soporte Antivibratorio Montado.....	63
Figura 53: Ensamblaje de Cinta Transportadora	63
Figura 54: Esquema Cinemático del Producto Resto	65
Figura 55: Esquema Cinemático del Producto Objetivo 1	66
Figura 56: Boquillas de Soplado <i>Nex Flow</i> 45001, 45002 & 45003	67
Figura 57: Gráfico Fuerza Ejercida vs Presión del Jet de Aire 45001	67
Figura 58: Diagramas de Cuerpo Libre de Instantes Analizados	68
Figura 59: Esquema Cinemático del Producto Objetivo 2	70

Figura 60: Dimensiones & Vista Isométrica de Estructura de Separación.....	71
Figura 61: Boquilla de Eyección con Soporte	72
Figura 62: Rango de Aplicación del Jet de Aire 45001	73
Figura 63: Posición de Boquillas en Paralelo	73
Figura 64: Esquema Neumático de Boquillas en Paralelo	74
Figura 65: Esquema Neumático una Boquilla con Válvula 2/2	74
Figura 66: Gráfico Consumo de Aire vs Presión del Jet de Aire 45001	75
Figura 67: Válvula Electroneumática 2/2 Festo VZWF	75
Figura 68: Válvula & Boquilla Sobre Carcasa	76
Figura 69: Soporte para Válvula & Agujeros de Carcasa	76
Figura 70: Tapa de Carcasa	77
Figura 71: Ensamblaje con Chapa de Chasis Seccionada	78
Figura 72: Vista Isométrica de Chapa de Chasis	79
Figura 73: Sección Transversal & Dimensiones de Perfiles Ranurados	79
Figura 74: Montaje del Subsistema Visión Artificial	80
Figura 75: Distancia de Visión Artificial con Respecto a Cinta	80
Figura 76: Gráfica E vs ρ con Recta Filtradora	82
Figura 77: Gráfica Clasificación de Materiales Según ρ	83
Figura 78: Gráfica E vs $Precio \cdot \rho$ con Recta Filtradora	84
Figura 79: Resultados de Selección de Materiales	85
Figura 80: Resultados de Selección de Procesos	85
Figura 81: Esquema del Proceso de Termoconformado	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparativa de Máquinas Separadoras Ópticas Comerciales	15
Tabla 2: Normativa Aplicable	18
Tabla 3: Variables de Entrada de Proyecto	19
Tabla 4: Flujo de Plástico por Tipo	20
Tabla 5: Variables de Salida de Proyecto	21
Tabla 6: Variables Solución de Proyecto	22
Tabla 7: Restricciones de Proyecto	22
Tabla 8: Criterios de Proyecto	22
Tabla 9: Funciones Mecánicas	23
Tabla 10: Matriz Morfológica	24
Tabla 11: Puntuación Asignada a Criterios de Evaluación	29
Tabla 12: Evaluación de Desempeño Técnico	29
Tabla 13: Evaluación de Desempeño Económico	30
Tabla 14: Dimensiones & Funciones de los Subsistemas	33
Tabla 15: Anchos & Velocidades de Bandas Transportadoras	38
Tabla 16: Factor Ancho de Banda C_w	40
Tabla 17: Factor Longitud de Banda C_L	41
Tabla 18: Factor de Servicio k_f	41
Tabla 19: Potencias Adicionales	42
Tabla 20: Factor de Rozamiento C_R	43
Tabla 21: Factor de Resistencia a la Tracción C_v	43
Tabla 22: Catálogo Técnico Banda <i>DUNLOFLEX</i>	44
Tabla 23: Tabla de Dimensiones de Tambor Motriz & Conducido	46
Tabla 24: Tabla de Propiedades de Conjunto Rodillo	49
Tabla 25: Eficiencia de Diversos Tipos de Transmisión	52
Tabla 26: Coeficientes de Fricción Banda-Tambor	54
Tabla 27: Parámetros del Reductor de Velocidad	55
Tabla 28: Resultado del Movimiento Parabólico del Producto Objetivo 1	69
Tabla 29: Criterio de Rigidez Limitada con Mínima Masa	81

Tabla 30: Criterio de Rigidez Limitada con Mínimo Coste	83
Tabla 31: Materiales & Procesos de Fabricación	87
Tabla 32: Presupuesto de Cinta de Aceleración	88
Tabla 33: Presupuesto de Estructura de Separación & Chasis/Carcasa	89
Tabla 34: Presupuesto de Circuito Neumático	89



1. Introducción

El reciclaje en la actualidad es un tema omnipresente en el mundo. Cada año la población mundial crece, lo que genera una mayor demanda de productos y energía. En consecuencia, se libera más gases de efecto invernadero al ambiente y se originan más residuos. Se sabe que, en la mayoría de los países del mundo, la gestión de residuos es un problema que se debe resolver con la mayor brevedad posible.

Hoy en día las plantas de reciclaje utilizan una gran cantidad de personal humano para realizar la gestión de desechos, lo que hace que el proceso de reciclaje sea lento e ineficiente. Un porcentaje muy bajo del total de los restos que se producen diariamente acaban siendo reciclados. Este trabajo pretende aportar a la solución del problema de la clasificación de residuos para el reciclado.

1.1 Justificación

Este trabajo se realizó debido a los requisitos académicos para la cumplimentación del grado en Ingeniería Mecánica. Además, se escogió el tema de diseño de una máquina para la industria del reciclaje, ya que en la actualidad se necesita desarrollar la sostenibilidad ambiental para enfrentar el cambio climático desde múltiples frentes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Generales

El objetivo de este trabajo es el de diseñar y calcular una máquina separadora óptico-neumática que, junto a la ayuda de sensores, actuadores y elementos de máquina, sea capaz de clasificar residuos plásticos urbanos de una forma práctica y eficiente. La máquina será capaz de diferenciar entre envases de dos (o tres) tipos de plásticos comunes entre residuos de tipo doméstico.

1.2.2 Objetivos Específicos

◆ Objetivo Tecnológico

Desarrollar una máquina transportadora y clasificadora de residuos, preparada para ser fabricada e implementada.

◆ Objetivo Industrial

Diseñar una máquina que sea de ayuda para la industria de reciclaje a nivel mundial.

◆ Objetivo Social

Mejorar la calidad del reciclaje a nivel mundial, para aumentar la calidad de vida en el planeta.

◆ Objetivo Medioambiental

Aportar al progreso de la sostenibilidad ambiental, para combatir la contaminación global.

◆ Objetivo Académico

Demostrar las capacidades y conocimientos adquiridos a lo largo de los estudios en el grado en Ingeniería Mecánica.

2. Antecedentes

El reciclaje ha estado presente en las diferentes culturas que han habitado la tierra, desde tiempos antiguos. Se define como la *‘recuperación y reprocesado de materiales residuales para su uso en nuevos productos’*^[1]. Hoy en día este tema se menciona constantemente debido al crecimiento de la contaminación ambiental y se están investigando nuevas tecnologías para mejorar la gestión de los residuos a nivel mundial.

2.1 Historia del Reciclaje

La creación del reciclaje no se le atribuye a ninguna persona o país. Desde hace más de 2000 años atrás distintas civilizaciones han aplicado fundición para reciclar metales desgastados y conformarlos en nuevas piezas^[2]. Algunas fuentes mencionan que los primeros indicios del reciclado (de materiales no metálicos) se encuentran en el Japón del siglo XI, con el reprocesado de papel desechado para la creación de nuevos folios usados en ámbitos artísticos^[3]. En el año 1690, se fundó en Estados Unidos (Philadelphia) la primera fábrica de papel por la familia Rittenhouse, que utilizaba como materia prima algodón y lino reciclado^[4]. Similarmente, se datan procesos de reciclado en diversos lugares y épocas como en la antigua Roma, la China de la dinastía Han, entre otros.

No obstante, el reciclaje como lo conocemos ahora se desarrolló en el siglo XIX. Antes de esta época, en muchos países (Inglaterra, Francia, Estados Unidos, entre otros) se acostumbraba a lidiar con los residuos de tres maneras: quemarlos, enterrarlos y echarlos a los ríos o calles. Esto último causaba problemas de pestes y enfermedades. La revolución industrial solo aceleró el problema de la contaminación, debido a la creciente disponibilidad de productos y progreso de la economía. Afortunadamente, en el año 1883, un prefecto francés llamado Eugène Poubelle dicta un decreto que exige el uso de contenedores de acero para almacenar residuos domésticos para su posterior recogida hacia un vertedero^[5]. Este fue uno de los primeros pasos hacia la gestión de residuos industriales.

Los inicios del siglo XX ven surgir las primeras plantas de reciclaje industrial. En el noreste de Estados Unidos (Chicago y Cleveland) se crearon las primeras plantas de reciclaje de latas de aluminio, en 1904. Unos años después, un químico belga llamado Leo Baekeland inventó el primer plástico sintético, la Baquelita^[6]. Promocionado como “el material de los mil usos”, el éxito de este material fomentó el desarrollo de nuevos tipos de polímeros, lo que nos introdujo a la era de los plásticos. Para la segunda guerra mundial, los plásticos estaban presentes en armaduras, ropa, paracaídas, vidrio reforzado, cables de radar, llantas, entre otros. Además, para este suceso se recicló masivas cantidades de acero, estaño, papel, caucho, y otros materiales usados para la conflagración.

Los años 60's y 70's fueron importantes para la historia del reciclaje, ya que se empezó a tomar mayor conciencia a los movimientos ecologistas. El año 1970 contempla el primer Día de la Tierra como una protesta ante la crisis ambiental que se empezó a percibir^[7]. En este mismo año se crea el símbolo del reciclaje, también conocido como cinta de Möbius, que representa el ciclo de vida que los materiales deberían experimentar para cuidar del medio ambiente: reducir, reciclar y reutilizar.

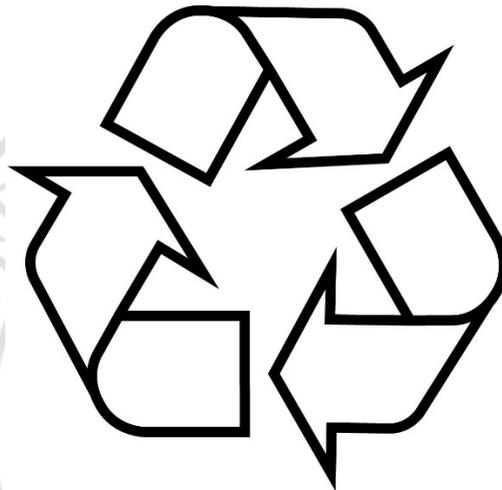


Figura 1: Símbolo del Reciclaje (Gary Anderson, 1970)

[Fuente: MoMA]

Ahora en el siglo XXI el reciclaje se ha convertido en un tema indispensable en todos los ámbitos de nuestras vidas, con el objetivo de frenar la crisis climática. Sin embargo, esta meta se presenta difícil con el incremento de la población y su consecuente demanda de más producción industrial y formación de residuos. Con la ayuda de nuevas tecnologías se debe cambiar esta tendencia hacia un futuro sostenible.

2.2 Reciclaje en los Siglos XX & XXI

El reciclaje industrial se inició en el siglo XX, junto con el nacimiento de los plásticos. Esto último, sumado al hecho de que la población mundial se encontraba en un incremento exponencial, agravó desproporcionadamente los problemas de contaminación. La cifra de residuos acumulados solo ha ido aumentando desde entonces.

Un estimado de **2,01 mil millones de toneladas de residuos sólidos** municipales fueron generados solo en **2016**. Si nada cambia se espera que este número crezca a **3,4 mil millones de toneladas para el 2050**. En términos generales, **37%** de los residuos producidos a nivel mundial se depositan en **vertederos**, **33 %** termina siendo **expulsado al medio ambiente**, **11% se incinera** y **13.5% se recupera para reciclado**^[8].

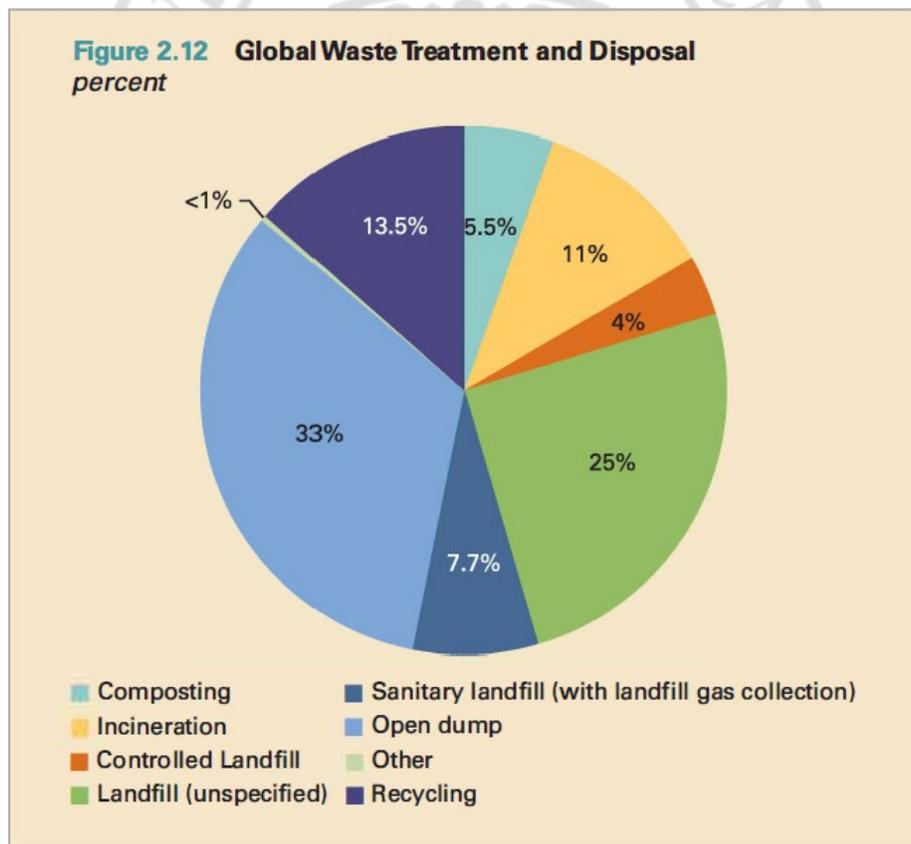


Figura 2: Gráfico de Tratamiento Global de Residuos en Porcentajes [8]

De todos estos desechos, se debe considerar la composición, debido a que cada material afecta de manera diferente a la biósfera. En el gráfico siguiente se muestra la relación entre los diferentes tipos de residuos que se producen (*figura 3*). Los de mayor magnitud son las sobras orgánicas, ya que un tercio de la comida que llega al ámbito doméstico termina malográndose. Los plásticos componen un 12% de total y aun así terminan causando más daño al medioambiente, porque, en promedio, aproximadamente **8 millones de toneladas de plástico acaban en los océanos anualmente**.

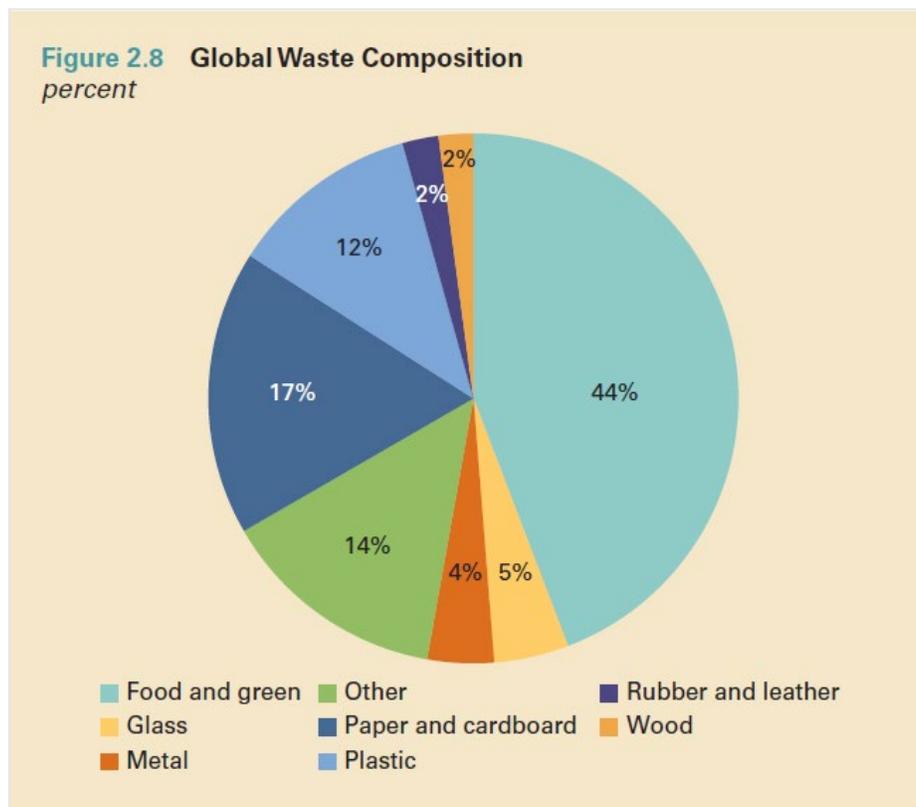


Figura 3: Gráfico de Composición Global de Residuos en Porcentajes [8]

Solo en residuos plásticos, el mundo ha generado un total de **6300 millones de toneladas métricas** desde su creación hasta el 2015, de los cuales: **9% han sido reciclados, 12% incinerados y 79% han terminado en vertederos o expulsados hacia el ambiente**. Los plásticos modernos empezaron como materiales sintéticos, hechos a partir de combustibles fósiles y se ha estimado que pueden demorar en descomponerse 1000 años. Por este último motivo, la única manera en que se puede, al presente, eliminar los residuos plásticos por

completo, es por incineración. Se sabe muy bien que esto agrava el problema del calentamiento global, de modo que no es una opción aceptable. En la actualidad existen algunas soluciones para suprimir la contaminación de plásticos sin generar consecuencias adversas en el mundo, como: reciclaje, plásticos biodegradables, gusanos capaces de digerir polímeros, entre otros. De estas soluciones, la más viable en estos momentos es el impulso de la industria del reciclaje. No obstante, la proporción de plásticos reciclados sigue siendo baja. A continuación, se muestra una gráfica donde se observa la tendencia de la cantidad de residuos plásticos acumulados (en millones de toneladas métricas) a través de los años:

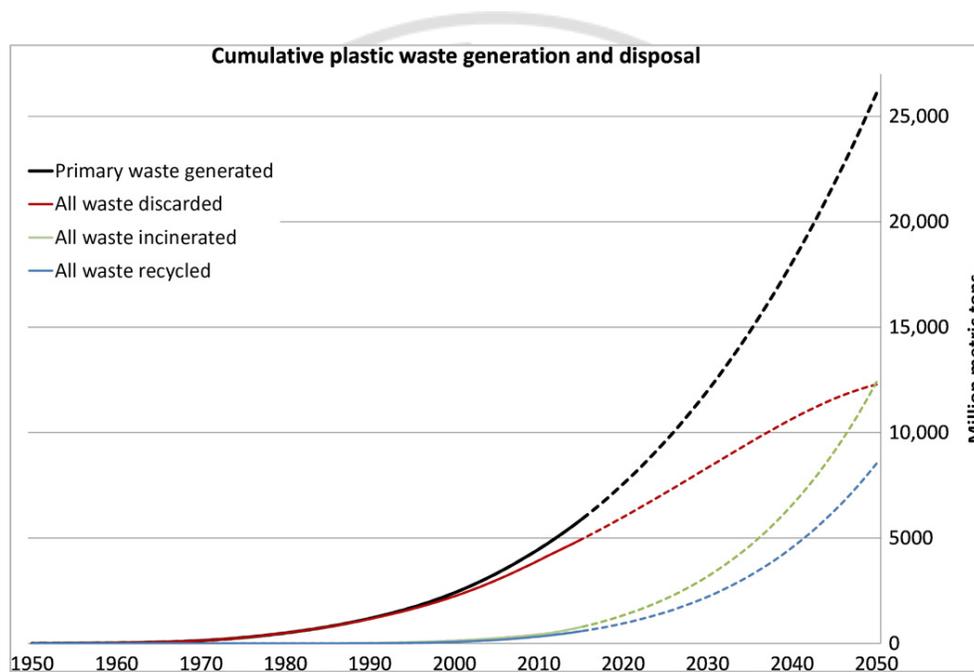


Figura 4: Cifras Acumulativas de Residuos Plásticos [9]

Queda aclarar que la industria del reciclaje generó, solamente en 2016, un total de 160 mil millones de dólares alrededor del mundo, empleando cerca de 1,5 millones de personas. Sin embargo, este tema no debe ser visto como un negocio, analizando su rentabilidad, sino más bien como un deber de los gobiernos de todas las naciones para erradicar la contaminación ambiental.

3. Estado del Arte

Las máquinas separadoras son un invento del siglo XX, que surgió debido a la necesidad de clasificar productos agrícolas; frutas y verduras^[10]. **La separación óptica es un sistema de clasificación que utiliza la espectroscopía para distinguir entre diferentes composiciones de material, color y forma.**

Se empezó con máquinas manuales con estructuras hechas de madera. Fue mejorando la tecnología hasta que en la década de 1930 se crea la primera separadora capaz de clasificar por colores. Con el paso de los años se automatizó el proceso y estas máquinas fueron ampliando su campo de aplicación. No fue hasta la década de los 90's que la separación óptica fue implementada a la gestión de residuos sólidos. En la actualidad, la tecnología de separación óptica es capaz de identificar y clasificar objetos compuestos de materiales orgánicos, plásticos, algunos metales; al igual que vidrio, textil y papel.

3.1 Funcionamiento

Los separadores ópticos se componen de tres subsistemas: alimentación, visión artificial y separación. La visión artificial, el cerebro de la máquina, se subdivide en el conjunto óptico y el procesado de imágenes. Esto se realiza con la ayuda de cámaras y láseres de diversos tipos, que logran recopilar múltiples espectros que sirven para identificar la composición del objeto analizado. Tras haber recibido la imagen del objeto, un espectrómetro lee la 'firma espectral' de la luz emitida por cada material. La última tecnología, en término de sensores para las separadoras ópticas, son las **cámaras hiperespectrales**, que utilizan tecnología HSI o *Hyperspectral Imaging*, basada en el principio de la espectroscopía^[11].

La separación de objetos se realiza mediante aire comprimido y el posicionamiento estratégico de cintas transportadoras dentro de un marco estructural. Los sensores ópticos pueden trabajar con la detección de luz visible, infrarroja y ultravioleta. Cuando un objeto es identificado por la visión artificial, se clasifica como 'blanco' (*targeted*). Seguidamente, una computadora calcula la posición de dicho cuerpo y coordina con el circuito neumático para la eyección hacia una salida de la máquina, que lo lleva hacia un proceso posterior (compactadora de balas).

3.2 Plantas de Recuperación de Residuos Sólidos Urbanos

Los **residuos sólidos urbanos (RSU)**, son toda aquella materia residual producto de los domicilios y comunidades^[12]. Esta definición excluye a: residuos peligrosos, residuos industriales, entre las otras 8 clasificaciones de los desechos. Al ser residuos sólidos no se incluye materia disuelta o suspendida en desagües, u otros contaminantes que se encuentran en fuentes de agua. Como subcategorías de los RSU se encuentran: materia orgánica, plásticos, metales, cerámicos, electrónicos, textiles, papel y otros.

Los RSU se recolectan todos los días y llevan a plantas de recuperación donde se clasifican y se compactan en balas, para luego ser reciclados con facilidad en otros centros de tratamiento de residuos. En la siguiente imagen, se muestra el esquema de una planta de recuperación común, en este caso, de plásticos, metales y cartones.

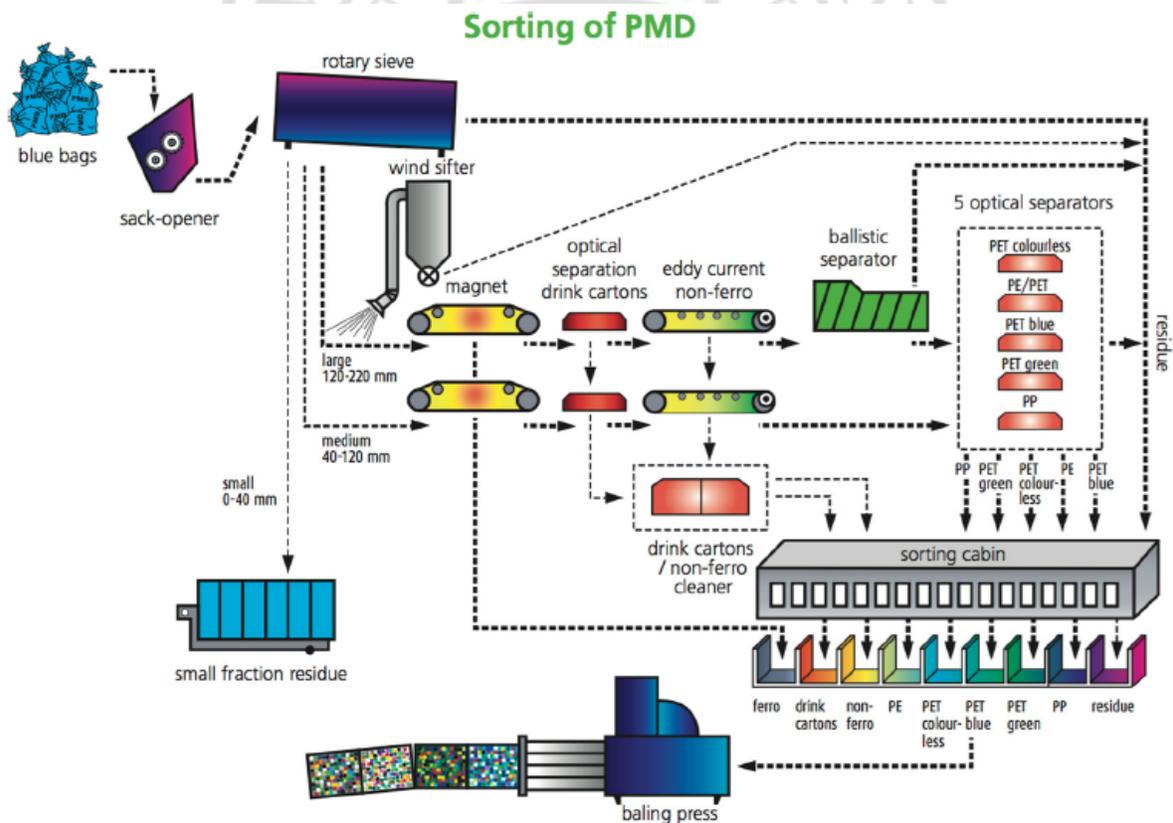


Figura 5: Esquema de una Planta de Recuperación de Residuos Sólidos Urbanos [13]

Las plantas de recuperación de RSU (*Material Recovery Facilities*) se clasifican en 4 tipos^[14]:

- **Separación en Origen:** los desechos que son recibidos en la planta fueron previamente clasificados en algún punto de su recolección.
- **Flujo Único:** se procesan RSU reciclables, mezclados en un flujo único que los clasifica en múltiples etapas.
- **Flujo Dual:** se procesan RSU reciclables. Por un lado, las fibras (papel y cartón) y, por otro lado, envases combinados de distintos materiales (metales, plásticos y cerámicos).
- **Residuos Mezclados:** se reciben RSU reciclables y no reciclables.

Estas plantas utilizan una serie de máquinas para realizar la clasificación de la materia. Entre ellas se encuentran: **tambores rotativos, separadores balísticos, separadoras magnéticas, separadoras por corrientes de Foucault y separadoras ópticas** (*Figura 5*). La máquina separadora óptica que se diseñó en este trabajo está dirigida para funcionar en las plantas de recuperación de **flujo único**.

3.2.1 Capacidad de la Planta

La capacidad de las plantas es una de las variables más significativas que se debe estudiar para el apropiado diseño de la maquinaria. Esto depende de la cantidad de residuos generados por la comunidad estudiada. Un mapa realizado por la INE (*Instituto Nacional de Estadística*), en 2016, muestra la cantidad de residuos (kilogramos) por año que produce un habitante promedio en cada comunidad de España.

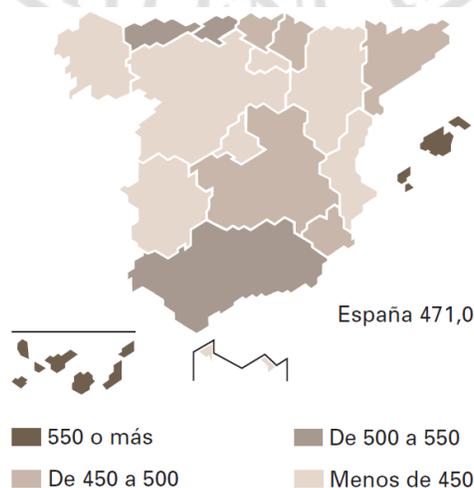


Figura 6: Residuos Sólidos Generados en España per Cápita [15]

Estas cifras varían a lo largo de los años. En la última década estos valores han sufrido variaciones relativamente bajas, sin embargo, la cantidad de residuos producidos en el mundo actualmente no tiene antecedentes en la historia. La cantidad producida en la última década, en España, se aprecia en la figura 7.

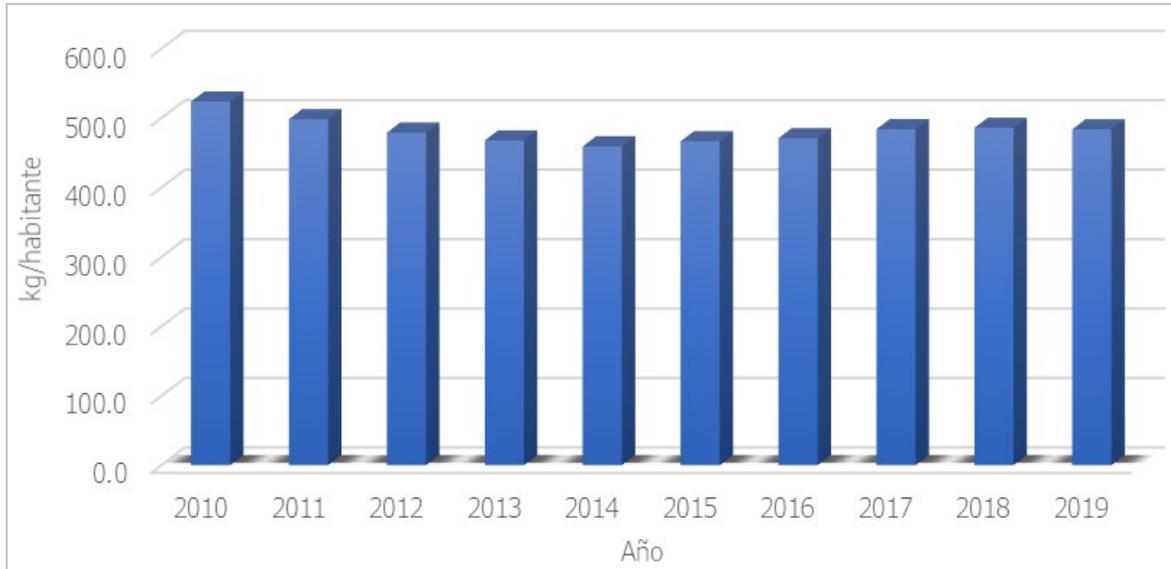


Figura 7: Gráfico de Residuos Sólidos Generados Anualmente por Persona [15]

La capacidad de la planta se mide en toneladas por día u hora. Para calcular estas cifras se deben tener en cuenta la generación de residuos por personas y la población objetivo^[16].

$$TR = \text{habitantes} \cdot \left(\frac{\text{residuos}}{\text{tiempo} \cdot \text{persona}} \right) \quad (3.1)$$

Donde TR se refiere a toneladas de residuos sólidos reciclables que entran en la planta de recuperación, por unidad de tiempo. Se tomó como ejemplo para este estudio la Comunidad Valenciana, para enfocar los datos usados a una muestra y que los resultados sean más próximos a la realidad. Según el INE, en la Comunidad Valenciana habitan **5 058 138 personas**. Además, a partir de la figura 6 y 7 se obtiene que la persona promedio produce alrededor de **480 kilogramos por año por persona**.

$$TR = (5\,058\,138) \cdot \frac{480}{1000} = 2\,427\,906 \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$$

Una planta de recuperación, al igual que otras empresas, tiene un horario de trabajo. Se tomó una planificación típica del trabajo, donde la empresa funciona 3 turnos de 8 horas en un día y 5 días por semana. Tomando como referencia 250 días laborales en un año, la empresa trabaja $250 \times 24 = 6000$ [h/año]. Si se buscara que una única planta se ocupe de los residuos de toda la comunidad valenciana, se necesitaría una capacidad de $2\,427\,906 \div 6000 = 404,65$ [ton/h].

No obstante, esta cifra resulta muy alta debido al hecho de que se requieren distintas plantas que gestionen los residuos de toda la comunidad. Un estudio del CONAMA (*Congreso Nacional del Medio Ambiente*) realizado en 2014 (el más reciente que se pudo hallar), indicó que en la comunidad valenciana existían 9 plantas de recuperación de RSU^[17]. Si se habla de una hipotética décima planta y asumiendo que dichas 10 instalaciones gestionan los desechos de la misma cantidad de personas, la capacidad sería la siguiente:

$$TR = \left(\frac{5\,058\,138}{10} \cdot \frac{480}{1000} \right) = 242\,790,6 \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$$

Traduciéndolo a toneladas por hora:

$$TR_h = \frac{TR}{6000 \left[\frac{\text{h}}{\text{año}} \right]} = 40,5 \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] \quad (3.2)$$

3.3 Separadoras Ópticas en el 2021

En la industria de la gestión de residuos, los proveedores destacados de separadoras ópticas se encuentran en países de la unión europea, Norteamérica y Asia del Este. A continuación, se presentan algunos de los modelos, mientras se exhiben los datos más significativos de cada uno y comparan, con el fin de adquirir información de utilidad para el diseño de este trabajo.

- **MSS Optical**



Figura 8: Separadora Óptica MSS PlasticMax [18]

La empresa americana MSS se dedica al diseño y fabricación de máquinas separadoras desde el año 1974. Desde aquella década han trabajado en la separación de plásticos, y uno de sus últimos modelos en este aspecto es el *PlasticMax*. Este dispositivo es capaz de identificar y clasificar botellas de plástico, plástico triturado, films, fibras, cartones y residuos de origen electrónico.

- **Picvisa**



Figura 9: Separadora Óptica Picvisa Ecopack [19]

Picvisa es una organización de origen español (sede principal en Barcelona), consagrada al diseño y desarrollo de máquinas de selección y clasificación industrial. El modelo de la separadora creada por Picvisa, capaz de trabajar con plásticos, se denomina *Ecopack*. Dentro de los tipos de polímeros con los que trabaja se encuentran PET, PE, PP, PS, PVC, EPS y ABS.

- **Pellenc ST**



Figura 10: Separadora Óptica Pellenc ST Mistral + [20]

Pellenc, de origen francesa, es una multinacional especializada en tecnología de clasificación y reciclaje para la industria. La máquina más vendida y con mayor reconocimiento a nivel mundial es llamada *Mistral +*. Es capaz de separar múltiples materiales, como: PET, PE, PP, madera, materia orgánica y combustibles derivados de residuos (*RDF*, que en sus siglas en inglés quieren decir *Refused-derived Fuel*).

3.3.1 Comparativa

	MSS PlasticMax	Pellenc ST Mistral +	Picvisa EcoPack
Anchura: Cinta de Aceleración	1600-2800mm	1300-3300mm	800-2800mm
Longitud mín: Cinta de Aceleración	5000mm	5000mm	6000mm
Nº de Bloques de Válvulas	1 o 2	1 válvula simple o 2 válvulas dobles	2 a 6 según modelo
Distancia entre Boquillas de Eyección	1/2" o 1"	25mm	8-16mm
Potencia	8-12 kW	Según anchura	2,5-6,7 kW
Presión de Aire Requerida	7 bar	7-8 bar	7-8 bar
Altura de Sensor Óptico Sobre Cinta	Depende de aplicación	900mm	890mm

Tabla 1: Comparativa de Máquinas Separadoras Ópticas Comerciales [Elaboración Propia]

4. Metodología

Para la elaboración de este trabajo académico se utilizó una metodología aprendida a lo largo de la carrera de ingeniería mecánica, relativo al **diseño en ingeniería mecánica**. Se apoyó de la teoría de diseño mecánico encontrada en el libro *Machine Design* escrito por Robert Norton, que provee al ingeniero una serie de pautas mostradas a continuación.

1	Identification of need
2	Background research
3	Goal statement
4	Task specifications
5	Synthesis
6	Analysis
7	Selection
8	Detailed design
9	Prototyping and testing
10	Production

Figura 11: Etapas del Diseño Mecánico [21]

Estos pasos se reflejarán en los siguientes apartados, de forma que se cada uno se muestre de forma organizada. Se sabe que el diseño es un proceso iterativo, sin embargo, la totalidad de las iteraciones no se aprecian en el trabajo, ya que se extendería substancialmente. Su traducción vendría a ser la siguiente: 1. Identificación de las necesidades, 2. Búsqueda de Antecedentes, 3. Establecimiento de Objetivos, 4. Especificación de Tareas, 5. Síntesis, 6. Análisis, 7. Selección, 8. Diseño Detallado, 9. Prototipo & Experimentación y 10. Producción. Las últimas dos partes de prototipado y producción no se abordan, porque no son objetivos de esta tesis.

Además del procedimiento anterior, se pueden agrupar las etapas de diseño mecánico como un proceso dividido en 3 fases.

- **Diseño Conceptual:** se define la problemática y son previstos los requisitos de diseño (variables, restricciones y criterios). Se presentan opciones de diseño en la etapa de **síntesis**, con el objetivo de presentar ideas creativas sin tener en cuenta la calidad o valor en términos de ingeniería. Se desarrolla un **análisis** de las soluciones de diseño, descomponiendo las ideas para aproximar un valor cualitativo de cada una. Se realiza una **selección** de la idea idónea, según los criterios planteados.
- **Diseño Preliminar:** se desarrollan **modelos ingenieriles** (estáticos y dinámicos) de los distintos subsistemas, con el objetivo de **obtener la geometría** de los elementos de máquinas y calcular los **esfuerzos** con que interactúan. Se conciben modelos cinemáticos y cinéticos de los componentes móviles, y se efectúan análisis de resistencia de materiales. Se utilizan fórmulas normadas para calcular las transmisiones y elementos estándar. Se relacionan todos los componentes del sistema, completando el modelado para que cumpla los requisitos de diseño.
- **Diseño Detallado:** se documenta todo lo visto en el diseño preliminar. Se definen los procesos de fabricación a utilizar, según los materiales empleados. Para terminar, se dispone todo lo modelado en planos (despiece, ensamble y fabricación) y se elaboran presupuestos, de modo que el producto está listo para las etapas de prototipado y producción.

Herramientas

Las herramientas usadas en este trabajo fueron, en su mayor parte, tecnológicas. Para el modelado 3D se utilizaron los programas *SolidWorks* y *AutoCAD*. En el aspecto del diseño mecánico en ingeniería se complementó la teoría con programas como: *KISSsoft*, *SolidWorks Simulation*, *Ansys Granta EduPack* y *MDSolids*. Los cálculos se apoyaron con el empleo de softwares como *Wolfram Mathematica*, *Matlab* y *Excel*.

5. Alcance

El diseño que aborda este texto se centra en el aspecto mecánico únicamente. Los elementos modelados de los distintos subsistemas fueron del dominio mecánico, diseñados aplicando teoría del diseño en ingeniería mecánica.

El subsistema de visión artificial fue tomado en cuenta según las dimensiones y posicionamiento, no obstante, no hubo un desarrollo del mismo. Si bien este conjunto es de vital importancia para el funcionamiento de la separadora óptica, su diseño es tratado por ingenieros de diferentes especialidades.

6. Normativa

El proyecto tuvo en cuenta una serie de normas para asegurar la seguridad y protección del uso adecuado de la maquinaria a diseñar. Estos estándares técnicos los provee la *Asociación Española de Normalización (UNE)*, que trabaja con normas internacionales de los organismos *ISO (Organización Internacional de Normalización)* y *EN (Normas Europeas)*.

Norma	Descripción
UNE-EN ISO 12100:2012	<i>Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo.</i>
UNE-EN 14120-1:2016	<i>Seguridad de las máquinas. Resguardos. Requisitos generales para el diseño y construcción de resguardos fijos y móviles.</i>
UNE-EN ISO 14119:2014	<i>Seguridad de las máquinas. Dispositivos de enclavamiento asociados a resguardos. Principios para el diseño y la selección.</i>
UNE-EN ISO 13854:2020	<i>Seguridad de las máquinas. Espacios mínimos para evitar el aplastamiento de partes del cuerpo humano.</i>
UNE-EN ISO 13857:2020	<i>Seguridad de las máquinas. Distancias de seguridad para impedir que se alcancen zonas peligrosas con los miembros superiores e inferiores.</i>
UNE-EN 60204-1:2019	<i>Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas. Parte 1: Requisitos generales</i>

Tabla 2: Normativa Aplicable

[Elaboración Propia]

7. Diseño Conceptual

7.1 Problemática

La necesidad de la que surge este proyecto yace en el hecho de que existe una sobreproducción de bienes para la gran cantidad de gente que habita en la tierra, pero no una forma adecuada de tratar los residuos que se generan. La acumulación de plásticos incrementa cada día y se requiere de la ayuda de la ingeniería para resolver esta situación. Por esta razón se inventaron las máquinas de separación y tratamiento de desechos urbanos.

7.2 Variables, Criterios & Restricciones

7.2.1 Variables de Entrada

Variables de Entrada	Limitaciones de Entrada	Condición
Tipo de Producto	Residuos plásticos más comunes entre los RSU	X_{e_1} PP, PE, PET, PVC
Flujo de Material*	Porcentaje de plásticos en las toneladas de RSU entrante	X_{e_2} $\dot{m}=TR*(\%Plástico)$ [t/h]
Velocidad de Entrada	-	X_{e_3} $v_e < 3$ [m/s]

Tabla 3: Variables de Entrada de Proyecto
[Elaboración Propia]

*El flujo de material plástico que ingresa a la separadora óptica se deriva de la capacidad de toneladas por hora que recibe la planta de recuperación de RSU. Luego de determinar esta cantidad, se procedió a deducir qué tipos de polímeros constituyen los residuos plásticos y en qué proporción se encuentran. Para conocer la cantidad de plásticos encontrados en los RSU se utilizaron las referencias en la *figura 3* y la *ecuación 3.2*.

$$\dot{m} = TR \cdot \left(\frac{12}{100}\right) = 4,856 \left[\frac{t}{h}\right] \quad (7.1)$$

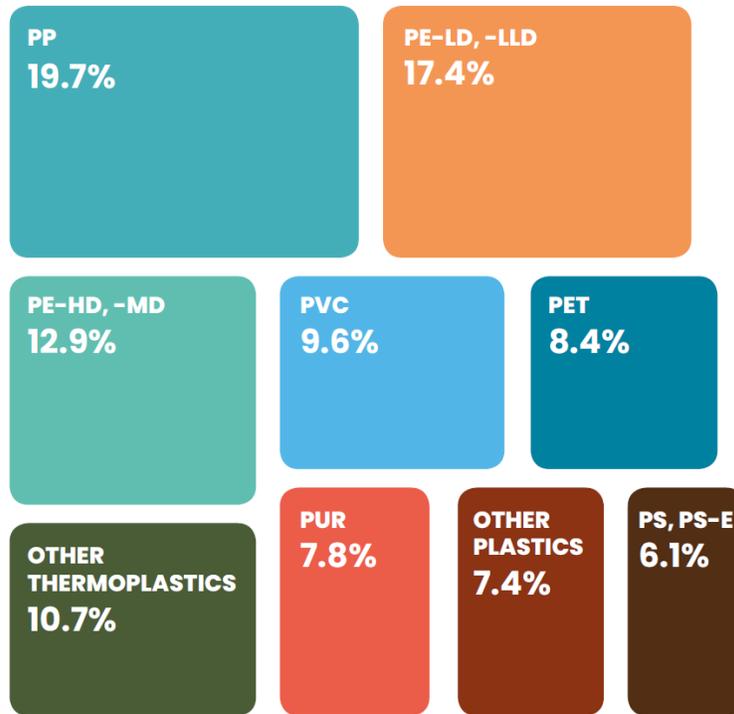


Figura 12: Distribución del Uso de Polímeros por Tipo [22]

La imagen que se muestra anteriormente manifiesta, en términos generales, la proporción de uso en Europa de cada tipo de polímero. Con esto se resuelve la primera variable de entrada X_{e1} , al determinar que se va a trabajar con los plásticos más utilizados del mercado: **polipropileno (PP), polietileno de baja densidad (PELD) y polietileno de alta densidad (PEHD).**

Además, con este último dato y la solución de la *ecuación 6.1* se puede determinar el flujo de producto definitivo que ingresará a la separadora, obteniendo la variable X_{e2} :

Tipo de Plástico	Flujo de Material [t/h]
Polipropileno (PP)	$\dot{m}_{PP}=4,856*(19,7\%)=0,9566$
Poletileno Baja Densidad (PELD)	$\dot{m}_{PELD}=4,856*(17,4\%)=0,845$
Poletileno Alta Densidad (PEHD)	$\dot{m}_{PEHD}=4,856*(12,9\%)=0,6264$

Tabla 4: Flujo de Plástico por Tipo
[Elaboración Propia]

Con respecto a la variable de entrada X_{e3} , la velocidad a la que accede el material a la máquina depende de la cinta transportadora que lo transfiere. Se recurrió a utilizar como referencia cintas creadas por un fabricante europeo, llamado *Coveya*, dedicado al diseño y fabricación de bandas transportadoras para la industria de la gestión de residuos. El rango de flujo soportado es de **20 a 500 toneladas/hora** y de velocidades de **0,2 a 1,2 metros/segundo**.



Figura 13: Cinta *Easikit Flatbed* [23]

Debido a que nuestro sistema requiere menos de 2 toneladas por hora de flujo, se consideró una cinta de 20t/h de capacidad llamada *Easikit Flatbed*, cuyo rango de velocidades es de **0,2-1,2 m/s**. Por lo tanto, la variable v_e se encontrará entre estos valores y se determinará cuando se analice la cinemática del subsistema de alimentación.

7.2.2 Variables de Salida

Variables de Salida	Limitaciones de Salida	Condición
Eficiencia de Separación	Se desea alcanzar 100%	X_{s1} } $\eta > 100\%$
Velocidad de Salida	-	X_{s2} } v_s

Tabla 5: Variables de Salida de Proyecto
[Elaboración Propia]

7.2.3 Variables Solución

Variables Solución			
S ₁	Configuración Cinemática	S ₃	Dimensiones de Subsistemas
S ₂	Velocidad de Cinta Aceleradora	S ₄	Materiales
S ₃	Dimensiones Envolventes de Máquina	S ₅	Geometría de Elementos de Máquina

Tabla 6: Variables Solución de Proyecto [Elaboración Propia]

7.2.4 Criterios & Restricciones

Las restricciones son límites que se imponen a las variables solución, establecidas por la naturaleza o el cliente. Al no estar presente la interacción ingeniero-cliente en este trabajo, solo se consideran las barreras de la naturaleza y la disponibilidad de recursos (de forma realista) en nuestra sociedad moderna. Los criterios son condiciones no restrictivas que se desean alcanzar.

Restricciones	
R ₁	Uso de materiales comerciales
R ₂	Presupuesto aceptable para uso en la industria

Tabla 7: Restricciones de Proyecto [Elaboración Propia]

Criterios	Valor
Eficiencia	Máxima
Coste de fabricación	Mínimo
Simplicidad de montaje	Máxima

Tabla 8: Criterios de Proyecto [Elaboración Propia]

7.3 Síntesis y Análisis de Diseño

Una vez presentados los distintos requerimientos, se procede a la fase creativa y analítica de diversas soluciones de diseño. Se presentaron ideas sobre la máquina vista como sistema, que encuentra compuesta por 3 subsistemas mencionados anteriormente: **alimentación, separación y visión artificial.**

La configuración de estos subsistemas se basa alrededor de las funciones de los subsistemas y cómo se relacionan para lograr un objetivo general. Se formularon **tres conceptos de diseño** con configuraciones diferentes, que luego fueron examinadas para determinar de manera aproximada la de mejor valor cualitativo.

7.3.1 Matriz Morfológica

El método de la matriz morfológica (o cuadro morfológico) se utiliza para comparar distintas opciones de diseño, al relacionar distintas soluciones de las funciones que debe cumplir el sistema. Las funciones mecánicas que deben realizar los subsistemas para llevar a cabo su objetivo principal son las siguientes:

Función	Subsistemas	Descripción
Transportar Material	Cinta de Aceleración	La máquina debe ser capaz de trasladar el producto que ingresa en sus vicinidades hasta su apertura de salida
Eyectar Producto Objetivo	Cinta & Boquillas de Soplado	El producto objetivo debe ser separado del producto resto usando los principios de la neumática
Clasificar Material	Todos	El trabajo de todos los subsistemas en conjunto debe resultar en flujos de material clasificado
Transformar Energía	Cinta, Boquillas & Visión Artificial	Para que estos módulos cumplan sus objetivos se requiere de una transformación de energía
Proteger & Soportar Componentes	Chasis	El proceso de separación y los componentes eléctricos/electrónicos se sitúan dentro del chasis

Tabla 9: Funciones Mecánicas [Elaboración Propia]

La separadora óptica también tiene funciones eléctricas y electrónicas, sin embargo, como ya se mencionó en el apartado 5 de alcances, estos temas no son parte del presente trabajo. Las combinaciones de diseño de la matriz morfológica que se idearon son en base a los aspectos mecánicos del proyecto.

En el siguiente cuadro se presentan tres alternativas para cada función. También se diferencia las distintas combinaciones con indicadores de colores, donde cada color representa un concepto de diseño.

Concepto de Diseño 1: ●

Concepto de Diseño 2: ●

Concepto de Diseño 3: ●

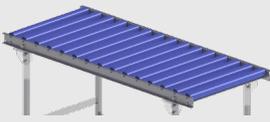
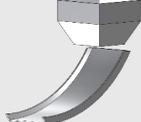
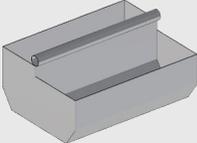
Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Transportar Material	 <p>Cinta Transportadora^[23]</p> <p>● ● ●</p>	 <p>Rodillos de Transporte^[24]</p>	 <p>Tolva o Estructura</p> <p>●</p>
Eyectar Producto Objetivo	 <p>Boquillas Standard^[25]</p>	 <p>Jets de Aire^[26]</p> <p>● ●</p>	 <p>Cuchillas de Aire^[27]</p> <p>●</p>
Clasificar Material	 <p>Estructura de Separación</p> <p>● ● ●</p>		
Transformar Energía	 <p>Motores Eléctricos^[28]</p> <p>● ● ●</p>	 <p>Motores Neumáticos^[29]</p>	 <p>Motores Hidráulicos^[30]</p>
Proteger & Soportar Componentes	<p>Chasis / Carcasa de Chapa</p> <p>● ● ●</p>		

Tabla 10: Matriz Morfológica [Elaboración Propia]

Con respecto a la función de transporte de material, se tomó en cuenta el uso de las cintas transportadoras antes que los rodillos de transporte, ya que para este proyecto se requiere que el producto con el que se trabaja adquiera velocidad para el proceso de separación. Por esta razón y por la ventaja de que las cintas están normadas por distintas organizaciones es que se decantó por esta alternativa para todos los conceptos de diseño.

En relación con los elementos neumáticos a utilizar para la separación óptica, se investigaron los tipos de componentes usados en aplicaciones de eyección de objetos. Se diferenció entre tres tipos: **boquillas estándar**, **jets de aire** y **cuchillas de aire**. La diferencia entre las boquillas estándar y los jets de aire recae en las presiones de trabajo y el área de aplicación. Entre las dos opciones se decidió emplear los jets de aire, ya que son más eficientes para el soplado de objetos.

La estructura de separación es muy similar en todos los conceptos de separación óptica, por lo que solo se propuso una solución. La máquina motriz para los distintos módulos se resolvió que fuese el motor eléctrico, debido a que va acorde al objetivo ambiental de este proyecto, es altamente eficiente, requiere poco mantenimiento, su durabilidad y el control automático. El chasis adoptará la forma de las dimensiones y posicionamiento final de los subensamblajes.

7.3.1.1 Concepto de Diseño 1: Separadora Óptica de Eyección Simple

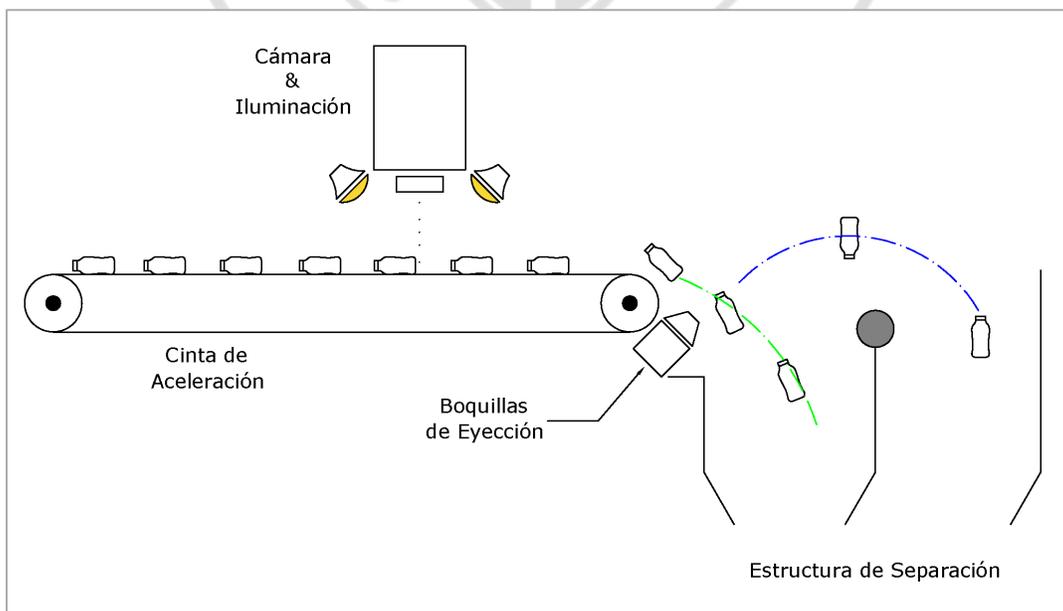


Figura 14: Esquema de Separadora de Eyección Simple [Elaboración propia]

La separadora óptica de eyección simple es la configuración más utilizada en la industria. Se presentó este diseño basado en lo aprendido en el estado del arte. El esquema mostrado anteriormente permite apreciar los componentes más relevantes de la maquinaria y su principio de funcionamiento. Los elementos que integran este bosquejo son los siguientes:

- 1) **Cinta de Aceleración:** dispositivo de transporte de material. Imprime una aceleración al producto que ingresa a la máquina.
- 2) **Boquillas de Eyección:** parte del circuito electroneumático que se conecta con la computadora de la máquina para coordinar la eyección del material objetivo y dejar en caída libre al resto.
- 3) **Estructura de Separación:** estructura dispuesta en la maquinaria de forma que divida el flujo entre el producto objetivo y el resto.
- 4) **Cámara e Iluminación:** componentes del subsistema de visión artificial que se encarga de detectar el producto objetivo, según forma, composición y color.

Se elaboró un boceto de los subsistemas de la separadora en una vista isométrica (*figura 15*), donde se aprecia el posicionamiento relativo de los distintos subensamblajes de la separadora óptica de eyección simple.

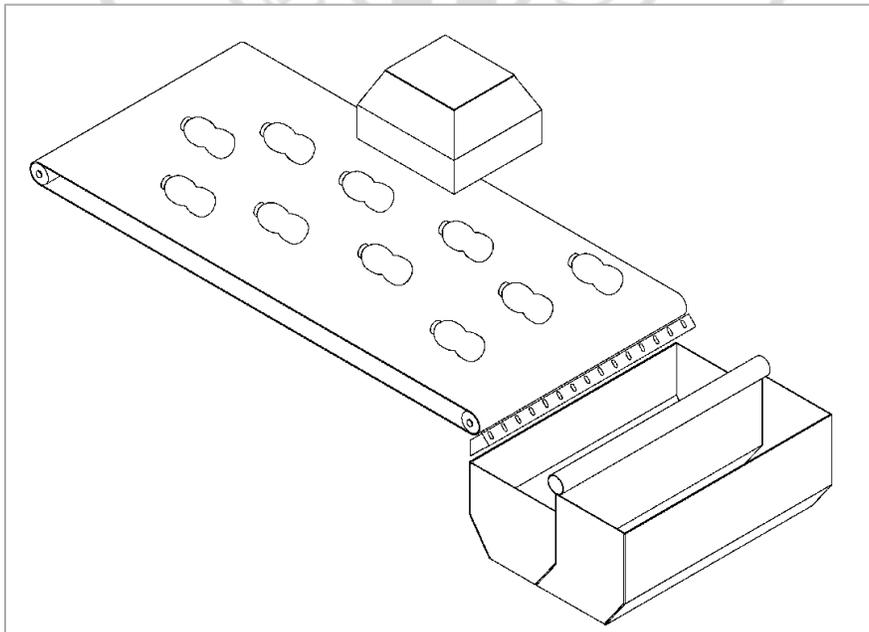


Figura 15: Esquema Isométrico de Separadora Óptica [Elaboración propia]

7.3.1.2 Concepto de Diseño 2: Separadora Óptica Vertical

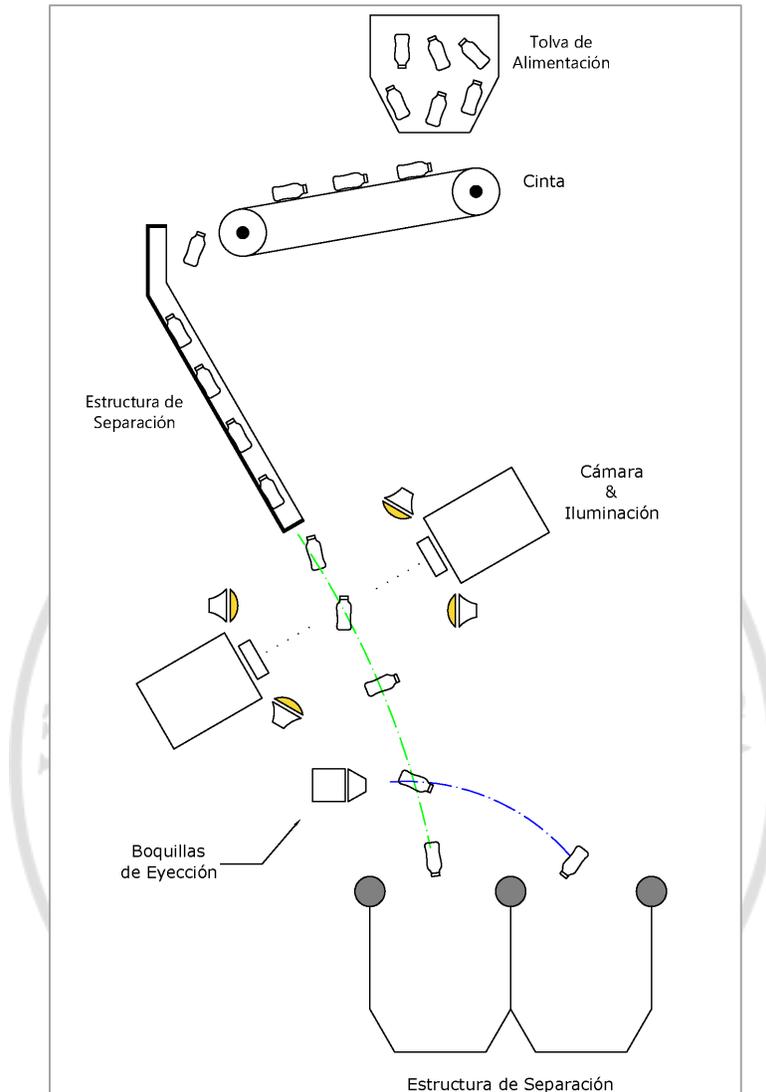


Figura 16: Esquema de Separadora Óptica Vertical
[Elaboración propia]

El segundo concepto de diseño elaborado se representó con una configuración vertical. A diferencia del anterior concepto, este diseño añade una tolva de alimentación y una estructura que sirve como guía para el flujo de los productos.

La visión artificial capta información mientras que el material se encuentra en caída con trayectoria parabólica. Con esta solución, el subsistema neumático se simplifica, ya que está previsto que caiga un objeto tras otro y solo se previó utilizar, para este caso, una única cuchilla de aire.

7.3.1.3 Concepto de Diseño 3: Separadora Óptica de Eyección Doble

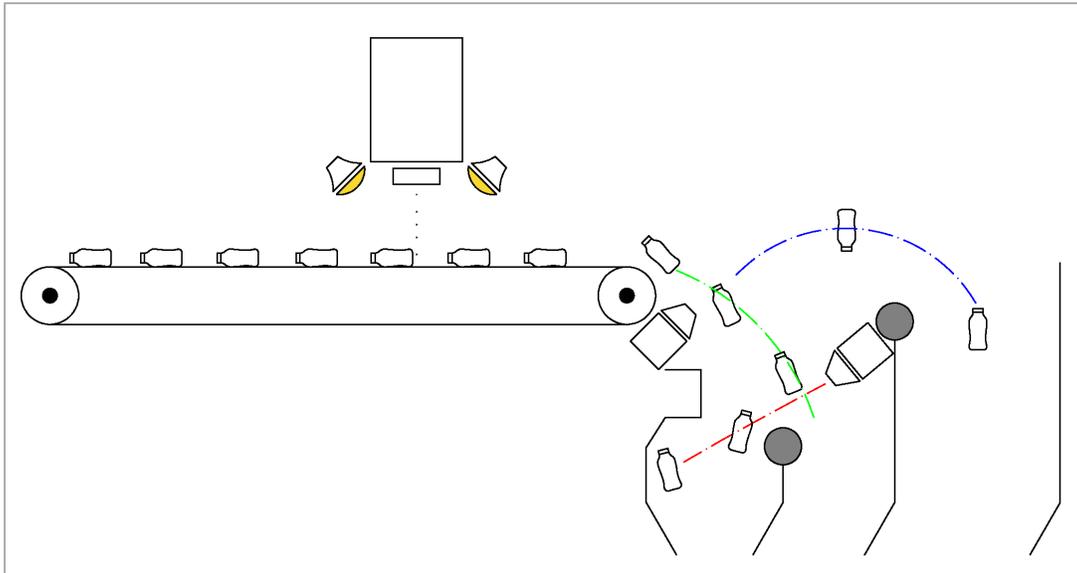


Figura 17: Esquema de Separadora de Eyección Doble
[Elaboración propia]

Como se puede apreciar de la *figura 17*, la separadora óptica de eyección doble requiere modificar la estructura de separación para que sean clasificados tres productos. Se añade un grupo de boquillas de eyección, para dirigir el segundo producto objetivo a su destino.

Por otro lado, se cambia la configuración de la visión artificial, añadiendo otra cámara para que identifique el nuevo material aportado o, en su caso, integrando una segunda cámara. Esto se define en el diseño de software y electrónico de la máquina, aspectos que no son parte de este trabajo, por lo cual se seguirá representando como un único subensamblaje.

7.4 Selección

Con el objetivo de concretar una selección de diseño para desarrollarlo en su totalidad, se llevó a cabo una **evaluación técnico-económica**. Este método se basa en la norma alemana *VID 2225* para métodos de diseño en ingeniería y consiste en la valoración de los distintos conceptos de diseño en base a los aspectos de ingeniería y costes.

Valoración	Puntaje 'p'	Peso ponderado 'g'
0	No satisface	Prescindible
1	Limitado	Poco Útil
2	Suficiente	Útil
3	Bueno	Importante
4	Ideal	Muy Importante

Tabla 11: Puntuación Asignada a Criterios de Evaluación [Elaboración Propia]

La tabla anterior muestra la asignación de puntaje que utiliza este método para cada criterio de evaluación. El valor p designa la escala de valores y g es el peso ponderado, en función de la importancia de cada criterio.

7.4.1 Evaluación Técnica

			Diseño 1		Diseño 2		Diseño 3	
Nº	Criterios de Evaluación	g	p	=g*p	p	=g*p	p	=g*p
1	Complejidad	4	4	16	2	8	3	12
2	Uso de Energía	4	4	16	4	16	4	16
3	Dimensiones	3	3	9	2	6	3	9
4	Diseño	4	2	8	3	12	4	16
5	Seguridad	2	3	6	2	4	3	6
6	Montaje	3	3	9	2	6	3	9
7	Mantenimiento	3	3	9	2	6	3	9
8	Fabricación	3	3	9	3	9	3	9
9	Manipulación	2	3	6	3	6	3	6
10	Fiabilidad	4	3	12	3	12	3	12
Puntaje Total		32		100		85		104
Valor Técnico X_i			0.781		0.664		0.813	

Tabla 12: Evaluación de Desempeño Técnico [Elaboración Propia]

En la evaluación técnica se consideraron criterios que aplican a todos los conceptos de diseño planteados. El diseño que mejor puntuó en este apartado es el tercero, al tener un valor técnico X_i más elevado. Esta variable se calculó con la siguiente fórmula:

$$X_i = \frac{\sum(g_i \cdot p_i)}{(\sum g_i) \cdot p_{i-max}} \tag{6.2}$$

7.4.2 Evaluación Económica

			Diseño 1		Diseño 2		Diseño 3	
Nº	Criterios de Evaluación	g	p	=g*p	p	=g*p	p	=g*p
1	Costo de Tecnología	4	2	8	3	12	2	8
2	Costo Energético	4	3	12	4	16	2	8
3	Costo de Fabricación	3	3	9	2	6	3	9
4	Costo de Mantenimiento	3	3	9	2	6	3	9
5	Costo de Operación	3	3	9	3	9	3	9
Puntaje Total		17		47		49		43
Valor Económico Y_i			0.922		0.721		0.843	

Tabla 13: Evaluación de Desempeño Económico [Elaboración Propia]

La evaluación económica se realizó de igual manera que la técnica. En este aspecto, el puntaje mayor lo obtuvo el concepto de diseño 1. La fórmula para calcular la variable Y_i es la siguiente:

$$Y_i = \frac{\sum(g_i \cdot p_i)}{(\sum g_i) \cdot p_{i-max}} \tag{6.3}$$

A continuación, se analizó las dos evaluaciones en un gráfico valor técnico-valor económico. Se ilustraron las variables adquiridas para todos los diseños.

7.4.3 Gráfica de Resultados

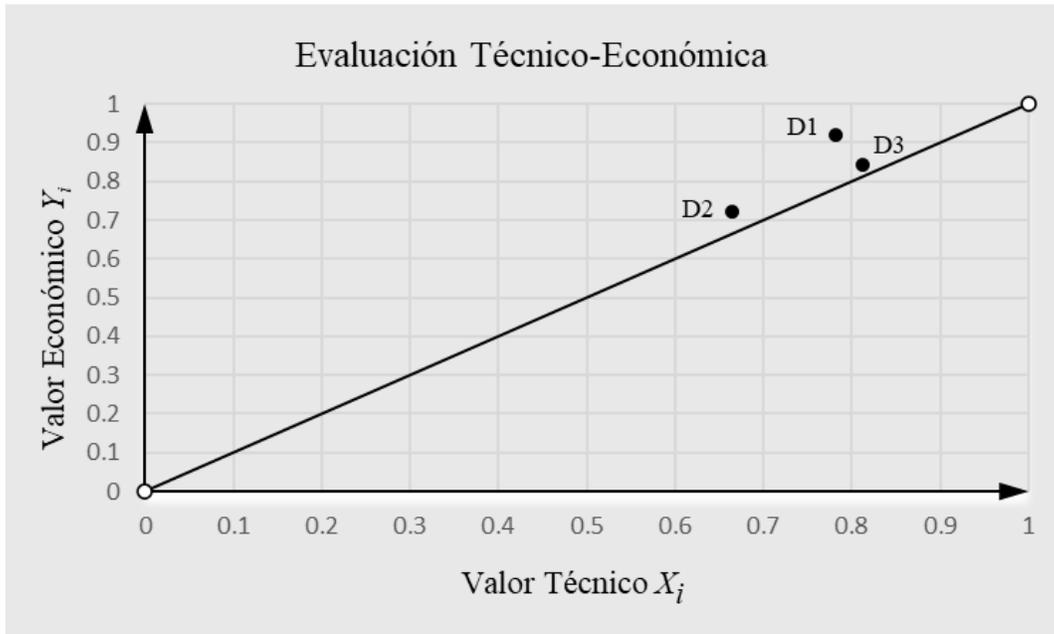


Figura 18: Gráfica Evaluación Técnica Económica
[Elaboración propia]

En la gráfica anterior se muestran los resultados de la evaluación. Cada punto representa un concepto de diseño. Los valores de las variables X_i e Y_i son porcentajes de la calidad relativa de cada diseño.

Según este método, el punto que más se aproxima al punto (1;1) de la recta $y=x$ es el más favorable. Bajo este criterio el **concepto de diseño 3** resultó el ideal para desarrollar en este proyecto.

8 Diseño Preliminar

Este apartado ahondará en el diseño mecánico del concepto seleccionado: separadora óptica de eyección doble. Para empezar, se establecieron unas dimensiones envolventes de los subsistemas y un posicionamiento relativo. Luego se continuó con el cálculo de cada subsistema, tomando en cuenta los requisitos de diseño.

8.1 Dimensiones Envolventes

En primer lugar, se empezó por definir las dimensiones **envolventes** del sistema y subsistemas. Estas representan las medidas máximas de la máquina y se justifican con la investigación previa realizada en el estado del arte. Conocer estos parámetros es fundamental para ubicar los distintos componentes en el espacio que comprende la maquinaria. Su valor final será distinto, debido a las consideraciones que se tomaron en cuenta posteriormente.

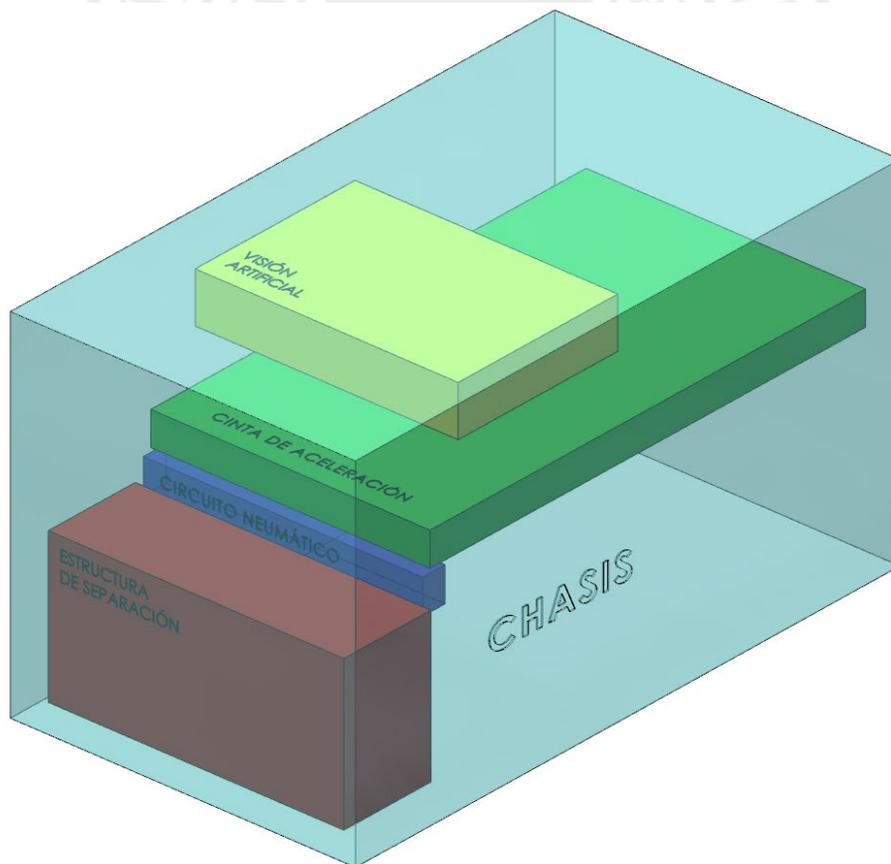


Figura 19: Envolventes de Separadora Óptica
[Elaboración propia]

Sistema / Subsistema	Función	Dimensiones (mm)
Separadora Óptica-neumática	Máquina clasificadora de material que utiliza la neumática	4300x4500x7700
Chasis & Carcasa	Estructuras que soporta y protege todos los subsistemas	4200x4260x7500
Cinta de Aceleración	Imprime una aceleración al material que ingresa	3500x400x6200
Visión Artificial	Detecta y registrar el paso del material. Se comunica con el circuito neumático para coordinar la eyección	3200x600x2200
Circuito Neumático	Compuesto de un compresor, válvulas, tuberías y boquillas de eyección	3500x410x310
Estructura de Separación	Dirige la salida del producto separado	3700x1800x1000

Tabla 14: Dimensiones & Funciones de los Subsistemas
[Elaboración Propia]

8.2 Cinta de Aceleración

La cinta de aceleración es el primer subsistema con el que entra en contacto el material, por lo que su configuración afecta directamente a los demás módulos. Las cintas transportadoras son máquinas por sí mismas, por lo que están compuestas por otros subsistemas que se detallaron de manera independiente y finalmente como conjunto. Las partes principales son: una banda transportadora, tambores (o poleas), rodillos de transporte, motor (y reductor según el caso) y una estructura que soporta todos los componentes de manera estable.

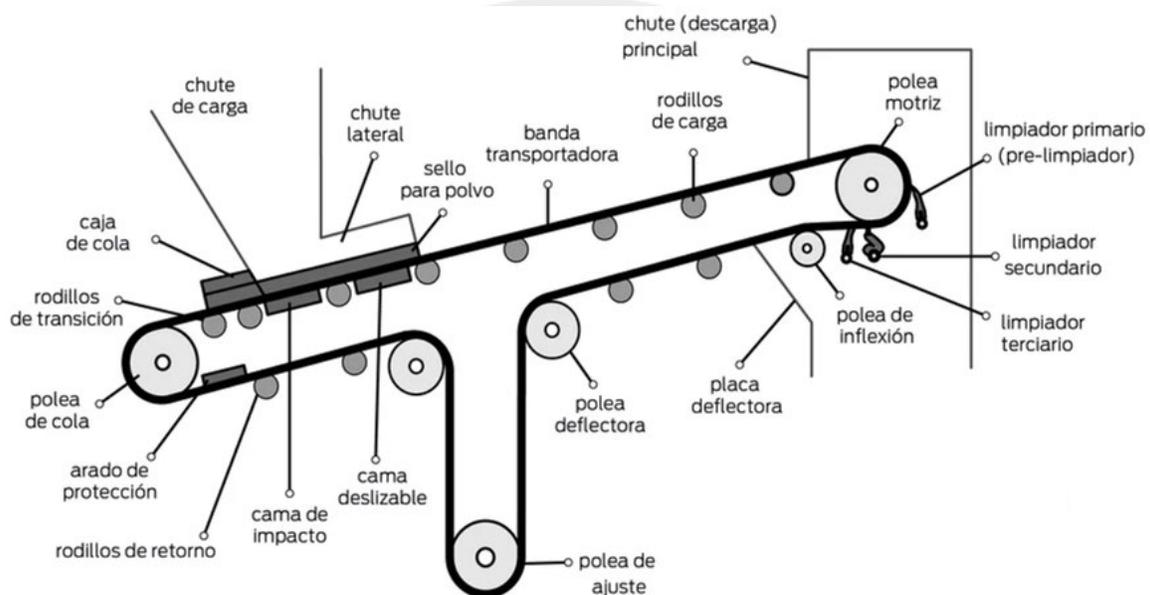


Figura 20: Partes de una Cinta Transportadora [31]

Se empezó con el diseño de la cinta, calculando su ancho. Este depende del flujo volumétrico del material que ingresa y la velocidad que adquiere sobre la cinta.

$$Q = v \cdot A \quad (8.1)$$

Donde:

Q -> flujo volumétrico del producto [m³/s]

v -> velocidad de avance de la cinta [m/s]

A -> sección transversal del material transportado [m²]

El flujo volumétrico se obtiene a partir del flujo másico obtenido en el *apartado 6.2.1*. En la **tabla 3** se dedujeron los flujos másicos de los residuos plásticos más comunes en las plantas de tratamiento. Debido a que este es el caso de eyección doble, se trabajó con los polímeros **polipropileno, polietileno de baja densidad y polietileno de alta densidad**. Las densidades respectivas de cada polímero son 900, 920 y 960 [kg/m³] ^[32].

$$Q_{PP} = \frac{0,9566 \left[\frac{t}{h} \right] \cdot \left(\frac{1000kg}{1t} \right) \cdot \left(\frac{1h}{3600s} \right)}{900 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad (8.2)$$

$$Q_{PELD} = \frac{0,845 \left[\frac{t}{h} \right] \cdot \left(\frac{1000}{3600} \right)}{920 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad (8.3)$$

$$Q_{PEHD} = \frac{0,6264 \left[\frac{t}{h} \right] \cdot \left(\frac{1000}{3600} \right)}{960 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad (8.4)$$

Los caudales calculados son, respectivamente: $2,9525 \cdot 10^{-4}$ [m³/s], $2,5513 \cdot 10^{-4}$ [m³/s] y $1,8125 \cdot 10^{-4}$ [m³/s]. Con estos datos y el ancho banda se puede obtener la velocidad de la cinta.

Con respecto a la sección transversal, esta se determinó con el ancho de la banda y la altura del material de trabajo. El área transversal que cubre el material de trabajo se aproximó al de un rectángulo de dimensiones w (ancho de la cinta) y h (altura de la sección de material).

$$A = w \cdot h \quad (8.5)$$

Para el ancho se empezó utilizando la información provista en la *tabla 1*, realizando un promedio de los distintos anchos usados en la industria. Este resultó ser 2110mm, que se aproximó a **2000mm**.

Con relación a la altura se tuvo que investigar sobre los distintos productos que están previstos interactuar con la separadora óptica. Los artículos comúnmente fabricados de **polipropileno** son **envases para alimentos, botellas reutilizables y productos médicos**.



Figura 21: Dimensiones Envases de PP [33]

En la figura anterior se pueden observar las distintas dimensiones de envases para alimentos grandes elaborados con PP. El más alto que se encontró fue de **12cm** en posición normal, con un volumen de 3500mL.

Por otro lado, el **polietileno de baja densidad** es utilizado en la realización de **bolsas para supermercados y film para alimentos**, en su mayoría. Los productos de LDPE se pueden apreciar en la *figura 22*, no obstante, su espesor es despreciable en comparación con los envases de PP y PEHD, por lo que no influyen este análisis.



Figura 22: Productos de PELD [34 & 35]

Por último, el uso doméstico más común para el **polietileno de alta densidad** son los envases de **productos químicos, agroquímicos, alimenticios**, entre otros.



Figura 23: Productos de PEHD [36]

Los envases de PEHD más grande son, en su mayoría, las botellas para productos químicos. Una botella (por ejemplo, de detergente) tiene, aproximadamente, **6cm** de espesor cuando se encuentra en posición horizontal.

Los productos de PP fueron usados como referencia de altura para el siguiente cálculo. Reemplazando la información obtenida se procede a resolver la *ecuación 8.1*.

$$(2,9525 \cdot 10^{-4} + 2,5513 \cdot 10^{-4} + 1,8125 \cdot 10^{-4}) \left[\frac{m^3}{s} \right] = v \cdot (2 \cdot 0,12) [m^2] \quad (8.6)$$

$$v = 0,00305 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (8.7)$$

El valor que resultó de la *ecuación 8.6* indica la velocidad mínima que debe tener la cinta transportadora, con dicha sección transversal establecida, para mover la carga calculada. Sin embargo, este valor es bastante pequeño, ya que **no se tomó en cuenta la heterogeneidad de los productos y la precisión del flujo de RSU calculado para la Comunidad Valenciana**. Por esta razón se recurrió a tablas y fórmulas de fabricantes de cintas. La siguiente imagen relaciona anchos de banda y velocidad de avance, con la dimensión de los productos transportados.

Tab. 3 - Velocidades máximas aconsejables

Tamaño dimensiones máximas		Banda ancho mín	velocidad max			
uniforme hasta mm	mixto hasta mm	mm	A m/s	B	C	D
50	100	400	2.5	2.3	2	1.65
75	150	500				
125	200	650	3	2.75	2.38	2
170	300	800	3.5	3.2	2.75	2.35
250	400	1000	4	3.65	3.15	2.65
350	500	1200				
400	600	1400	4.5	4	3.5	3
450	650	1600				
500	700	1800	5	4.5	3.5	3
550	750	2000				
600	800	2200	6	5	4.5	4

- A - materiales ligeros deslizables, no abrasivos, peso específico de 0,5÷1,0 t/m³
- B - materiales no abrasivos de tamaño medio, peso específico de 1,0÷1,5 t/m³
- C - materiales medianamente abrasivos y pesados, peso específico de 1,5÷2 t/m³
- D - materiales abrasivos, pesados y cortantes > 2 t/m³

Entre los factores que limitan la velocidad máxima de un transportador citamos:

Tabla 15: Anchos & Velocidades de Bandas Transportadoras [37]

Observando la tabla de la imagen, se recordó la dimensión máxima de los productos mencionada bajo la figura 18, de **12cm**. Esto quiere decir que el ancho y la velocidad se encuentran en el rango **mixto hasta 150mm**. El factor de material es el **A**, de materiales ligeros de 500-1000 kg/m³. Los límites de velocidad y ancho de banda son:

$$v_{max} = 2,5 \left[\frac{m}{s} \right] \tag{8.8}$$

$$w_{min} = 0,5 \text{ [m]} \tag{8.9}$$

Según el estado del arte, las separadoras ópticas utilizan cintas de mayor velocidad que las fabricadas para transporte de productos en general. Es por esto que se decidió doblar el valor de la velocidad a un valor de **5 [m/s]**. Además, se estableció un ancho de banda **w=800[m]**. Con estos datos, el nuevo caudal total que puede transportar la cinta es de **Q'=0,48[m³/s]**. Proporcionalmente, el flujo másico permitido en la cinta es:

$$m'_{Total} = \sum (\%Plastico)_i \cdot (Q_T \cdot \rho_i) = 221,4 \text{ [kg/s]} \tag{8.10}$$

8.2.1 Potencia de Accionamiento

La potencia necesaria para mover la banda transportadora debe calcularse tomando en cuenta la carga a desplazar, la fricción entre todos los elementos involucrados, las dimensiones de los componentes y el régimen de trabajo. Se elaboró un diagrama con las fuerzas que experimenta la carga o producto, durante el transporte en la cinta.

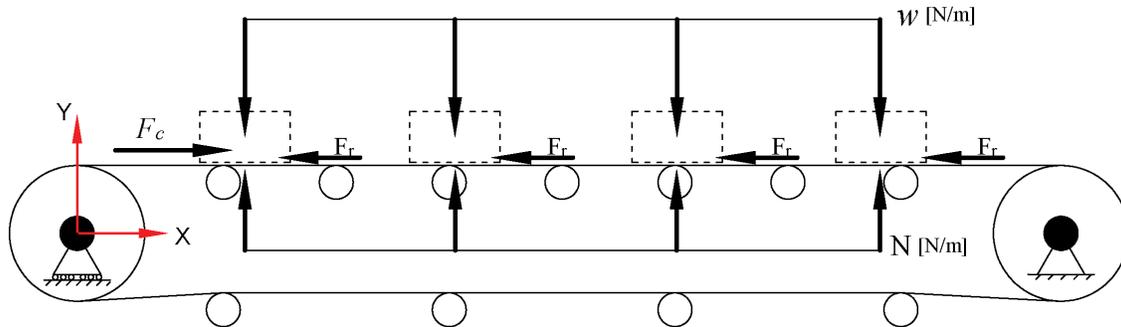


Figura 24: DCL de Productos sobre Cinta
[Elaboración Propia]

El peso se encuentra uniformemente distribuido a lo largo del área longitudinal de la banda, al igual que las normales. La fricción dinámica se vuelve nula en el momento en que el material de transporte se queda en reposo con respecto al movimiento de la banda. Luego, la fuerza necesaria para mover la carga, en este caso llamada F_c , se puede obtener realizando una sumatoria de fuerzas del eje X. Sin embargo, realizando este enfoque se percató que se dejan muchas cosas omitidas para que el cálculo sea preciso.

El cálculo y selección general de las cintas transportadoras se encuentra normado por dos organizaciones: **DIN** (*Deutsches Institut für Normung*) y **CEMA** (*Conveyor Equipment Manufacturers Association*). Con estas guías se puede diseñar de forma más rigurosa los parámetros de la cinta. Algunos de los siguientes valores están respaldados por estas manuales normados^[38] y cálculos propios.

$$P_T = P_C + P_h + P_{ad} \text{ [kW]} \quad (8.11)$$

Donde:

$$P_C = \frac{C_w \cdot v + \dot{m}}{C_L \cdot k_f} \quad (8.12)$$

$$P_h = \frac{H \cdot \dot{m}}{367} \quad (8.13)$$

$$P_{ad} = P_{tr} + P_{dl} + P_{dc} \quad (8.14)$$

P_T -> potencia de accionamiento del tambor motriz [kW]

P_C -> potencia necesaria para mover la cinta en vacío y horizontal con carga [kW]

P_h -> potencia necesaria para elevar (o descender) la carga una cierta altura [kW]

P_{ad} -> potencia adicional requerida para vencer la fricción impuesta por los componentes suplementarios [kW]

P_{tr} -> potencia debido a los *trippers* o carros repartidores [kW]

P_{dl} -> potencia debido a los dispositivos de limpieza [kW]

P_{dc} -> potencia debido a los dispositivos de carga y faldones [kW]

C_w -> factor de ancho de banda [kg/m]

v -> rapidez lineal de banda [m/s]

\dot{m} -> capacidad de transporte de la cinta [kg/s]

C_L -> factor de longitud de banda [m^{-1}]

k_f -> factor de servicio [-]

H -> altura de desplazamiento $H=L \cdot \text{sen}(\Theta)$ [m]

Empezando con el cálculo de P_C , se obtuvo los factores que afectan la ecuación, siguiendo las tablas designadas.

Servicio	Densidad de Material ρ [kg/m ³]	Ancho de Banda [mm]								
		300	400	500	650	800	1000	1200	1400	1600
Ligero	$\rho \leq 1000$	31	54	67	81	108	133	194	227	291
Medio	$1000 < \rho \leq 2000$	36	59	76	92	126	187	277	320	468
Pesado	$2000 > \rho$		65	86	103	144	241	360	414	644

Tabla 16: Factor Ancho de Banda C_w [38]

Se apreció que, en la *tabla 10*, se categorizan los factores según el servicio. La separadora óptica se encuentra dentro del rango de **servicio ligero**. Con un ancho de banda de 800mm, el valor del factor resultó $C_w=108[\text{kg/m}]$.

Longitud [m]	3	4	5	6	8	10	12.5	16	20
$C_L [\text{m}^{-1}]$	667	625	555	526	454	417	370	323	286

Tabla 17: Factor Longitud de Banda C_L [38]

Según el estado del arte que se investigó, se muestra en la *tabla 1* que las separadoras ópticas utilizadas en la industria, en promedio, la **longitud mínima de la banda es de 5000mm**. Este es el valor que se decidió usar para obtener el factor de longitud de banda, $C_L=555[\text{m}^{-1}]$.

Condiciones de Trabajo	$k_f [-]$
Favorables, buena alineación, bajas velocidades	1,17
Normales (condiciones estándar)	1
Desfavorables, baja temperatura, altas cargas, presencia de polvo, altas velocidades	0,87 - 0,74
Temperaturas extremadamente bajas	0,57

Tabla 18: Factor de Servicio k_f [38]

En el caso del factor de servicio, se determinó que las condiciones de trabajo eran estándar, por lo que su valor es igual a **la unidad**.

Con los valores anteriormente obtenidos se pudo calcular la potencia P_c . El valor del flujo másico utilizado es la suma de los flujos de la *tabla 3*.

$$P_c = \frac{108 \cdot 5 + (61,5)}{555 \cdot 1} = 1,1 \text{ [kW]} \quad (8.15)$$

Luego, se determinó que la potencia para elevar o descender carga es $P_h=0[\text{kW}]$, ya que la cinta es plana (no hay inclinación).

Finalmente, la potencia adicional es provista usando la *tabla 19*. Este valor toma en cuenta los distintos complementos de la cinta que necesitan de energía adicional. En la cinta de aceleración de esta máquina, no se incluyó carros repartidores (*trippers*), ni dispositivos de limpieza o guías de carga. Siendo así, la potencia adicional es $P_{ad}=0[\text{kW}]$.

Trippers P_{tr}	Ancho de Banda [mm]	$P_{ad}[\text{kW}]$
	$w \leq 500$	$0,8 \cdot v$
	$500 < w \leq 1000$	$1,5 \cdot v$
Dispositivos de Limpieza P_{dl}	Tipo de Contacto	
	Contacto simple	$0,3 \cdot w \cdot v$
	Contacto de carga elevada	$1,5 \cdot w \cdot v$
Guías de Carga P_{dc}	Longitud L_f	
	Desde el punto de carga	$0,16 \cdot v \cdot L_f$

Tabla 19: Potencias Adicionales [38]

En suma, la **potencia total** equivale a la potencia necesaria para mover la cinta en vacío y en desplazamiento horizontal con carga P_C , cuyo resultado se muestra en la *ecuación 8.14*.

8.2.2 Banda Transportadora

Tras haber calculado la potencia necesaria para impulsar la cinta, se procedió a seleccionar la banda transportadora. Para esto, los fabricantes proporcionan una serie de pautas para realizar un análisis basado en resistencia, material y espesor.

Existen tres tipos de banda, según el aspecto de la superficie portante de la carga: lisas, rugosas y nervadas. Para aplicaciones de transporte horizontal se utilizan las **bandas lisas**. El material de estas suele estar compuesto por múltiples capas de distintos tejidos o metales. La resistencia de las bandas se calcula en base a su **tensión superficial** [N/m], habiendo fórmulas suministradas por los fabricantes^[38].

$$K = \left(\frac{C_R}{C_V} \right) \cdot \frac{P_T}{v} \quad (8.16)$$

La ecuación 8.18, se usó para obtener la tensión superficial de la banda, en función de la potencia de accionamiento y la velocidad.

Superficie de Tambor Motriz	Factor de Fricción μ	Ancho de Banda [mm]						
		300	400	500	650	800	1000	1200
Mojado, sin recubrimiento	0,15	98	74	59	45	37	30	25
Mojado, recubrimiento de caucho	0,25	69	52	41	32	26	21	17
Seco, sin recubrimiento	0,35	57	43	34	26	21	17	14
Seco, recubrimiento de caucho	0,4	53	40	32	25	20	16	13

Tabla 20: Factor de Rozamiento C_R [38]

El factor de rozamiento C_R se dedujo de la tabla 20. La superficie del tambor, como se asumió anteriormente, es seca y recubierta de caucho ($\mu=0,4$). Con el ancho de banda de 800mm, el factor resultó $C_R=20[\text{mm}^{-1}\cdot 10^{-3}]$.

Tipo de Cinta (DUNLOP)	Tipo de empalme por número de telas	Factor C_V
DUNLOFLEX	2 capas superpuestas	100%
	1 capa superpuesta	50%
TRIOFLEX	3 capas superpuestas	100%
	2 capas superpuestas	67%
SUPERFORT	Número de Capas	1
		2
		3
		4
		5
		6
FERROFLEX	Zig-Zag	-
STEEL CORD	Número de Escalones	1 & 2
		3
		4

Tabla 21: Factor de Resistencia a la Tracción C_V [38]

Seguidamente, se buscó el elemento restante para la fórmula de tensión superficial, el factor de resistencia a la tracción según el tipo de cinta y empalme. En este momento, se tuvo que elegir un tipo de cinta del fabricante *Dunlop*, ya que su manual requiere de eso para calcular su tensión superficial. La banda recomendada por el fabricante de aplicaciones ligeras y condiciones normales es la *Dunloflex*, de una capa superpuesta. Por consiguiente, el factor C_V es igual a **0,5**.

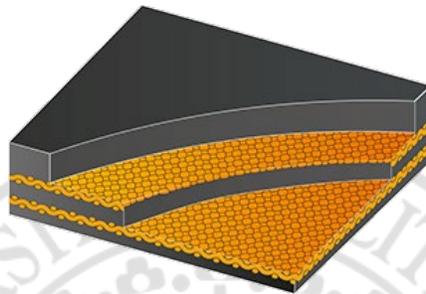


Figura 25: Sección Parcial de Banda *DUNLOFLEX* [39]

En la figura previa, se muestra una vista de sección parcial del material utilizado para este cálculo de banda. Al disponer de todos los datos para resolver la *ecuación 8.18*, se determinó que $K=8,8[N/mm]$.

Este valor de tensión superficial se tuvo que comparar con el catálogo técnico de la empresa suministradora, así se contrasta con los valores nominales.

Belt type	Carcass thickness [mm]	Carcass weight [kg/m ²]	Pulley diameters *			Min. width ** [mm]	Max. belt width [mm] for satisfactory load support with material density of t/m ³ : **		
			A [mm]	B [mm]	C [mm]		< 0.75	0.75 - 1.5	1.5 - 2.5
D 200	2.7	3.5	250	200	160	400	800	800	
D 250	3.1	4.0	250	200	160	400	1000	800	650
D 315	3.2	4.1	250	200	160	500	1200	1000	800
D 400	3.5	4.3	315	250	200	500	1400	1200	1000
D 500	3.9	4.9	315	250	200	650	1400	1200	1000
D 630	4.0	5.0	400	315	250	650	1600	1400	1200
D 800	4.7	5.8	500	400	315	650	1600	1400	1200

Tabla 22: Catálogo Técnico Banda *DUNLOFLEX* [39]

Se apreció que todas las bandas cumplen las especificaciones. Adicionalmente, se adquirieron parámetros de otros aspectos, como: espesor de banda y diámetro exterior de las poleas (conductora, conducida y de inflexión), cuyo esquema se muestra a continuación.

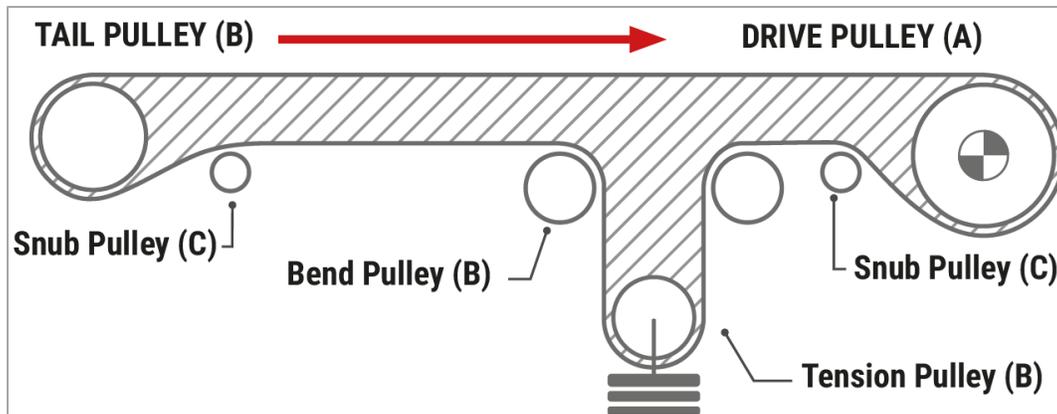


Figura 26: Esquema de Poleas & Designación DUNLOFLEX [39]

8.2.3 Tambores

Los tambores son elementos que transmiten potencia y mueven la banda mediante fricción. Este componente es un sub-ensamblaje dentro del módulo de la cinta de aceleración. Está compuesto por una tubería cilíndrica, un árbol de transmisión, tapas en forma de anillo, rodamientos y anillos de seguridad.

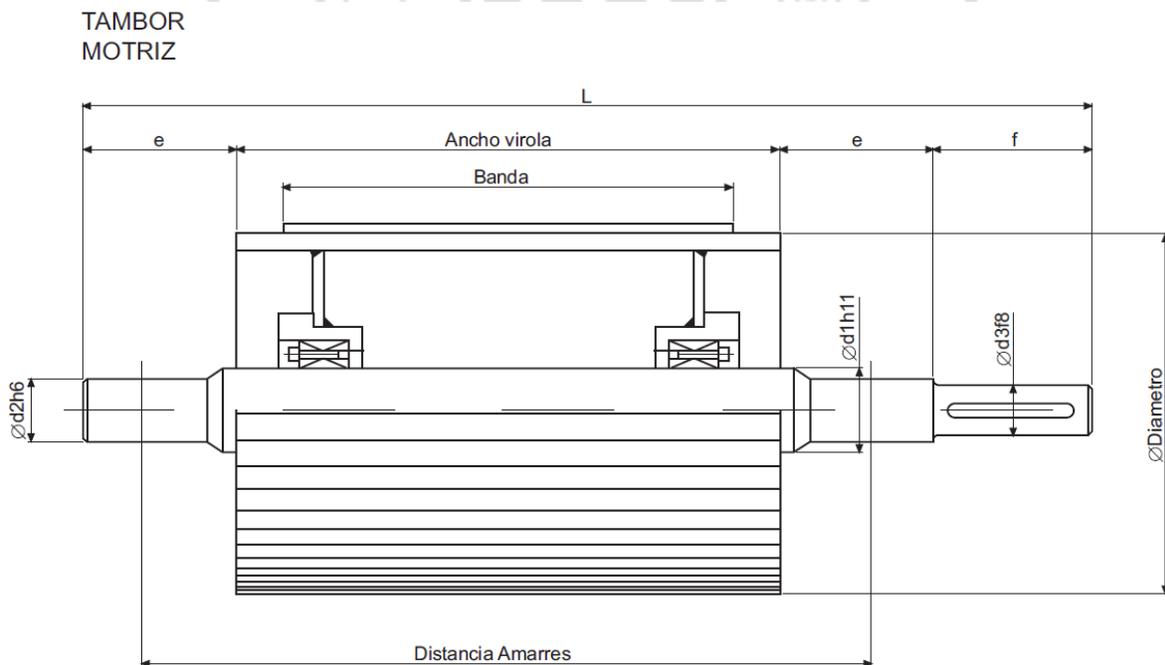


Figura 27: Dimensiones de Ensamblaje Tambor Motriz [40]

La *figura 27* muestra una vista de media sección, frontal, de los elementos que conforman un tambor motriz junto con sus medidas. Esta representación general se encuentra normada por *DIN* y *CEMA*.

Banda	Ancho Virola	Distancia Amarres	f	e	L	Diametro	d1	d2	d3
400	500	675	60	100	795	315	50	40	35
			65	120	805	400	70	50	45
			80	150	835	500	90	65	60
500	600	775	65	120	905	315	70	50	45
			80	150	935	400	90	60	55
			90	160	955	500	110	80	75
650	750	950	65	120	1080	315	70	50	45
			80	150	1110	400	90	60	55
			90	160	1130	500	110	80	75
			110	190	1170	630	130	100	95
800	950	1150	65	120	1280	315	70	50	45
			80	150	1310	400	90	60	55
			90	160	1330	500	110	80	75
			110	190	1370	630	130	100	95
			120	230	1390	800	150	125	120

Tabla 23: Tabla de Dimensiones de Tambor Motriz & Conducido [40]

Siguiendo la información provista por las *figuras 25* y *26*, y a su vez, mirando la *tabla 23*, se obtuvieron las siguientes medidas del tambor motriz: **Diámetro=315[mm]**, **d1=70[mm]**, **d2=50[mm]**, **d3=45[mm]**, **f=65[mm]** y **e=120[mm]**. Las tolerancias de ajustes también se tomaron en cuenta para una fase posterior de fabricación. Una vista de conjunto, isométrica y de sección se muestran a continuación:

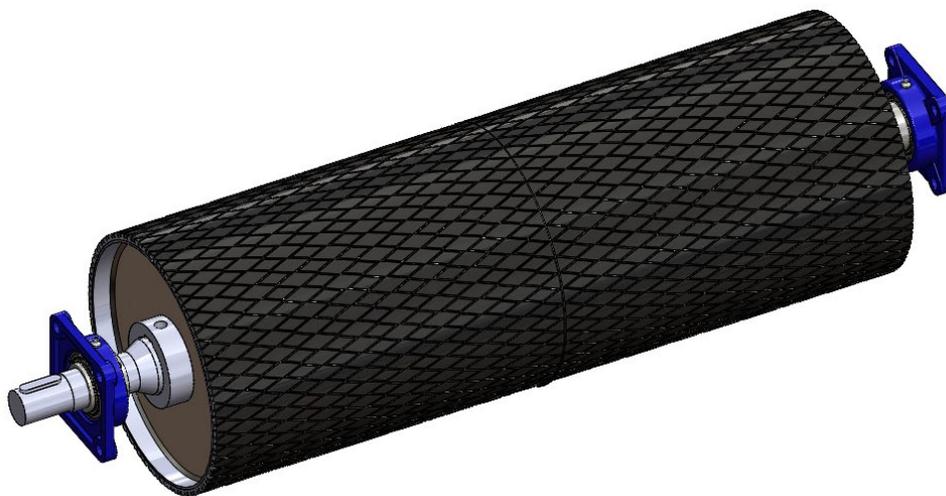


Figura 28: Conjunto Tambor Motriz
[Elaboración Propia]

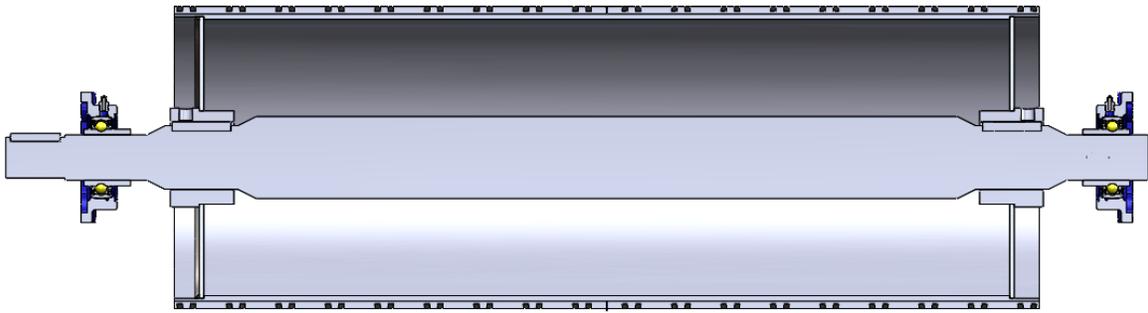


Figura 29: Sección del Conjunto Tambor Motriz
[Elaboración Propia]

El árbol que se propuso en la *figura 27* fue modificado para que el **elemento de fijación** no tenga movimiento relativo a su posición en el árbol. Dicho elemento de fijación es el que transmite la potencia del árbol al tubo engomado con el revestimiento de caucho. Este fue concebido como un casquillo, que incluye agujeros para la aplicación de prisioneros y se monta en el árbol mediante el uso de una chaveta. Los soportes con rodamientos que se utilizaron fueron del tipo UCF y se recurrió al fabricante *SKF*^[41].

Seguidamente, se trabajó en el tambor conducido de la misma forma que el motriz, con la diferencia que este tiene un eje (en vez de árbol) y el diámetro exterior de la tubería es menor.

TAMBOR CONDUcido

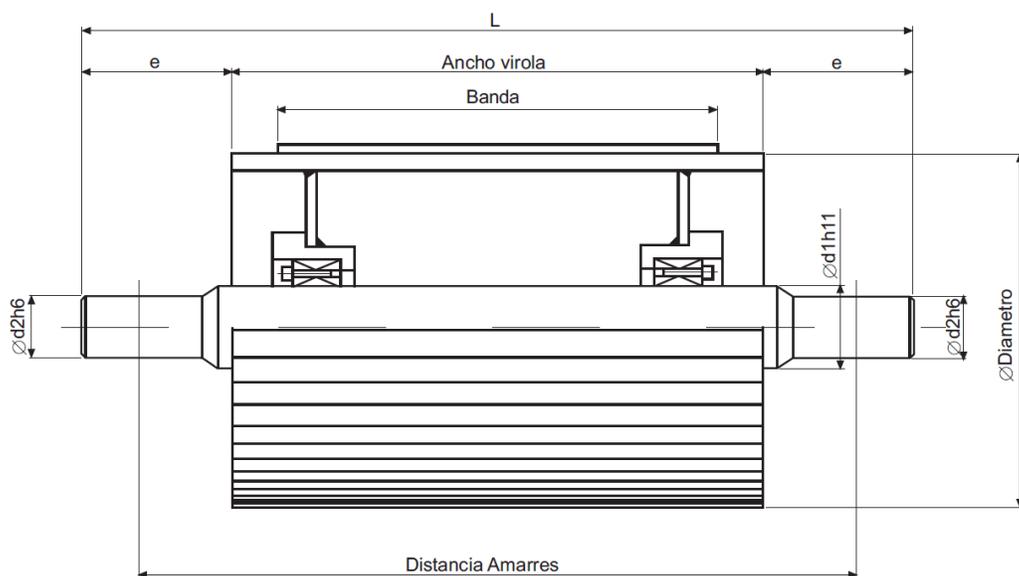


Figura 30: Dimensiones de Ensamblaje Tambor Conducido [40]

Como se puede apreciar en la *figura 29*, el tambor conducido es similar al tambor motriz. El cambio que se realizó fue de pasar de un diámetro exterior de tubo de 315mm a **250mm**. Las vistas isométricas y de sección del tambor conducido se muestran a continuación:

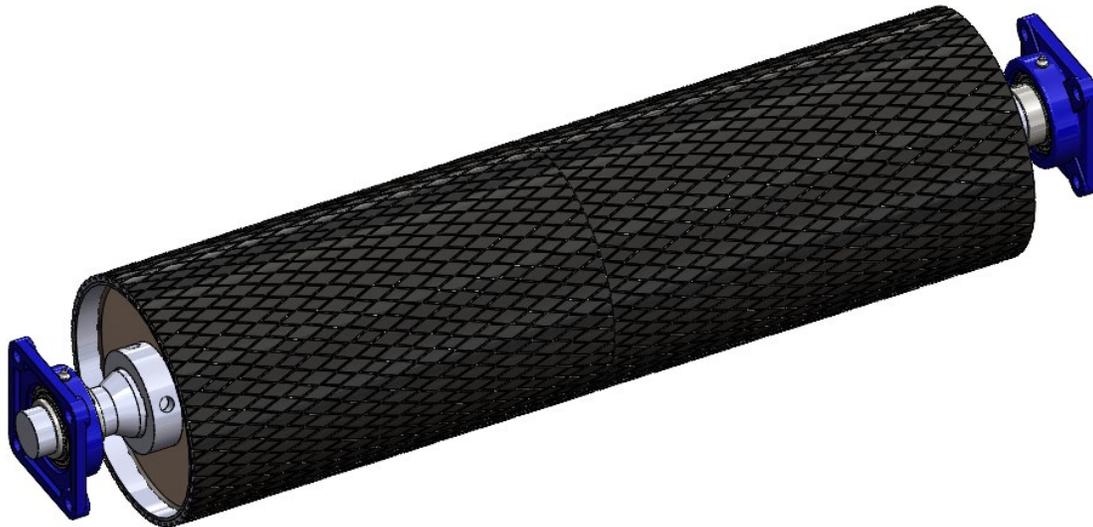


Figura 31: Conjunto Tambor Conducido
[Elaboración Propia]

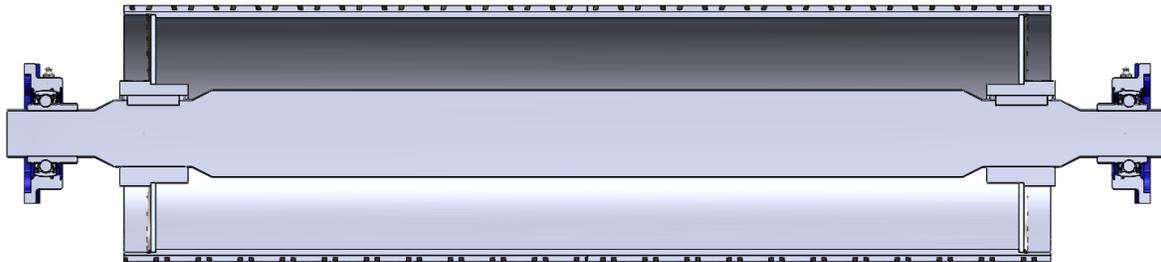


Figura 32: Sección del Conjunto Tambor Conducido
[Elaboración Propia]

8.2.4 Rodillos

Los rodillos son piezas modulares que permiten el desplazamiento de los productos transportados por la cinta. Están compuestos por un eje, rodamientos, una tubería y elementos para el sellado. Las dimensiones generales, recomendadas por fabricantes de rodillos, se muestran en las imágenes posteriores.

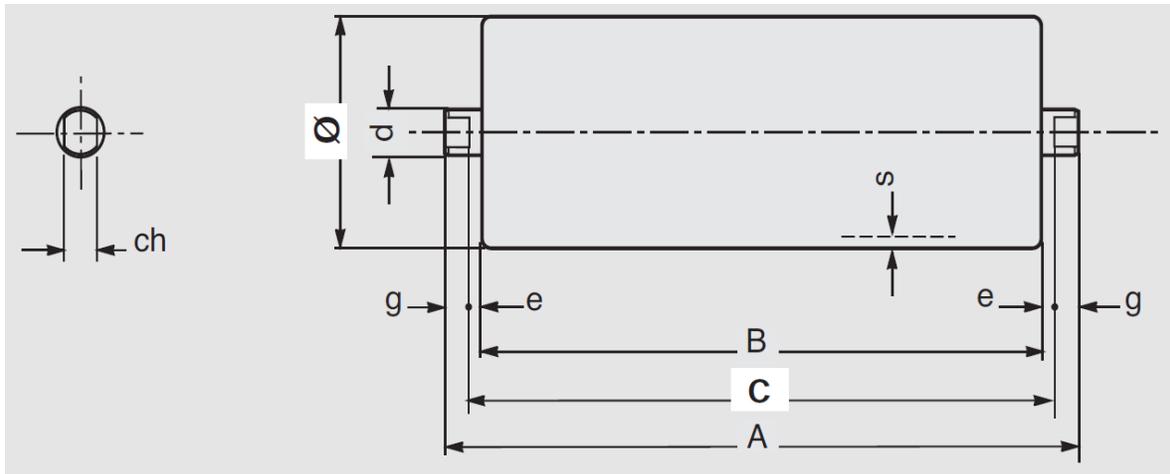


Figura 33: Dimensiones de Conjunto Rodillo [37]

banda	rodillo			peso		capacidad de carga					
ancho mm	dimensiones mm			Kg		daN					
configuraciones 	B	C	A	partes giratorias total		velocidad de la banda m/s					
						1	2	3	4	4.5	5
800	315	323	347	6.4	8.3	627	498	435	395	380	367
1000	380	388	412	7.2	9.5	627	498	435	395	380	367
800 1200	465	473	497	8.3	11.1	627	498	435	395	380	367
1400	530	538	562	9.2	12.3	627	498	435	395	380	367
1000 1600	600	608	632	10.1	13.5	627	498	435	395	380	367
1800	670	678	702	10.9	14.8	627	498	435	395	380	367
1200	700	708	732	11.3	15.4	627	498	435	395	380	367
2000	750	758	782	12.0	16.3	627	498	435	395	380	367
1400	800	808	832	12.6	17.2	627	498	435	395	380	367
1600	900	908	932	13.9	19.0	627	498	435	395	380	367
800	950	958	982	14.5	19.9	608	498	435	395	380	367

Tabla 24: Tabla de Propiedades de Conjunto Rodillo [37]

Con la información anteriormente presentada, se modelaron los componentes de los rodillos. Según las dimensiones que figuran en la *tabla 24*, también indica el fabricante otra información de importancia: el espesor de pared de la tubería es de **4mm** y los **rodamientos** a utilizar (**rígidos de bolas 6306**).

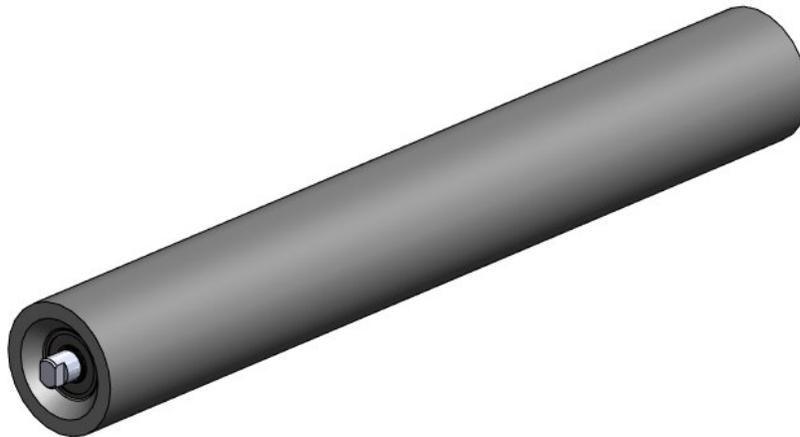


Figura 34: Conjunto Rodillo
[Elaboración Propia]



Figura 35: Sección del Conjunto Rodillo
[Elaboración Propia]

Las dimensiones totales y denominación de cada pieza del subensamblaje se encuentran detallados en el *Anexo A* de planos. Los componentes a los laterales permiten la rotación y proveen el sellado. Estos son: rodamientos, sellados laberínticos, anillos de sellado interior y anillos Seeger A30-DIN471. Se puede apreciar una captura de estas piezas en la siguiente imagen:

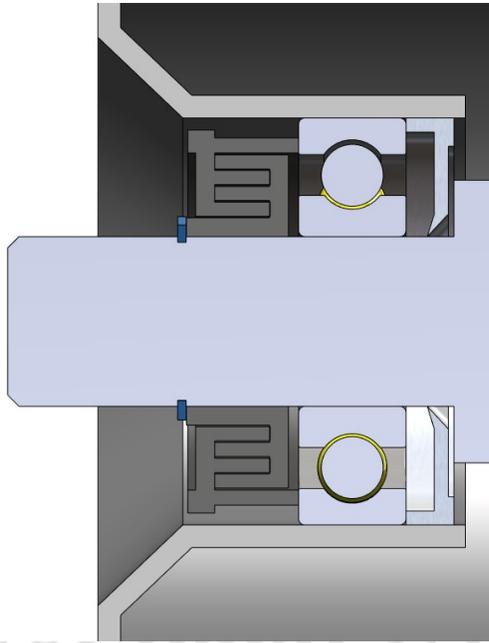


Figura 36: Vista Seccionada de Componentes del Rodillo
[Elaboración Propia]

Se debe determinar cuántos rodillos colocar y el espaciamiento entre estos. Esto toma en cuenta los parámetros de la cinta y su régimen de trabajo.

Carrying Side	
$l_o = 0.5 \text{ à } 1.0 \text{ m}$	Small installation or high impact
$l_o = \text{app. } 1.2 \text{ m}$	Normal installation
$l_o = 1.4 \text{ à } 4.0 \text{ m}$	High tension installation
Return Side	
$l_u = (2-3) * l_o$	Maximum approx 6 m

Figura 37: Espaciamiento entre Rodillos [38]

La ilustración anterior muestra, por un lado, el valor de l_o que representa la distancia entre rodillos de la zona tensa de la banda. Por otro lado, la variable l_u simboliza la separación entre rodillos de retorno, de la zona floja de la banda. Habiendo definido anteriormente que las condiciones de trabajo son estándar, se fija un valor de $l_o=1,2\text{m}$ y usando la ecuación dada también $l_u=2,4\text{m}$. Los resultados del posicionamiento se muestran en la *figura 37*.

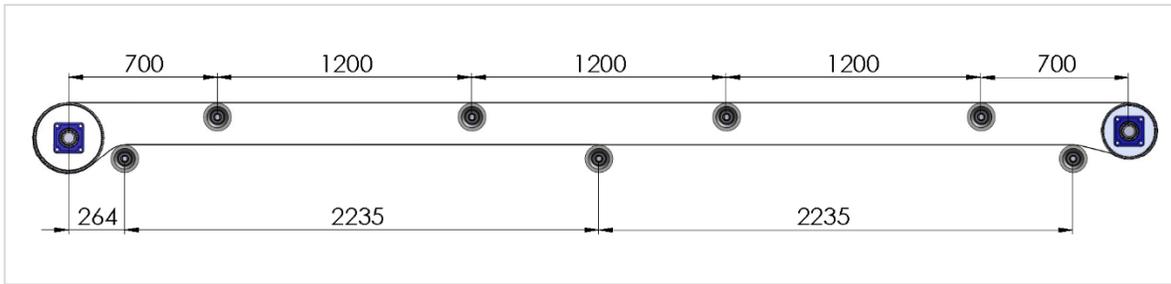


Figura 38: Distancia entre Rodillos
[Elaboración Propia]

7.2.5 Transmisión

La máquina motriz que acciona la cinta transportadora se seleccionó con la ayuda del apartado 8.2.1 *Potencia de Accionamiento*, donde se calculó la potencia total $P_T=1,1$ [kW]. La potencia necesaria del motor eléctrico tuvo que tomar en cuenta el rendimiento de la transmisión η .

Se sabe que la cinta se diseñará con accionamiento simple, es decir, que solo un tambor será impulsado. Comúnmente se usan los motorreductores como máquina motriz de una cinta transportadora. Se encontró información sobre los distintos tipos de transmisión y sus correspondientes eficiencias, para seleccionar y desarrollar. Esta referencia se puede apreciar en la *tabla 25*.

Tipo de Transmisión	Eficiencia
Poleas y bandas en V	94%
Cadena de rodillos	93%
Cadena de rodillos lubricados en aceite	95%
Reductor de engranajes helicoidales, una reducción	95%
Reductor de engranajes helicoidales, doble reducción	94%
Reductor de engranajes helicoidales, triple reducción	93%
Reductor de tornillo sinfín-corona (relación 20:1)	90%
Reductor de tornillo sinfín-corona (relación 20:1 a 60:1)	70%
Reductor de tornillo sinfín-corona (relación 60:1 a 100:1)	50%
Reductor de engranajes rectos (mecanizados)	90%
Reductor de engranajes rectos (fundidos)	85%

Tabla 25: Eficiencia de Diversos Tipos de Transmisión [42]

Según el objetivo ambiental del proyecto, se dispuso a utilizar las transmisiones con mayor eficiencia. Por este motivo, se buscó trabajar con reductores de engranajes helicoidales o tornillos sinfin-corona.

$$P_M = P_T/\eta \tag{8.17}$$

La potencia del motor se obtiene con la fórmula anterior.

Para obtener un valor límite de torque al que debe trabajar el motorreductor, se analizaron los esfuerzos que interactúan en el accionamiento. El siguiente esquema muestra un diagrama de cuerpo libre de la banda, apoyada en el tambor motriz.

Donde:

F_u: Fuerza Tangencial [N]

T₁: Fuerza del lado tenso de la banda [N]

T₂: Fuerza del lado flojo de la banda [N]

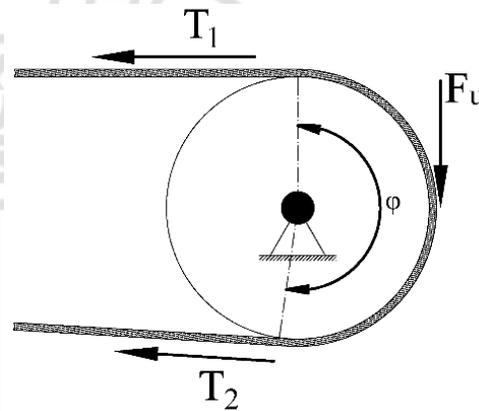


Figura 39: Diagrama de Cuerpo Libre de Banda
[Elaboración Propia]

La fuerza tangencial entre la banda y el tambor se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_T = \frac{F_u \cdot v}{1000} \tag{8.18}$$

Despejando la ecuación 8.18 se reformuló que $F_u=(1000 \cdot 1,1)/5=220[N]$. Esta fuerza se presenta tangencialmente en la superficie del tambor. Con este valor se puede cuantificar las fuerzas de tensión T_1 y T_2 , usando la ecuación de Euler-Eytelwein y la segunda ley de Newton.

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\mu\phi} \tag{8.19}$$

$$F_u = T_1 - T_2 \tag{8.20}$$

Siendo μ el coeficiente de fricción entre la banda y el tambor, y ϕ el ángulo de abrace que se muestra en la *figura 39*. Dicho ángulo varía según la configuración de rodillos y tambores. Para una cinta con condiciones de trabajo favorables, se otorga un valor de 180 grados. Si se añade un rodillo tensor o polea de inflexión, se establece un rango de $220^\circ \leq \phi \leq 230^\circ$. Dado que la cinta de este trabajo no experimenta elevadas cargas, se otorgó un valor de $\phi = 220^\circ$.

Con relación al coeficiente de fricción, los fabricantes de cintas y normas proveen tablas sobre distintos materiales de tambor y banda. Este depende de distintos parámetros como temperatura de trabajo, acabado superficial del tambor, presión superficial, entre otros.

Condición de Operación	Superficie de Tambor Motriz			
	Acero Pulido	Revestimiento Poliuretano (estriado)	Revestimiento Caucho (estriado)	Revestimiento Cerámico (poroso)
Seco	0,35-0,4	0,35-0,4	0,4-0,45	0,4-0,45
Mojado (limpio)	0,1	0,35	0,35	0,35-0,4
Mojado (lodo o barro)	0,05-0,1	0,2	0,25-0,3	0,35

Tabla 26: Coeficientes de Fricción Banda-Tambor [42]

Para esta sección, se asumió que la superficie del tambor se mantendrá como acero con recubrimiento de caucho. Puesto que el material de trabajo es seco y no hay riesgo de fluidos presenten en la operación de la máquina, se dispuso un coeficiente $\mu = 0,4$.

Resolviendo el sistema de ecuaciones 7.16 & 7.17, se calcularon las fuerzas $T_1 = 280,4[N]$ y $T_2 = 60,4[N]$. El procedimiento de la solución se muestra en la *figura 40*, efectuado en el programa *Wolfram Mathematica*.

```
Eqn1 = T1 / T2 == e ^ (mu * phi);
Eqn2 = Fu == T1 - T2;
Simplify[Solve[{Eqn1, Eqn2}, {T1, T2}]]
simplifica | resuelve
```

$$\left\{ \left\{ T_1 \rightarrow -\frac{220 \cdot e^{1.53589}}{1. - 1. e^{1.53589}}, T_2 \rightarrow -\frac{220.}{1. - 1. e^{1.53589}} \right\} \right\}$$

Figura 40: Resultado de Sistema de Ecuaciones para T1 & T2 [Elaboración Propia]

$$M_{MIN} = F_u \cdot r \tag{8.21}$$

La expresión anterior proporciona un valor de torque mínimo para accionar la cinta, con respecto a la fuerza tangencial F_u y el radio exterior del tambor motriz con recubrimiento de caucho ($\approx 320\text{mm}$). Por lo tanto, el momento torsor es igual a $M=276,1 \cdot 0,16=35,2[\text{N}\cdot\text{m}]$. Obtenidos los esfuerzos que experimenta la banda, se procede a seleccionar el motorreductor que acciona la cinta. Los parámetros de selección son: la potencia, la velocidad angular, la relación de transmisión, el régimen de trabajo y la configuración de la máquina motriz. Para empezar, se calculó la velocidad angular.

$$v = \omega \cdot r \tag{8.22}$$

Teniendo valores de velocidad lineal y radio del tambor, se despeja la velocidad angular: $\omega=5/0,16=31,25[\text{rad/s}]$, que son aproximadamente 300[RPM]. Con esta información, se buscó una máquina motriz que cumpla las condiciones. Esta se encontró en un catálogo hecho por la empresa *Motovario*, cuya página web asiste con la selección de reductores con motores eléctricos con variadores.

Buscando datos de revoluciones por minutos y potencia de motor, se encontró una configuración adecuada. En un principio, hubo dificultades al encontrar valores exactos de 1,1[kW] y 300[RPM], es por esto que se decidió utilizar un motor con variador de velocidad y en la práctica se pretende ajustar la velocidad a los parámetros de trabajo indicados. El modelo del reductor es *TXF010+NMRV050*, mientras que el motor es *TP80B2*. Las características motorreductor se muestran en la tabla siguiente.

1,10 kW									
n2 (a) [rpm]	n2 (b) [rpm]	M2 (a) [Nm]	M2 (b) [Nm]	fs (a)	fs (b)	i	Gear reducer	Motor	Fr2 [N]
400,0	68,0	20	50	3,3	2,6	5,00	TXF010+NMRV050	TP80B2	1400

Tabla 27: Parámetros del Reductor de Velocidad [43]

La reducción se realiza en dos etapas, con engranajes cilíndricos de dientes helicoidales. La relación de transmisión es de 5. Los valores mínimos y máximos de velocidad angular se encuentran entre {68;400}RPM.

El rango de momento torsor que provee {20;50} [Nm] va de acorde con lo calculado en la ecuación 8.21.

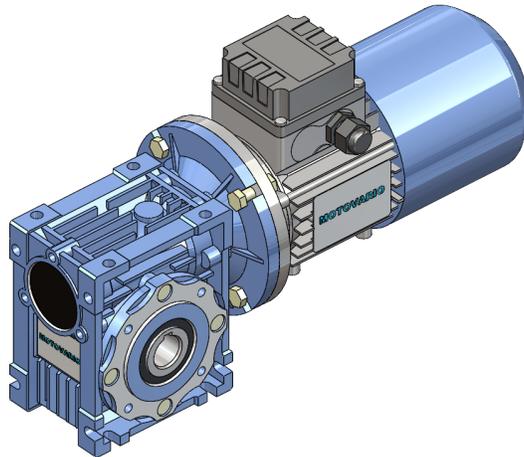


Figura 41: Motorreductor con Variador de Velocidad Seleccionado
[Elaboración Propia]

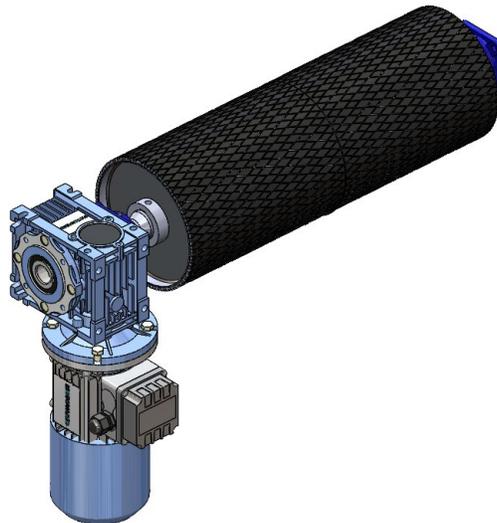


Figura 42: Posición de Montaje de Motorreductor Variador
[Elaboración Propia]

La posición de montaje se realizó de manera vertical para evitar solapamientos con la estructura de la cinta. El cilindro de acoplamiento del árbol del tambor motriz tuvo que aumentar su largo para el correcto posicionamiento del motorreductor. Esto se ve reflejado en los planos del *Anexo A*.

8.2.6 Estructura de Cinta

Para finalizar con el diseño de la cinta, se calculó su estructura. Esta se compuso de perfilería de acero estructural, en su mayoría UPN, pero también tuberías rectangulares y placas. Las dimensiones están directamente relacionadas con todos los componentes anteriores. Una idea base para la ejecución de los cálculos se muestra a continuación:

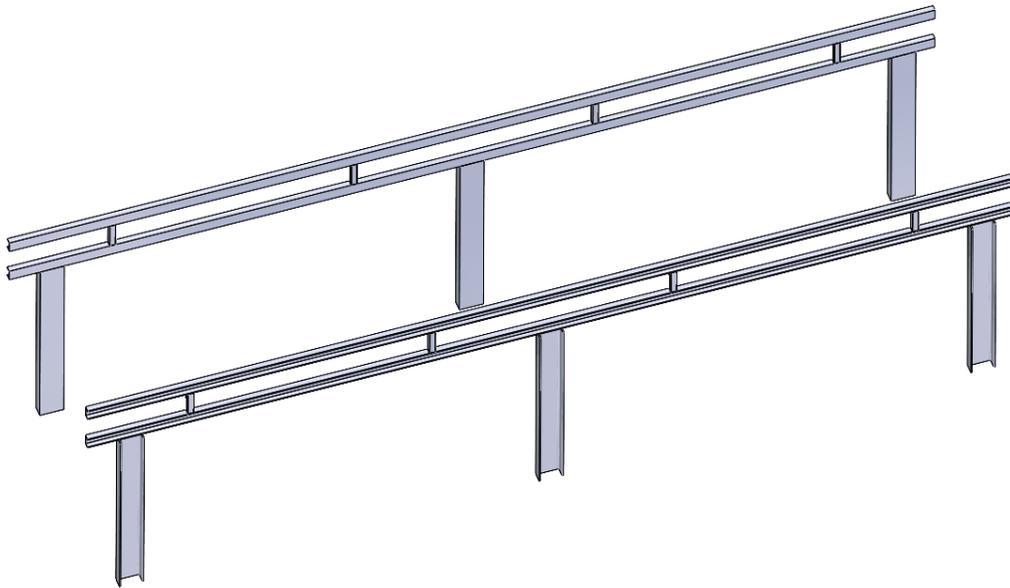


Figura 43: Estructura de Cinta
[Elaboración Propia]

Se muestra seguidamente el análisis de resistencia y deformación del perfil UPN longitudinal (utilizando el programa *MDSolids*), que se apoya sobre las vigas base de la estructura, ya que es el más susceptible a deformaciones que afecten al funcionamiento de la cinta.

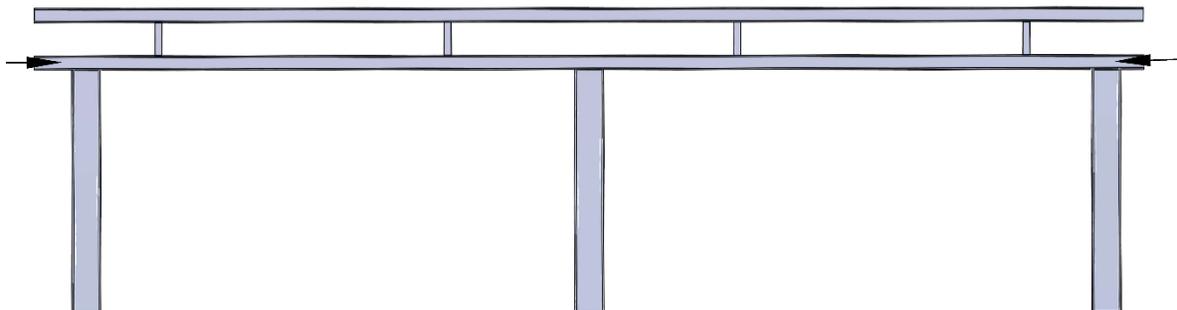


Figura 44: Vista de Perfilería [Elaboración Propia]

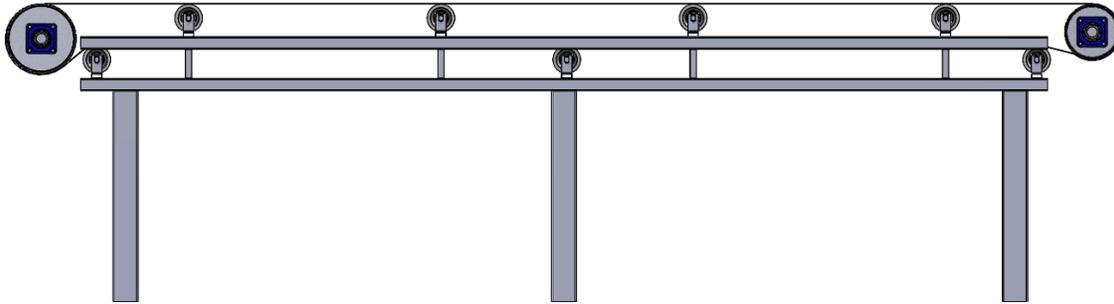


Figura 45: Estructura con Rodillos & Tambores
[Elaboración Propia]

La imagen anterior muestra la estructura con los elementos rodantes montados. En primer lugar, se analizó la viga UPN 60 (señalada en la *figura 44*) como simplemente apoyada (sin la barra media) con el objetivo de conocer si dos vigas de apoyo cumplen los requisitos de resistencia y deflexión. La sección transversal y las características tomadas como referencia están normadas. El material utilizado fue el acero estructural **ASTM A36** (EN S235J2), con un límite elástico $\sigma_y=250\text{MPa}$.

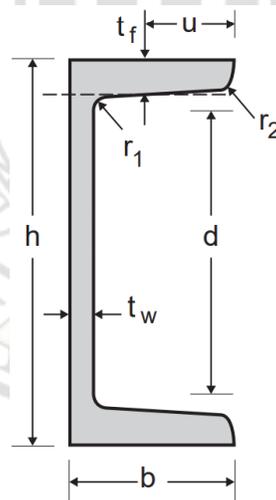


Figura 46: Sección de Viga UPN [44]

La *figura 47* muestra, en la parte superior, el **diagrama de cuerpo libre** de la viga **simplemente apoyada**. Los esfuerzos que actúan incluyen: el peso de los tres rodillos directamente en contacto con el perfil (P_1 , P_2 y P_3), y una carga repartida que comprende los pesos de la carga transportada, de los elementos estructurales directamente superiores y los cuatro rodillos restantes (w_1).

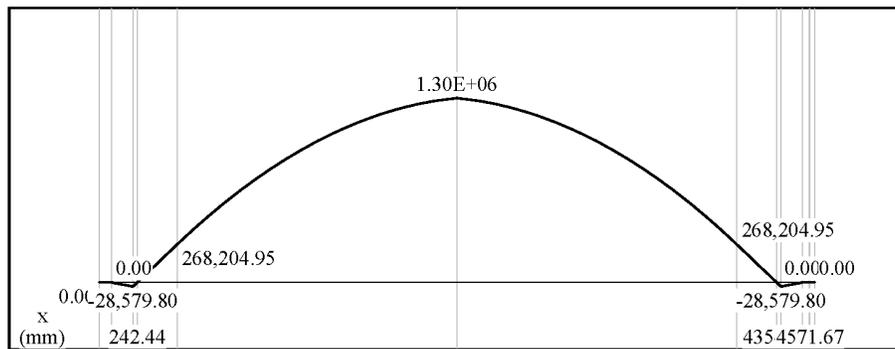
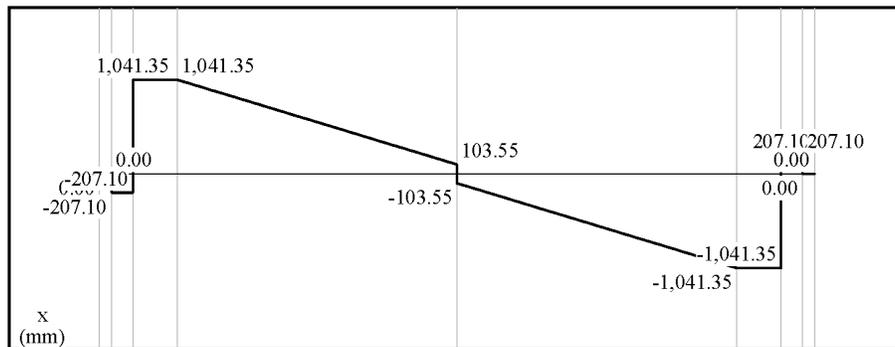
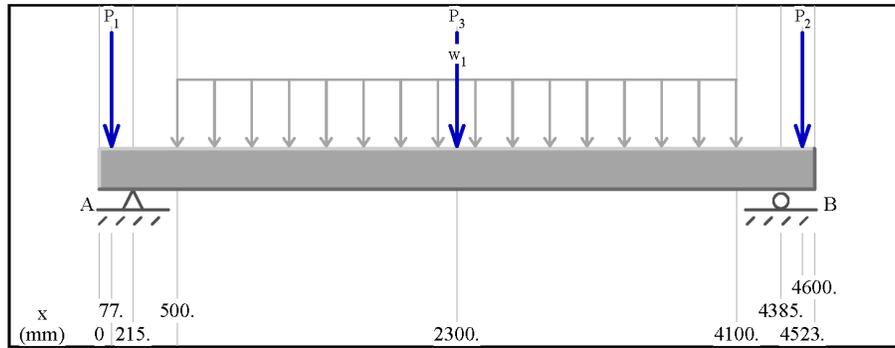


Figura 47: Análisis por Resistencia de Viga UPN 60 [Elaboración Propia]

Según el análisis de resistencia de la viga, se elaboraron los diagramas de momento cortante y flector. Se comprobó que el punto más desfavorable (punto medio del elemento) cumpliera con el material.

$$\sigma_f = \frac{M_f \cdot d}{I} \quad (8.24)$$

$$\tau_c = \frac{F_c}{A} \quad (8.25)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3(\tau_c^2)} \quad (8.26)$$

Las ecuaciones anteriores representan las tensiones de flexión y cortantes, y la tensión equivalente de Von Mises para un estado plano. El momento y la fuerza cortante, en el punto desfavorable, como se aprecia en la anterior imagen, son $M_f=1300\text{N}\cdot\text{m}$ y $F_c=103,55\text{N}$. De la referencia de las vigas UPN[□], se obtuvo $I=31,60\cdot 10^4\text{mm}^4$, $A=645\text{mm}^2$, y $d=30\text{mm}$. Calculando las tensiones resulta un esfuerzo equivalente de Von Mises $\sigma_{eq}=123,42\text{MPa}$.

$$F.S. = \frac{\sigma_y}{\sigma_{adm}} \tag{8.27}$$

Aplicando un factor de seguridad de 2, el esfuerzo admisible sale $\sigma_{adm}=125\text{MPa}$. Considerando la inecuación $\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$, se aprecia que la viga UPN 60 cumple por resistencia, por un pequeño margen.

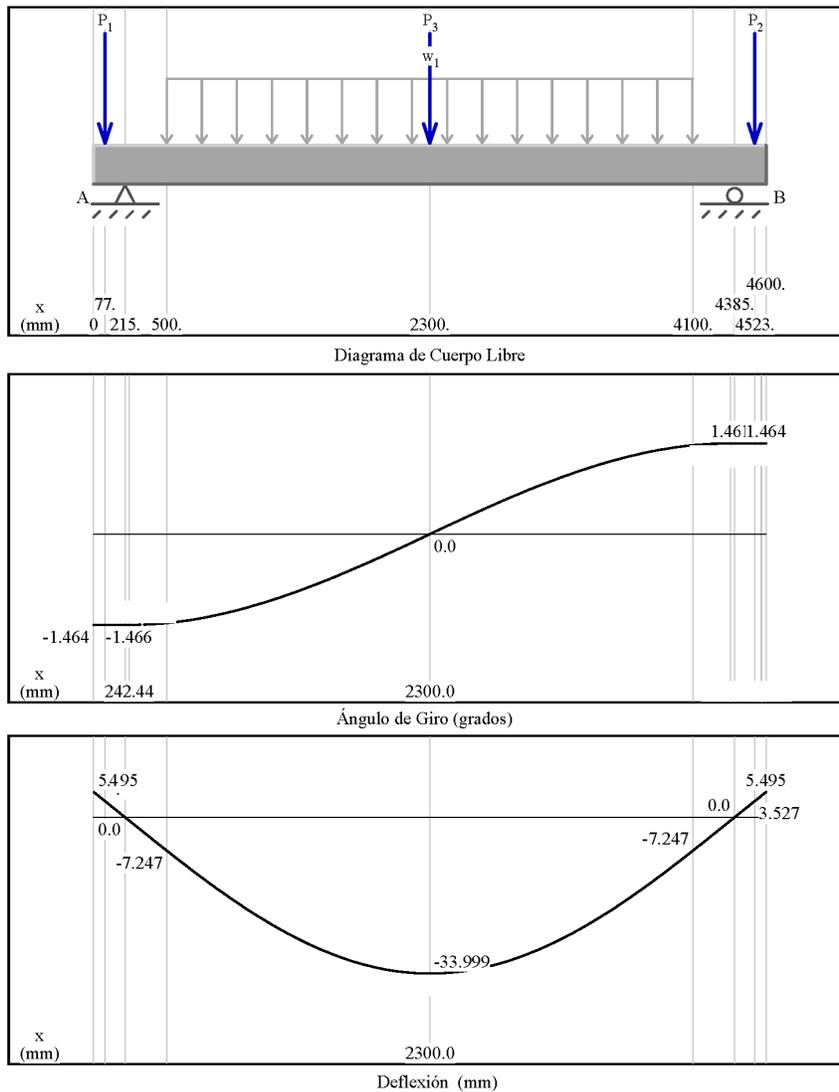


Figura 48: Análisis por Deflexión de Viga UPN 60 [Elaboración Propia]

Posteriormente, se desarrolló la deflexión en la viga, como se muestra en la imagen anterior. La curva elástica obtenida se consiguió combinando distintos casos de esfuerzos en vigas simplemente apoyadas, que han sido estudiados en la materia de resistencia de materiales. El desplazamiento máximo alcanzó un valor de 34mm, lo cual es significativo y traería problemas a la cinta.

Con el objetivo de solucionar esta cuestión, se decidió añadir una viga base más a la estructura y aumentar las dimensiones del perfil a **UPN 80**. Con esta configuración, la máxima deflexión se disminuye hasta **0,6058mm**. Con esto finaliza el análisis estructural de la viga.

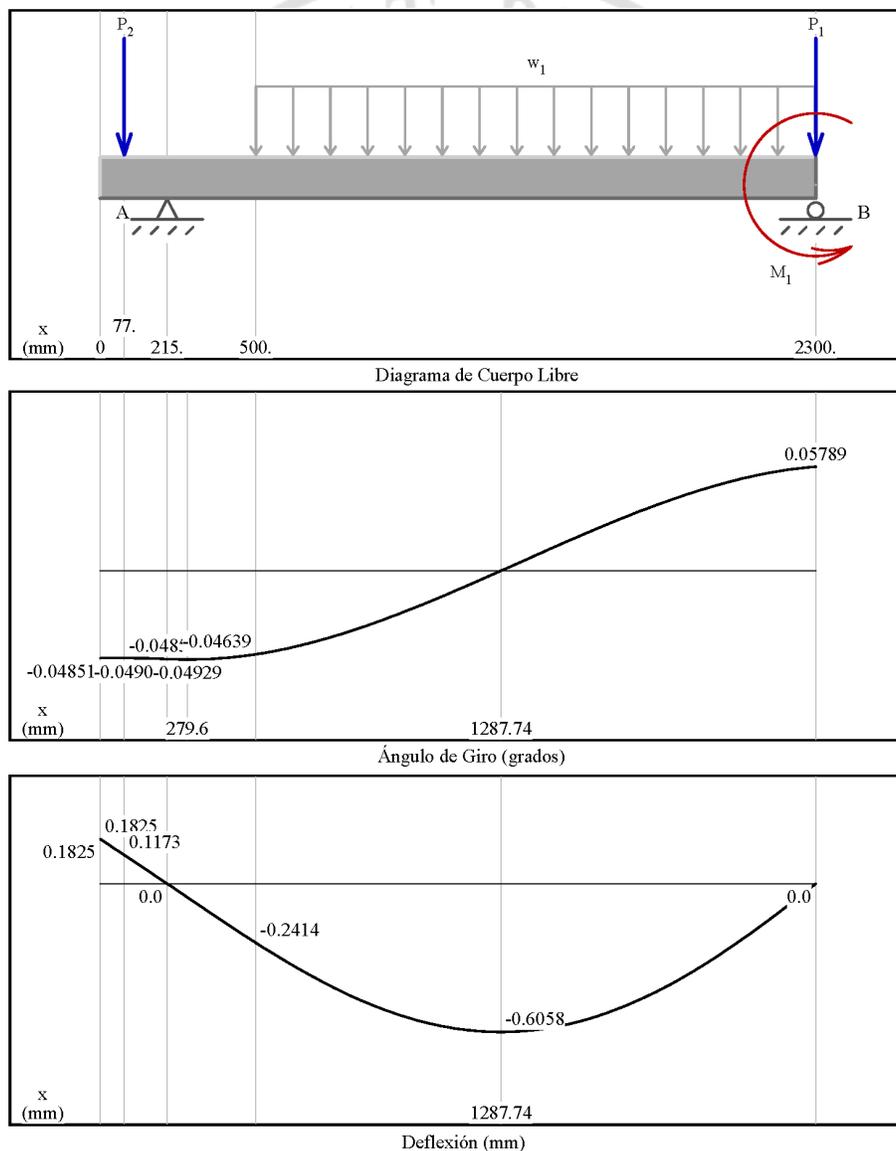


Figura 49: Análisis por Deflexión de Viga UPN 80 [Elaboración Propia]

Por último, se muestra la estructura que se usó para soportar a los rodillos. Esta constituye una barra rectangular de dimensiones 50x20x1,5mm y dos piezas de soporte, como se puede ver en la siguiente imagen.



Figura 50: Rodillo con Estructura
[Elaboración Propia]

La fijación de cada tambor fue llevada a cabo mediante la creación de piezas que se adaptan a la estructura y los rodamientos UCF 210. Estos elementos utilizan uniones atornilladas, ya que deben ser fácilmente desmontables para efectuar mantenimiento a los tambores.

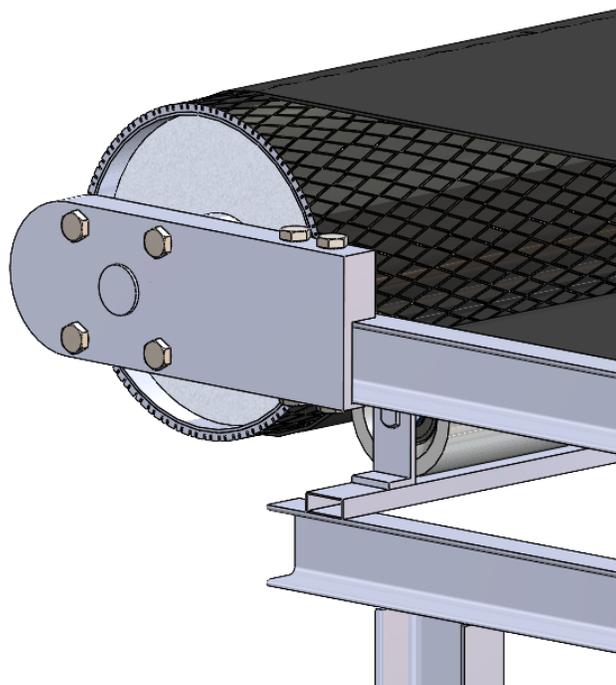


Figura 51: Pieza de Soporte de Tambor Montada
[Elaboración Propia]

Se emplearon soportes de pie de máquina para reducir las vibraciones y el ruido. En específico, se usaron los soportes antivibratorios SV de caucho de tipo 5^[45], de tornillo M16 (*Anexo B*). Para fijarlos a la estructura se añadieron placas rectangulares de 120x55x10mm.

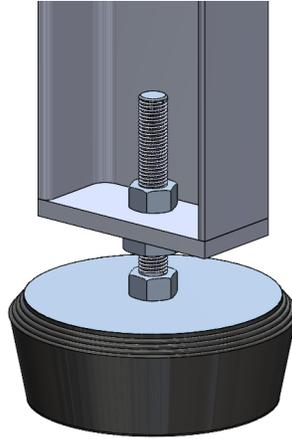


Figura 52: Soporte Antivibratorio Montado [Elaboración Propia]

Finalmente, se añadieron tuberías rectangulares entre perfilerías, para dar estabilidad a la estructura. Las uniones que no han sido mencionada anteriormente se consideran soldadas. La totalidad de los componentes y su posicionamiento en la estructura se encuentran detallados en el *Anexo A*. Una vista isométrica de la cinta transportadora final se puede contemplar en la figura siguiente:

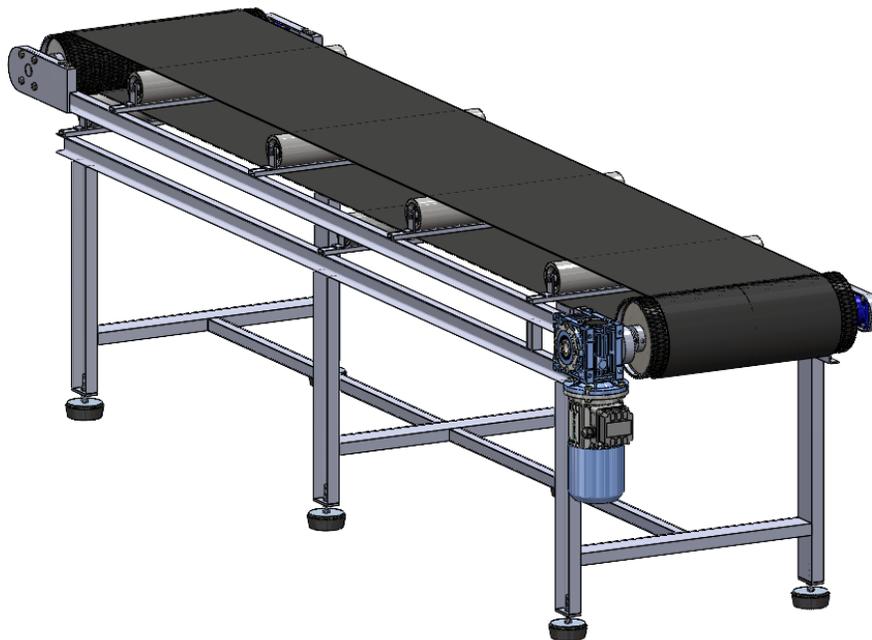


Figura 53: Ensamblaje de Cinta Transportadora [Elaboración Propia]

8.3 Estructura de Separación

Con el objetivo de clasificar el material, se dispone de una estructura compuesta de tolvas y rodillos de separación. Este es el subsistema por el que atraviesa el material separado, para luego ser tratado por otros procesos de reciclaje.

Para su diseño, se analizó la dinámica de los productos, ya que de eso depende las dimensiones finales de la estructura. Se descompusieron tres casos, por separado, del movimiento de cada material.

8.3.1 Configuración Cinemática

El diseño de la separadora óptica gira en torno del desplazamiento del material que discurre dentro de sus límites. El análisis cinemático muestra la geometría de movimiento en detalle, que debe concordar con la geometría de la máquina. Este estudio reveló datos sobre longitudes y velocidades, que son utilizados para definir los distintos módulos que constituyen la maquinaria. En este caso, se analizó la problemática como **cinemática de la partícula**, ya que es una buena aproximación considerando las dimensiones de los distintos cuerpos analizados.

Al haber una clasificación de objetos, existen dos movimientos independientes que se examinaron. Como se aprecia en la *figura 14* el **producto objetivo** posee la trayectoria azul y el **producto 'resto' (o remanente)** sigue el recorrido de la línea verde. Ambos trayectos son **parabólicos**, porque durante la mayor parte del tiempo en que ambos materiales ingresan a las inmediaciones de la estructura de separación, solo perciben la fuerza de su **peso propio**.

8.3.1.1 Movimiento Parabólico: Producto Resto

La primera trayectoria cinemática analizada fue la que recorre el producto resto. La cinta de aceleración imprime una velocidad inicial v_0 al material (igual a la velocidad de la cinta) que se dirige a impactar sobre una pared de la tolva de separación. En la siguiente imagen se aprecia la problemática:

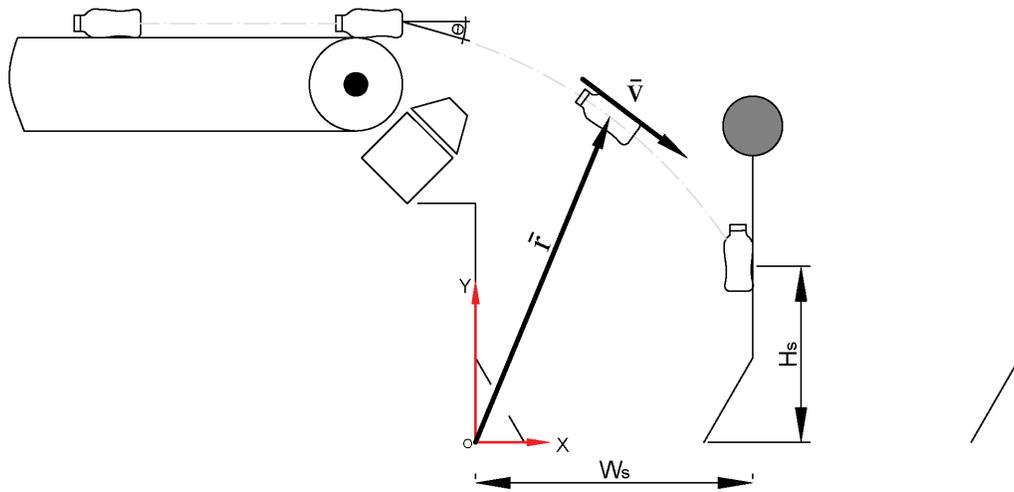


Figura 54: Esquema Cinemático del Producto Resto
[Elaboración propia]

Las dimensiones H_s y W_s son dependientes de la trayectoria parabólica de la partícula, y ésta es afectada por la velocidad inicial y el ángulo de salida. El vector \vec{r} y \vec{v} definen el movimiento en su totalidad y se expresan del siguiente modo:

$$\vec{r} = (x_0 + v_0 \cdot \cos \theta_0 \cdot t ; y_0 + v_0 \cdot \text{sen } \theta_0 \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2) \quad (8.28)$$

$$\vec{v} = (v_0 \cdot \cos \theta_0 ; v_0 \cdot \text{sen } \theta_0 - g \cdot t) \quad (8.29)$$

$$\vec{a} = (0 ; -g) \quad (8.30)$$

Se puede apreciar el origen de coordenadas colocado estratégicamente como referencia para las dimensiones que se quiso obtener. Los valores de x_0 e y_0 se tuvieron que asumir, ya que la estructura que soporta la cinta no ha sido diseñada. Estas constantes se definieron como $x_0=-100[\text{mm}]$ e $y_0=1500[\text{mm}]$. El ángulo inicial de la trayectoria se estableció como $\Theta_0=0^\circ$, debido a que la cinta es plana. Reemplazando los variables H_s y W_s en las dos ecuaciones comprendidas en el vector \vec{r} , se obtienen las siguientes expresiones:

$$W_s = -0,1 + 5 \cos 0 \cdot t \quad (8.31)$$

$$H_s = 1,5 + 5 \text{sen } 0 \cdot t - \frac{1}{2} (9,81)t^2 \quad (8.32)$$

Habiendo tres ecuaciones y tres incógnitas, se dispuso a reemplazar una de las variables por un valor realista. En este caso, se substituyó $W_s=1000[\text{mm}]$. Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtiene: $H_s=1262,6[\text{mm}]$ y $t=0,22\text{s}$, siendo t el tiempo en que el producto impacta con la pared en la distancia H_s .

8.3.1.2 Movimiento Parabólico: Producto Objetivo 1

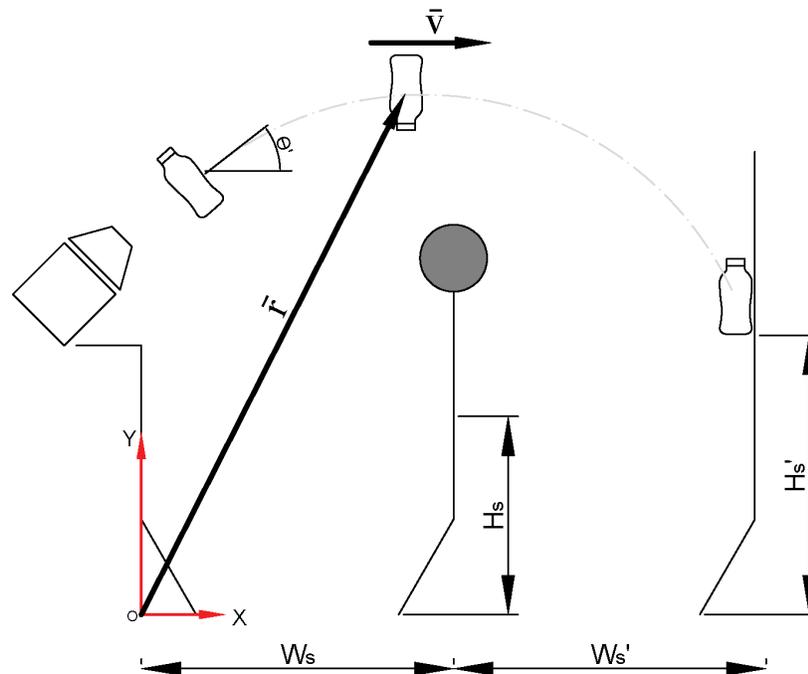


Figura 55: Esquema Cinemático del Producto Objetivo 1
[Elaboración propia]

En este segundo caso, la partícula experimenta una fuerza generada por la presión del aire que proveen las boquillas de soplado. Luego de la aplicación de dicha fuerza, el producto realiza un movimiento parabólico hacia la segunda tolva de separación. Antes de calcular la cinemática del segundo trayecto, se tuvo que hallar la velocidad inicial, en el instante en que el aire impacta con el producto y lo eyecta.

La imagen siguiente muestra los distintos modelos de las boquillas de eyección que se seleccionaron en la matriz morfológica del diseño conceptual. Cada una sirve para distintas aplicaciones. En este caso, se utilizó el **jet de aire 45001**, porque está diseñada para eyectar productos ligeros y abarca más área de trabajo al tener una abertura de salida más grande.



Figura 56: Boquillas de Soplado *Nex Flow* 45001, 45002 & 45003 [26]

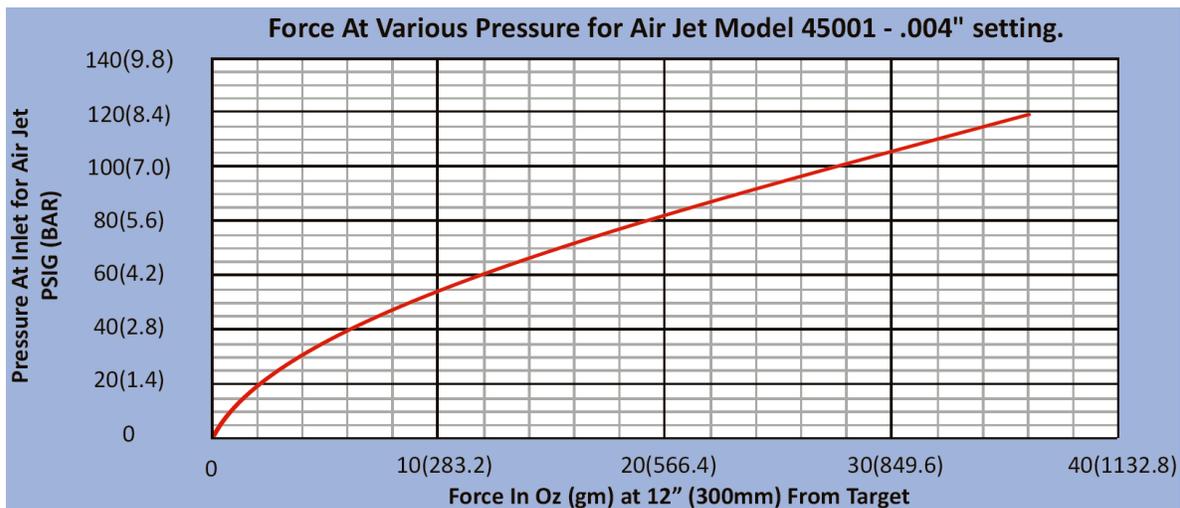


Figura 57: Gráfico Fuerza Ejercida vs Presión del Jet de Aire 45001 [46]

El gráfico anterior muestra la fuerza ejercida por la boquilla al producto objetivo, a una distancia de 300[mm]. Se provee un rango de 0 a 8,4 bares. El análisis se inició con una presión del aire de 7[bar], que transfiere una fuerza $F_N=30[\text{Oz}]=8,343[\text{N}]$.

Impulso & Cantidad de Movimiento

A fin de obtener el vector velocidad inicial de este análisis, se aplicó la teoría del impulso y cantidad de movimiento. Se debe estudiar dos instantes de la trayectoria: el momento antes de que la boquilla libere el aire comprimido y el momento cuando la fuerza neumática terminó de ser aplicada a la partícula. Se empezó esquematizando un diagrama de cuerpo libre de los dos instantes.

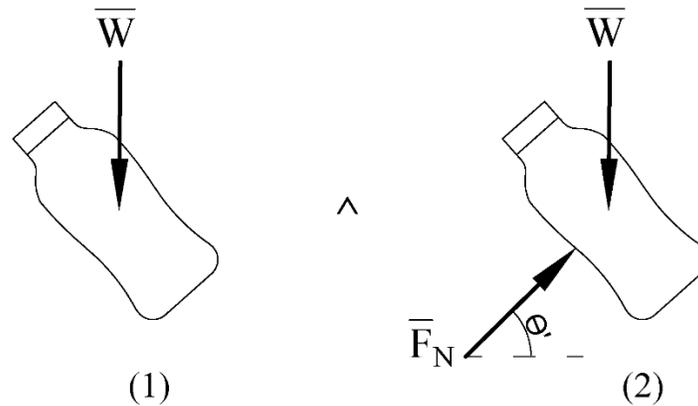


Figura 58: Diagramas de Cuerpo Libre de Instantes Analizados
 [Elaboración Propia]

La ecuación del impulso lineal y cantidad de movimiento involucra la masa del objeto analizado, las fuerzas involucradas en el movimiento y las velocidades en cada instante.

$$m \cdot \bar{v}_1 + \sum_i^{(2)} \int_{(1)} \bar{F}_i dt = m \cdot \bar{v}_{(2)} \tag{8.33}$$

La masa del objeto se consideró $m=0,1[\text{kg}]$, cuyo valor es por encima del promedio, para brindar un factor de seguridad. La velocidad y el tiempo atribuido al primer instante se calcula con las ecuaciones 8.28 y 8.29, asumiendo una altura inicial $y_0'=1400[\text{mm}]$. El tiempo recorrido por la partícula desde el primer caso hasta la posición de eyección es $t_1=0,14[\text{s}]$ y la velocidad $\bar{v}_1=(5 ; -1,4)[\text{m/s}]$. Las fuerzas del peso y la presión del aire se consideran constantes en función del tiempo. Con estos datos se reemplaza en la ecuación 8.33 para obtener el vector \bar{v}_2 .

$$0,1(5; -1,4) + (F_N \cos \theta'; F_N \sin \theta')(t_2 - t_1) + (0; -0,1 \cdot 9,81)(t_2 - t_1) = 0,1 \bar{v}_2 \tag{7.34}$$

Las incógnitas que se deben reemplazar para conseguir la velocidad del instante dos son el ángulo inicial (de eyección) y el tiempo del segundo instante, con relación al primero. Se dispuso a probar con el ángulo $\theta_0'=45^\circ$. El tiempo entre el inicio de la eyección, hasta que

empieza el segundo movimiento parabólico se estableció en $t_2=0,17[s]$. La velocidad entonces se calcula como $\bar{v}_2=(6,77 ; 2,88)[m/s]$. En módulo se traduce a $v_2=7,36[m/s]$.

Posteriormente, para obtener las dimensiones Hs' y Ws' que aparecen en la *figura 51*, se debe calcular la cinemática como en el caso anterior. Una vez más se propone que el ancho de dicha tolva sea de un metro ($Ws'=1000[mm]$). Adicionalmente, se dispuso un valor inicial en el eje de abscisas de $x_0'=100[mm]$.

$$W_S + W_S' = 0,1 + (v_2 \cdot \cos \theta_0' \cdot t) \tag{8.35}$$

$$H_S' = 1,4 + (v_2 \cdot \sen \theta_0' \cdot t) - \frac{1}{2} (9,81)t^2 \tag{8.36}$$

Con este arreglo, el tiempo de impacto surge 0,365 segundos y la altura $Hs'=2646[mm]$. Este resultado se consideró como muy elevado y un sobredimensionamiento de la estructura. Se probó variando la presión del aire y el ángulo de eyección. La combinación más favorable se estableció en los siguientes datos:

P _{aire}	F _N	Θ ₀ '	v ₂	t _{impacto}	Hs'
2,8[bar]	6[Oz]=1,668[N]	30°	5,28[m/s]	0,415[s]	1650[mm]

Tabla 28: Resultado del Movimiento Parabólico del Producto Objetivo 1
[Elaboración Propia]

Adicionalmente, se precisó calcular la altura máxima de la trayectoria, ya que eso limitará las dimensiones del rodillo separador y la posición del segundo set de boquillas de eyección. Se evaluó la altura cuando la partícula se encuentra a una distancia Ws del punto de origen.

$$1 = 0,1 + (v_2 \cdot \cos \theta_0' \cdot t) \tag{8.35}$$

$$H_{MAX-RODILLO} = 1,4 + v_2 \cdot \sen \theta_0' \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \tag{8.38}$$

El tiempo donde alcanza dicho punto es de 0,197[s] y el valor de altura máxima es aproximadamente $H_{MAX-Rodillo}=1730[mm]$.

8.3.1.3 Movimiento Parabólico: Producto Objetivo 2

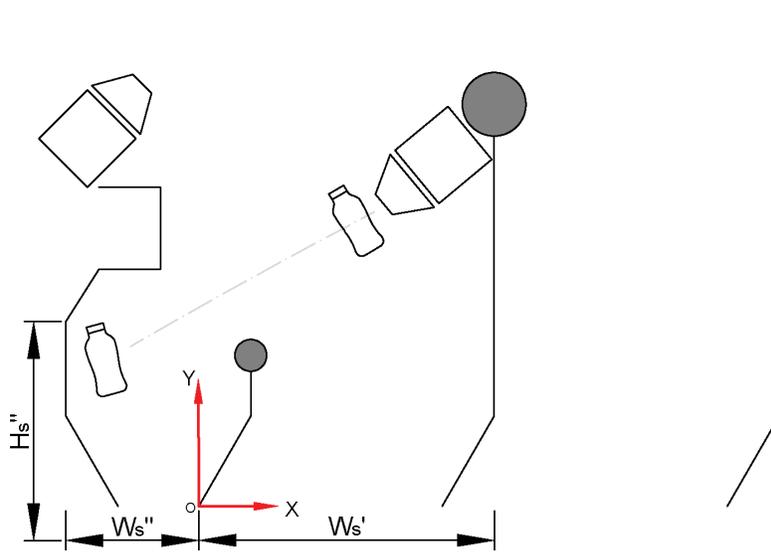


Figura 59: Esquema Cinemático del Producto Objetivo 2
[Elaboración propia]

Por último, se planteó la dinámica de la eyección del segundo producto objetivo. Se utilizó los mismos parámetros en cuanto al circuito neumático y las mismas ecuaciones para resolver este caso. El punto de inicio de la trayectoria se estableció en $x_0''=900[\text{mm}]$ e $y_0''=1300[\text{mm}]$. La velocidad inicial ocurre 0,202 segundos del primer movimiento parabólico y tiene un valor de $\bar{v}_3=(5 ; -1,982)[\text{m/s}]$.

Se dictó un tiempo de aplicación de la fuerza de eyección neumática de 0,03 segundos y un ángulo de eyección $\theta_0''=195^\circ$. Usando la ecuación 7.33 de impulso y cantidad de movimiento, con estos datos, se obtuvo una velocidad $\bar{v}_4=(4.567 ; -2,53)[\text{m/s}]$, con un módulo $v_4=5,22[\text{m/s}]$.

$$0,1(5; -1,982) + (F_N \cos \theta''; F_N \sen \theta'')(t_2 - t_1) + (0; -0,1 \cdot 9,81)(t_2 - t_1) = 0,1\bar{v}_4 \quad (7.39)$$

Teniendo la velocidad inicial del segundo movimiento parabólico, se recurrió otra vez a las ecuaciones comprendidas en el vector \bar{r} de este caso. Se tumo que asumir un valor de anchura de tolva $W_s''=500[\text{mm}]$.

$$-W_S'' = 0,9 + (v_4 \cdot \cos \theta_0'' \cdot t) \quad (8.40)$$

$$H_S'' = 1,3 + (v_4 \cdot \sen \theta_0'' \cdot t) - \frac{1}{2}(9,81)t^2 \quad (8.41)$$

De este modo, el tiempo de impacto es 0,278 segundos y la altura $H_S''=547$ [mm]. Con esto se termina el análisis dinámico de los productos.

8.3.2 Dimensiones Generales

Unificando los tres análisis previos, se modeló el conjunto final de la estructura. Está compuesto, en total, por diez chapas dobladas y cortadas a medida, de espesor 3mm. También se situaron dos rodillos de diámetro 100mm, igualmente de 3mm de espesor. Se tomaron en cuenta los montajes de las boquillas de eyección, cuyo diseño se muestra en el siguiente apartado.

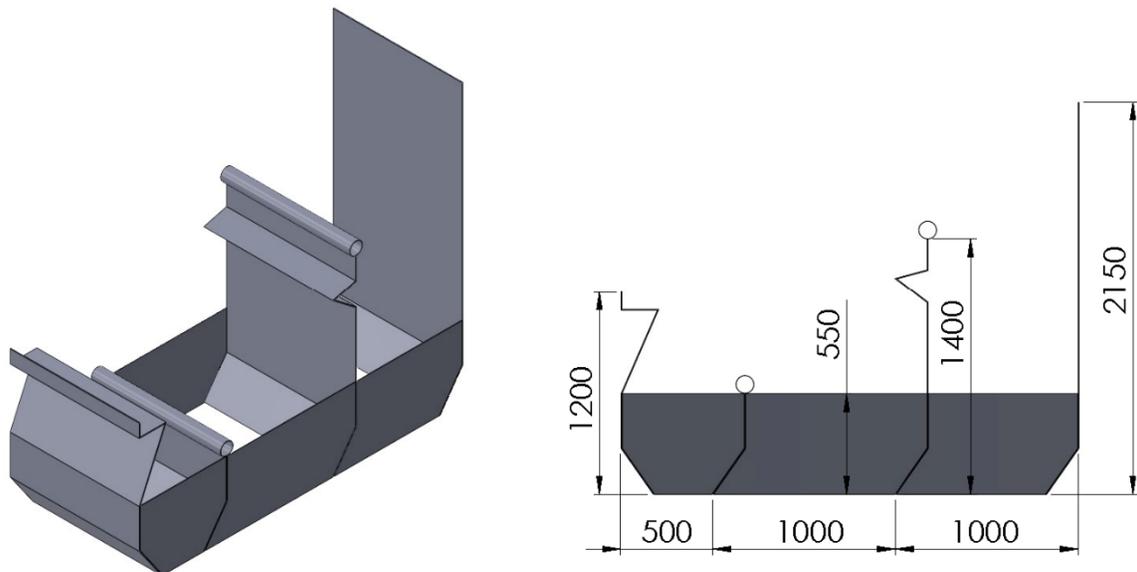


Figura 60: Dimensiones & Vista Isométrica de Estructura de Separación
[Elaboración propia]

El plano de este subensamblaje se encuentra detallado en el *Anexo A*.

8.4 Circuito Neumático

El subsistema que se encarga de la eyección del material es el circuito neumático. Como se mencionó antes, este incluye las boquillas de soplado (o boquillas de eyección), válvulas de control electroneumáticas, tuberías y un circuito electrónico de control automático (que incluye sensores, autómatas; sin embargo, esto no se abarca en este trabajo). Una carcasa se diseñó para comprender las boquillas y válvulas en una misma posición de trabajo.

Las boquillas y válvulas se modelaron con ayuda de planos del fabricante. Luego, se empezó a modelar la carcasa en función de las dimensiones de estos dos componentes.

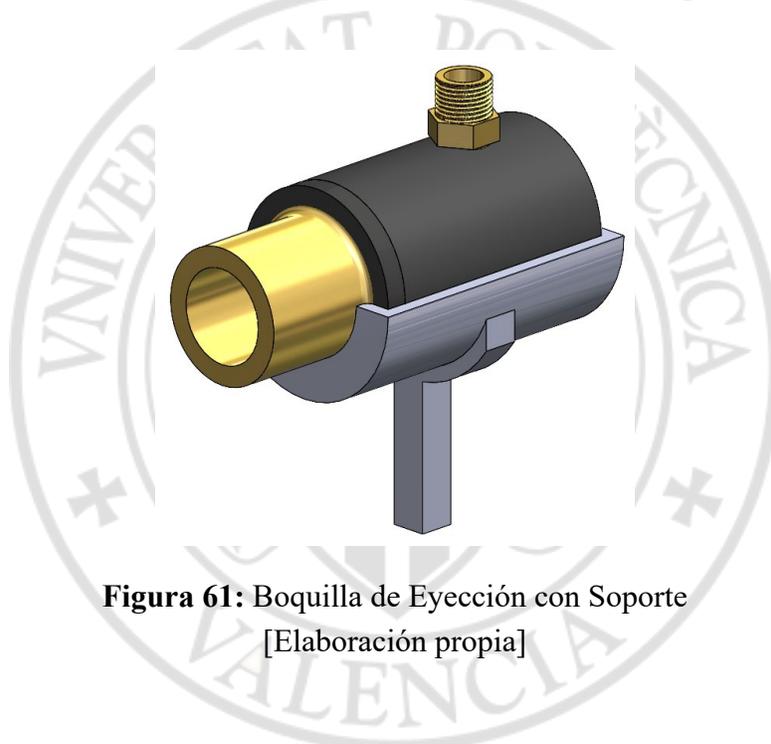
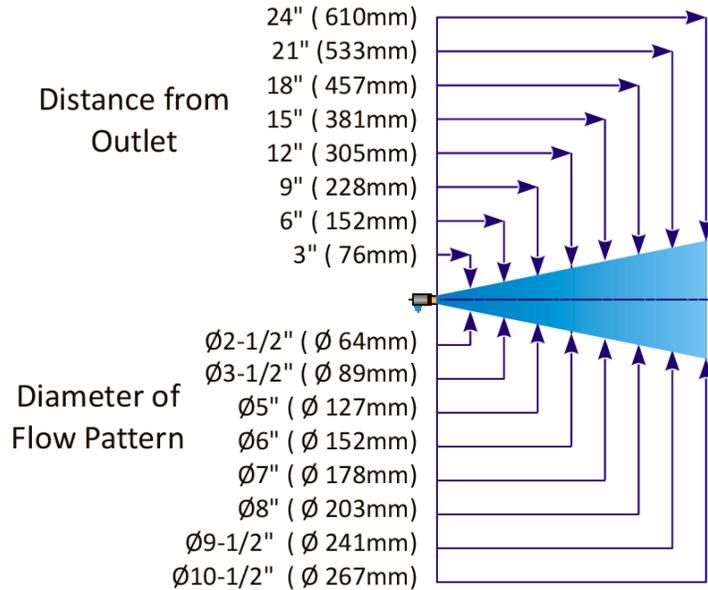


Figura 61: Boquilla de Eyección con Soporte
[Elaboración propia]

Se tuvo que considerar el número de boquillas que se necesitaban, en paralelo, para que se logre cubrir toda el área transversal de desplazamiento de los productos. Como dato se buscó el rango de trabajo del aire procedente de las boquillas de eyección. En la *figura 57* se aprecia a qué distancia se alcanza un cierto valor de diámetro de la ráfaga de aire presurizado.

Esto se comparó con la longitud de la banda, ya que esta influye directamente con la longitud de la carcasa que contiene las boquillas y válvulas.



MODEL :- 45001 JET

Figura 62: Rango de Aplicación del Jet de Aire 45001 [46]

Recordando la información de la *figura 53*, la fuerza que se utilizó para calcular la dinámica de los objetos se determinó a una distancia de 300mm de la salida de la boquilla. Según la imagen anterior, a esa distancia el Jet de Aire elegido tiene un alcance de **152mm** de diámetro.

$$N_{Boquillas} = \frac{w}{\phi_{flujo}} \tag{8.41}$$

El resultado de la ecuación es de 5,26 cuyo valor se redondea a **6**. Esto abarca un ancho, sumando los diámetros útiles de trabajo, de 900mm.

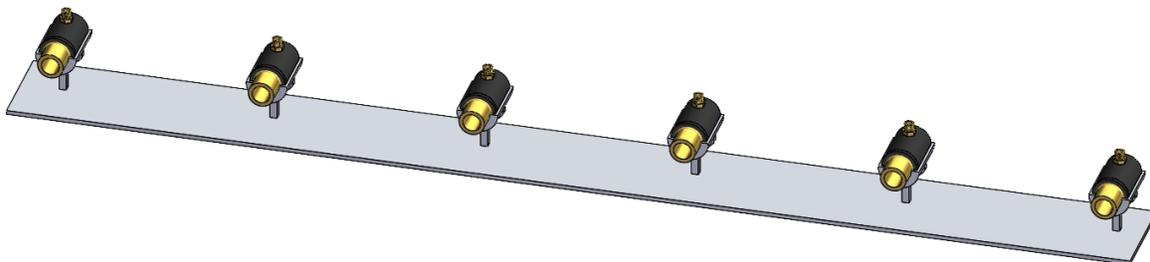


Figura 63: Posición de Boquillas en Paralelo
[Elaboración propia]

Se realizó un esquema neumático simple para tener una perspectiva de la configuración de los componentes. La válvula que se consideró como la apropiada para este caso fue una **válvula de control 2/2 de accionamiento electroneumático**. Esto se debe a que las boquillas solo necesitan dos estados: eyección o reposo.

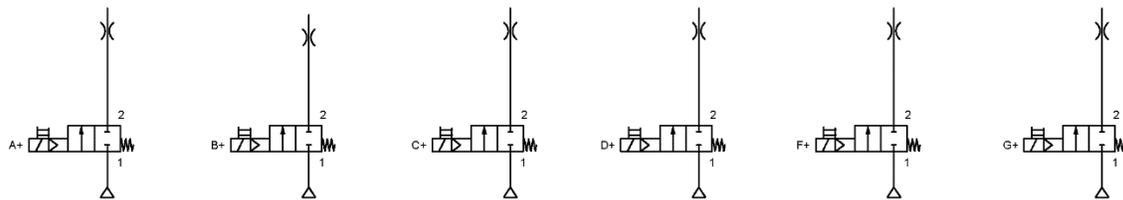


Figura 64: Esquema Neumático de Boquillas en Paralelo
[Elaboración propia]

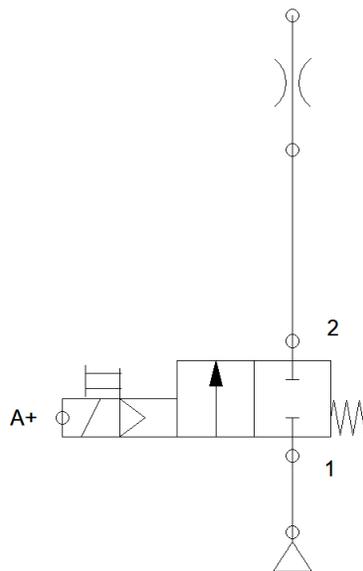


Figura 65: Esquema Neumático una Boquilla con Válvula 2/2
[Elaboración propia]

La selección de la válvula tomó en cuenta la presión de trabajo de las boquillas (2,8bar) y el caudal requerido. El fabricante de boquillas provee de una gráfica para obtener el caudal (figura 60), donde muestra que, para un valor de presión de 2,8 bares, se genera un consumo de aire de aproximadamente **15,5[l/min]**. Con estos datos se seleccionó una válvula de dos vías, de la empresa *Festo*, dedicada a tecnologías de automatización neumática y eléctrica.

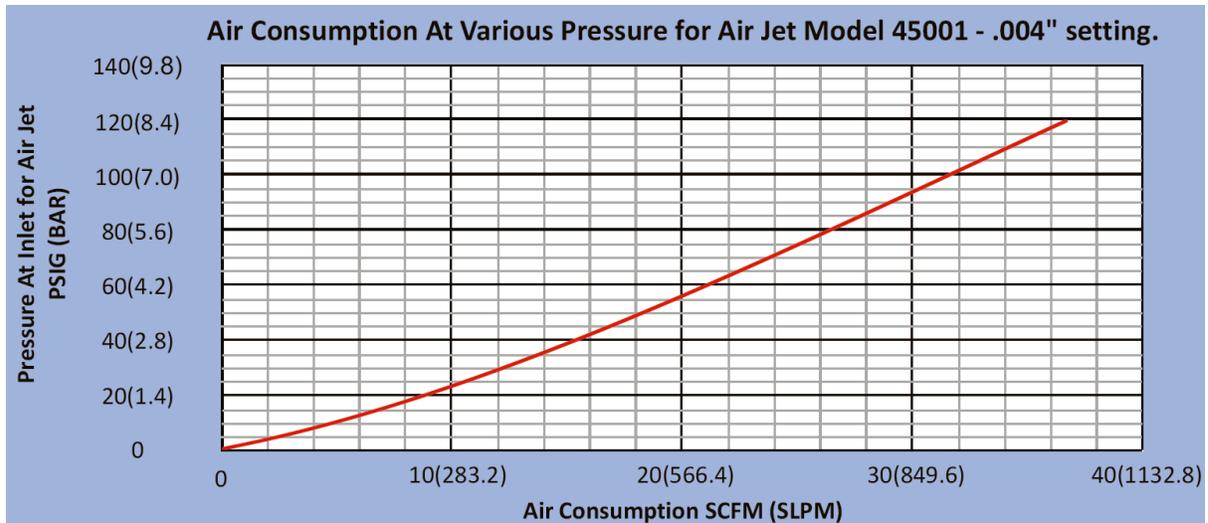


Figura 66: Gráfico Consumo de Aire vs Presión del Jet de Aire 45001 [46]

La válvula seleccionada fue la *Festo VZWF*, de diafragma con accionamiento forzado, monoestable y normalmente cerrada. Trabaja con una presión máxima de 10[bar] y caudal de 1,8[m³/h]. La tensión de alimentación para el solenoide es de 24V, con corriente continua y consume una potencia de 11[W].

Se posicionó una válvula por cada boquilla. Es apta para trabajar con aire comprimido según la norma ISO 8573-1:2010.

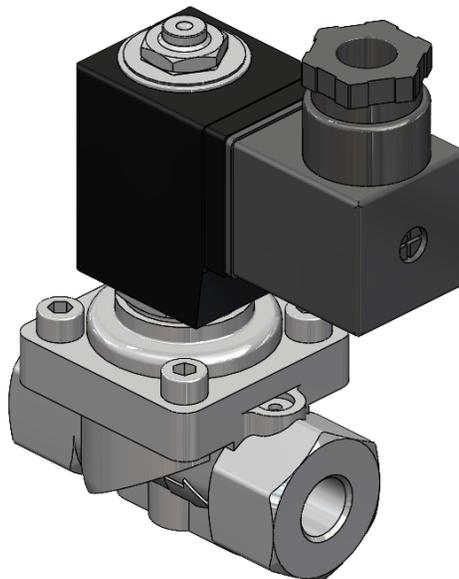


Figura 67: Válvula Electroneumática 2/2 Festo VZWF [47]

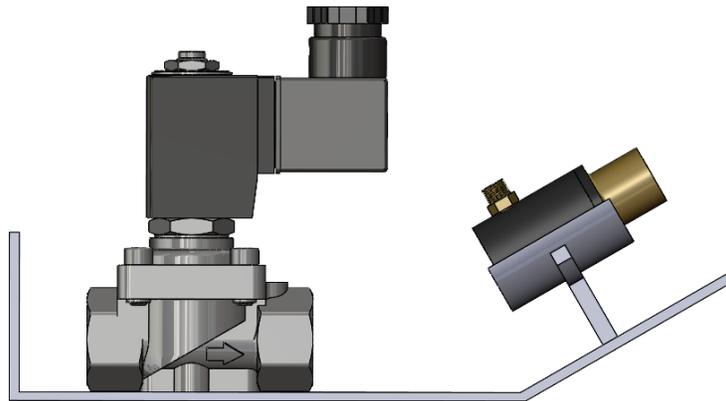


Figura 68: Válvula & Boquilla Sobre Carcasa [Elaboración Propia]

En la figura anterior se aprecia el posicionamiento de la válvula con respecto a la boquilla. Se procuró que el diseño fuese compacto y que en la carcasa se sitúen los elementos mecánicos del circuito. Los cables y elementos electrónicos se deben instalar en un panel aparte.

La válvula posee una superficie plana de pequeñas dimensiones, con agujeros para fijar a una superficie lisa. Se añadieron respectivos agujeros para este propósito y, además, se construyó un pequeño soporte para situar el elemento de forma estable.

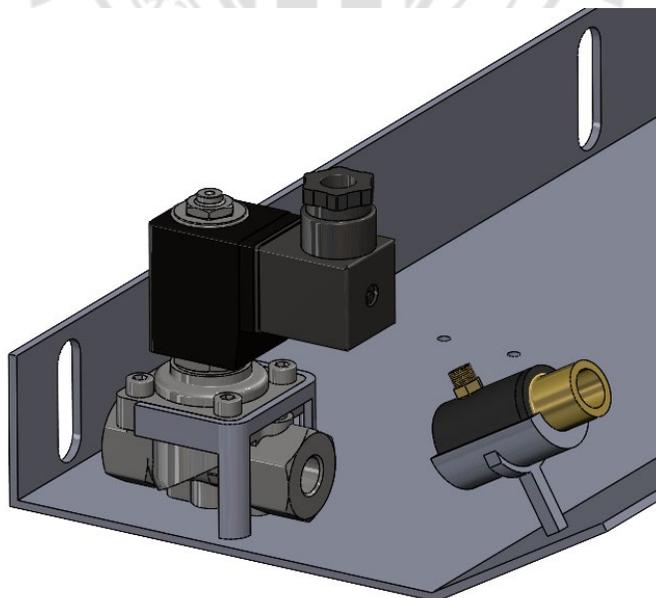


Figura 69: Soporte para Válvula & Agujeros de Carcasa [Elaboración Propia]

Se añadieron ranuras en la base de la carcasa para la entrada de tuberías neumáticas. Luego, se pensó en la cobertura superior de los elementos. Esta se ideó siguiendo el método DFA (*Design For Assembly*), porque los elementos mecánicos precisan de mantenimiento y posibles recambios por si surgen incidencias.

En consecuencia, se modeló una tapa hecha de un material fácilmente moldeable (posiblemente plástico), cuyo montaje se lleve a cabo mediante pestañas, en vez de uniones atornilladas o permanentes. Se colocó un agujero en la parte superior para la inserción de cables de alimentación eléctrica para las válvulas.

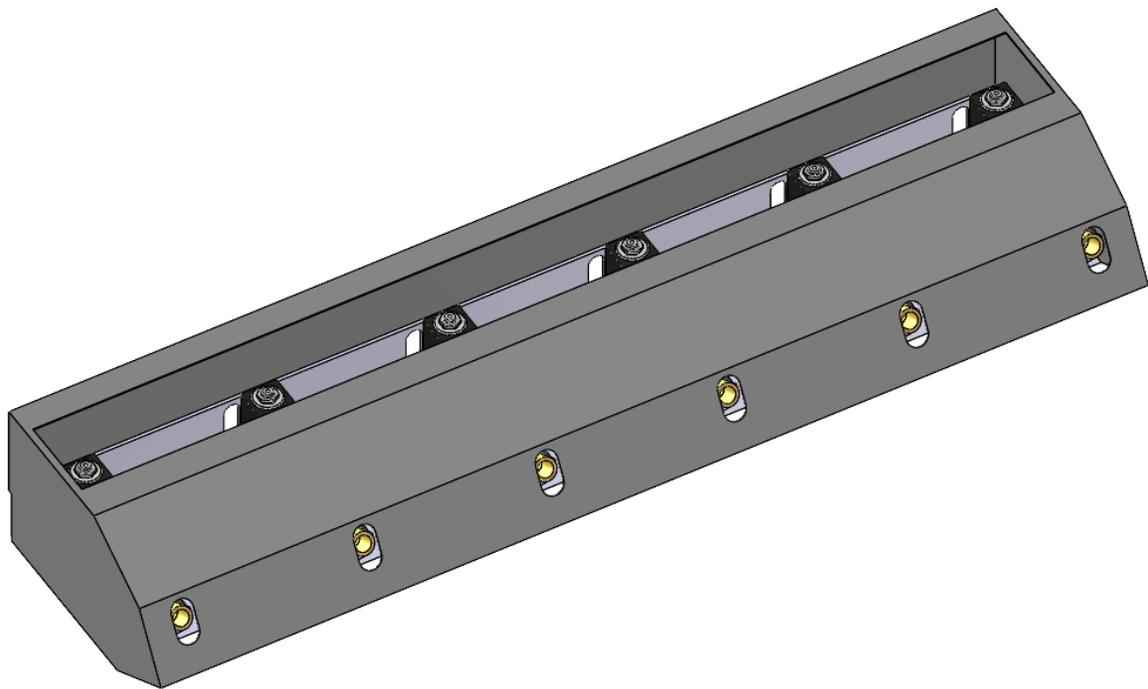


Figura 70: Tapa de Carcasa
[Elaboración Propia]

Todo el subensamblaje se une a la estructura de separación mediante uniones atornilladas, que se encuentran en la base. Esto se refleja en el *Anexo A* de planos de ensamblajes y subensamblajes.

8.5 Chasis / Carcasa

El último subsistema para completar con el diseño mecánico del proyecto es el que realiza la función de chasis y carcasa. Este se modela en función de las dimensiones de todos los demás subsistemas en posición. En primer lugar, se desarrolló la chapa que envuelve al proceso de separación.

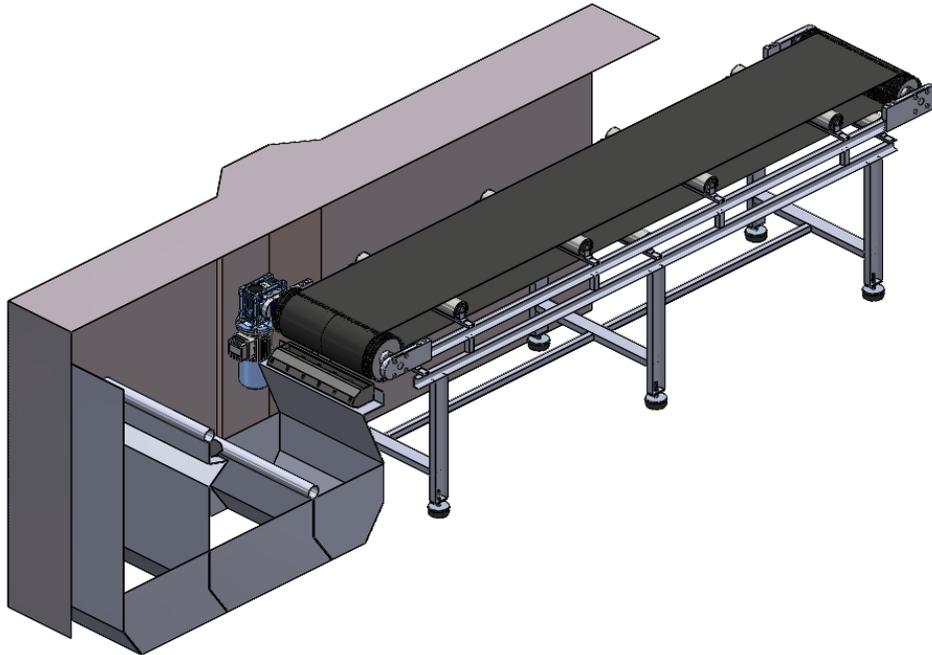


Figura 71: Ensamblaje con Chapa de Chasis Seccionada
[Elaboración Propia]

La estructura de separación va atornillada a la chapa del chasis/carcasa, mientras que la cinta se posiciona manualmente alineada con el circuito neumático. Se tomó en cuenta que el lado del motor de la cinta tendría distinta geometría, ahorrando material. La chapa es de 3mm de espesor y está compuesta por distintas láminas de acero estructural, soldadas en los laterales.

Una ventana se incluyó, cortando una parte lateral de la chapa de 1500x600mm, con el objetivo de monitorear el proceso de separación. Esto se puede apreciar en la figura mostrada a continuación.

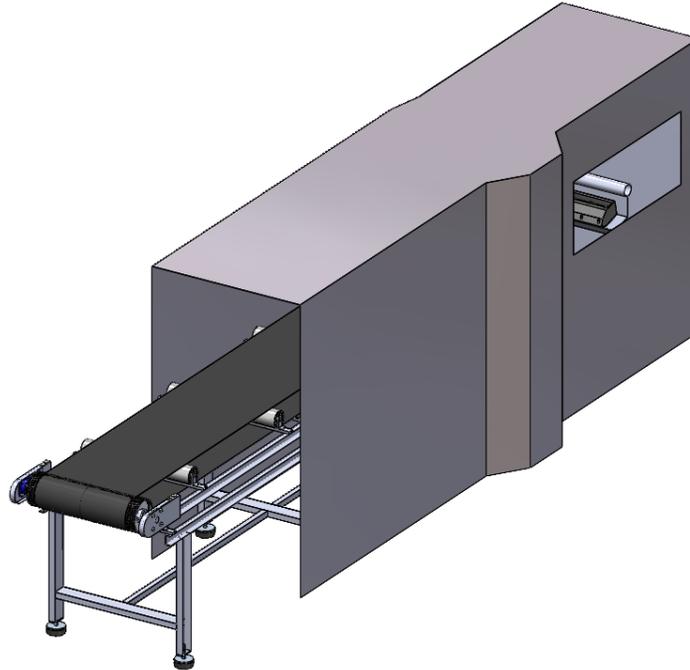


Figura 72: Vista Isométrica de Chapa de Chasis
[Elaboración Propia]

Tomando en cuenta el subsistema de visión artificial, se sabe que va montado mediante perfiles unidos al chasis. Se realizó una representación de lo que sería la cámara y las luces, con sus dimensiones relativas y posición, para así mostrar la perfilería a usar en este caso.

El montaje de dicho subsistema se ejecutó utilizando dos perfiles de aluminio ranurado, cuya sección transversal se puede apreciar en la siguiente imagen.

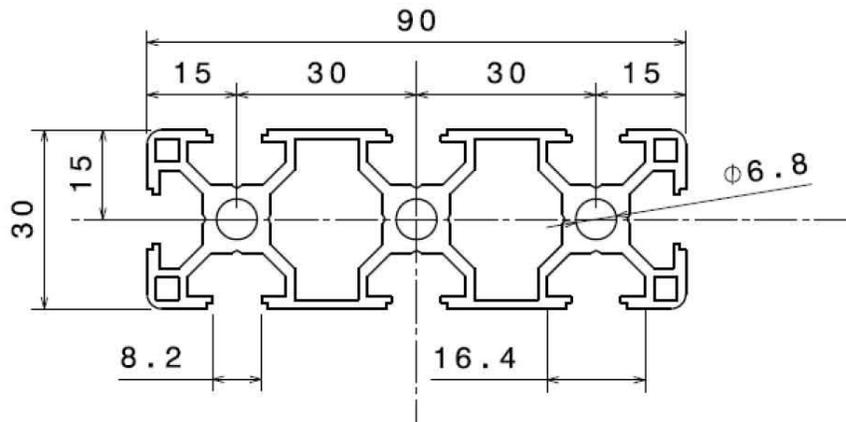


Figura 73: Sección Transversal & Dimensiones de Perfiles Ranurados [48]

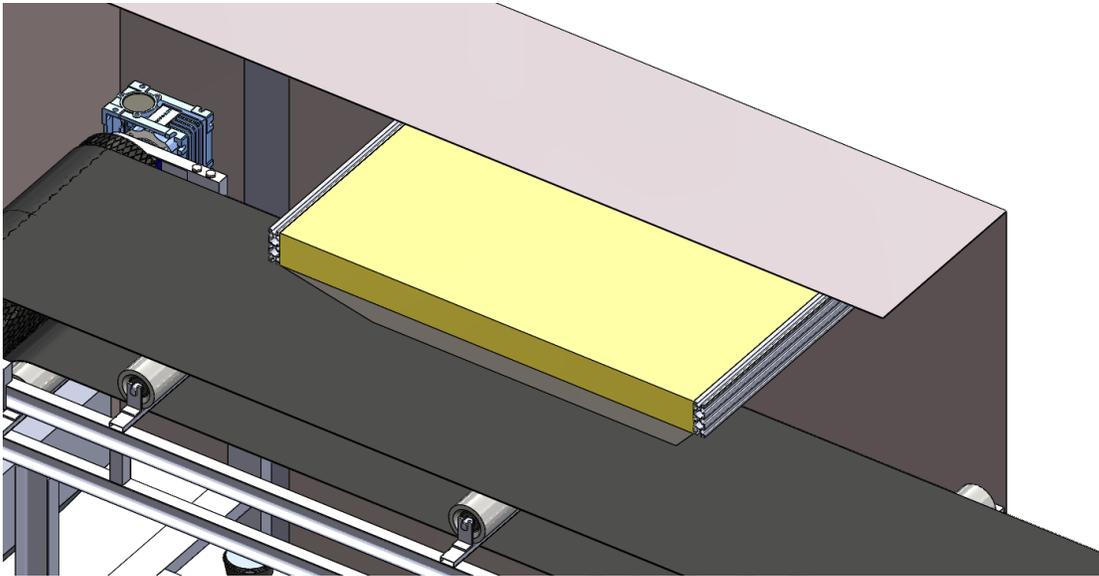


Figura 74: Montaje del Subsistema Visión Artificial
[Elaboración Propia]

Los perfiles van atornillados a la chapa y la carcasa del módulo de visión artificial se atornilla a los perfiles. Esto permite el desmontaje del subsistema para su debido mantenimiento o reemplazo de alguna pieza en su interior.

La altura de la chapa se diseñó acorde a lo investigado en el estado del arte, donde se vio que se requería una altura mínima para facilitar el escaneado de los productos. Además, se ubicó la visión artificial a una distancia que permite a los productos alcanzar una posición estable a la velocidad que le imprime la cinta y, a su vez, que provea de tiempo al ordenador para procesar y enviar la señal al circuito neumático.

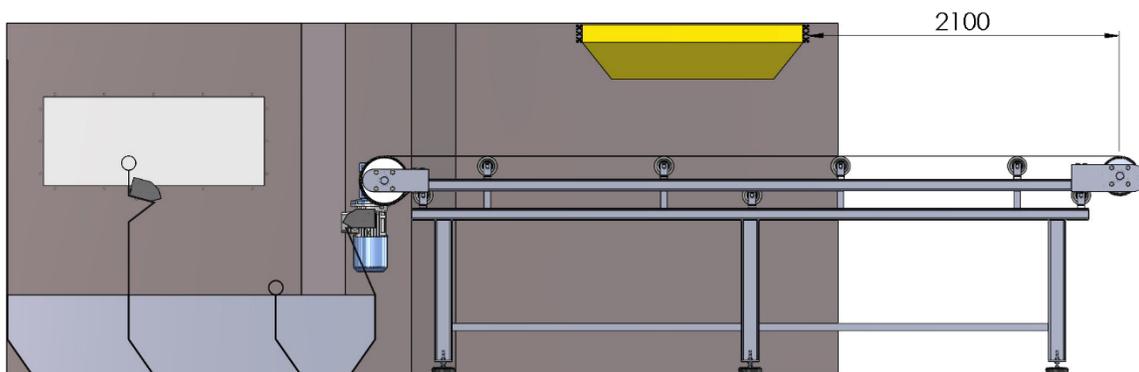


Figura 75: Distancia de Visión Artificial con Respecto a Cinta
[Elaboración Propia]

9 Diseño Detallado

Para finalizar con la definición total de la separadora óptica se tuvo que efectuar los planos de diseño, el listado de materiales, listado de procesos de fabricación y el presupuesto.

9.1 Materiales & Procesos de Fabricación

Los procesos de fabricación y materiales están directamente ligados al diseño de los componentes, debido a que estos dos determinan las propiedades mecánicas de las piezas. Cada material y proceso fue analizado acorde al conocimiento adquirido a lo largo de la carrera. Se utilizó el programa *Ansys Granta EduPack*; software informático de apoyo a la selección de materiales y procesos^[49].

A continuación, se demostró los criterios para la selección de una sola pieza, la tapa de carcasa que se mostró en la *figura 62*. Las demás piezas siguieron el mismo procedimiento. Luego, se formuló una tabla con los resultados del proceso.

Se establecieron ciertos **criterios** para la selección del material, que incluye: **mínima densidad, alta rigidez y mínimo coste**.

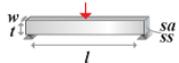
FUNCTION AND CONSTRAINTS ¹		MAXIMIZE ²	MINIMIZE ²	
Beam in bending		length, shape fixed; section area free	$E_f^{1/2} / \rho$	$\rho / E_f^{1/2}$
		length fixed; section area and section shape free	$(\phi E_f)^{1/2} / \rho$	$\rho / (\phi E_f)^{1/2}$
		length, thickness, section shape fixed; width free	E_f / ρ	ρ / E_f
		length, thickness fixed; width, section shape free	$(\phi E_f) / \rho$	$\rho / (\phi E_f)$
		length, width, section shape fixed; thickness free	$E_f^{1/3} / \rho$	$\rho / E_f^{1/3}$
		length, width, section shape fixed; thickness free	$(\phi E_f)^{1/3} / \rho$	$\rho / (\phi E_f)^{1/3}$

Tabla 29: Criterio de Rigidez Limitada con Mínima Masa [50]

De la tabla anterior se estableció que el modelo a utilizar para máxima rigidez y mínima densidad es el de la penúltima fila. Este indica que la longitud, ancho y sección transversal de nuestra pieza es conocida. Se buscó relacionar ambos parámetros en una recta, para compararla con el gráfico de módulo elástico vs densidad de distintos materiales.

$$N_1 = \frac{E^{1/3}}{\rho} \quad (9.1)$$

$$\log(N_1) = \frac{1}{3} \log(E) - \log(\rho) \quad (9.2)$$

Si se sustituye $y = \log(E)$ y $x = \log(\rho)$, se obtiene la ecuación de una recta de pendiente igual a tres:

$$y = 3x + 3 \cdot \log(N_1) \quad (9.3)$$

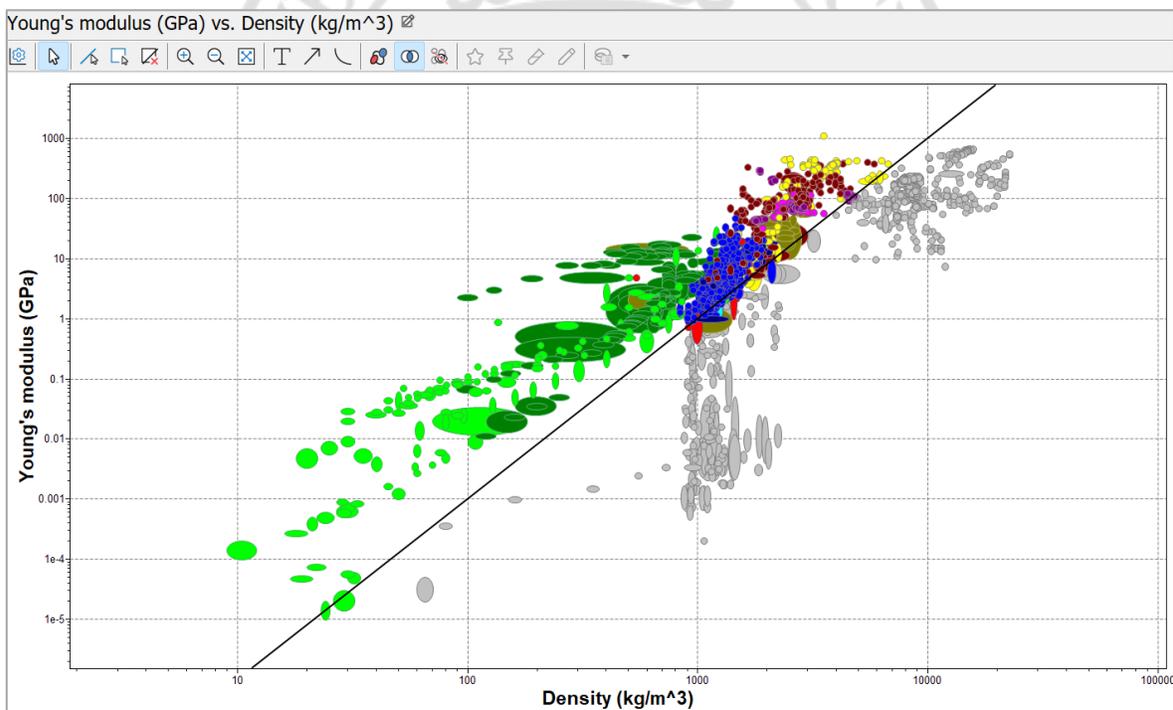


Figura 76: Gráfica E vs ρ con Recta Filtradora
[Elaboración Propia]

La recta de la *ecuación 9.3* sirve como un filtro, resaltando los materiales de alto módulo de Young. Luego, se clasificó específicamente por densidad, para complementarlo con la gráfica anterior. Se introdujo un marco filtrador, fijando como límite superior 1000[kg/m3].

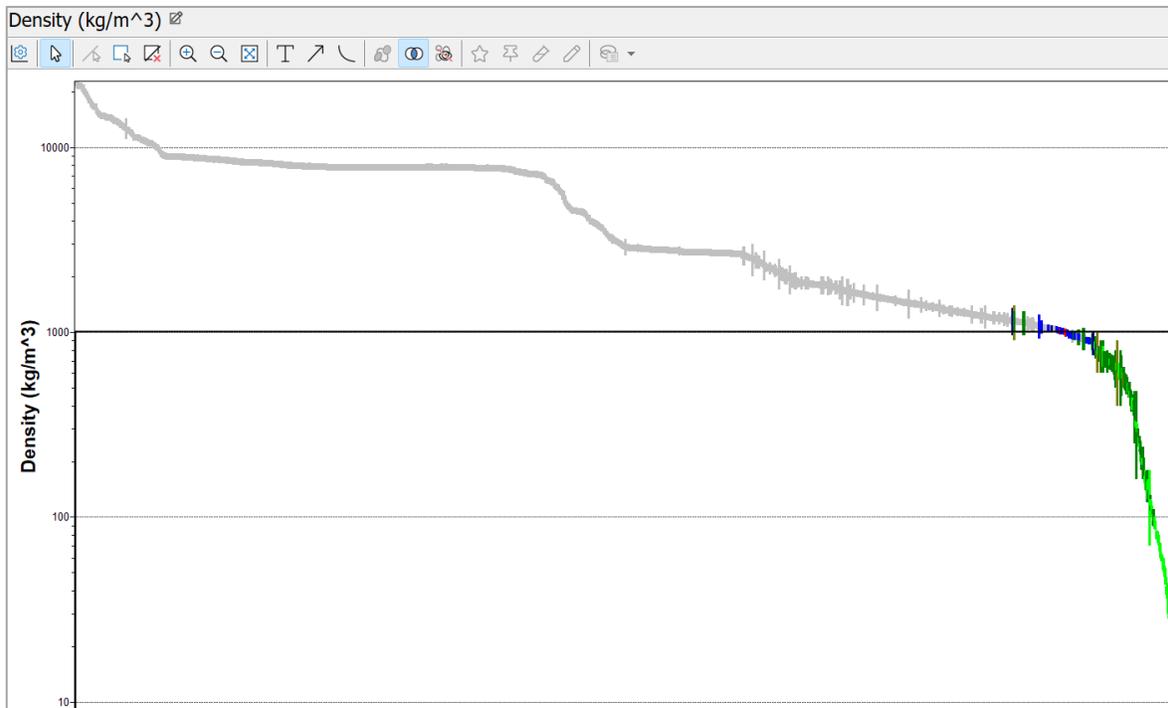


Figura 77: Gráfica Clasificación de Materiales Según ρ
[Elaboración Propia]

Asimismo, se aplicó el criterio de rigidez limitada con mínimo coste. Al igual que en la tabla pasada, se utilizaron las expresiones de la penúltima fila. El procedimiento fue el mismo.

FUNCTION AND CONSTRAINTS		MAXIMIZE ¹	MINIMIZE ¹	
Beam in bending		length, shape fixed; section area free	$E_f^{1/2} / C_m \rho$	$C_m \rho / E_f^{1/2}$
		length fixed; section area and section shape free	$(\phi E_f)^{1/2} / C_m \rho$	$C_m \rho / (\phi E_f)^{1/2}$
		length, thickness, section shape fixed; width free	$E_f / C_m \rho$	$C_m \rho / E_f$
		length, thickness fixed; width, section shape free	$(\phi E_f) / C_m \rho$	$C_m \rho / (\phi E_f)$
		length, width, section shape fixed; thickness free	$E_f^{1/3} / C_m \rho$	$C_m \rho / E_f^{1/3}$
		length, width, section shape fixed; thickness free	$(\phi E_f)^{1/3} / C_m \rho$	$C_m \rho / (\phi E_f)^{1/3}$

Tabla 30: Criterio de Rigidez Limitada con Mínimo Coste [50]

$$N_2 = \frac{E^{1/3}}{C_m \cdot \rho} \quad (9.1)$$

$$\log(N_2) = \frac{1}{3} \log(E) - \log(C_m \cdot \rho) \quad (9.2)$$

Donde C_m es una variable que representa el precio en **unidades-monetarias/kg**. Si se sustituye $y=\log(E)$ y $x=\log(C_m \cdot \rho)$, se obtiene el mismo resultado que en la ecuación 9.3.

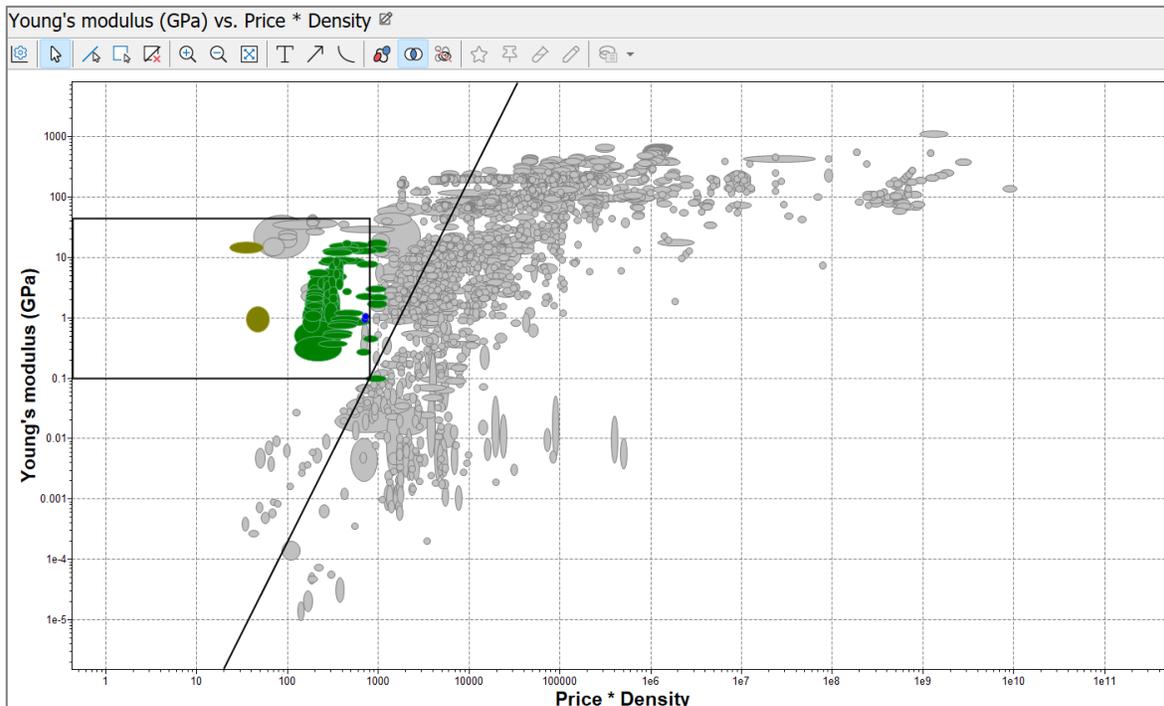


Figura 78: Gráfica E vs $Precio \cdot \rho$ con Recta Filtradora
[Elaboración Propia]

La figura anterior profundiza en la clasificación del material, combinando una recta y marco filtrador. En este punto permanecen materiales orgánicos (maderas), materiales compuestos y polímeros termoplásticos.

Se decantó por trabajar con polímeros, por su alta maleabilidad y su accesibilidad. Con este último filtro el programa mostró dos posibles alternativas con las que trabajar, ambas **polietileno de alta densidad**.

Se seleccionó finalmente el PEHD de uso general, utilizado en procesos de moldeo y extrusión, con un módulo de elasticidad mínimo de 1,07[GPa].

3. Resultados: pasan 2 de 3242	
Mostrar:	Pasan todas las etapas
Clasificar por:	Etapas 6: Young's modulus (GPa)
Nombre	Young's modulus (GPa)
PE-HD (general purpose, molding & extrusion)	1.07 - 1.09
PE-HD (high molecular weight)	0.915 - 0.961

Figura 79: Resultados de Selección de Materiales
[Elaboración Propia]

Seleccionado el material se procedió a elegir un **proceso de fabricación** adecuado. Para este propósito también se requirió adherirse a algunas restricciones, aparte del conocimiento del material empleado. Entre estas están: la **forma** de la pieza es laminar, su **espesor** y el **tipo** de proceso de fabricación. Esta combinación resultó en 11 opciones de procesos a elegir.

1. Datos para la selección	
Base de datos:	Level 3 Cambiar...
Seleccionar de:	ProcessUniverse: Shaping processes
2. Etapas de selección	
<input checked="" type="checkbox"/> Gráfico/Índice <input type="checkbox"/> Límite <input checked="" type="checkbox"/> Árbol	
<input checked="" type="checkbox"/>	Etapa 1: Range of section thickness (mm)
<input checked="" type="checkbox"/>	Etapa 2: Primary shaping processes
<input checked="" type="checkbox"/>	Etapa 3: Molding, Deformation
<input checked="" type="checkbox"/>	Etapa 4: PE-HD (general purpose, molding & extrusion)
3. Resultados: pasan 6 de 146	
Mostrar:	Pasan todas las etapas
Clasificar por:	Orden alfabético
Nombre	
Calendering	
Extrusion blow molding	
Injection blow molding	
Injection molding (thermoplastics)	
Polymer extrusion	
Thermoforming	

Figura 80: Resultados de Selección de Procesos
[Elaboración Propia]

Desde un punto de vista tecnológico, se planteó utilizar el proceso de moldeo por inyección (*injection molding*), para termoplásticos. Este proceso consiste en la inyección a alta presión de plástico fundido, hacia un molde de acero a temperatura ambiente. Sin embargo, para obtener una rentabilidad del proceso (lote económico mínimo) se deben fabricar más de 1000 piezas con el mismo molde.

El proceso de manufactura que se adecuó a la tapa de la carcasa fue el **termoconformado** (*thermoforming*), que consiste en calentar un termoplástico hasta antes de su punto de fusión y forzarlo a adaptar la geometría de un molde, mediante presión o succión. Su lote económico mínimo es de 10 unidades.

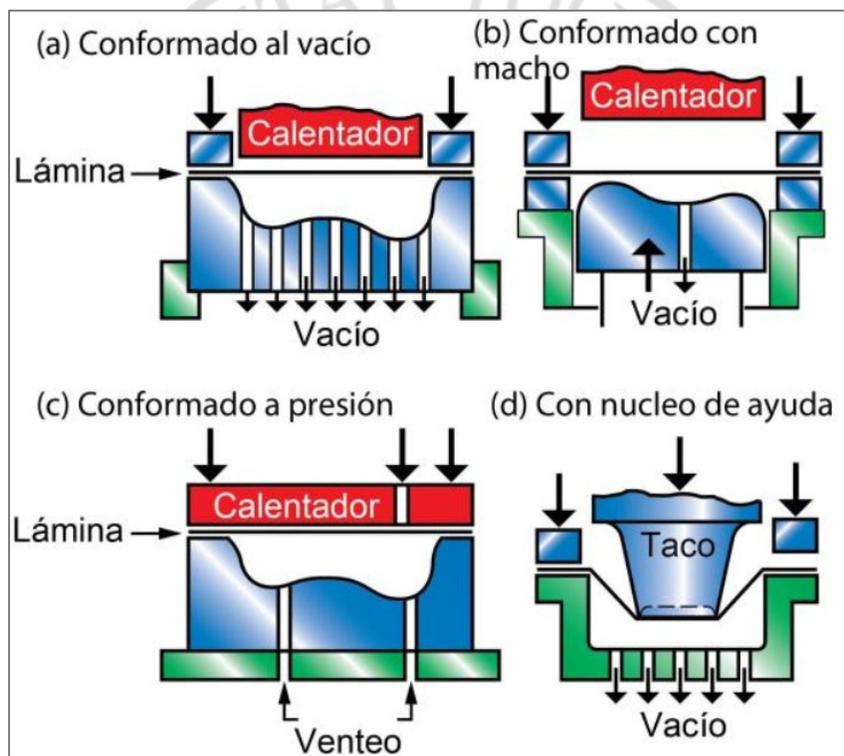


Figura 81: Esquema del Proceso de Termoconformado [49]

Aquí termina el proceso de selección de material y fabricación de la tapa de la carcasa del circuito neumático. Para los demás componentes se realizó un procedimiento parecido. Algunos elementos de la máquina son estándar y, por lo tanto, usan materiales y procesos de manufactura definidos por los fabricantes. La siguiente tabla muestra un listado que involucra a todos los subensamblajes.

Cinta de Aceleración			
Nº	Componente	Material	Proceso de Fabricación
1	Árbol Motriz	Acero UNE F-1140	Torneado
2	Tubería de Tambores	Acero EN 25CrMo4	Extrusión en caliente
3	Tubería de Rodillo	Aluminio 6061-T6	Fundición a la cera perdida
4	Eje de Rodillo	Acero EN 42CrMo4	Torneado
5	Viga UPN 80	Acero EN S235J2	Laminado
6	Viga UPN 120	Acero EN S235J2	Laminado
7	Tubería Rectangular 50x20x1.5	Acero EN S235J2	Extrusión en caliente
8	Tubería Rectangular 120x50x3	Acero EN S235J2	Extrusión en caliente
9	Tubería Cuadrada 50x50x2	Acero EN S235J2	Extrusión en caliente
10	Tubería Cuadrada 45x45x2	Acero EN S235J2	Extrusión en caliente
11	Pieza de Soporte de Tambores	Acero EN S235J2	Fresado
Circuito Neumático			
Nº	Componente	Material	Proceso de Fabricación
1	Base de Carcasa	Acero EN S235J2	Fundición a la cera perdida
2	Tapa de Carcasa	Polímero PE-HD	Termoconformado
3	Jet de Aire 45001 (Cilindro de Flujo de Aire)	Latón	Torneado
Estructura de Separación			
Nº	Componente	Material	Proceso de Fabricación
1	Chapas	Acero EN S235J2	Corte & doblado
2	Rodillos de Separación	Acero EN S235J2	Extrusión en caliente
Chasis/Carcasa			
Nº	Componente	Material	Proceso de Fabricación
1	Chapa	Acero EN S235J2	Corte, doblado & soldadura
2	Perfiles Ranurados	Aluminio 6063-T5	Extrusión en caliente

Tabla 31: Materiales & Procesos de Fabricación [Elaboración Propia]

9.2 Presupuesto

El proceso ingenieril llegó a su conclusión en el anterior apartado, de modo que se detalló la parte económica del proyecto. Se realizó un presupuesto tomando en cuenta el costo de material y fabricación de las piezas. Además, el costo del tiempo de trabajo que conlleva el montaje y las pruebas de la maquinaria.

Los valores mostrados a continuación fueron basados en información de fabricantes y con la ayuda de *Ansys Granta EduPack*.

Presupuesto Cinta de Aceleración			
Componente	Cantidad	Precio Unitario [€/ud.]	Precio Total [€]
Banda DUNLOFLEX	1	390,55	390,55
Tambor Motriz	1	1047,12	1047,12
Tambor Conducido	1	985,32	985,32
Rodillo	7	63,33	443,31
Motorreductor Variador TFX+NMRV	1	629,5	629,5
Viga UPN 80	18,4 [m]	18,04 [€/m]	331,94
Viga UPN 120	5,73 [m]	27,95 [€/m]	160,15
Tubería Rectangular 50x20x1.5	8,12 [m]	3,22 [€/m]	26,15
Tubería Rectangular 120x50x3	3,21 [m]	15,24 [€/m]	26,15
Tubería Cuadrada 50x50x2	3,93 [m]	10,73 [€/m]	42,17
Tubería Cuadrada 45x45x2	0,9383 [m]	8,57 [€/m]	8,04
Pieza de Soporte de Tambores	4	19,11	76,45
Tornillo M16	32	-	64,8
Tuerca M16	32	2,25	72

Tabla 32: Presupuesto de Cinta de Aceleración [Elaboración Propia]

Presupuesto Estructura de Separación			
Componente	Cantidad	Precio Unitario [€/ud.]	Precio Total [€]
Chapas	10	-	1401,17
Rodillos de Separación	2	22,5	45
Presupuesto Chasis/Carcasa			
Componente	Cantidad	Precio Unitario [€/ud.]	Precio Total [€]
Chapa	1	-	788,22
Perfil Ranurado	2	18,15 [€/m]	47,34

Tabla 33: Presupuesto de Estructura de Separación & Chasis/Carcasa
[Elaboración Propia]

Presupuesto Circuito Neumático			
Componente	Cantidad	Precio Unitario [€/ud.]	Precio Total [€]
Jet de Aire 45001	12	71,68	860,16
Válvula Electroneumática Festo VZWF 2/2	12	141,64	1699,68
Base de Carcasa	2	97,2	194,4
Tapa de Carcasa	2	12,2	24,4
Tornillo M16	12	2,02	24,24
Tuerca M16	12	2,25	27

Tabla 34: Presupuesto de Circuito Neumático
[Elaboración Propia]

Asimismo, se tomó en cuenta el tiempo de montaje de todas las partes, que conlleva la compensación de los operarios responsables. Asumiendo que la empresa gasta 36[€/h], solicitando los servicios de tres mecánicos técnicos por una duración de 48 horas, el coste del ensamblado resulta en 1728 euros.

En total, **el aspecto mecánico del proyecto** tiene un coste aproximado de **11 143€**. La separadora en su totalidad tiene un valor económico más elevado, cuando se considera todo lo relativo a los aspectos eléctricos y electrónicos.

10 Conclusiones

Finalizado el proyecto, se repasaron los objetivos y se llegaron a las siguientes conclusiones:

1. Empleando los conocimientos adquiridos de la ingeniería mecánica, se consiguió desarrollar una máquina separadora óptico-neumática que cumpliera con los requisitos de diseño establecidos.
2. La separadora óptica es capaz de clasificar residuo sólido urbano de tipo plástico, de tres materiales distintos (PP, PE-HD y PE-LD). Esto es posible gracias al diseño de distintos subsistemas que trabajan conjuntamente.
3. Se investigó el contexto concerniente a las separadoras ópticas y la generación de RSU, para alcanzar una aproximación a los detalles de diseño acorde con la situación actual de la industria del reciclaje.
4. Se efectuó una selección de conceptos de diseño, por medio de una evaluación técnico-económica. Analizando cualitativa y cuantitativamente entre distintos criterios de evaluación, se comparó la idoneidad de cada idea.
5. Mediante el uso de análisis de resistencia de materiales, dinámica y ciencia de materiales, se determinó la geometría y propiedades mecánicas de los distintos elementos de máquina involucrados en el proceso de separación.
6. Se resolvió la totalidad de las variables solución establecidas en el diseño conceptual: geometría de elementos de máquina, dimensiones de subsistemas, definición de materiales, configuración cinemática y dimensiones envolventes.
7. Los subensamblajes y piezas fueron propiamente documentados en un anexo de planos, adjunto a esta memoria.

Referencias

- [1] Britannica, T. Editors of Encyclopedia (2020, October 15). recycling. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/recycling>
- [2] Marc Laurency Bruguera. (2020, Mayo 11). El reciclaje a través de la historia. *La Vanguardia*. <https://www.lavanguardia.com/vida/junior-report/20200508/481022563019/historia-reciclaje.html>
- [3] A Brief History of Recycling. (2019, Noviembre 11). *NERC*. <https://nerc.org/news-and-updates/blog/nerc-blog/2019/11/19/a-brief-history-of-recycling>
- [4] A Complete Guide to Recycling History. (2017, Enero 20). *DTM Mix*. <https://www.dtmix.co.uk/blog/recycling-history/>
- [5] Guenn Tayao, Ian. (s.f.). History of Recycling, World and Australia. *Waster*. <https://bit.ly/3mYKW7G>
- [6] History and Future of Plastics. (s.f.). *Science History Institute*. <https://www.sciencehistory.org/the-history-and-future-of-plastics>
- [7] Curiosidades y Origen del Reciclaje. (2019, Noviembre 13). *Ecobidon*. <https://ecobidon.com/curiosidades-origen-del-reciclaje/>
- [8] Silpa, K; Yao, L; Bhada-Tata, P; Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Group.
- [9] Geyer R; Jambeck J; Lavender K. (2017). Production, use and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, Vol3 (7). <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>
- [10] Brief History of Optical Sorting. (2020, Julio 28). *Picvisa*. <https://picvisa.com/en/evolution-optical-sorting-waste-recycling-picvisa/>
- [11] Will Flower. (2015, Septiembre 09). A Look at Optical Sorting. *Waste 360*. <https://www.waste360.com/commentary/look-optical-sorting>
- [12] Scudelati & Asociados. (s.f.). *Plantas de Recuperación/Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos*. <http://www.ecopuerto.com/Bicentenario/informes/PLANTATRATAMIENTOSCUDEL.pdf>

- [13] Ragaert, K., Delva, L., & van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- [14] Pinellas County. (2009, Septiembre). *Materials recovery facility technology review*. <https://www.nswai.org/docs/MATERIALS%20RECOVERY%20FACILITY%20TECHONOLOGY%20REVIEW.pdf>
- [15] INE. (s.f.). *España en cifras 2019*. https://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2019/9/
- [16] Amutio, C. (2019). *Diseño de una Planta de Valorización de Residuos Urbanos para el Área de Gestión A6 de la Comunitat Valenciana*. Universidad Politécnica de Valencia. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/113904/29208027M_TFM_1542130725683804004_9755654912993.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [17] Gallardo, A. (2014). *Estudio de la situación actual de las plantas de tratamiento mecánico-biológico en España*. CONAMA. <http://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/CT%202014/1896711843.pdf>
- [18] MSS. (s.f.). *MSS, Inc. Brochure*. MSS Optical. <https://www.cpgrp.com/mss-brochure/files/assets/basic-html/page-1.html>
- [19] Picvisa. (s.f.). *Picvisa Ecopack*. <https://picvisa.com>
- [20] Pellenc ST. (s.f.). *Mistral +*. <https://www.pellencst.com/products/mistral-connect-2>
- [21] Norton, R. (2011). *Machine Design* (4th ed.). Prentice Hall.
- [22] Plastics Europe. (s.f.). *Plastics - The Facts 2021*. <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/Plastics-the-Facts-2021-web-final.pdf>
- [23] Coveya. (s.f.). *Coveya Recycling Waste Management Brochure* [Catálogo]. <https://www.coveya.co.uk/content/uploads/2020/10/Coveya-Recycling-Waste-Management-Brochure-Spreads.pdf>
- [24] Kaiser Kraft. (s.f.). *Vía de Rodillos Ligera*. <https://bit.ly/3sd8Oqa>
- [25] Nex Flow. (s.f.). *Standard Air Nozzle*. <https://www.nexflow.com/products/energy-efficient-blow-off-products/air-nozzles/air-nozzles/>
- [26] Nex Flow. (s.f.). *Air Jets*. <https://www.nexflow.com/products/energy-efficient-blow-off-products/air-jets/air-jets/>

- [27] Nex Flow. (s.f.). *Air Knives*. <https://www.nexflow.com/air-knives/>
- [28] The Engineers Post. (2022, Abril 10). *Types of Electric Motors: Their Working & Applications*. <https://www.theengineerspost.com/types-of-electric-motors/>
- [29] Neumac. (2015, Octubre). *Motores Neumáticos*. <https://www.neumac.es/catalogos/catgenmotoresneumac.pdf>
- [30] Sumifluid. (2022, Mayo 17). *MOTORES HIDRÁULICOS*. <https://sumifluid.com/hidraulica/motores-hidraulicos/>
- [31] Spinozzi, D. (2020, Septiembre 24). *La última guía sobre cintas transportadoras*. Spinozzi Argentina. <https://www.spinozziargentina.com/post/guia-fundamental-de-cintas-transportadoras>
- [32] Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2010). *The Science and Engineering of Materials* (6th ed.). Cengage Learning.
- [33] Sino Mould. (s.f.). *SINO Plastic Disposable Food Containers*. Foldable Crate. <https://www.foldable-crate.com/thin-wall-container-molding.html>
- [34] Mahira Polyglobal. (s.f.). *LDPE Film*. <https://www.mahirapolyglobal.com/product/ldpe-shrink-film-ldpe-stretch-film>
- [35] Retif. (s.f.). *Bolsa de plástico*. shorturl.at/fDMR1
- [36] BMI Machines. (2020, Agosto 21). *Cinco tipos de plásticos que usas en tu día a día*. <https://www.bmimachines.com/cinco-tipos-de-plasticos-que-usas-en-tu-dia-a-dia/>
- [37] Rulmeca. (2003, Julio). *Rodillos y componentes para el transporte por banda de material a granel* (2 Ed.).
- [38] Dunlop. (2016). *Conveyor Belt Technique: Design and Calculation*.
- [39] DUNLOP Conveyor Belting. (s.f.). *Gama de Productos DUNLOP*. DUNLOP CB. <https://www.paperturn-view.com/?pid=ODY86875&v=2>
- [40] ULMA. (2016). *Conveyor Components*. <http://www.ulmaconveyor.com/wp-content/uploads/sites/6/2016/06/Cata%CC%81logo-Te%CC%81cnico-ULMA-Conveyor-2016.pdf>

- [41] SKF. (s.f.). *Unidades de rodamientos de bolas*. <https://www.skf.com/co/products/mounted-bearings/ball-bearing-units>
- [42] Salinero, M. (2013, Octubre). *Diseño de una Banda Transportadora Mediante GUIDE de MATLAB*. Universidad Carlos III de Madrid.
- [43] Motovario. (s.f.). *Motovariators*. <https://my.motovario.com/file.php?s=7341>
- [44] Montanstahl AG. (s.f.). *UPN EUROPEAN STANDARD CHANNELS*. <https://www.montanstahl.com/downloads/pdf/UNP-UPN-Datasheet.pdf>
- [45] AMC Mecnocaucho. (s.f.). *Soportes antivibratorios SV*. <https://www.mecnocaucho.com/es-ES/productos/soporte-antivibratorio/sv/#plano-8>
- [46] Nex Flow. (s.f.). *AIR JET DATASHEET*. https://www.airnozzle.co.uk/wp-content/uploads/2018/06/air_jets.pdf
- [47] Festo. (s.f.). *Electroválvula VZWF-B-L-M22C-G14-135-E-1P4-10-R1*. <https://www.festo.com/es/es/a/download-document/datasheet/1492134>
- [48] ALU 10. (s.f.). *Perfiles de Aluminio Ranurado. ALU10*. <https://alu10.com/es/serie-3060-ranura-8/20-perfil-ranurado-3090-Bancadas-Maquinas.html>
- [49] Ansys (CES) Granta EduPack (2021 R2). (2021). [Software]. Ansys. <https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>
- [50] Ansys Granta EduPack. (s.f.). *Stiffness-limited design at minimum mass*.