

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Ingeniería en sistemas para el diseño de una línea de reciclaje de  
polietileno tereftalato

Trabajo de graduación presentado por Luis Adrian Hernández Morales  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica  
Industrial

Guatemala,  
2024



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería

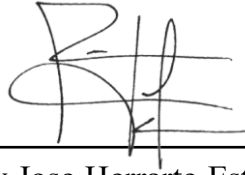


Ingeniería en sistemas para el diseño de una línea de reciclaje de polietileno tereftalato

Trabajo de graduación presentado por Luis Adrian Hernández Morales  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica  
Industrial

Guatemala,  
2024

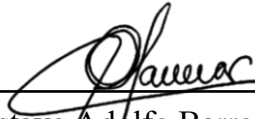
Vo.Bo.:



(f)

Rony Jose Herrarte Estevez

Tribunal Examinador:



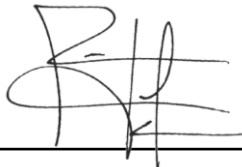
(f)

Gustavo Adolfo Barrera Noriega



(f)

Laura Maria Roldán Reyes



(f)

Rony Jose Herrarte Estevez

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de diciembre de 2024.

A través de mis años en la carrera siempre vi mi culminación de estudios como un suceso que pasaría en mucho tiempo. Mientras más se acercaba la fecha, más me abrumaba por las nuevas responsabilidades y el trabajo que definiría el rumbo de mi carrera. Sin embargo, personas excepcionales me acompañaron en el viaje y me dieron fuerzas y motivación para dar lo mejor de mí.

Quiero agradecer a mis padres, Luis Pedro Hernández Del Valle y María Inés Morales Segura por darme su respaldo absoluto y siempre cuidar de mí. A mis compañeros de toda la carrera de Ingeniería Mecánica Industrial, que no los considero como compañeros, sino como familia por las historias y momentos inolvidables que hemos tenido. A mi asesor Rony Herrarte por su apoyo e incontables ayudas que me dio en el proceso del trabajo. A Maria Natalia Gómez por su apoyo incondicional y ser el motor que me impulsa en momentos difíciles. Y a Dios por brindarme esta oportunidad y acompañarme en todo el camino y lograr cumplir una meta importante en mi vida. Y a mis hermanos, Martisabel y Carlos Andrés Hernández Morales, para que cada paso en mi vida sirva de ejemplo para ellos.

---

## Índice

---

Prefacio .....	V
Lista de figuras .....	XII
Lista de cuadros .....	XIV
Resumen .....	XV
1. Introducción .....	1
2. Antecedentes .....	3
2.1. Problema .....	3
2.2. Contexto .....	3
3. Justificación .....	7
4. Objetivos .....	9
4.1. Objetivo general .....	9
4.2. Objetivos específicos .....	9
5. Alcance .....	11
6. Marco teórico .....	13
6.1. <i>System Engineering</i> .....	13
6.1.1. Definición de <i>System Engineering</i> .....	13
6.1.2. Método utilizado en <i>System Engineering</i> .....	14
6.1.3. Plan de mitigación .....	14
6.2. Línea de reciclaje .....	15
6.2.1. Qué es una línea de reciclaje .....	15

6.2.2.	Procesos de la línea de reciclaje .....	15
6.2.3.	Reciclaje PET .....	16
6.2.4.	Máquinas en una línea de reciclaje y sus aplicaciones.....	16
6.3.	Polietileno de Tereftalato (PET) .....	17
6.3.1.	Composición del PET y sus características .....	17
6.3.2.	Forma de reciclaje PET .....	17
6.3.3.	Materiales o productos creados a partir del PET .....	18
6.3.4.	Propiedades del PET reciclado .....	18
7.	Metodología .....	19
7.1.	Definición de requisitos .....	19
7.2.	Comunicación entre equipo .....	20
7.3.	Monitoreo de avances de cada máquina .....	28
7.4.	Integración entre máquinas .....	29
7.5.	Factor de seguridad .....	29
7.5.1.	Factor de material .....	30
7.5.2.	Factor de esfuerzo .....	30
7.5.3.	Factor de geometría .....	31
7.5.4.	Factor de teoría de fallo .....	31
7.5.5.	Factor de seguridad mínimo calculado .....	32
7.6.	Máquinas diseñadas .....	32
7.6.1.	Separadora de densidades .....	32
7.6.2.	Desetiquetadora .....	34
7.6.3.	Lavadora en caliente .....	36
7.6.4.	Trituradora .....	37
7.6.5.	Extrusora .....	39
7.6.6.	Peletizadora .....	40
7.7.	Mitigación de riesgos para las máquinas .....	42
7.8.	Diseño de línea de reciclaje .....	50
7.9.	Cálculo de demanda a cubrir .....	52

7.10.	Planificación de producción anual .....	53
7.11.	Módulos adicionales a implementar .....	55
7.11.1.	Módulo de transporte .....	55
7.11.2.	Planta de tratamiento de aguas .....	56
7.11.3.	Máquina de detección y separación de residuos .....	57
8.	Resultados y discusión .....	59
8.1.	Cumplimiento de requisitos .....	59
8.2.	Comunicación entre equipo .....	61
8.3.	Monitoreo de avances de cada máquina .....	62
8.4.	Integración entre máquinas .....	64
8.5.	Factor de seguridad .....	64
8.6.	Máquinas diseñadas .....	65
8.7.	Mitigación de riesgos para las máquinas .....	66
8.8.	Diseño de línea de reciclaje .....	69
8.9.	Cálculo de demanda a cubrir .....	69
8.10.	Planificación de producción anual .....	70
8.11.	Módulos adicionales a implementar .....	71
9.	Conclusiones .....	73
10.	Recomendaciones.....	75
11.	Referencias .....	77
12.	Anexos .....	81



---

## Lista de figuras

---

Figura 1. Formato de minutas .....	24
Figura 2. Máquina separadora de densidades primera versión.....	33
Figura 3. Máquina separadora de densidades versión final .....	34
Figura 4. Máquina desetiquetadora primera versión.....	35
Figura 5. Máquina desetiquetadora versión final: .....	35
Figura 6. Máquina lavadora caliente primera versión .....	36
Figura 7. Máquina lavadora caliente versión final .....	37
Figura 8. Diseño de trituradora primera versión .....	38
Figura 9. Diseño trituradora final .....	39
Figura 10. Diseño extrusora .....	40
Figura 11. Primera versión dado peletizador .....	41
Figura 12. Versión final de dado peletizador .....	41
Figura 13. Máquina peletizadora .....	42
Figura 14. Análisis <i>Bowtie</i> para máquina separadora .....	66
Figura 15. Análisis <i>Bowtie</i> para desetiquetadora .....	66
Figura 16. Análisis <i>Bowtie</i> para lavadora en caliente .....	67
Figura 17. Análisis <i>Bowtie</i> para trituradora .....	67
Figura 18. Análisis <i>Bowtie</i> para extrusora .....	68
Figura 19. Análisis <i>Bowtie</i> para peletizadora .....	69
Figura 20. Mapa de línea de reciclaje .....	69
Figura 21. Minuta 1.1 .....	84
Figura 22. Minuta 1.2 .....	85
Figura 23. Minuta 2.1 .....	86
Figura 24. Minuta 2.2 .....	87
Figura 25. Minuta 3 .....	88

Figura 26. Minuta 4.1 .....	89
Figura 27. Minuta 5 .....	91
Figura 28. Correo seguimiento extrusora 1 .....	91
Figura 29. Correo seguimiento extrusora 2 .....	92
Figura 30. Correo seguimiento extrusora 3 .....	92
Figura 31. Correo de comunicación 1 .....	92
Figura 32. Correo de comunicación 2 .....	93

---

## Lista de cuadros

---

Cuadro 1. Identificación de códigos: .....	20
Cuadro 2. Requisitos .....	20
Cuadro 3. Cronograma grupal primer semestre 2023 – 1.1 .....	21
Cuadro 4. Cronograma grupal primer semestre 2023 – 1.2 .....	22
Cuadro 5. Cronograma grupal primer semestre 2023 – 1.3 .....	22
Cuadro 6. Cronograma grupal segundo semestre 2023 .....	25
Cuadro 7. Cronograma grupal primer semestre 2024 – 1.1 .....	26
Cuadro 8. Cronograma grupal primer semestre 2024 – 1.2 .....	27
Cuadro 9. Cronograma grupal primer semestre 2024 – 1.3 .....	27
Cuadro 10. Elementos para el <i>Bowtie</i> de la máquina separadora .....	43
Cuadro 11. Elementos para el <i>Bowtie</i> de la máquina desetiquetadora .....	45
Cuadro 12. Elementos para el <i>Bowtie</i> de la máquina lavadora caliente .....	46
Cuadro 13. Elementos para el <i>Bowtie</i> de la máquina trituradora .....	47
Cuadro 14. Elementos para el <i>Bowtie</i> de la extrusora - parte 1 .....	48
Cuadro 15. Elementos para el <i>Bowtie</i> de la extrusora – parte 2 .....	49
Cuadro 16. Elementos para el <i>Bowtie</i> de la máquina peletizadora .....	50
Cuadro 17. Dimensiones .....	51
Cuadro 18. Cuadro comparativo de bandas transportadoras .....	56
Cuadro 19. Resultado de cumplimiento de requisitos.....	60
Cuadro 20. Comunicación con integrante hasta finalizar diseño de máquina .....	61
Cuadro 21. Cronograma de actividades global año 2023 – 1.1 .....	62
Cuadro 22. Cronograma de actividades global año 2023 – 1.2 .....	62
Cuadro 23. Cronograma de actividades global año 2024 – 2.1 .....	63
Cuadro 24. Cronograma de actividades global año 2024 – 2.2 .....	63
Cuadro 25. Alturas de entrada y salida de cada máquina .....	64
Cuadro 26. Valores de factor de seguridad .....	64
Cuadro 27. Características de máquinas .....	65

Cuadro 28. Condiciones de producción y demanda establecida .....	69
Cuadro 29. Unidades de producción – 1.1 .....	70
Cuadro 30. Unidades de producción – 1.2 .....	70
Cuadro 31. Resultado de simulación de producción anual .....	71
Cuadro 32. Módulos a tomar en cuenta en el futuro .....	71
Cuadro 33. Condiciones de producción – 1.1 .....	81
Cuadro 34. Condiciones de producción – 1.2 .....	82
Cuadro 35. Tiempo de producción – 1.1 .....	82
Cuadro 36. Tiempo de producción – 1.2 .....	83

En el presente trabajo se diseña una línea de reciclaje de plástico Polietileno de Tereftalato (PET) compuesta por seis módulos de máquinas que ejecutan distintas etapas del proceso. El diseño se desarrolló a partir de la información obtenida tras la visita a la planta de reciclaje Complast, en Guatemala e investigaciones sobre el mercado de reciclaje de plástico. Las máquinas consideradas en la línea son: una separadora por densidades, una desetiquetadora, una lavadora en caliente, una trituradora, una extrusora y una peletizadora. Cada máquina fue diseñada por un integrante del equipo diferente, mientras que el rol que se desempeñó en el proyecto fue el de ingeniero en proyectos, llevando a cabo una metodología de ingeniería en sistemas para garantizar la óptima compatibilidad entre cada máquina. Se llevaron a cabo reuniones en repetidas ocasiones para dar seguimiento a las máquinas y llevar un control en tomas de decisiones como el factor de seguridad de 1.9. Todas estas máquinas están diseñadas para operar de manera integrada, con una capacidad de 150 kg/h de PET, asegurando un flujo de trabajo eficiente y coordinado entre ellas. Todas las características, detalles, planos y costos de máquinas se pueden observar en los trabajos de graduación de: Juan Ignacio Foncea, Edgar Ricardo Echeverría, Adrian Calvo y Yessika Quintanilla, de la Universidad Del Valle de Guatemala.

Además, se realizó un análisis exhaustivo de los peligros potenciales de cada máquina, aplicando la metodología Bowtie, para garantizar la seguridad operativa de la planta. Se diseñó un plan de producción anual buscando satisfacer una demanda de 216,000 kg de PET. El flujo a trabajar para satisfacer la demanda es de 110.5 kg/h en caso de que, en el futuro la demanda aumente. El proyecto incluye un bosquejo detallado de la línea de reciclaje, facilitando su implementación en empresas o municipalidades interesadas en reducir la contaminación por plástico PET. El diseño propuesto busca contribuir significativamente a la mitigación del impacto ambiental de este tipo de residuos, una de las mayores fuentes de contaminación en Guatemala. Por último, se analizaron máquinas adicionales a implementar en un futuro como el módulo de banda transportadora, una planta de tratamiento de aguas y una máquina de detección y separación de residuos.

Palabras clave: reciclar, PET, línea de reciclaje, sistemas, máquinas.

This project presents the design of a recycling line for Polyethylene Terephthalate (PET) plastic, composed of six machine modules that carry out different stages of the recycling process. The design was developed based on information gathered during a visit to the Complast recycling plant in Guatemala, as well as research on the plastic recycling market. The machines included in the line are: a density separator, a label remover, a hot washer, a shredder, an extruder, and a pelletizer. Each machine was designed by a different team member, while the role assumed in this project was that of a project engineer, applying a systems engineering methodology to ensure optimal compatibility between machines. Recurrent meetings were held to monitor machine progress and support decision-making processes, such as the definition of a safety factor of 1.9. All machines are designed to operate in an integrated manner, with a capacity of 150 kg/h of PET, ensuring an efficient and coordinated workflow. All technical specifications, drawings, and cost analyses of the machines can be found in the graduation theses of Juan Ignacio Foncea, Edgar Ricardo Echeverría, Adrian Calvo, and Yessika Quintanilla from Universidad del Valle de Guatemala.

In addition, a thorough hazard analysis was conducted for each machine using the Bowtie methodology, to ensure the operational safety of the plant. An annual production plan was developed to meet a demand of 216,000 kg of PET. A processing flow of 110.5 kg/h was also considered to accommodate potential future demand increases. The project includes a detailed layout of the recycling line, facilitating its implementation in companies or municipalities interested in reducing PET plastic pollution. The proposed design aims to significantly contribute to the mitigation of the environmental impact caused by PET waste, one of the main sources of pollution in Guatemala. Finally, future additional modules were analyzed, such as a conveyor belt system, a water treatment plant, and a waste detection and separation machine.

Keywords: recycle, PET, recycling line, system, machinery



# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

El Polietileno de Tereftalato, normalmente conocido como PET, es un polímero termoplástico ampliamente utilizado en distintos mercados, como, por ejemplo, fabricación de envases y textiles. Este material es comúnmente utilizado por su alta resistencia mecánica, transparencia, ligereza, fácil almacenaje y transporte. Estas características hacen del PET el material preferido para la producción de botellas de bebidas, empaques de alimentos y una variedad de productos de uso cotidiano. Sin embargo, su uso masivo también ha llevado a un aumento significativo de residuos plásticos, presentando un desafío ambiental considerable (Reduce Reutiliza Recicla, 2024).

El motivo del diseño y desarrollo de una línea de reciclaje PET radica en la urgente necesidad de abordar el problema de la contaminación por plástico PET en Guatemala, donde el mal manejo y desecho de estos residuos ha generado un impacto ambiental significativo. Para garantizar la viabilidad y eficacia del diseño, se realizó una visita de campo a la empresa de reciclaje Complast, ubicada en Villa Nueva, con el fin de recolectar información relevante sobre las operaciones y tecnologías utilizadas. Dentro de la información recabada en la empresa se destacó el uso de máquinas que contaban con un flujo de PET de aproximadamente 150kg por hora. Los módulos que formaron parte de esta línea de reciclaje son una trituradora, una extrusora, una desetiquetadora, dos lavadoras y una peletizadora.

Dentro de la planificación de la planta se identificaron peligros en el funcionamiento de las máquinas. Al detectar los peligros se buscó mitigar daños mediante un análisis Bowtie para cada una de las máquinas. Estos elementos son esenciales para asegurar no solo la eficiencia operativa sino también la seguridad y sostenibilidad del proyecto.

De igual forma, se planificó el desarrollo de un plan de producción anual tomando en cuenta como

base un máximo de 150kg/h de flujo. Además, se estimó el mercado de Guatemala que recicla PET. Teniendo como producción un porcentaje de ese mercado. La implementación de esta línea de reciclaje representa una solución práctica y efectiva para reducir los niveles de contaminación por PET en el país.

### **2.1. Introducción al problema**

Guatemala enfrenta un problema de contaminación debido a la acumulación y mal desecho del PET. Esto representa un obstáculo al desarrollo y avance sostenible del país, afectando la salud pública, como por ejemplo, enfermedades a causa de este plástico. Actualmente, estudios indican que la persona consume alrededor de 2,000 piezas pequeñas de microplástico cada semana. Esto equivale a tener 21 gramos de plástico dentro del cuerpo al mes. La razón de esto es que, debido a que el PET no se degrada con el paso de los años, se van creando microplásticos que circulan en el ambiente, provocando que el aire que se respire contenga microplásticos y entre a nuestro cuerpo. Los desechos del PET también son un ejemplo de contaminación que enfrenta el agua del país dificultando su potabilización al contener grandes cantidades de este, e incluso, afectando también el sector de la pesca debido a las grandes cantidades de peces que ingieren estos plásticos, que al final, el ser humano consume (Silva, 2024).

### **2.2. Contexto**

El uso excesivo de envases de plástico ha sido causa del deterioro del medio ambiente a nivel mundial. Un estudio realizado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente demuestra que el plástico en general representa el 85 % de los residuos que llegan a los océanos y, en consecuencia, todas las especies marinas se enfrentan a riesgos de intoxicación, trastornos y asfixia, comprometiendo a los seres humanos a buscar soluciones para poder aliviar este problema que se

vive en todo el mundo (Naciones Unidas, 2024). Un medio utilizado para poder controlar este problema es realizar una línea de reciclaje PET. Según el Director Administrativo de la Asociación Rescate y Conservación de Vida Silvestre (ARCAS) el problema del plástico es inmenso y afecta a todos. Esta basura queda en la superficie de la arena de las playas, teniendo hasta medio metro de profundidad. (EntreMundos, 2024) El problema de tenerlo en la superficie de la arena es que afecta los hábitats naturales de la vida silvestre tanto en la flora como en la fauna. Las plantas pueden tener dificultades para crecer en suelos contaminados por plásticos, y los animales pueden evitar áreas con alta concentración de basura.

El PET es un plástico polietileno ligero que se puede moldear mediante soplado para la obtención de botellas, envases o recipientes. Es transparente y cuenta con cualidades que lo vuelven fácil de reciclar. (Termoformas, 2024) Existen dos métodos de reciclaje para este plástico: el mecánico y el químico. El método químico implica descomponer las moléculas del polímero por medio de una despolimerización. Esto permite reutilizar el PET para fabricar nuevos productos, convirtiéndolo en combustible o en materias primas más común para el reciclaje del PET. El proceso de despolimerización rompe la cadena en puntos específicos para obtener directamente el monómero. (Pio, s.f.) Una forma de despolimerizar el plástico es la metanólisis, en la que se descompone el PET en sus moléculas básicas, dimetil tereftalato y etilenglicol, que pueden ser nuevamente polimerizados para la obtención de PET virgen. Este proceso también puede ser usado para PET coloreado y con contenidos de otros polímeros contaminantes (PE, PVC, polímeros termoestables). (de los Plásticos, s.f.) Las ventajas de este método es que tiende a producir materiales reciclados de alta calidad, casi equivalentes a los materiales vírgenes, debido a la descomposición molecular y la purificación de los componentes. Sin embargo, el costo a comparación del método mecánico es más alto. Por lo que, en la industria de reciclaje PET, se prefiere el método mecánico.

En el método mecánico, el reciclaje se lleva a cabo por medio de diferentes máquinas o módulos por el cuál el PET se va transformando físicamente. El proceso mecánico comienza por el consumidor recolectando los envases y llevandolos al centro de reciclaje. En el lugar de reciclaje, el personal trabajador separa cada envase dependiendo de su tipo de resina (PET, HDPE, PVC, LDPE, PP, PS, entre otros). (Seibt, 2024) Posterior a este método artesanal, se comienza el proceso con 4 módulos diferentes que son los que una planta típica contiene. El primero siendo de fragmentación o trituración, se llevan los plásticos a una máquina trituradora o molino de cuchillas, en donde las botellas reducen su tamaño. De este módulo se busca obtener copos de PET para después pasar al segundo módulo que es el lavado. Allí se utiliza un tanque de agua para poder lavarlo y separarlo. La separación se da por la diferencia de densidades, en donde los copos de PET

se hundan por ser más densos que el agua, mientras que contaminantes como tapas y etiquetas flotan. Luego, está el proceso de secado, donde los fragmentos son secados en grandes máquinas con circulación de aire caliente. El siguiente proceso es el de extrusión, donde los trozos secos son introducidos a una máquina donde se funden con calor y se llevan mediante un tornillo sin fin a una matriz donde se forman filamentos continuos. Estos filamentos se enfrían en una bañera con agua a temperatura ambiente y se cortan en un granulador, formando gránulos de material plástico reciclado que se envasan. Al finalizar el proceso de reciclaje, la recicladora envía esta materia prima transformada a las industrias procesadoras, quienes desarrollan los productos plásticos que forman parte de nuestra vida y que aportan soluciones innovadoras a todos los sectores de la industria (Interempresas, 2024).

Otra máquina que se pueden implementar además de las que se usan normalmente es una sopladora. Esta se utiliza para la fabricación de objetos huecos mediante el inflado de un tubo de plástico. Este tubo se calienta para llenar un molde o troquel y crear la forma requerida al llenar el molde con el material. (Corzosa, s.f.) La máquina desetiquetadora es otra pieza fundamental para el proceso. Actualmente, la empresa Stadler ha creado una

desetiquetadora que elimina las etiquetas de todo tipo de botellas y logra desprender con eficacia el 80 % de las etiquetas. Esta máquina procesa flujos de hasta 9 toneladas por hora, en función del tamaño de las partículas y la composición del material. Es de suma importancia el poder organizar las máquinas y que se puedan ubicar en locaciones donde el traslado de materia y el proceso entre ellas sea lo más eficiente posible. (México, s.f.)

Las ventajas del reciclaje PET es que puede reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Esto debido a que el procedimiento para la creación del PET virgen da como resultado mayores emisiones de gases de efecto invernadero que el proceso de reciclaje del PET. En resumen, al conservar la materia prima de este plástico, el tratamiento del PET reciclado requiere de menos energía para su conversión dando como resultado una menor emisión de contaminantes (Ecoologic, s.f.).

Una compañía que realiza este proceso de reciclaje PET es la compañía Kenplas, ubicada en Hangzhou, China. Ingresando a la industria de plásticos en 1993, también construye maquinaria y equipo para procesamiento PET, como máquinas de inyección, estirado y soplado, moldes para preformas y formación de botellas y artículos como tapas para botellas. Su proceso comienza con el recibimiento de desperdicio en forma de botellas y lo termina con fabricación de nuevas botellas plásticas. Esta operación la denominan como B2B (bottle to bottle). El proceso es económico y efectivo desde el punto de vista financiero. Según lo explican los representantes de la empresa, las escamas de botellas recuperadas se pueden convertir nuevamente en botellas de alta calidad. Los

análisis de cromatografía de gases muestran que las características sensoriales del reciclado son aún mejores que aquellas del producto original. Dando como resultado, una mejor sensación al tacto, el olor e incluso a la vista que los productos creados a partir de PET vírgen. Los contenidos de acetaldehído y glicol de etileno son mucho más bajos que los valores tradicionales, debido a la aplicación de vacío durante el proceso de re-polimerización en fase sólida.(Industries, s.f.)



---

### Justificación

---

Actualmente, el mundo atraviesa situaciones críticas para el medio ambiente debido al mal desecho del plástico. En Guatemala, se estima que la generación per cápita de residuos y desechos sólidos comunes es de 0.519 kilogramos por habitante al día. La composición de estos residuos sólidos se estima en un 53 % de materia orgánica, 9 % de plásticos, 6 % de papel y cartón, 2 % de vidrio y 1 % de latas. Hasta la fecha, se calcula que se han producido

8.300 millones de toneladas de plástico (Libre, 2020). Una de las resinas más utilizadas en la fabricación de plástico es PET. El PET es liviano, fuerte, generalmente transparente, y se utiliza con frecuencia en empaques de alimentos y telas (poliéster). Además, es uno de los plásticos más fáciles de reciclar y reutilizar.

Para poder llevar un mejor control y ayudar al medio ambiente de Guatemala, se proponen soluciones como la implementación de una línea de reciclaje donde se trate el PET para reutilizarlo y darle nueva forma en productos o materiales de construcción. Estas líneas de reciclaje de PET cuentan con máquinas especializadas para tratar este polímero y llevar a cabo el proceso de reciclaje. Estudios muestran que actualmente consumimos alrededor de 2,000 pequeñas piezas de plástico cada semana, lo que equivale aproximadamente a 21 gramos al mes. Esta contaminación, causada por microplásticos, afecta tanto a humanos como a animales. La implementación de una línea de reciclaje de PET podría reducir significativamente estos niveles de contaminación.

Por medio de un equipo de seis integrantes se diseñó el montaje de las cinco máquinas, buscando la compatibilidad entre ellas. El ingeniero de sistemas del equipo desempeñará un papel crucial en este proyecto. Su responsabilidad principal será establecer la capacidad de carga de las máquinas para procesar el PET y diseñar la planta donde se realizará el trabajo. La importancia del rol del ingeniero de sistemas radica en su habilidad para integrar y optimizar todos los componentes del sistema de reciclaje.

El ingeniero de sistemas se encarga del diseño y planificación, asegurando que todas las máquinas y procesos funcionen de manera cohesiva. Esto incluye el diseño del layout de la planta, la disposición de las máquinas y la planificación de los flujos de trabajo. Además, identifica y resuelve problemas potenciales antes de que se conviertan en obstáculos, optimizando la eficiencia operativa mediante la implementación de mejores prácticas. También mantendrá la comunicación efectiva entre todos los miembros del equipo, asegurando que cada uno comprenda sus responsabilidades y contribuya al éxito del proyecto.

El ingeniero de sistemas busca constantemente formas de mejorar el sistema de reciclaje, introduciendo nuevas tecnologías y métodos para aumentar la eficiencia y reducir los costos. Asegurará que el proyecto promueva prácticas sostenibles que minimicen el impacto ambiental del proceso de reciclaje.

El objetivo del proyecto es que la línea de reciclaje se implemente en alguna empresa o municipalidad, apoyando a la comunidad en la reducción considerable de desechos de PET y reutilizando este material para otros propósitos, ya sea en la construcción o en la producción de nuevos envases. La contribución del ingeniero de sistemas es esencial para alcanzar estos objetivos, garantizando que el sistema de reciclaje funcione de manera eficiente y efectiva, y que cumpla con las expectativas de sostenibilidad y reducción de residuos.

### **4.1. Objetivo general**

Diseñar una planta de línea de reciclaje PET que cuente con 6 módulos de máquinas que puedan procesar al menos 150 kg de plástico por hora.

### **4.2. Objetivos específicos**

1. Realizar el esquema general de la planta de reciclaje.
2. Realizar un plan de mitigación de riesgos para la fabricación y funcionamiento de la planta.
3. Definir una agenda global para los diseños de cada máquina y la planta.
4. Garantizar la correcta compatibilidad entre las máquinas a ser diseñadas.
5. Diseñar un plan de producción anual para la línea de reciclaje.

## CAPÍTULO 5

---

### Alcance

---

El alcance del proyecto es desde la entrada del material a la primera máquina, que es la máquina separadora, hasta la obtención del pellet de la máquina peletizadora. Enfocándose únicamente en la línea de reciclaje y su producción. El tiempo de abordaje del proyecto no debe durar más de 2 años. Se contempla únicamente el diseño y área necesaria para poder construir e instalar la línea de reciclaje, no tomando en cuenta la construcción de las máquinas. No se contempla un cliente final específico, sino que, el proyecto está destinado a cualquier entidad que tenga a su disponibilidad los materiales y espacio mínimo que se detalla en el proyecto para su construcción.

### **6.1. *System Engineering***

#### **6.1.1. Definición de *System Engineering***

Un ingeniero en sistemas (*System Engineering*) es un profesional en el cual se dedica a estudiar y monitorear un sistema a implementar para poder garantizar la integridad y procesos en el cual busca formular propuestas para soluciones radicales mediante el uso de tecnologías y organizando un equipo de diversos profesionales para poder llevar a cabo un plan. Trabaja en sistemas completos de ingeniería al ir diseñando, desarrollando y mejorando cada proceso desde el principio hasta el final del producto o servicio a ofrecer. Están implicados en todos los aspectos del diseño, desarrollo, integración, fabricación y marketing. No consiste solamente en el conocimiento de las diversas áreas de la ingeniería, sino de hacer que los sistemas funcionen teniendo en cuenta todos los factores involucrados (educaweb.com, s.f.).

Un sistema de ingeniería típico conforma muchos tipos diferentes de ingenieros que trabajan juntos como un equipo; el ingeniero de sistemas debe ser capaz de comprender y respaldar el trabajo de todos los miembros del equipo. Deben entender tanto el punto de vista del fabricante como el del operario. Es de esta forma en el cual se logra una comunicación ideal para la preparación y construcción de un sistema o conjunto de operaciones.

Establece horarios de reuniones con el equipo y determina el camino a seguir y el ritmo en que el equipo debe de trabajar. Velando por que las tareas de cada miembro del equipo satisfagan los

requerimientos para que cada trabajo de cada miembro se pueda sincronizar. En simples palabras es el que lidera el proyecto que se está llevando a cabo (educaweb.com, s.f.).

### **6.1.2. Método utilizado en System Engineering**

Una metodología que se puede considerar para la ingeniería de sistema es la metodología para transformar necesidades en requisitos integrando ingeniería en sistemas. El fin es para encontrar una metodología donde se agregue valor a los procesos de análisis y diseño, y asegurar la calidad del sistema. ‘La calidad en la definición de los requisitos lleva directamente al éxito o fracaso del proyecto de desarrollo de un sistema’ (Gomez Sotelo et al., 2017). El primer paso es identificar y valorizar los grupos de interés. Donde una vez identificados se les pueda invitar a participar activamente desde la fase conceptual del nuevo sistema. El segundo paso es capturar y consolidar las necesidades de los grupos de interés. Se propone la implementación de cuestionarios donde a partir de los resultados de cada grupo de interés se pueda formular la misión, propósitos y objetivos. El tercer paso es verificar la factibilidad y consistencia, donde una vez establecidas las necesidades a través de los cuestionarios, se verifica si el conjunto de necesidades son factibles y consistentes, sin contradicciones entre ellas y compatibles. Luego se priorizan y se transforman en requisitos expresados en términos del servicio esperado, el lenguaje debe ser apropiado para que sea comprendido. Por último, se debe de verificar, registrar y administrar estos requisitos o necesidades de los grupos de interés para poder realizar el proyecto de manera óptima.

### **6.1.3. Plan de mitigación**

Cuando una empresa entiende y comprende los problemas que tienen mayores probabilidades de incidencia en diferentes capacidades operativas, se pueden tomar medidas para poder disminuir el impacto de estos problemas en procesos, resultados, trabajadores y clientes.

Es por esto que para que el sistema pueda funcionar de forma óptima y disminuir riesgos de accidentes o problemas se crea un plan de mitigación de riesgos. Este plan es una forma para que las empresas limiten el impacto de las amenazas operativas en los resultados de las empresas. Esto garantiza a la fábrica que pueda tener confianza en que se puedan limitar las pérdidas o accidentes que se podrían experimentar como resultado.

Existen 5 pasos para poder crear un plan de mitigación. El primer paso es poder identificar las amenazas y evaluar si las consecuencias de estos problemas son manejables. No busca evitar o reducir amenazas, sino aumentar la conciencia de las amenazas existentes que no pueden evitarse. El segundo paso es la evasión de amenazas. Inicia con la identificación de riesgos asumidos y busca crear una lluvia

de ideas para poder evitarlos. Esta estrategia crea una planificación de riesgos para dar a entender un mejor panorama y establecer pasos para prevenir resultados negativos (5 estrategias a considerar, s.f).

Otro paso a seguir es llevar a cabo un control de riesgos. El control de riesgos evalúa los riesgos identificados y toma medidas para reducir o prevenir el impacto negativo potencial. En lugar de evitar o aceptar completamente los riesgos, esto se centra en las consecuencias y en cómo manejarlos. El cuarto paso para la mitigación de riesgos es la transferencia de amenazas. La implementación de la transferencia de riesgos funciona al trasladar el impacto de las consecuencias a otra parte. La forma más común de transferencia de riesgos es contratar un seguro, donde la empresa paga una prima que, idealmente, proteger a la empresa de pérdidas más significativas en el futuro. Y por último, el quinto paso es poder hacer un monitoreo de los riesgos. Donde el monitoreo evalúa periódicamente las amenazas y las consecuencias para poder analizar los impactos que se tendrán. Evaluar el rendimiento del proyecto u operación tal como está sucediendo permite una respuesta en tiempo real para mitigar los riesgos, y requiere conciencia de como cada cambio puede afectar la probabilidad de que se produzcan riesgos potenciales (5 estrategias a considerar, s.f.).

## **6.2. Línea de reciclaje**

### **6.2.1. Qué es una línea de reciclaje**

Normalmente un sistema de reciclaje se basa en la recolección de volúmenes de residuos para posteriormente ser procesados y tratados. Esto con el objetivo de obtener un nuevo material el cuál puede venderse o utilizarse para la producción de nuevos productos.

En la línea de reciclaje se enfocan en el proceso y tratamiento del residuo a través de distintas máquinas para poder obtener el nuevo producto. A través de un procesamiento eficiente y consistente, una línea de reciclaje puede producir gránulos de plástico reciclado de alta calidad, reduciendo los desechos y contribuyendo a un futuro más sostenible y ecológico. Normalmente cuenta con una serie de 5 máquinas que están sincronizadas entre sí, que serán explicadas más adelante. Se busca definir cuál de las operaciones es el cuello de botella, si es que hay alguno, para poder establecer el volumen de producción. Esto es importante ya que al identificar un flujo tomando como referencia el cuello de botella, se tendrá una producción continua y sin estaciones donde el material quede estancado provocando un tiempo muerto. (Aceretech, 2023)

## **6.2.2. Procesos de la línea de reciclaje**

El proceso de la línea de reciclaje comienza al reunir los envases plásticos y pesarlos para determinar el volumen a trabajar. Luego de esto se pasa a una clasificación ya sea manual hecha por los operarios o automática hecha por una máquina, donde se separan las botellas dependiendo del color que sean y así poder proceder a la máquina donde, por medio de un imán, se detectan si los envases contienen metales o algún otro material no deseado. Después de esto se pasa por la máquina de desetiquetado donde por medio de soda cáustica y otros agentes químicos se remueven las etiquetas. Con esto se continúa por el proceso del lavado y centrifugado para eliminar restos de otros materiales y se logra obtener un material con textura y color homogéneos. Luego se procede al triturado para poder reducir el volumen, obteniendo copos de PET para poder fundir y peletizar el material en el último proceso. Teniendo un resultado final de plástico reciclado listo para convertirse en otro producto final para el consumidor (Víctor, 2022).

## **6.2.3. Reciclaje PET**

El PET es el polímero más reciclado a nivel mundial. El PET puede ser reciclado múltiples veces, pero para uso alimentario solo se permite un 1er nivel de reciclaje, pasado este nivel se utiliza para una amplia variedad de productos finales como fibra, fibra de relleno textil, correas, botellas y envases para usos no alimentarios como detergentes y productos fitosanitarios (¿Cómo se recicla y reusa el PET?, s.f.). El proceso de reciclaje de PET genera un gran impacto ambiental, particularmente en Europa Occidental, donde se estima que el uso de PET reciclado puede reducir hasta 200, 000 toneladas anuales de plástico virgen de origen fósil (Recicla, 2023).

En el proceso de reciclaje, las botellas PET se llevan a la planta de reciclaje donde se eliminan las etiquetas y tapones. Luego se separan por colores para triturarlos y así lavarlos, secarlos y esterilizarlos. Posteriormente se funden a 270°C para granularlos. Así se llevan a la máquina de inyección para poder crear las preformas de las nuevas botellas PET y cerrar el círculo (Reciclaje de PET para avanzar hacia una economía circular, 2020).

Para poder establecer la producción de la línea de reciclaje seleccionada, se investigó distintos proveedores y distintas máquinas. La página consultada fue Aceretech. El cuál es una proveedora de maquinaria industrial sobre líneas de reciclaje. Se tomó en consideración máquinas como desetiquetadoras, trituradoras y extrusoras ya que estas son las que más influyen en el tiempo de proceso en las líneas de reciclaje. Al estudiar cada máquina se descubrió que la máquina con menor capacidad era una extrusora que trabaja entre 120 y 160 kg/h. Para la desetiquetadora se contaba con

una capacidad de 600kg/h. La trituradora más simple trabajaba con una capacidad de 160 a 200kg/h y por último, la extrusora simple contaba con el rango previamente mencionado, por lo que, esta máquina se considera el cuello de botella. Siendo el cuello de botella la máquina u operación que establece el ritmo de trabajo de todo el sistema, se tomó la decisión de trabajar con el volumen decidido en los requisitos para evitar cualquier ralentización de producción en la línea de reciclaje, siendo 150kg/h (Aceretech machinery, s.f.).

#### **6.2.4. Máquinas en una línea de reciclaje y sus aplicaciones**

Los módulos a implementar en la línea de reciclaje son cinco. Entre ellas están la lavadora de botellas, la desetiquetadora, la trituradora, una máquina peletizadora y una extrusora. En el cuál se explican a continuación.

La lavadora consiste en poder eliminar impurezas o contaminantes que existan en la botella. Dependiendo del tipo de lavado existen 2. La primera es el lavado en frío, donde las temperaturas a trabajar están alrededor de 30°C y el segundo es el lavado en caliente, donde las temperaturas rondan arriba de 70°C. Normalmente el lavado se realiza sobre el triturado. Y el fin del proceso es poder eliminar impurezas o contaminantes orgánicos que puedan afectar y contaminar la escama final del PET. En ocasiones se utilizan métodos de fricción, centrifugación, entre otros para mejorar el lavado y la eliminación de elementos no deseados (Mariano, 2011).

Luego de realizar el primer lavado se utiliza la máquina de desetiquetado para poder remover las etiquetas de los envases PET. Dentro de la máquina hay cuchillos afilados, resistentes y dentados de aleación que cortan y despegan las etiquetas de las botellas de plástico. Las cuchillas en forma de garras están soldadas a un eje giratorio a cierto ángulo para empujar las botellas para adelante ([Removedor de etiquetas plásticas], 2020).

La trituradora, como lo indica su nombre se encarga de triturar y disminuir los tamaños de los envases a copos. Para la trituradora se suele utilizar un molino de cuchillas. Al terminar el proceso de triturado se transporta a la máquina extrusora donde esta aplica presión sobre los gránulos y se alcanzan temperaturas superiores a los 90°C, y presiones tales de generar la plastificación del PET al comprimirlo y realizar su expulsión.

Por último, la máquina peletizadora sirve para convertir los copos de PET en pequeñas piezas llamadas gránulos o pellets. consta de un rodillo prensante que después de realizar el proceso de extrusión; contenido dentro de un elemento cilíndrico llamado trefiladora de compresión que comprime el material y determina la salida a través de matrices perforadas. Cuchillos colocados afuera de la trefiladora cortan los pellets del largo deseado. obteniendo el resultado final del material reciclado (Máquina para fabricación de pellet, 2021).

## **6.3. Polietileno de Tereftalato (PET)**

### **6.3.1. Composición del PET y sus características**

El politereftalato de etileno, tereftalato de polietileno o polietileno de tereftalato es más conocido como PET en sus siglas en inglés. Este material es un polímero plástico donde su uso más común es en envases de bebidas o textiles. En el tema químico, su composición es obtenida mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. El PET es un termoplástico con alto grado de cristalinidad. Entre sus propiedades se destacan su alta transparencia, alta resistencia al desgaste y la corrosión, buen coeficiente de deslizamiento y buena resistencia química y térmica.

Entre sus aspectos positivos se destacan que es liviano e impermeable, no tóxico a cierto grado ya que todos los plásticos tienen cierto grado de toxicidad, alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad lo que lo hace apto para fabricación de fibras y siendo importante en el análisis es que es totalmente reciclable. Las propiedades físicas y características del PET han sido las razones por la cuál ha alcanzado una gran relevancia dentro de las industrias de textiles y envases como botellas, bandejas y láminas (¿Qué es el PET?, s.f.).

### **6.3.2. Forma de reciclaje del PET**

Existen tres formas de reciclaje para el PET. Están el químico, mecánico y por disolución. Para las formas químicas y por disolución, estas están en comienzos de su utilización y estudio. Por lo que estos métodos buscan obtener valores en energía o para que acaben directamente en el vertedero.

El reciclado de disolución usa agentes químicos y disolventes para deshacer los polímeros. Lo que lo diferencia de la química y la razón por la que no se considera reciclaje químico es debido a que en la disolución no ocurren roturas de las cadenas poliméricas. Solamente disuelve los polímeros y los separa en su totalidad sin afectar la cadena (Victor reciclaje, 2022).

El reciclaje químico o también llamado según la norma ISO 15270:2008 como reciclado molecular convierte los polímeros en monómeros. Esto quiere decir que su estructura química de los residuos plásticos va variando por medios ya sea de gasificación o despolimerización. Este método es más utilizado para tratar fácilmente plásticos que ya han sido sometidos en varios ciclos de reciclaje mecánico y muestran una disminución en sus propiedades.

El reciclaje que comúnmente se usa es el mecánico. Este consiste en aplicar distintos tipos de rupturas o cizallas o incluso temperaturas para poder convertir los residuos en material reciclado sin romper las cadenas de polímeros (Victor reciclaje, 2022).

### **6.3.3. Materiales o productos creados a partir del PET**

A partir del reciclaje PET, se pueden obtener distintas materias primas para poder utilizarlos como recursos en creación o producción de productos finales. Las materias primas que se obtienen del reciclado pueden ser chatarra de PET prensada en fardos, PET triturado, escamas de R-PET o PET triturado. Con esto, los productos a crear pueden ser para distintas industrias. Entre estas industrias se puede comenzar con el más grande que es el de envases. De los envases se pueden volver a crear botellas plásticas, cubiertos plásticos, cubiertas o tapaderas plásticas y trastes plásticos. E incluso con las fibras del PET se pueden obtener incluso textiles para poder crear camisas, suéteres o todo tipo que lleve tela (cirplus, s.f.).

### **6.3.4. Propiedades del PET reciclado**

El PET incluso después de su reciclaje mantiene características importantes que lo hacen uno de los materiales más utilizados. Como propiedades de gran flexibilidad, impermeabilidad, muy alta resistencia tanto a las temperaturas como al desgaste. Tomando en cuenta la posibilidad de que se recicle otra vez, contribuyendo a una disminución de envases de plástico virgen en el medio ambiente.

Por otra parte, es importante aclarar sobre el mito que, al reciclar el PET, este se puede convertir en un material cancerígeno si entra en contacto con alimentos o productos para ingerir. En una serie de tres artículos publicados por científicos de Wageningen Food and Biobased Research, se examinó la influencia de la influencia de la calidad del tereftalato de polietileno reciclado y los niveles de contenido reciclado en las propiedades de las botellas de PET. Los autores resumieron que las cantidades migradas de acetaldehído y etilenglicol cumplieron con los límites establecidos en la legislación sobre materiales en contacto con alimentos. Obteniendo resultados donde el producto de condensación de acetaldehído y etilenglicol migró en concentraciones por debajo del límite de 10 µg/L, que convencionalmente se aplica para sustancias añadidas no intencionalmente. Esto quiere decir que no clasificado como 'carcinógeno', mutagénico' o 'tóxico para la reproducción'. Concluyendo que los envases de reciclaje PET usados para alimentos no se consideran dañinos para el ser humano. (Food Packaging Forum, 2020)

---

### Metodología

---

La metodología de ingeniería en sistemas presentada para el diseño de una planta de reciclaje PET se llevó a cabo mediante una serie de monitoreos y una comunicación constante entre los miembros del equipo. Se organizaron reuniones mensuales para documentar los avances y asegurar un contacto continuo entre los integrantes. Se crearon minutas y tablas que evidenciaron el progreso, permitiendo acceder fácilmente a la información crucial de cada máquina. A través de esta organización, se determinó el factor de seguridad mínimo necesario para las máquinas y se diseñó la línea de reciclaje tomando en cuenta los diseños y dimensiones específicas de las mismas. Con estos datos, se generó un mapa de la línea de reciclaje utilizando el programa *Simio*.

Posteriormente, basándose en un flujo másico establecido de 150 kg/h, se procedió a la planificación de la producción anual de pellets. Esto permitió proyectar la capacidad productiva de la planta y optimizar el proceso de reciclaje. Adicionalmente, se plantearon las máquinas y módulos que deberían ser implementados o diseñados en el futuro para lograr una línea de reciclaje más completa y autónoma.

En cuanto a la mitigación de riesgos, se empleó la metodología *Bowtie* para cada máquina, lo que permitió identificar los peligros y minimizar tanto el impacto como la frecuencia de ocurrencias relacionadas con la pérdida de control. Este enfoque integral asegura que la planta no solo sea eficiente en términos de producción, sino también segura y preparada para afrontar posibles contingencias.

## 7.1. Definición de requisitos

Los requisitos fueron basados en la línea de reciclaje y también con lo que se requiere que lleve el trabajo como *System Engineering*. Estos requisitos se dividen en 4 apartados ocódigos, que son P, para Producción; S, de seguridad; M, para las máquinas y LR para la línea de reciclaje tal y como se observa en el cuadro 1. Mientras que en el cuadro 2 se detalla cada requisito por su apartado.

**Cuadro 1**  
*Identificación de Códigos*

ID	Significado
P	Producción
S	Seguridad
M	Máquinas
LR	Línea de Reciclaje

Fuente: *elaboración propia*

**Cuadro 2**  
*Requisitos*

Código	Requisito
P01	El plan de producción debe considerar 2 días de mantenimiento cada tres meses. P02 La producción tiene que tener un inventario de seguridad.
P03	El plan de producción tiene que contemplar asuetos, feriados y vacaciones de acuerdo al código de trabajo guatemalteco para el año 2024.
S01	Cada máquina debe tener 1 botón de paro de emergencia.
S02	Las máquinas que cuenten con piezas punzo cortantes deben estar cerradas en las áreas donde sean accesibles estas piezas peligrosas.
S03	Cada máquina debe tener un factor de seguridad mínimo de 1.9. S04 Cada máquina debe tener un <i>análisis bowtie</i> .
M01	Las máquinas deben procesar toda botella PET que no sobrepase los 600 ml.
M02	Las máquinas deben poder trasladar el producto entre ellas sin que las botellas se atasquen.
M03	Cada plano de máquina debe tener su lista de partes. M04 Cada plano debe contener los materiales y sus cantidades.
M05	Cada plano debe seguir el formato estándar del departamento de mecánica. LR01 La línea de reciclaje debe poder manejar un flujo de al menos 150 kg por hora.
LR02	Contar con un formato de minutas para el registro de los temas en reuniones grupales. LR03 Llenar hojas Excel con información de dimensiones de cada máquina.
LR04	Compartir carpeta grupal donde se actualicen informaciones sobre cada cambio en las máquinas.

Fuente: *elaboración propia*

## 7.2. Comunicación entre equipo

Para poder tener una comunicación efectiva y asertiva entre los integrantes del grupo se calendarizaron reuniones grupales para poder compartir entre cada uno sus avances, inquietudes o dar ayuda en caso lo requieran. Con el fin de mantener un constante avance a un ritmo igual para cada integrante, las reuniones para el primer semestre del año 2023 se programaron de la siguiente forma, siempre en los días lunes por disponibilidad del equipo:

- Enero, las reuniones se llevaron a cabo las fechas 16 y 30.
- Febrero se llevaría a cabo la fecha del 27.
- Marzo, las fechas 6 y 20 también.
- Abril, la fecha del 17.
- Y mayo, en las fechas 8 y 19.

Es importante recalcar que en algunas reuniones no iban a poder estar presentes todos los integrantes del grupo, por lo que se procuraba resumir y comunicar a los que no asistieron por medio de las minutas que se describirán más adelante.

De igual forma se creó un cronograma grupal para el primer semestre del año 2023 donde se verificaría que el grupo siguiera al unísono y sin poder atrasar la entrega. El cronograma se muestra de la siguiente forma:

**Cuadro 3**  
***Cronograma grupal primer semestre 2023 - 1.1***

Cronograma Semestre 1, 2023												
	enero						febrero					
metas/máquinas	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
	<b>Primera reunión grupal</b>											
calendarizar reuniones	x	x	x	x	x	x						
delimitar orden de las máquinas	x	x	x	x	x	x						
	<b>Segunda reunión grupal</b>											
Identificar máquinas en el mercado							x	x	x	x	x	x
Conocer las partes de cada máquina							x	x	x	x	x	x
							<b>Tercera reunión grupal</b>					



Para las reuniones de enero, se abordaron los temas sobre los días a reunirse, la frecuencia que se realizarían estas reuniones y el orden que cada uno lleva dentro de la línea de reciclaje. Mientras que parte del grupo se les dificultaba las reuniones por horarios de clases y actividades, otros estaban disponibles en esos días y viceversa. Al final se llegó a un acuerdo en el cuál todos se comprometían a realizar las reuniones los lunes a las 9 de la noche. Y la frecuencia de estas reuniones serían que en enero se realizarían dos reuniones, en febrero una, en marzo dos reuniones, en abril solo una y en mayo se llevarían a cabo dos reuniones.

En febrero se realizaría de manera formal un cronograma grupal, donde se establecerían los pasos o metas de grupo para que cada ningún integrante se atrasara con sus entregas. Cada integrante también investigaría sus máquinas en temas de sus funciones, ejemplos y la forma de operar, al igual que conocer los componentes principales de cada máquina. También se iniciarían los primeros diseños para las máquinas para la trituradora, extrusora y peletizadora. La razón por la cuál se trabajaron primero las últimas 3 máquinas es que los integrantes de dichas máquinas debían terminar sus diseños para finales de 2023, mientras que el resto del grupo debía tener sus diseños finalizados para el 2024. De igual forma se iba comunicando al grupo las decisiones y cambios que las últimas 3 máquinas iban a realizar.

En marzo, se enfocó en establecer el producto o la materia prima con la que se trabajaría, al igual que los recursos y requisitos que necesita cada máquina. Las reuniones serían presenciales, sin embargo, no se contaba con un registro formal o una bitácora para que se plasmara o dejara evidencia sobre los temas tratados y de esta forma compartir con los integrantes que no podían asistir

De esta manera, se implementaron las minutas con el objetivo de llevar una mejor organización respecto a la fecha y hora de las reuniones, así como a los integrantes que asistían. Las minutas también registraban los temas abordados, las aportaciones de cada integrante y, por último, las tareas que cada miembro debía realizar durante el mes. Las minutas contaban con:

- Fecha: se coloca la fecha que se realiza la reunión, poniendo el día, mes y año.
- Hora: se colocaría la hora en la que se lleva a cabo la reunión en formato de 12 horas y no el formato de 24 horas.
- Modalidad de la Reunión: se especifica si la reunión sería virtual o presencial. De ser virtual, la plataforma utilizada es *Zoom*.

- **Objetivos de la reunión:** se especifica el o los objetivos esperados para la reunión, ya sea el discutir de un tema o poder resolver problemas o inquietudes.
- **Integrante y su asistencia:** se coloca el nombre del integrante, la máquina en la que se especializa y se pone si asiste o está ausente en la reunión.
- **Temas tratados:** se escriben los temas hablados y tratados de la reunión. Todas las propuestas y dudas que van surgiendo. Así como los progresos de las máquinas y la línea de reciclaje.
- **Compromisos:** de último, cada integrante se propone metas a realizar a una determinada fecha, ya sea avanzar en un tema o terminarlo.

**Figura 1**  
**Formato de minutas**

MINUTA DE REUNIÓN			
FECHA:		HORA:	Modalidad:
OBJETIVO:			
INTEGRANTE	MÁQUINA	ASISTENCIA	
<u>TEMAS TRATADOS</u> 1. 2. 3. 4. 5.			
COMPROMISOS			
No.	TAREA	RESPONSABLE	FECHA A ENTREGAR
1			
2			
3			
4			
5			

Fuente: *elaboración propia*

La reunión para la fecha 17 de abril fue modalidad virtual. Asistieron todos los integrantes, excepto la máquina extrusora. Los temas tratados fueron el flujo de volúmen, que se estableció de 150kg/h. La razón por la que se decidió 150kg/h es que al investigar plantas de reciclaje y visitar la

planta Complast S.A con dirección 21.5 carretera antigua a Amatitlán lote 7 zona 10 Amatitlán, las máquinas trabajaban con capacidad de 300kg/h. La fábrica de Complast S.A consistía también en la fabricación de telas o camisas, por lo que debían tener un flujo grande para alimentar el proceso posterior. El caso de la línea de reciclaje diseñada, está en fase de buscar inversionistas para realizar la fabricación en función a las necesidades de la empresa por lo que un flujo más pequeño sería ideal. Es por esto que se decidió trabajar la mitad del flujo hecho en la fábrica.

Por último, se tenía confusión acerca del factor de seguridad para la planta. Es por esto que el *System Engineer* se encarga de poder determinar un factor de seguridad mínimo y compartirlo para que cada integrante trabaje su factor de acorde al mínimo establecido. Para esto se investigarían los factores a utilizar y calcularlo con una fórmula que se explica más adelante.

El 8 de mayo la modalidad fue virtual. Asistieron todos los integrantes menos la extrusora por complicaciones personales. Los objetivos de esta reunión serían identificar los avances, compartir el factor de seguridad y discutir sobre las metas como grupo. se acordó que para finales de semestre, cada integrante lograría realizar los cálculos y diseños de sus máquinas; a tal punto de iniciar sus simulaciones. Se compartió el factor de seguridad mínimo de 1.9 que se obtuvo por medio del cálculo explicado más adelante. Cada integrante del equipo estuvo de acuerdo de trabajar sus maquinas tomando este factor de seguridad ya que los que recién habían calculado sus factores obtenían resultados mayores a 1.9, por lo que era favorecedor para la línea de reciclaje. También se compartieron las dimensiones de las máquinas para que las alturas y largos fueran coherentes con respecto a la línea de reciclaje. Se trató el tema sobre los materiales. Conociendo cuántos materiales diferentes necesitaba cada máquina. Así se podría identificar cuáles materiales iban a compartirse entre máquinas y poder ahorrar costos.

Por último, la fecha 19 de mayo se llevó una reunión presencial con los integrantes de la extrusora y la peletizadora. El objetivo fue analizar la conexión y relación entre las máquinas peletizadora y extrusora. Se discutió sobre las velocidades de las máquinas, la peletizadora trabaja a 170mm/s, mientras que la extrusora trabaja a 3,000 mm/s. Por lo que se trabajará para cambiar la velocidad de la peletizadora para ver el impacto en su proceso. Y la conexión entre las máquinas debe de ser directa, por lo que se diseñará un acople que junte la máquina extrusora con la peletizadora.

Para el segundo semestre del 2023, se concluyeron los trabajos de la trituradora y la peletizadora. En el mes de julio y agosto se trabajaron los últimos diseños y cálculos de las máquinas trituradora y peletizadora. Los últimos análisis realizados para la máquina trituradora fueron la simulación para las soldaduras y verificar por medio de una simulación en *Ansys* los esfuerzos que las cuchillas sufren. También se trabajaron al final los manuales de uso, mantenimiento e

instalación de ambas máquinas. Los manuales, cálculos y análisis hechos en cada máquina se pueden observar en los trabajos de graduación realizados por Adrian Calvo y Yessika Quintanilla. El integrante encargado de la máquina peletizadora por falta de compromiso y comunicación se atrasó y no pudo terminar satisfactoriamente la clase de Diseño e Innovación 2. Esto dio como resultado dificultad de comunicación y falta de seguimiento de la máquina. Para el resto del segundo semestre, septiembre y octubre, se trabajó con la simulación inicial de la línea de reciclaje. Utilizando las medidas proveídas y el flujo establecido. Dicha simulación se explicará detalladamente en la sección de Diseño de Línea de Reciclaje.

**Cuadro 6**  
**Cronograma grupal segundo semestre 2023**

<b>Cronograma semestre 2, 2023</b>												
	<b>julio</b>						<b>agosto</b>					
metas/máquinas	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
cálculos finales de trituradora y extrusora				x		x				x		x
Diseño final de máquinas				x		x				x		x

Fuente: *Elaboración propia*

A inicios del año 2024, en el mes de enero, se recopilaron los datos de las primeras máquinas para analizar el estado y la compatibilidad. Con la información recopilada tanto de las máquinas finalizadas como las que siguen en marcha, se realizó una reunión grupal para poder compartir el estado general de la línea de reciclaje. Para el 26 de febrero, se realizó el análisis de requerimiento de materia prima, siendo en este caso las botellas PET para su transformación, la cantidad de botellas necesarias y el inicio del plan de producción.

Durante el mes de marzo se realizaron investigaciones sobre el módulo de transporte. Se buscaron los diferentes tipos de bandas transportadoras y se hizo una tabla comparativa entre diferentes tipos para determinar la más adecuada según el objeto a transportar. El tema del módulo de transporte se encuentra más detallado en la sección 7.11.1 de Módulos adicionales a implementar. A finales de marzo e inicios de abril, se llevó a cabo el análisis de peligros para cada máquina, identificando el peligro principal que cada máquina puede tener u ocasionar. Para esto se realizó un análisis *Bowtie*, el cuál será explicado en la sección de Mitigación de riesgos para las máquinas.

El 5 de abril se hizo una reunión con el integrante encargado de la lavadora en frío y la lavadora en caliente. Se realizaron cambios en el diseño de la primera lavadora. Volviéndose en una máquina

que cuenta con dos tanques. El primer tanque se alimenta de las botellas y el agua, seguido de esto, las botellas se trasladan al segundo tanque en el cuál se realiza una segunda separación de sedimentos y suciedad de las botellas. Respecto a la lavadora en caliente, se evalúa el uso de etilenglicol para que las temperaturas en el líquido fueran mayores a 100°C y que no ocurriera evaporación. De esta forma se buscaría eliminar bacterias e impurezas que las botellas todavía tuvieran.

El 15 de mayo se buscó contactar al integrante de la máquina extrusora por medio de correo, solicitando información del estado de su máquina y las dimensiones para la planificación de la línea de reciclaje. El 16 de mayo se obtuvo respuesta por parte del integrante, se explica que la máquina extrusora es de 2.25 m de largo x 1.50 m de alto x 0.75 m ancho. Y se uniría al final del cañón por medio del dado o figura de extrusión de la peletizadora.

A finales del primer semestre del año 2024 se terminó de realizar la planificación de producción para el año 2024, el cual el cálculo y explicación se encuentra en la sección 7.10 de la metodología. Realizando una simulación de producción anual lo más certero posible.

**Cuadro 7**  
**Cronograma grupal primer semestre 2024 1.1**

<b>Cronograma semestre 1, 2024</b>												
	<b>enero</b>						<b>febrero</b>					
metas/máquinas	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Recopilación de datos				x		x						
Reunión Grupal	x	x	x									
Requerimientos de materia prima para el inicio de la línea de reciclaje							x					

Fuente: *Elaboración propia*

**Cuadro 8**  
**Cronograma grupal primer semestre 2024 1.2**

<b>Cronograma semestre 1, 2024</b>												
	<b>marzo</b>						<b>abril</b>					
metas/máquinas	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Evaluación e iteración de máquinas lavadoras							x		x			

Fuente: *Elaboración propia*

**Cuadro 9**  
**Cronograma grupal primer semestre 2024 1.3**

<b>Cronograma semestre 1, 2024</b>						
	<b>mayo</b>					
metas/máquinas	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Diseño de extrusora					x	

Fuente: *Elaboración propia*

Para el mes de julio, se realizaron cambios grandes en las máquinas lavadoras, sin embargo, esto no afectó la compatibilidad ni el flujo de producción. La lavadora en frío contaría con un cambio de nombre y una función adicional. El nuevo nombre sería Máquina separadora por densidades. Por lo que, a partir de esta sección se le referirá a la primera máquina como separadora. Su necesidad sería el que las botellas deban entrar sin tapadera. Los tubos de alimentación del primer tanque al segundo serían tres para poder tener el flujo necesario de 150kg/h. La lavadora en caliente usaría soda cáustica en vez del etilenglicol. La razón de este cambio es debido a la necesidad de reducir el tiempo de preparación de la máquina antes de su uso. Y la máquina consistiría en un cilindro, el cuál tiene un volumen de 6.28 m<sup>3</sup>.

En agosto se trabajó el bosquejo final para la línea de producción, utilizando las medidas de las máquinas que estuvieran finalizadas. Las máquinas que contaban con sus medidas concluidas eran la máquina separadora, la máquina lavadora caliente, la trituradora, la extrusora y la peletizadora. Dicho Bosquejo final se puede observar en los resultados.

Por último, el mes de septiembre se concluyó la máquina desetiquetadora. Trabajando de último el sistema de extracción de etiquetas por medio de un ventilador y el desgarre de las etiquetas por medio de un rotor con cuchillas. Una vez determinada las medidas de la desetiquetadora se integró la medida de la máquina en el mapa de la línea de reciclaje para poder concluir con el diseño. Finalizando la etapa de diseño, se compartió el resultado de la línea de reciclaje por medio de una reunión grupal y anotando lo comunicado por medio de una minuta.

Como se puede evidenciar en el proceso de creación y planificación de la línea de reciclaje, el desarrollo del proyecto se dio de manera gradual. Sin embargo, es importante destacar que la comunicación entre los integrantes del equipo no fue tan continua ni frecuente como se hubiera deseado. Esto se debió a que, además de trabajar en la línea de reciclaje, los miembros del equipo tenían que cumplir con las exigencias de otras asignaturas y sus respectivos horarios laborales. Estas

responsabilidades adicionales limitaron la disponibilidad de tiempo para reuniones regulares, lo que afectó la fluidez y la coordinación en algunas etapas del proyecto. La agenda global para el diseño de las máquinas y la línea se presentará en los resultados y las minutas y correos realizados se presentarán en los anexos.

### **7.3. Monitoreo de avances de cada máquina**

Para el monitoreo de las máquinas, se recopilaron datos como cálculos y avances para llevar un control del desarrollo de las mismas. Se creó una carpeta en la nube para subir las minutas de las reuniones, facilitando el acceso a los temas discutidos y los cambios en los diseños acordados. Esto permitió que cada integrante pudiera recordar lo acordado como grupo y tener a mano la información necesaria para avanzar con su trabajo. Además, se crearon tablas para que cada integrante compartiera datos importantes de sus máquinas, como sus dimensiones y materiales a utilizar.

Cada mes, se solicitaban los avances de cada máquina mediante correos electrónicos. Inicialmente en el año 2023, para el mes de febrero se requirieron los diseños preliminares, en marzo los cálculos iniciales, en abril los diseños completos y en mayo los cálculos finales e inicios de las simulaciones. Si algún integrante olvidaba enviar sus avances o no lo hacía, se enviaba un correo de recordatorio para garantizar un avance continuo y mantener una comunicación óptima. En caso de incumplimiento o excusas, el *System Engineer* se reunía con el integrante para ayudarlo a completar la tarea presencialmente. Posteriormente se reorganizó el monitoreo dependiendo de las fechas que cada máquina tiene determinada para entregar el diseño.

Durante el primer semestre del año 2023, se priorizó el monitoreo de las máquinas trituradora, extrusora y peletizadora ya que ese mismo año debían entregar los diseños. Sin embargo, la máquina extrusora sufrió un retraso debido a que el integrante responsable tuvo complicaciones en cierta clase, lo que afectó el progreso. Las máquinas trituradora y peletizadora mantuvieron la prioridad durante el segundo semestre de 2023, ya que debían completar el diseño de sus máquinas ese mismo año.

Para las máquinas separadora de densidades, desetiquetadora y lavadora en caliente, se mantuvo la comunicación para informar sobre los cambios en las otras máquinas (tales como cambios en las dimensiones o alturas para entrega y salida de material en proceso) y así priorizarlas para el año

2024, cuando deberían concluirse los diseños restantes y la planificación de la línea de reciclaje. Sin embargo, la comunicación con el integrante de la extrusora comenzó a deteriorarse después del retraso, con respuestas esporádicas a los correos enviados. Este integrante dejó de trabajar en el diseño de la máquina, dedicándose a otras labores. El último contacto registrado fue el 16 de mayo de 2023, donde se presentó un diseño preliminar con dimensiones de la extrusora. Debido a esta situación, para el diseño de la línea de reciclaje se utilizarían las medidas proporcionadas en esa fecha, y se realizarían suposiciones respecto al flujo volumétrico, seguridad y eficiencia de la máquina.

## 7.4. Integración entre máquinas

La integración entre las máquinas se llevó a cabo mediante reuniones regulares entre los integrantes de los equipos responsables de cada módulo en la línea de reciclaje. Un aspecto fundamental que facilitó esta integración fue que todas las máquinas fueron diseñadas para manejar un flujo másico constante de 150 kg/h, lo que garantiza una operación fluida y continua en toda la línea.

Se priorizó inicialmente la integración entre la trituradora, la extrusora y la peletizadora, dado que los integrantes encargados de estas máquinas debían completar sus diseños antes que los demás. La trituradora, con su tolva de entrada a una altura de 3.8 metros y salida a 0.8 metros, fue diseñada para que su material triturado pueda ser fácilmente transportado a la extrusora mediante bandas transportadoras o manualmente si es necesario. La extrusora, con su entrada a 1.5 metros de altura y salida a 1 metro, se conectará directamente con la peletizadora a través del dado peletizador, asegurando una transferencia eficiente del material extruido.

A continuación, se abordó la integración de las máquinas en la secuencia inicial de la línea de reciclaje, que incluye la máquina separadora por densidades, la desetiquetadora y la lavadora en caliente. La máquina separadora, con su salida de material en una altura baja, entregará el material a la desetiquetadora, cuya tolva de entrada está a 1.34 metros de altura. Esta tolva facilita la recepción del material a través de una banda transportadora de cangilones o listones. La desetiquetadora, que descarga a 0.53 metros, alimentará el material a la lavadora en caliente, cuya tolva de entrada está a 2.5 metros de altura. De nuevo, el uso de una banda transportadora o transporte manual asegurará la eficiencia en este traspaso.

Finalmente, se integró el transporte de la lavadora en caliente hacia la trituradora, teniendo una altura de salida de 4 metros en la lavadora y una entrada de 3.8 metros como se comentó previamente. El material lavado es transportado mediante bandas transportadoras a la tolva de entrada de la trituradora. Posteriormente, el material triturado es dirigido a la extrusora, que, como se mencionó, está directamente conectada a la peletizadora mediante un acople diseñado específicamente para asegurar una transferencia eficiente del material.

Gracias a este enfoque meticuloso en la compatibilidad de alturas, flujos y métodos de transporte, se ha logrado una integración sólida y eficiente entre las máquinas, lo que asegura un funcionamiento cohesivo de la línea de reciclaje.

## 7.5. Factor de seguridad

Se comenzó calculando el factor de seguridad mínimo que requerirían las máquinas. El factor de seguridad puede ser fácilmente determinado con la estimación de 5 factores que son el material, la geometría, esfuerzo, análisis de falla y confiabilidad. Mientras más se sepan las propiedades del material y el esfuerzo, las tolerancias sean más estrictas, menor la confiabilidad requerida y mejor aplicable las teorías de falla; más cercano es el factor de seguridad a 1.

Para encontrar este dato esto se utilizó el método del pulgar, en el que se tomó la referencia de esta ecuación gracias al libro de *The Mechanical Design Process* de David Ullman. La ecuación a utilizar sería la siguiente:

$$FS = FS_{\text{material}} * FS_{\text{esfuerzo}} * FS_{\text{geometria}} * FS_{\text{teoriadefallo}} * FS_{\text{confiabilidad}}$$

Donde FS es el Factor de Seguridad que se desea determinar.

El factor FS material es determinado al saber si las propiedades del material son conocidas y de que forma son encontradas. El factor FS de tensión se calcula al conocer las condiciones de la carga, también si la naturaleza de la carga está determinada con el promedio, con sobrecargas entre 20 y 50 % y si el método de análisis de tensión da errores inferiores al 50 %.

El factor FS de geometría se determinó estableciendo que tan estrictas son las tolerancias para las máquinas.

Para el FS de la teoría de fallo se estableció que, para las máquinas, el análisis de falla a utilizar es una simple extensión de las teorías como multiaxial, esfuerzos de fatiga completamente invertidos y tensiones de fatiga medias uniaxiales distintas de cero.

Y, por último, el factor de seguridad de confiabilidad se escoge al decidir qué tan importante es la pieza a analizar. por lo que una pieza que no sea tan importante o requerida va a brindar un factor cercano a 1.

### 7.5.1. Factor de material

El valor del FS del material se divide en 3 rangos. El primer rango es de FS igual a 1. Este se escoge si las propiedades de los materiales son correctamente conocidas y se obtienen de fuentes confiables como base de datos o proveedores.

El segundo rango es de un FS de material de 1.1. Este se elige si las propiedades del material

son obtenidas de un libro o página de internet.

Y por último, el rango FS alto del material es de 1.2 a 1.4 si las propiedades del material no son conocidas del todo. Para la línea de reciclaje se escoge un FS del material de 1.1 ya que los datos obtenidos de los materiales son recopilados de páginas de internet.

### **7.5.2. Factor de esfuerzo**

El factor de esfuerzo su primer rango es de 1 a 1.1. Estos primeros valores se seleccionan si las cargas son estáticas o fluctuantes y si el análisis de estas fuerzas son hechas por medio de un método preciso.

El segundo valor es de 1.2 a 1.3. Esto es porque la naturaleza de las cargas están definidas como un promedio y los métodos de análisis de las cargas brindan un error menor a 50 %.

Y el tercer rango de este factor de seguridad para el esfuerzo va de 1.4 a 1.7. Esto se da si la carga no está definida y si el análisis de esfuerzo tiene una precisión dudosa. Es por esto que el factor seleccionado es de 1.2, porque las cargas realizadas en las máquinas son un promedio y los errores que brindarían ese programa es de un porcentaje muy bajo.

### **7.5.3. Factor de geometría**

Para el factor de la geometría se toma en consideración las tolerancias. Los primeros dos rangos son de un factor de 1.0 si las tolerancias de manufacturación son rigurosas o si son promedios.

El último valor del factor va de 1.1 a 1.2 si las dimensiones no se mantienen estrechas. Es por esto que el factor a utilizar es de 1.0. Ya que se requieren de tolerancias muy estrictas.

### **7.5.4. Factor de teoría de fallo**

El primer rango para el factor de la teoría de fallo es de 1.0 a 1.1. Esto se da si el análisis de falla a utilizar se deriva del estado de esfuerzo, como para el esfuerzo estático uniaxial o multiaxial.

El segundo valor es de 1.2. Esto es solo si la falla a utilizar es una extensión de las teorías de fallo como multiaxial, esfuerzos de fatiga completamente invertidos o tensiones de fatiga medias uniaxiales distintas de cero.

El último rango es de 1.3 a 1.5 si el análisis de teoría de fallo no es bien desarrollado. Esto es si presenta daños acumulativos o tensiones de fatiga medias multiaxiales distintas de cero.

Se optó por un factor de seguridad para teoría de fallo de 1.2. La razón es porque las teorías de falla utilizados eran multiaxiales.

#### **7.5.5. Factor de teoría de fallo**

Por último, es la estimación del factor de seguridad para la confiabilidad. El primer valor es de 1.2. La razón de escoger este valor es si la conveniencia de la pieza no es alta, menor a 90 %.

El segundo rango es de 1.2 a 1.3 si la relevancia de la pieza es un aproximado de 92 a 98 %. Y por último el rango de confiabilidad va de 1.4 a 1.6 si las piezas necesitan una consideración mayor a 99 %.

El factor que se optó para la confiabilidad es de 1.2. Ya que cada pieza de las máquinas desempeña un rol importante. Sin embargo, el porcentaje de importancia o seriedad no debería de ser superior al 99 %.

#### **7.5.6. Factor de seguridad mínimo calculado**

Como se discutió previamente, los factores seleccionados para las 5 variables son los siguientes:

- FS material: 1.1
- FS esfuerzo: 1.2
- FS geometría: 1.0
- FS teoría de fallo: 1.2 ■ FS confiabilidad: 1.2

Por lo que la ecuación sería:

$$FS = 1.1 * 1.2 * 1.0 * 1.2 * 1.2$$

Como, resultado el factor de seguridad mínimo que tienen que cumplir las máquinas es de 1.9.

En la reunión grupal del 8 de mayo se compartió este resultado al equipo para que tomaran en consideración este factor de seguridad mínimo para sus máquinas. Eventualmente, cada integrante

compartía que sus máquinas alcanzaban el mínimo y lo superaban, por lo que se tuvo un factor de seguridad prometedor para las máquinas.

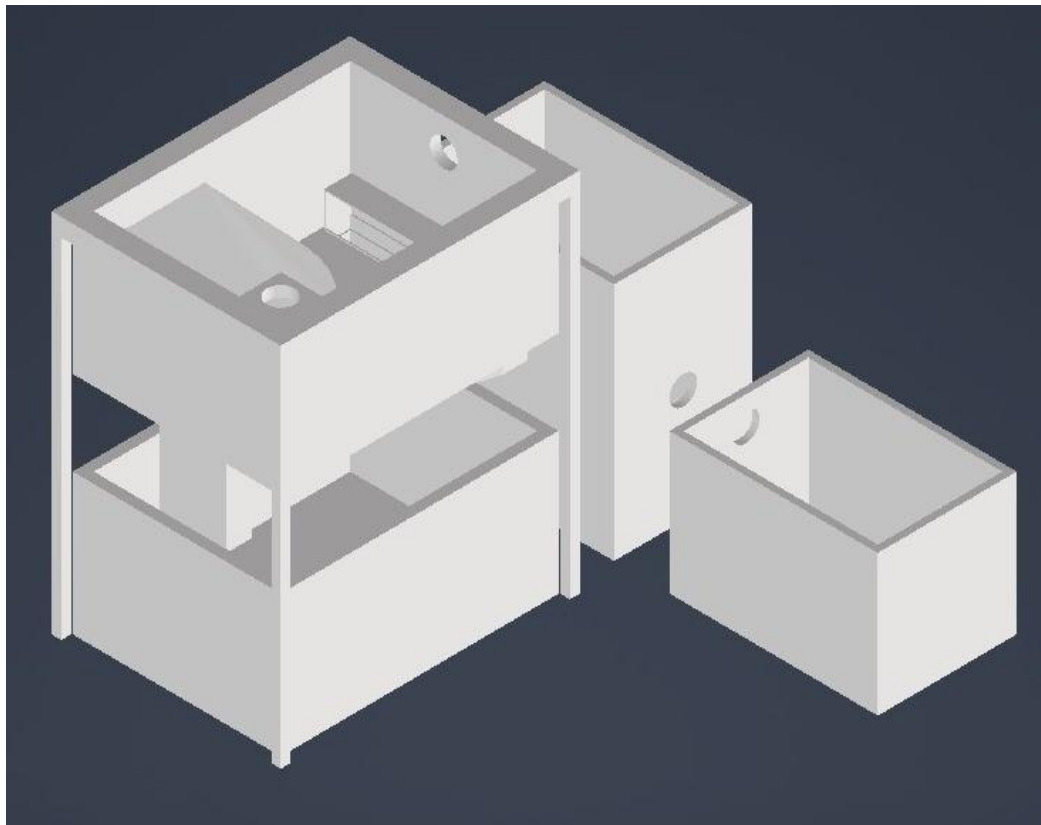
## **7.6. Máquinas diseñadas**

En la siguiente sección se presentan las seis máquinas diseñadas para la línea de reciclaje de PET. Cada máquina ha sido cuidadosamente diseñada y evaluada para asegurar su congruencia con el sistema general, cumpliendo con los requisitos técnicos y de seguridad. A continuación, se detalla la información requerida de diseño de cada una, incluyendo la definición del factor de seguridad, la congruencia de dimensiones, la altura de las entradas y salidas, y la capacidad de flujo mínimo para cumplir con el requisito de 150 kg/h. Es importante recalcar que lo mencionado representa datos generales e importantes de cada máquina. Para mayor información y poder visualizar los planos, manuales de instalación y de mantenimiento, es necesario recurrir a los trabajos de graduación realizados por los integrantes de cada máquina.

### **7.6.1. Separadora en densidades**

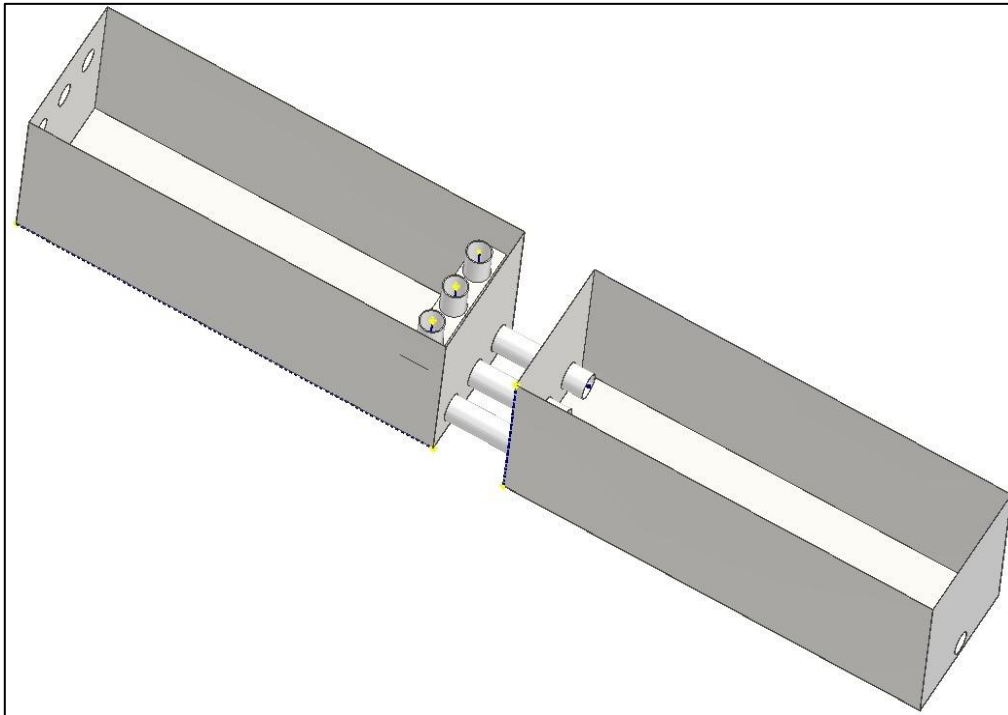
La línea de reciclaje comienza con la máquina separadora de densidades. Inicialmente, la máquina consistía en ser una lavadora a temperatura ambiente. Su primer diseño consistía en 4 tanques de agua el cuál un tanque estaba posicionado encima de otro tanque. La versión final adopta un cambio en donde la máquina se llamaría separadora de densidades y los tanques se reducen a dos. La razón por la que realizó el cambio a dos tanques para la versión final es debido a que se podría presentar un peligro al recoger las botellas en el tanque inferior al tener el tanque arriba del operador. También, Se ahorra espacio y mejor la funcionalidad de tal forma que, al caer demasiada agua, la bomba necesitaría mas potencia de la necesaria para realimentar el tanque superior, aparte que el caudal era más alto que en la versión final. En la versión final se requiere que las botellas entren al primer tanque sin tapadera, para que así, el agua recircule dentro de la botella y expulse la suciedad y basura que se encuentra dentro de las botellas. En el se tiene una retroalimentación del agua hacia el primer tanque. Se considera para el transporte de la máquina separadora a la desetiquetadora de forma manual, recolectando las botellas finalizadas del tanque y transportándolas a la tolva de entrada de la máquina desetiquetadora. El tiempo de preparación previo a su operación es menos de 29.55 minutos con un caudal de llenado de  $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$ .

**Figura 2**  
*Máquina separadora de densidades primera versión*



Fuente: adaptada de Foncea (2024)

**Figura 3**  
*Máquina separadora de densidades versión final*



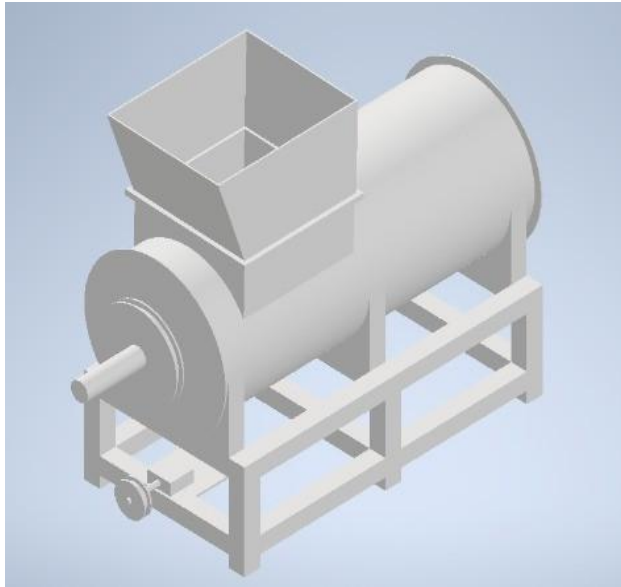
Fuente: adaptada de Foncea (2024)

### **7.6.2. Desetiquetadora**

El diseño de la desetiquetadora comenzó como un tanque horizontal por la cuál las botellas entran en su tolva en la parte superior. Por medio de un eje con cuchillas se iba rasgando las etiquetas de las botellas para al final transportar las botellas sin etiqueta por medio de un eje helicoidal. En este primer diseño se tuvo el problema de dimensionamiento y estructura que soporte. Además que no se contempló cómo se iban a almacenar las etiquetas y transportarlas. Es por eso que en el diseño final se cuenta con un ventilador en la parte superior donde succiona las etiquetas rasgadas para poder transportar las botellas con más facilidad y sin etiquetas. Las características y piezas que la máquina desetiquetadora contiene se pueden observar en el trabajo de graduación de

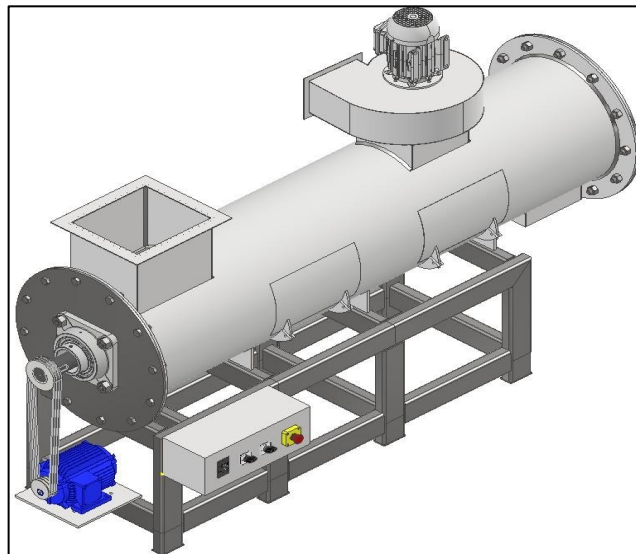
Edgar Echeverría.

**Figura 4**  
*Máquina desetiquetadora - primera versión*



Fuente: adaptada de Echeverría (2024)

**Figura 5**  
*Máquina desetiquetadora - versión final*

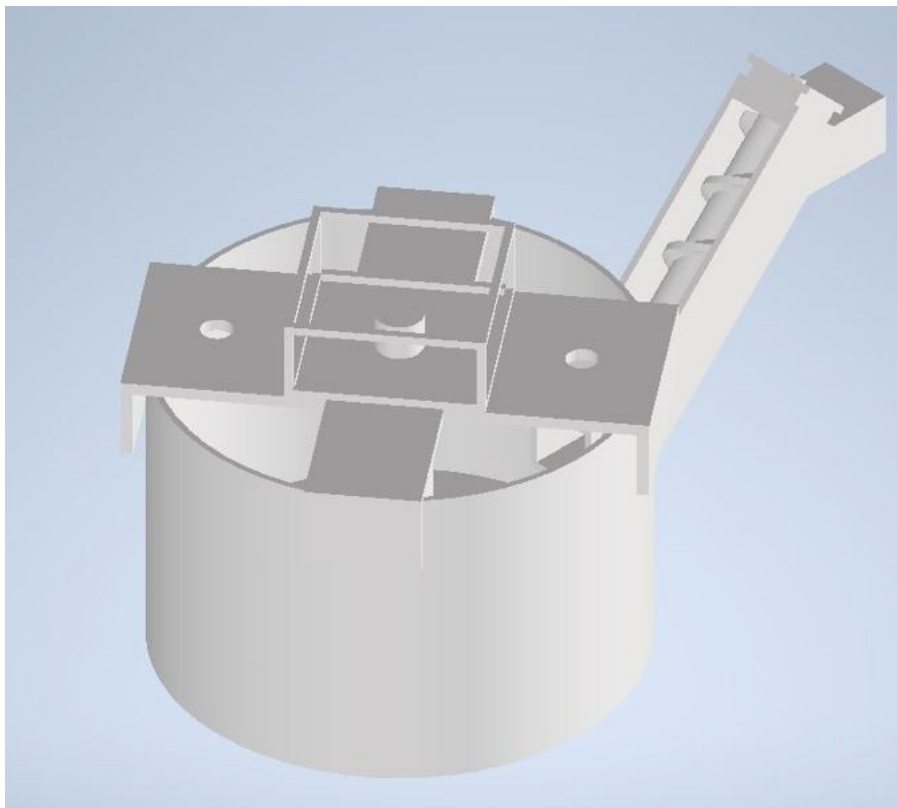


Fuente: adaptada de Echeverría (2024)

### 7.6.3. Lavadora en caliente

Para el primer prototipo de la lavadora en caliente, se tenía previsto usar etilenglicol para las temperaturas altas del agua. Sin embargo, se cambió el diseño para usar hidróxido de sodio o más conocido como soda cáustica en lugar de este. La razón por la que se hizo el cambio es debido al tiempo de preparación previo al uso de la máquina. Se tenía calculado que la lavadora en caliente tomaría más de 5 horas de precalentamiento usando el etilenglicol con las resistencias. Sin embargo, usando la soda cáustica se disminuye el tiempo a un valor de 40.9 minutos utilizando el mismo caudal de llenado que la máquina separadora. Mientras se está llenado el tanque de la lavadora en caliente, se agrega la soda cáustica a la mezcla para alcanzar la temperatura deseada y no tener que esperar más tiempo.

**Figura 6**  
*Máquina lavadora caliente primera versión*



Fuente: adaptada de Foncea (2024)

**Figura 7**  
*Máquina lavadora caliente versión final*

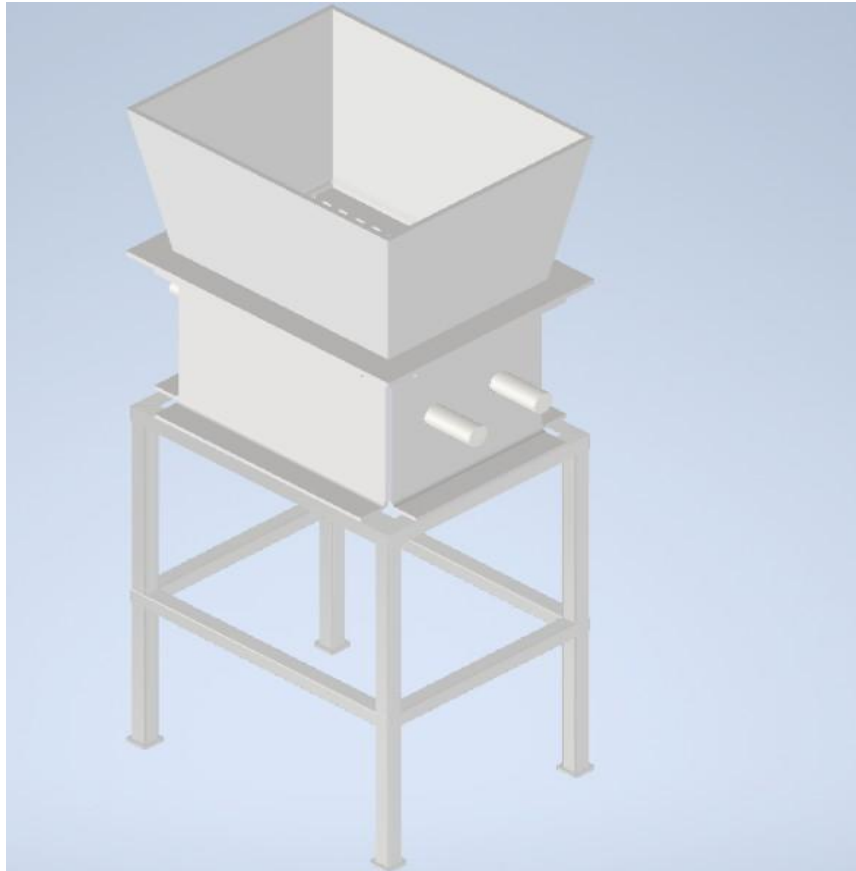


Fuente: adaptada de Foncea (2024)

#### **7.6.4. Trituradora**

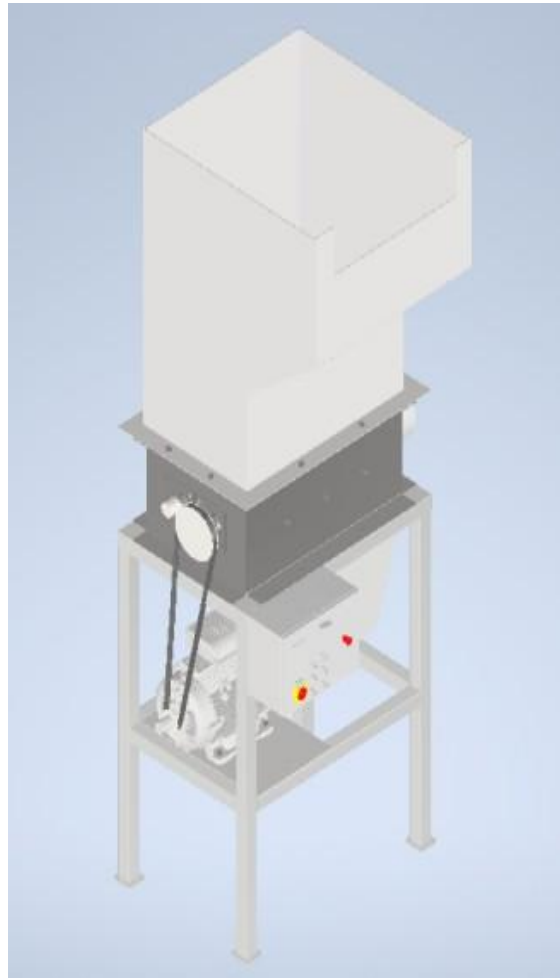
La máquina trituradora se diseñó de tal forma que cuenta con dos ejes de cuchillas intercambiables. El total de cuchillas son 14 y pueden cortar 2 botellas de 600ml por segundo. En el trabajo de graduación de Adrian Calvo se llevó a cabo el cálculo garantizando que la máquina trituradora pueda cortar 150kg/h de manera efectiva. Su máquina cuenta con un botón de paro de emergencia y un variador de frecuencia que permitirá variar las revoluciones por minuto (rpm) entre un 30 por ciento menos y un 30 por ciento más, pudiendo aumentar o disminuir el flujo volumétrico. Junto con su diseño, se trabajaron 28 planos de la máquina para su construcción y un manual de instalación y de mantenimiento. A continuación, se muestra el primer diseño y el diseño final de la máquina trituradora realizada por Adrián Calvo.

**Figura 8**  
*Diseño de trituradora primera versión*



Fuente: adaptada de Calvo (2024)

**Figura 9**  
*Diseño de trituradora Final*

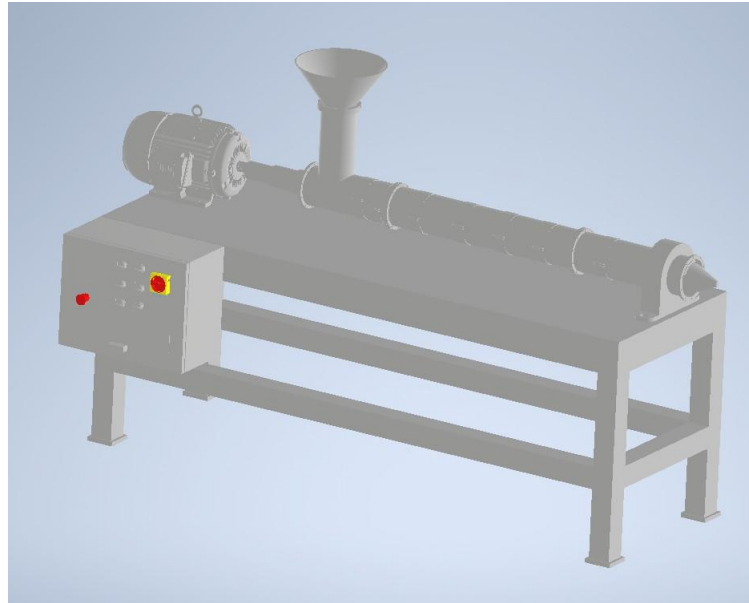


Fuente: Fuente: adaptada de Calvo (2024)

### **7.6.5. Extrusora**

Como se mencionó previamente, el integrante de la máquina extrusora dejó de tener contacto con el grupo el 16 de mayo del 2023. La información importante que se logró obtener son las dimensiones y una imagen del diseño de la máquina. Como se comentó en secciones anteriores, las dimensiones de la máquina extrusora son: 2.25 m de largo, 1.50 m de alto y 0.75 m de ancho. Y se uniría al final del cañón por medio del dado o figura de extrusión de la peletizadora. Las suposiciones que se tomarán es que, se cumple con los 150kg/h de flujo volumétrico, se cuenta con botón de emergencia y se tiene un manual de mantenimiento e instalación. La forma de transporte de la lavadora caliente a la extrusora sería mediante operarios que transporten los copos de PET. A continuación, se muestra la imagen del diseño más reciente al momento que se escribió el texto.

**Figura 10**  
*Diseño de extrusora*

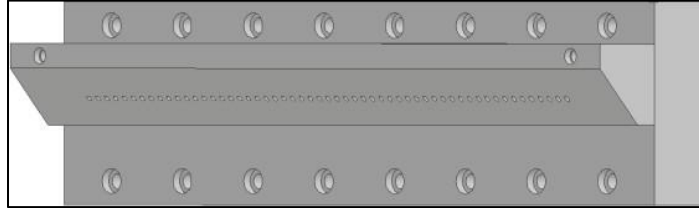


Fuente: Fuente: adaptada por De León (2024)

#### **7.6.6. Peletizadora**

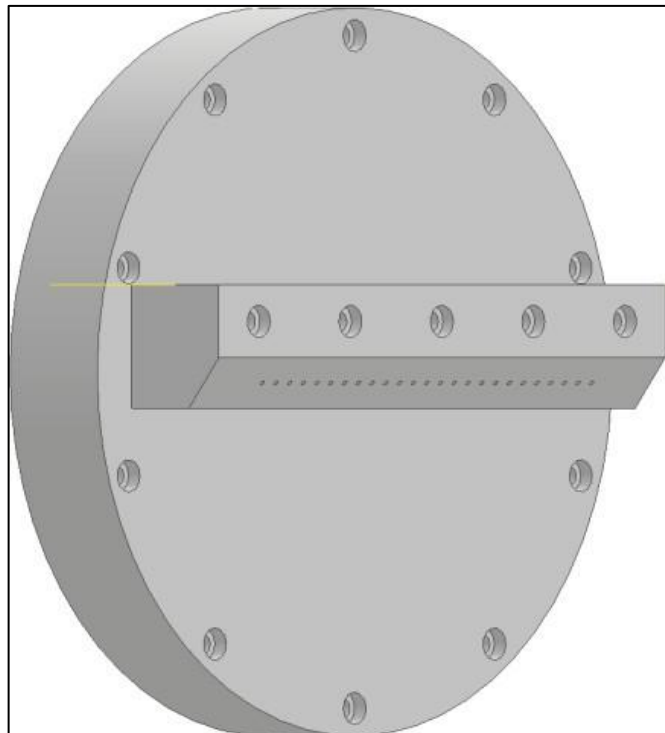
En cuanto a la peletizadora, se determinó que se requieren 25 agujeros en el dado peletizador para garantizar el flujo másico necesario en la línea de reciclaje, cumpliendo con el requisito de 150 kg/h en la producción de pellets. Además, se emplean 10 pernos para asegurar la base del dado peletizador a la extrusora, y 5 pernos adicionales para unir la boquilla a la base, asegurando así la integridad estructural y la correcta operación con la extrusora. Las cuchillas de la peletizadora están protegidas por una carcasa, lo que proporciona seguridad adicional y minimiza el riesgo de accidentes. Finalmente, la estructura de la peletizadora tiene una longitud de 2.375 metros y un ancho aproximado de 0.6 metros. El factor de seguridad que tiene el diseño es de 2.43, obteniendo un valor superior al necesario. Para la máquina peletizadora se cuenta con 7 planos para su construcción y un manual de instalación y mantenimiento. A continuación, se muestra el primer diseño y el último diseño del dado peletizador.

**Figura 11**  
*Dado peletizador – primera versión*



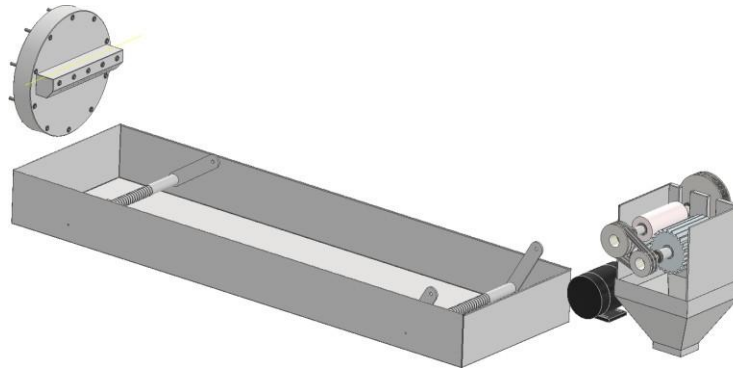
Fuente: adaptada por Quintanilla (2024)

**Figura 12**  
*Versión final de dado peletizador*



Fuente: Fuente: adaptada por Quintanilla (2024)

**Figura 13**  
**Máquina Peletizadora**



Fuente: Fuente: adaptada por Quintanilla (2024)

## 7.7. Mitigación de riesgos para las máquinas

En el contexto de la industria del reciclaje, la mitigación de riesgos es un componente crucial para asegurar la eficiencia y seguridad operativa de las máquinas involucradas en la línea de reciclaje de PET. Cada máquina, desde la separadora hasta la peletizadora, presenta riesgos específicos que pueden afectar tanto al proceso productivo como a la seguridad de los trabajadores. Para poder analizar los peligros y mitigar las consecuencias o impactos que pueden suceder se realizará un análisis por medio de una herramienta llamada *bowtie* para cada máquina de la línea de reciclaje. (Wolters Kluwer, 2024) Este método permitirá establecer controles preventivos y mitigadores efectivos. El análisis bowtie facilita la comprensión de las relaciones entre los eventos causales y sus consecuencias, proporcionando una estructura clara para desarrollar estrategias de mitigación que minimicen la probabilidad y el impacto de incidentes operativos y de seguridad.

El diagrama *bowtie* tiene la forma de una corbata, creando una clara distinción entre la gestión de amenazas por medio de sus barreras y los métodos de recuperación para poder mitigar las consecuencias.

Los elementos que incorporan el diagrama Bowtie son los siguientes:

- Amenazas: Son los causantes o responsables que desencadenan el peligro. Las amenazas pueden categorizarse como amenaza ambiental, de persona y máquina.

- Barreras: Son las encargadas de contener o controlar la amenaza.
- Pérdida de Control o Evento Máximo: es el instante en el cuál no hay vuelta atrás. Se pierde el control y da lugar a las consecuencias.
  - Métodos de Recuperación: Son las medidas o protocolos que buscan mitigar las consecuencias, buscando recuperarse de forma rápida del daño.
  - Consecuencia: Siendo los impactos o daños causados por el peligro.

En los siguientes análisis se consideran un peligro por máquina. Al analizar un peligro se pueden determinar distintas amenazas y un evento máximo el cual desata distintas consecuencias. Identificando un peligro por cada máquina se busca determinar numerosas barreras y medidas de recuperación para minimizar o evitar estos impactos negativos que ocasiona el peligro.

Para la máquina separadora se analizó tomando en cuenta como peligro el agua y cómo pérdida de control el instante en el cuál sucede un resbalo en el piso mojado. La razón por la que se escogió el agua es porque el componente principal que maneja la máquina es agua y, según el Departamento de Seguros de Texas, en 2020 el 15 % de todas las muertes relacionadas con el trabajo en Texas fueron causadas por resbalones y tropiezos (Texas Department of Insurance, 2024). Por lo que se decidió analizar las amenazas que pueden ayudar a la ocurrencia de este evento, las barreras que ayuda a prevenir el suceso y las herramientas necesarias para el método de recuperación de las consecuencias del resbalón del piso mojado. En la siguiente tabla se observan las amenazas, las barreras, los métodos de recuperación y las consecuencias que el agua o el resbalón del piso mojado pueden ocasionar:

**Cuadro 10**  
*Elementos para el bowtie de la máquina separadora*

<b>Peligro: agua</b>				
<b>Amenaza</b>	<b>Barrera</b>	<b>Pérdida de control</b>	<b>Método de recuperación</b>	<b>Consecuencias</b>
Nivel del tanque sobrepasa el límite	Sensores que detectan el nivel del agua	Resbalo en piso mojado	Stock de seguridad	Pérdida de producción por paro
	Drenaje de agua auxiliar	Resbalo en piso mojado	Área de mantenimiento y limpieza	
	Tapa del tanque	Resbalo en piso mojado	Aumento de producción	Fractura interna
Superficie resbaladiza	Botas antideslizantes	Resbalo en piso mojado	Primeros auxilios	Corto circuito por cables expuestos
	Equipo de limpieza	Resbalo en piso mojado	Hospitalización	
	Capacitación	Resbalo en piso mojado	Aislamiento de cables	
	Línea de no traspasar	Resbalo en piso mojado	Seguro para personal	
Operarios con falta de conocimiento de reglamentos	Letreros de precaución	Resbalo en piso mojado		

Fuente: *elaboración propia*

Para la máquina desetiquetadora se tomó en consideración la cuchilla del rotor como el peligro debido a que es el componente que más fácilmente puede ocasionar lesiones a la persona. Por lo que la pérdida de control se consideró como el momento de contacto del operario con la cuchilla, ya que no se puede revertir o manejar esa situación. Lo que esto provoca puede ser atrapamiento o cizallamiento. Siendo el resultado comúnmente la amputación de algún miembro y que las partes del cuerpo que más riesgo corren de ser atrapadas son las manos y el cabello (Universidad Carlos III de Madrid, 2024). Las amenazas se escogieron según la frecuencia con que estas puedan provocar la pérdida de control, mientras que las barreras se consideraron de acuerdo con el plan de operación en la planta y el diseño de la máquina, asegurando que se minimicen los riesgos y se proteja al operario en todo momento. El método de recuperación y consecuencias son las siguientes son las posibles medidas o eventos que pueden ser resultantes de la ocurrencia de la pérdida de control como se muestra en el cuadro 11:

**Cuadro 11**  
**Elementos para el bowtie de la máquina Desetiquetadora**

<b>Peligro: Cuchilla del rotor</b>				
<b>Amenaza</b>	<b>Barrera</b>	<b>Pérdida de control</b>	<b>Método de recuperación</b>	<b>Consecuencias</b>
Operario incompetente	Capacitación de seguridad y salud ocupacional	Contacto de las cuchillas con el operario	Botón de paro de emergencia	Laceraciones/ quebraduras
	Señalización del área de trabajo	Contacto de las cuchillas con el operario		
Cuchillas mal ajustadas	Capacitación del uso de máquinas	Contacto de las cuchillas con el operario	Equipo de primeros auxilios	Amputación
	EPP	Contacto de las cuchillas con el operario		
	Inspección diaria de cuchillas	Contacto de las cuchillas con el operario	Llamar a los paramédicos	
Cuchillas en mal estado	Botones de paro de emergencia	Contacto de las cuchillas con el operario		.
	Paro automático de emergencia	Contacto de las cuchillas con el operario	Plan de emergencia	
	Paro automático al abrir puerta	Contacto de las cuchillas con el operario		
Rotor de cuchillas a altas RPM	Mantenimiento preventivo	Contacto de las cuchillas con el operario	IGSS	Pérdidas económicas
	Reemplazo de cuchillas	Contacto de las cuchillas con el operario		
	Tolva de salida restringiendo el paso de manos	Contacto de las cuchillas con el operario	Seguro para personal	

Fuente: *elaboración propia*

Respecto a la máquina de lavadora en caliente, el peligro a considerar es el agua a altas temperaturas. Y la pérdida de control es la salpicadura del agua ya sea en el piso o a los operarios. El contacto con operario puede ocasionar quemaduras de segundo grado superficiales (Redacción Médica, 2024) . La piel se enrojece y adquiere un aspecto húmedo. Se forman ampollas muy dolorosas llenas de un líquido claro. En la siguiente tabla se presentan los elementos que componen el análisis de esta máquina:

**Cuadro 12**  
*Elementos para el bowtie de la máquina lavadora en caliente*

<b>Peligro: Agua a alta temperatura</b>				
<b>Amenaza</b>	<b>Barrera</b>	<b>Pérdida de control</b>	<b>Método de recuperación</b>	<b>Consecuencias</b>
Ignorancia	Capacitación	Salpicadura de agua	Kit de primeros auxilios	
Iluminación deficiente	Cambio predeterminado de bombillas	Salpicadura de agua	Operario capacitado de primeros auxilios	Quemaduras severas
Paletas mezcladoras flojas	Focos de mejor calidad	Salpicadura de agua	Stock de seguridad	
	Chequeo diario de equipo	Salpicadura de agua	Aumento de producción	Paro de maquinaria
	Guardas de seguridad	Salpicadura de agua	Piezas de repuesto	
Posición cerca de la máquina	Línea de no traspasar	Salpicadura de agua	Garantía de equipo	Daño a equipo

Fuente: *elaboración propia*

La máquina trituradora, al igual que la máquina desetiquetadora, el peligro que presenta en el análisis es el engranaje del eje principal debido a las posibles consecuencias de atrapamiento y cizallamiento. Por lo que la pérdida de control es el contacto del cuerpo con el engranaje en movimiento. Los elementos del análisis son los siguientes:

**Cuadro 13**  
**Elementos para el bowtie de la máquina Trituradora**

<b>Peligro: Engranaje de eje principal</b>				
<b>Amenaza</b>	<b>Barrera</b>	<b>Pérdida de Control</b>	<b>Método de Recuperación</b>	<b>Consecuencias</b>
Ignorancia en la operación	Capacitación de uso y funcionamiento de la máquina	Contacto del cuerpo con el engranaje en movimiento	Botón de paro de emergencia	Muerte
	Capacitación de salud y seguridad ocupacional	Contacto del cuerpo con el engranaje	Atención de primeros auxilios	Lesión permanente
	Engranaje cubierto	Contacto del cuerpo con el engranaje en movimiento	Plan de emergencia en caso de gravedad	Lesión temporal
Tránsito de terceros cerca del área de trabajo	EPP	Contacto del cuerpo con el engranaje en movimiento	Aumento de producción	Pérdida de producción
	Señalización del área de trabajo	Contacto del cuerpo con el engranaje en movimiento	Stock de seguridad	
Error humano (distracciones)	Señalización de peligros en el área	Contacto del cuerpo con el engranaje en movimiento		
	Supervisión de un encargado	Contacto del cuerpo con el engranaje en movimiento		

Fuente: *elaboración propia*

En la extrusora, el peligro principal a considerar es el sobrecalentamiento del extrusor, lo cual puede causar daños tanto a la materia prima como al operario. Este riesgo es especialmente relevante dado el proceso de calentamiento utilizado en la extrusora de tornillo con calentamiento en espiral. En este tipo de equipo, los copos de PET son trasladados a través de las diversas partes de la

extrusora gracias al movimiento giratorio de la rosca. La diferencia clave con el resto de extrusoras está en el sistema de calentamiento, donde una espiral rodea todo el cilindro, calentando de forma uniforme la cámara de fusión desde la zona de calentamiento hasta la tobera de salida. Esta uniformidad es crítica para la calidad del producto final, pero también representa un riesgo si las temperaturas sobrepasan los límites establecidos (IGC Perú, 2024) . La pérdida de control se considera en el momento en que las resistencias del sistema superan las temperaturas límites de operación, aumentando el riesgo de daños al material y posibles incidentes operacionales. A continuación, se presentan los elementos identificados en el análisis *Bowtie*:

**Cuadro 14**  
*Elementos para el bowtie de la extrusora parte 1*

<b>Peligro: Sobrecalentamiento del extrusor</b>				
<b>Amenaza</b>	<b>Barrera</b>	<b>Pérdida de Control</b>	<b>Método de Recuperación</b>	<b>Consecuencias</b>
Resistencias eléctricas sin supervisión	Sensores de temperatura	Resistencias arriba de la temperatura de operación	Botón de paro de emergencia	Plástico quemado
	Computadora de control de temperatura	Resistencias arriba de la temperatura de operación	Protocolos de extracción de la extrusora	Humos tóxicos
	Alarma de temperatura alta	Resistencias arriba de la temperatura de operación	Ventilación forzada y natural	
	Pantalla con indicador de temperatura	Resistencias arriba de la temperatura de operación	EPP (mascarilla)	
Resistencias en malas condiciones	Inspección diaria	Resistencias arriba de la temperatura de operación	Extintores de polvo químico seco	Incendio de la extrusora
	Mantenimientos programados	Resistencias arriba de la temperatura de operación	Personal capacitado para la limpieza	

Fuente: *elaboración propia*

**Cuadro 15**  
**Elementos para el bowtie de la extrusora parte 2**

<b>Peligro: Sobrecalentamiento del extrusor</b>				
<b>Amenaza</b>	<b>Barrera</b>	<b>Pérdida de Control</b>	<b>Método de Recuperación</b>	<b>Consecuencias</b>
Operación de la máquina sin material	Sensores de material en la máquina	Resistencias arriba de la temperatura de operación	Sistema de aspersores	
	Stock de materia prima	Resistencias arriba de la temperatura de operación	Protocolos de mantenimiento estandarizados con tiempos medidos	
	Botón de paro de emergencia	Resistencias arriba de la temperatura de operación	Personal capacitado para el uso de extintores	
	Encargado del puesto de trabajo	Resistencias arriba de la temperatura de operación		
Estación sin supervisión/descuido	Supervisor de operadores	Resistencias arriba de la temperatura de operación	Stock de seguridad	Paro de la producción
	Reglamentación para la operación de la máquina	Resistencias arriba de la temperatura de operación	Aumento de la producción	
	Activación de máquina por llave	Resistencias arriba de la temperatura de operación		

Fuente: *elaboración propia*

Por último, la máquina peletizadora cuenta con las cuchillas de corte como peligro, y la cuchilla dañada como la pérdida de control. En la siguiente table se describen los elementos que presentan este peligro para el análisis y así mitigar los impactos:

**Cuadro 16**  
**Elementos para el bowtie de la máquina Peletizadora**

<b>Peligro: Cuchillas de corte</b>				
<b>Amenaza</b>	<b>Barrera</b>	<b>Pérdida de control</b>	<b>Método de recuperación</b>	<b>Consecuencias</b>
Corrosión de material	Mantenimiento continuo	Cuchilla dañada	Cuchilla de repuesto lista en planta	Pérdida de producción
	Limpieza periódica	Cuchilla dañada	Personal de mantenimiento con plan de cambio de cuchilla	
Fatiga por uso	Reemplazo de cuchilla cada cierto tiempo	Cuchilla dañada	Garantía de la máquina en su compra	Pérdida de activos
	Plan de acción de producción	Cuchilla dañada	Seguro de las piezas de la máquina	
Exceso de material	Configuración correcta de la máquina	Cuchilla dañada	Botón de paro de emergencia	Herida en operario
	Capacitación de uso y funcionamiento del equipo	Cuchilla dañada	Capacitación de manejo re las cuchillas	
Ignorancia en la operación	Supervisión	Cuchilla dañada	Uso de equipo de protección personal	

Fuente: *elaboración propia*

Al identificar cada peligro, amenaza y consecuencia de las 6 máquinas, se busca reforzar las barreras o implementar nuevas medidas de recuperación para que las ocurrencias de las fatalidades o daños sean los mínimos posibles para las operaciones de la planta de reciclaje.

## **7.8. Diseño de línea de reciclaje**

Para el diseño de la planta se pidió que cada integrante llenara la tabla de dimensiones para su respectiva máquina. La separadora cuenta con un largo de 6.5 metros y un ancho de 1 metros. La desetiquetadora cuenta con 3 metros de largo y 2 metros de ancho. La lavadora en caliente cuenta con largo de 5.5 metros y un ancho de 2.0 metros. La trituradora cuenta con un ancho de 0.8512 metros y un largo de 1.13 metros. La extrusora cuenta con medidas de 0.75 metros de ancho y 2.25 metros de largo. Y, por último, la peletizadora tiene dimensiones de 0.6 metro de ancho y 2.375

metros de largo. La tabla fue compartida por medio de una carpeta subida en la nube para el equipo y así todos pudieran tener acceso a ella.

**Cuadro 17**  
*Tabla de Dimensiones*

<b>Máquina</b>	<b>Altura de entrada de material</b>	<b>Altura de salida De Material</b>	<b>Ancho</b>	<b>Largo</b>
Máquina Separadora	1m	Dentro del tanque	1 m	6.5 m
Desetiquetadora	1.34m	0.533 m	0.7 m	2.6 m
Layadora en Caliente	2.5m	4.0 m	2.0 m	5.5 m
Trituradora	3.8m	0.8 m	0.8512 m	1.130 m
Extrusora	1.5 - 1.60 m	1 m	0.70 - 0.75 m	2.25 m
Peletizadora	1m	modificable	0.6 m	2.375 m

Fuente: *elaboración propia*

Debido a que las dimensiones de largo sobrepasan los 20 metros, se diseñó la planta con un recorrido en forma de U. donde el primer tramo cuenta con los primeros tres módulos, y el segundo tramo cuenta con la trituradora, extrusora y peletizadora.

Para el modelado de la planta de reciclaje, se utilizó un software especializado llamado Simio. Este programa permite la disposición virtual de las máquinas que componen la línea de reciclaje mediante modelos digitales posicionados estratégicamente en un mapa interactivo. Esto facilita la visualización de su ubicación y operación dentro de la planta, permitiendo diseñar y organizar el esquema de la planta de manera eficiente. A través de Simio, es posible diseñar y optimizar el flujo de procesos, ordenando las máquinas de manera estratégica según las necesidades operativas. Además, el software permite simular un año completo de operación de la planta, brindando resultados detallados sobre tiempos de procesamiento y producción diaria. Estos resultados se aproximan a las condiciones reales de funcionamiento, proporcionando una herramienta valiosa para evaluar la capacidad y productividad.

Se puede observar en el resultado de Diseño de Línea de Reciclaje, que cada cuadro repre-  
senta

un metro, por lo que cada máquina esta con su respectiva dimensión. Es por esto que se puede observar que la lavadora en caliente es la máquina más grande y la trituradora sería la más pequeña. Se puede notar el recorrido de la botella que inicia en la máquina separadora y termina en depósito que está por nombre sink. En total se requiere un área de aproximadamente 19 metros de largo y 6 metros de ancho para que las máquinas puedan colocarse correctamente como se muestra en el mapa dentro del capítulo de resultados en la sección de Diseño de línea de reciclaje. Esto sin contar bodega de almacenamiento de producto, talleres de mantenimiento, áreas de descanso para personal y oficinas administrativas.

### **7.8.1. Estaciones de trabajo**

Las estaciones de trabajo son los espacios en donde van a estar cada una de las 6 máquinas. No se necesitan herramientas especializadas ni mesas de trabajo asignadas. Sin embargo, todas las estaciones buscan tener las siguientes características en común, buscando una aplicación como las cinco S, que son clasificación, orden, limpieza, estandarización y constancia según el reglamento de salud y seguridad ocupacional del Gobierno de Guatemala:

- Espacio suficiente alrededor de la máquina para que el operador pueda moverse cómodamente y realizar las tareas necesarias para su funcionamiento y limpieza. El espacio mínimo que se requeriría es de mínimo dos metros cuadrados libres por puesto de trabajo operativo por cada trabajador.
- Iluminación adecuada que garantice una buena visibilidad de la máquina y sus controles. Según el reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional, se requiere una exigencia visual alta en bancos de trabajo y líneas de producción, por lo que los luxes mínimos que se requieren es de 200 a 500.
- Mantener unas condiciones ambientales adecuadas para el confort del operador y el funcionamiento óptimo de la máquina. Para mantener el ambiente controlado, especialmente en áreas como la lavadora en caliente, se utilizarán ventiladores o extractores que eviten la acumulación de vapor y calor, mejorando tanto el confort del operario como la eficiencia de la máquina.
- Espacio pequeño de almacenamiento cerca de la máquina para guardar herramientas, repuestos, materiales y cualquier otro equipo necesario para el funcionamiento, mantenimiento o limpieza de la máquina.
- Medidas de seguridad adecuadas en la estación de trabajo, como protecciones físicas en la máquina, señalización de riesgos, dispositivos de parada de emergencia y equipos de protección personal.

- Sistemas de comunicación como intercomunicadores o radios para poder hablar con supervisores u otros operadores en caso sea necesario. En la línea de reciclaje, los operarios utilizarán intercomunicadores para coordinarse con los supervisores, asegurando una comunicación rápida en caso de fallas o ajustes en las máquinas, especialmente en operaciones críticas.

## 7.9. Cálculo de demanda a cubrir

Debido a que el PET es de los materiales más utilizados, se calcula que al menos 12 millones de toneladas de PET se generan anualmente en el mundo y que cada año tiene un aumento porcentual de 6 % (BMI Machines, 2024). En Guatemala se estima que solo el 25 % del plástico consumido se logra recuperar y reciclar (TTA, 2024) . Esto es el equivalente a 73,000 toneladas de plástico reciclado anualmente (Silva, 2024). De acuerdo con estimaciones, la planta a instalar cuenta con una capacidad aproximada de producir 1,314 toneladas de PET anuales utilizando el flujo de 150kg/h y trabajando 24 horas por todo el año.

$$\text{ProdAnual} = 150 \text{ kg/h} * 24\text{h} * 365 \text{ días} \text{ ProdAnual} = 1,314,000 \text{ kg} = 1,314 \text{ toneladas}$$

Sin embargo, para poder recrear una producción de PET más realista, se buscará trabajar con un flujo que no sea menor a 105kg/h debido a que la máquina trituradora cuenta con un variador de frecuencia en donde puede disminuir su flujo en un 30 %.

$$\text{FlujoMin} = 150 \text{ kg/h} * 70 \%$$

$$\text{FlujoMin} = 105 \text{ kg/h}$$

Por lo que el flujo inicial escogido es de 110.5kg/h. Que trabajando 24 horas todo el año, la producción sería la siguiente:

$$\text{ProdAnual} = 110.5 \text{ kg/h} * 24\text{h} * 365 \text{ días}$$

$$\text{ProdAnual} = 967,980 \text{ kg} = 967.980 \text{ toneladas}$$

La demanda inicial que se trabajará cumpliendo el horario laboral de 8 horas al día con descansos fines de semana será de 216,000kg anuales o 18,000kg mensuales. Esto equivale al 0.3 % del reciclaje anual actual en el país. En la actualidad en el mercado guatemalteco, de acuerdo a lo investigado, se encontró que hay 4 empresas que se dedican al reciclaje de plástico PET, y estas empresas ya se encuentran bien establecidas en la actividad. Se conoce el dato de una de estas empresas, Agrequima, que recolectaron 340 toneladas de plástico en 1 año, pero solamente el 70 % de este material se logró reciclar. (Alvarez et al., 2022) Este dato es bastante cercano al que la planta

de reciclaje tiene capacidad para producir, por lo que la incursión dentro del mercado si es factible, en especial cuando solamente el 25 % del plástico del país se ha logrado recuperar, dando espacio para crecimiento de materia prima con el aumento de este valor, y por ende crecimiento de nuestra empresa a futuro (TTA, 2024).

La razón por la que se escogió un flujo de PET menor a 150kg/h es debido al crecimiento que puede tener la demanda de este producto. Por lo que, suponiendo que la demanda tuviera un incremento del 25 % anual, las máquinas con sus capacidades de 150 kg/h logran cubrir la demanda durante más de 5 años. Los cálculos se realizaron considerando que las máquinas son capaces de trabajar durante 24 horas durante 355 días al año, considerando días apagados por mantenimiento el cuál se explicará en la planificación de producción anual.

## **7.10. Planificación de producción anual**

Para realizar este plan se consideraron los 12 meses de un año calendario, tomando en cuenta la demanda estipulada anteriormente de 18,000 kg al mes con 7 operarios (uno por cada máquina y un encargado de la planta) trabajando durante 8 horas al día de lunes a viernes, con 1 hora dentro del turno para almorzar. Por la demanda y la capacidad de producción, se programaron 2 días para mantenimiento cada 3 meses y se tendrá un inventario de seguridad estimado de 250 kg al mes de Pellets de PET, siendo el 25 % de la producción del día.

El mantenimiento se contempla que lo hará una empresa tercera, siguiendo como referencia los planes de mantenimiento según los planteados en las tesis de la Universidad Del Valle de Guatemala hechas por: Juan Ignacio Foncea, Edgar Echeverría, Adrian Calvo, Saúl De León y Yessika Quintanilla; por lo que serán descansos para el personal. Además de los descansos mencionados, se consideran asuetos, feriados y vacaciones de acuerdo al código de trabajo guatemalteco para el año 2024 (decreto número 1441 del Congreso de la República de Guatemala). Entre los descansos programados se encuentran los siguientes:

- Semana Santa
- Día del Ejército
- Día de Trabajadores
- Día de Todos los Santos ■ Navidad
- Año Nuevo
- Día de la Revolución (es domingo y no se corre)
- Día de la Independencia (es domingo y no se corre)

El plan de producción se puede visualizar en los anexos, mostrando las tablas de condición, unidades y tiempo para la producción. Tomando en consideración menos días de producción los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre por los mantenimientos. La tabla de condiciones describe la el pronóstico de la demanda mensualmente, el cuál fue establecido previamente como 18,000kg de pellets; el número de días hábiles para trabajar mensualmente, sin contar los fines de semana y los días de mantenimiento; las horas normales al día, que son 8 horas diarias establecidas según el código de trabajo; y la cantidad de trabajadores que son 7, uno por máquina y un encargado general.

La tabla de unidades describe el inventario inicial de cada mes, nuevamente el pronóstico de la demanda, la producción real mensual, el cuál sigue el siguiente cálculo:

$$\text{ProdReal} = 110.5 \text{ kg/h} * \text{hora} * \text{días}$$

El inventario final que se representa como la producción real menos la demanda; el inventario de seguridad determinado, siendo los 250kg mencionados anteriormente; y las unidades en exceso o lo sobrante, el cuál se considera como el inventario inicial del siguiente mes. Se incluye el dato de las unidades demoradas, siendo la producción faltante para satisfacer la demanda, sin embargo, con la producción calculada, no hay unidades escasas.

Por último, la tabla de tiempo el cuál muestra las horas requeridas de trabajo por mes, y las horas producidas, el cuál deben de ser iguales ya que se está tomando el tiempo completo para producción, dando como suposición que no ocurren micro paros o eventualidades que obliguen a detener la producción. De igual forma se cuenta con la disponibilidad de añadir horas extras de trabajo, horas extras totales de personal, personal contratada y personal des- pedida dependiendo si la demanda aumenta, se puede contratar más personal o implementar horas de trabajo extra para incrementar la producción.

Según la investigación realizada en el trabajo de graduación de la máquina peletizadora, hecha por Yessika Quintanilla, los pellets cuentan con un largo de 5 mm, con un diámetro de 3 mm, lo que da un volumen aproximado de 35.34 mm<sup>3</sup>. La masa de cada pellet sería de aproximadamente 0.0488 g. Y tomando en cuenta que, un modelo genérico de botella PET de 600ml tiene un gramaje de 18.8g (REMSA, s.f.), da como resultado que, para 1kg de pellet se necesitan aproximadamente 54 botellas PET, redondeando al entero mayor. Dando

como resultado final que, para cubrir la demanda mensual de 18,000kg de PET se necesitan 972,000 botellas mensuales.

$$\text{Botellasnecesarias} = 1000 \text{ g} / 18.8 \text{ g Botellasnecesarias} = 54 \text{ botellas/kg}$$

$$\text{Botellasnecesarias} = 54 \text{ botellas/kg} * 18,000 \text{ kgmensuales}$$

$$\text{Botellasnecesarias} = 972,000 \text{ botellasMensuales}$$

## **7.11. Módulos adicionales a implementar**

En la operación de una planta de reciclaje de PET, además de las máquinas principales que forman parte del proceso de transformación, es fundamental considerar la implementación de módulos adicionales que aseguren la eficiencia y sostenibilidad del sistema. Estos módulos complementarios son cruciales para mantener un flujo continuo de materiales, garantizar la calidad del producto final y minimizar el impacto ambiental. A continuación, se detallan los principales módulos adicionales que deben ser incorporados en la planta para optimizar su funcionamiento y garantizar un reciclaje eficaz.

### 7.11.1. Módulo de transporte

El módulo de transporte está compuesto por un sistema de bandas transportadoras que facilitan el movimiento de las botellas y materiales entre las distintas máquinas del proceso de reciclaje. Este sistema es crucial para mantener un flujo continuo y eficiente de la materia prima, asegurando que cada etapa del proceso se realice sin interrupciones.

Las consideraciones clave que se deben de tener para el diseño o elección de las bandas transportadoras es:

- **Inclinación y diseño:** el transporte entre máquina que requiere la máxima elevación es de la lavadora en caliente, a la trituradora, teniendo una salida de material de la lavadora en caliente a una altura de aproximadamente 1.5m y la altura de entrada a la máquina trituradora de alrededor 4m (2.5 m), la banda transportadora debe tener una inclinación adecuada. la parte superior del área de la banda debe adecuarse para sujetar las botellas de forma segura (Venmir, 2022). Las bandas transportadoras de cangilones o listones proporcionan soporte adicional para las botellas, evitando que se resbalen.
- **Velocidad:** la velocidad de la banda debe ser ajustada para asegurar que las botellas PET sean transportadas de manera segura y sin causar bloqueos o atascos.
- **Material de la banda:** la banda debe ser de un material resistente, como PVC o caucho, que pueda soportar el ambiente húmedo de la lavadora y las posibles temperaturas elevadas.
- **Ancho de banda:** el ancho de la banda debe ser suficiente para acomodar las botellas de 600 ml sin que se acumulen o caigan.
- **Mantenimiento y limpieza:** dado que se trata de un proceso de reciclaje, la banda debe ser fácil de limpiar y mantener para evitar la acumulación de residuos o contaminantes.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de las bandas transportadoras de cangilones o listones y una banda transportadora lisa, indicando que una banda transportadora sería la mejor opción, ya que permite un transporte seguro y eficiente en la subida desde la lavadora a la trituradora, manteniendo las botellas en su lugar a lo largo de la inclinación.

**Cuadro 18**  
*Tabla comparativa de bandas transportadoras*

<b>Criterio</b>	<b>Banda Transportadora de cangilones o listones</b>	<b>Banda transportadora Lisa</b>
<b>Capacidad de Elevación</b>	Alta, ideal para grandes diferencias de altura	Moderada, limitada en inclinaciones pronunciadas.
<b>Retención de Botellas</b>	Alta, los cangilones/listones previenen deslizamientos.	Baja, riesgo de deslizamiento en inclinaciones altas.
<b>Velocidad Adecuada</b>	Moderada a alta, ajustable según necesidades.	Alta, pero debe ser controlada para evitar deslizamientos.
<b>Material de la banda</b>	Resistente al desgaste y la humedad (PVC, caucho).	Resistente, pero el diseño liso puede no ser suficiente en condiciones húmedas.
<b>Aplicabilidad en reciclaje PET</b>	Muy alta, ideal para el transporte seguro de botellas a alturas mayores. La banda de listones, su función principal es la recogida de virutas y el transporte de las mismas (Izaro, 2017).	Moderada, aplicable solo en inclinaciones leves a moderadas.
<b>Mantenimiento</b>	Requiere más atención debido a los cangilones/listones. Alta, adecuado para	Más simple, menos partes móviles. Moderada, aplicable solo
<b>Versatilidad</b>	una variedad de materiales y ángulos.	en inclinaciones leves a moderadas

Fuente: *elaboración propia*

### **7.11.2. Planta de tratamiento de aguas**

Dado que el proceso de reciclaje utiliza una cantidad considerable de agua, especialmente en la separadora, es necesario implementar una planta de tratamiento de aguas. Este módulo tiene como objetivo purificar o mejorar las condiciones del agua, permitiendo su reutilización y minimizando el impacto ambiental. La planta de tratamiento se diseña para eliminar contaminantes y ajustar la calidad del agua según los requerimientos del proceso.

La planta de tratamiento de agua es fundamental para limpiar y reutilizar el agua utiliza- da en

la máquina separadora, la cual cuenta con dos tanques donde se realizan las primeras filtraciones de las botellas. Como las botellas recién ingresadas al proceso suelen traer consigo mucha suciedad y objetos extraños que muchas personas introducen en ellas para aumentar su peso, el agua se ensucia rápidamente, lo que hace esencial contar con una planta de tratamiento.

En la línea de reciclaje, se pueden utilizar varios tipos de plantas de tratamiento de aguas para garantizar que el agua empleada en el proceso cumpla con los estándares de calidad necesarios para su reutilización. Entre las distintas plantas de tratamiento de aguas se encuentran:

- **Planta de tratamiento biológico:** utiliza microorganismos para descomponer materia orgánica presente en el agua por medio de procesos aeróbicos (como los lodos activados) y anaeróbicos (como biodigestores). La principal aplicación de los procesos biológicos es la eliminación de las sustancias orgánicas biodegradables presentes en el agua residual, las cuales, se convierten básicamente en gases, que se liberan a la atmósfera, y en tejido celular biológico, eliminable por sedimentación (Equimar, 2024). Ideal para tratar aguas que contienen materia orgánica biodegradable, proveniente de residuos adheridos a las botellas.

- **Planta de tratamiento por membranas:** utiliza membranas semipermeables para filtrar contaminantes del agua por medio de procesos de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. Opera forzando el paso del líquido a través de una membrana colocada sobre un soporte sólido. Esta membrana permite el paso de partículas con características específicas, mientras que bloquea aquellas que no cumplen con esos requisitos (Condorchem Envitech, 2024). Proporciona una alta calidad de agua tratada, eliminando partículas muy pequeñas, virus, bacterias y contaminantes disueltos.

- **Planta de tratamiento de sedimentación y filtración:** basada en procesos físicos, donde los sólidos se separan del agua por gravedad (sedimentación) y luego se filtran. Incluye tanques de sedimentación para la decantación de sólidos y filtros de arena o carbón activo para la purificación adicional. Sencilla de operar, económica y eficaz para remover sólidos en suspensión. Usualmente, se encarga de retirar las partículas flotantes de gran tamaño, para poder brindar agua limpia y sin un color turbio (Eden Agua, 2024).

### **7.11.3. Máquina de detección y separación de residuos**

La máquina de detección y separación de residuos, también conocida como máquina

separadora de corriente de Foucault o de Eddy, se encarga de identificar y remover los residuos o basura que las botellas pueden llevar en su interior. Este módulo es esencial para garantizar que solo el material reciclable avance en el proceso, mejorando la calidad del producto final y la eficiencia del reciclaje. Aunque la primera máquina ya cuenta con una separadora de densidades, se busca implementar este módulo adicional previo a la primera máquina para eliminar basura de tal tamaño que dificulte el flujo de la máquina separadora dentro de las botellas.

El separador de corriente de Foucault, o Eddy, es un equipo avanzado diseñado para clasificar metales no ferrosos dentro de materiales reciclados. Utiliza un diseño optimizado del campo magnético para maximizar la fuerza de separación. Este separador es ideal para extraer pequeños metales no ferrosos, como virutas de aluminio, de materiales triturados. Funciona con una cinta transportadora corta y un rotor magnético de alta velocidad que, al girar, induce una corriente eléctrica en los metales conductores. Esta corriente crea un campo magnético que repele los metales, separándolos del material no metálico restante (Bunting Magnetics, s.f.).

#### **8.1. Cumplimiento de requisitos**

Se llevó a cabo una evaluación de cumplimiento de los requisitos. Es importante llevar a cabo la verificación, ya que estos requisitos representan la gestión ideal entre los integrantes y una estructura eficiente para la planificación de la línea de reciclaje. Garantizando así el éxito del trabajo deseado. Como se puede observar en la siguiente tabla, se pudo concretar exitosamente cada requisito en las máquinas que terminaron sus diseños.

**Cuadro 19**  
**Resultado de cumplimiento de requisitos**

código	Requisito	Cumplido	
		Sí	No
P01	El plan de producción debe considerar 2 días de mantenimiento cada tres meses.	X	
P02	La producción tiene que tener un inventario de seguridad.	X	
P03	El plan de producción tiene que contemplar asuetos, feriados y vacaciones de acuerdo al código de trabajo guatemalteco para el año 2024.	X	
S01	Cada máquina debe tener 1 botón de paro de emergencia.	X	
S02	Las máquinas que cuenten con piezas punzo cortantes deben estar cerradas en las áreas donde sean visibles estas piezas peligrosas.	X	
S03	Cada máquina debe tener un factor de seguridad mínimo de 1.9.	X	
S04	Cada máquina debe tener un análisis <i>Bowtie</i> .	X	
M01	Las máquinas deben procesar toda botella PET que no sobrepase los 600 ml.	X	
M02	Las máquinas deben poder trasladar el producto entre ellas sin que las botellas se atasquen.	X	
M03	Cada plano de máquina debe tener su lista de partes.	X	
M04	Cada plano debe contener los materiales y sus cantidades.	X	
M05	Cada plano debe seguir el formato estándar del departamento de mecánica.	X	
LR01	La línea de reciclaje debe poder manejar un flujo de al menos 150 kg por hora.	X	
LR02	Contar con un formato de minutas para el registro de los temas en reuniones grupales.	X	
LR03	Llenar hojas Excel con información de dimensiones y materiales de las máquinas.	X	
LR04	Compartir carpeta grupal donde se actualicen informaciones sobre cada cambio en las máquinas.	X	

Fuente: *elaboración propia*

## 8.2. Comunicación entre equipo

En el cuadro 20 se marca en la columna ‘Sí’ quienes estuvieron en comunicación constante durante el tiempo de trabajo, mientras que en la columna ‘No’, quienes se ausentaron y se perdió el contacto.

**Cuadro 20**  
*Comunicación con integrante hasta finalizar diseño de máquina*

Integrante	Se mantuvo comunicación	
	Si	No
Juan Ignacio Foncea	X	
Edgar Echeverría	X	
Adrián Calvo	X	
Saúl De León		X
Yessika Quintanilla	X	

Fuente: *elaboración propia*

Las reuniones programadas y las minutas de seguimiento permitieron una coordinación constante, logrando que los avances fueran visibles y se pudieran tomar decisiones correctivas en momentos clave. La documentación de cada reunión ayudó a solventar los desafíos de la disponibilidad de tiempo entre los integrantes. De igual manera, el compartir una carpeta el cuál se vayan actualizando los estados y se subían las minutas permitía a los integrantes estar al día en las noticias. A lo largo del trabajo, se fue diseñando la línea de reciclaje de la mano con los integrantes y el diseño de sus máquinas. La metodología en el cuál se anotaban las ideas y reuniones, y se compartía por medio de una carpeta compartida, aseguraron que los miembros ausentes estuvieran al tanto de las decisiones. Además, la creación de un cronograma grupal ayudó a mantener un ritmo de trabajo constante y a priorizar las tareas de acuerdo con las metas de cada semestre. Estos resultados demuestran el cumplimiento de los requisitos LR02 y LR04.

### 8.3. Monitoreo de avances de cada máquina

Se logró completar cada actividad acorde al cronograma global en el desarrollo de cada máquina gracias a un monitoreo constante. Otra herramienta de ayuda para el monitoreo es la creación de un excel compartido el cuál iban editando datos importantes como sus dimensiones. Las fechas de entrega de diseños y simulaciones se respetaron en la mayoría de los casos, excepto por la extrusora, que sufrió retrasos debido a la falta de compromiso del integrante a cargo. El monitoreo y la comunicación constante fue clave para asegurar que las máquinas avanzaran conforme a los tiempos estipulados. Las máquinas con mayor prioridad, como la trituradora y la peletizadora, lograron concluirse a tiempo, mientras que la extrusora presentó dificultades que afectaron el flujo de trabajo. Sin embargo, al final se logró establecer el ritmo con las máquinas restantes y finalizar la línea en el tiempo estipulado Tomando en cuenta el cronograma de actividades mostrado. Estos resultados demuestran el cumplimiento del requisito LR03. Tal y como se muestran en los cuadros del 21 al 24.

**Cuadro 21**  
*Cronograma de actividades global año 2023 - 1.1*

<b>Actividad</b>	<b>ene 2023</b>	<b>feb 2023</b>	<b>mar 2023</b>	<b>abr 2023</b>	<b>may 2023</b>
Investigación preliminar de línea de reciclaje	<b>x</b>				
Establecer orden de las máquinas	<b>x</b>				
Crear un cronograma grupal de reuniones	<b>x</b>	<b>x</b>			
Investigaciones de las máquinas en la línea		<b>x</b>			
Primeros diseños de módulos 4,5 y 6		<b>x</b>			
Identificación de producto principal y materia prima			<b>x</b>		
Delimitar requisitos para la línea de reciclaje			<b>x</b>		
Establecer flujo volumétrico a trabajar				<b>x</b>	
Calcular el factor de seguridad de la línea				<b>x</b>	<b>x</b>
análisis de conexión entre módulos 4, 5 y 6					<b>x</b>

Fuente: *elaboración propia*

**Cuadro 22***Cronograma de actividades global año 2023 - 1.2*

<b>Actividad</b>	<b>jun 2023</b>	<b>jul 2023</b>	<b>ago 2023</b>	<b>sep 2023</b>	<b>oct 2023</b>
Cálculos finales de máquinas 4 y 6		x	x		
Diseños finales de máquinas 4 y 6		x	x		
Primer bosquejo para la simulación de la línea				x	x

Fuente: *elaboración propia***Cuadro 23***Cronograma de actividades global año 2024 - 2.1*

<b>Actividad</b>	<b>ene 2024</b>	<b>feb 2024</b>	<b>mar 2024</b>	<b>abr 2024</b>	<b>may 2024</b>
Recopilación de datos obtenidos de las máquinas	x				
Requerimientos de materia prima para el inicio de proceso		x			
Investigación de módulos adicionales a implementar			x		
Análisis <i>Bowtie</i> para la mitigación de riesgos			x	x	
Iteración para máquinas separadora y lavadora				x	
Primera simulación anual					x

Fuente: *elaboración propia*

**Cuadro 24**  
***Cronograma de actividades global año 2024 - 2.2***

<b>Actividad</b>	<b>jun 2024</b>	<b>jul 2024</b>	<b>ago 2024</b>	<b>sep 2024</b>
Cálculos y diseño final de máquinas 1, 2 y 3			<b>x</b>	<b>x</b>
Plan de producción anual finalizado			<b>x</b>	<b>x</b>
Bosquejo final de la línea de reciclaje				<b>x</b>
Compartir los resultados al equipo				<b>x</b>

Fuente: *elaboración propia*

## 8.4. Integración entre máquinas

Se logró una integración efectiva entre las máquinas, ajustando las alturas de las entradas y salidas de material para asegurar un flujo continuo de 150 kg/h. Realizando primero las máquinas extrusora y peletizadora y después incorporando el resto de las máquinas tomando en cuenta las características que puedan facilitar el transporte. La salida de la peletizadora se colocó como modificable debido a que la cámara de corte, al no tener una base fija, tiene posibilidad de colocarse a la altura que se requiera. Y el rango de altura de entrada de la extrusora fue definido acorde al último dato recibido por parte del integrante. Se Propuso un mecanismo de transporte, como bandas transportadoras, para conectar las diferentes etapas del proceso siempre y cuando sea posible. Se prestó especial atención a las alturas de entrada y salida de las máquinas para garantizar un transporte lógico y sin dificultad. El garantizar una compatibilidad de transporte entre cada máquina y asegurar el flujo continuo que sea el mismo para las todas máquinas demuestra el cumplimiento del requisito M02 y LR01. Esto se puede observar a continuación en el cuadro 25.

**Cuadro 25**

*Alturas de entrada y salida de cada máquina*

<b>Máquina</b>	<b>Altura de entrada de material</b>	<b>Altura de salida de material</b>
Separadora	1 metro	1 metro
Desetiquetadora	1.34 metros	0.53 metros
Lavadora Caliente	2.5 metros	4.0 metros
Trituradora	3.8 metros	0.8
Extrusora	1.5-1.6 metros	1 metro
Peletizadora	1 metro	modificable

Fuente: *elaboración propia*

## 8.5. Factor de seguridad

Se calculó un factor de seguridad mínimo de 1.9 para todas las máquinas, asegurando que los diseños cumplieran con los estándares de seguridad requeridos. Este cálculo ayudó a garantizar la integridad estructural y operativa de cada máquina. El factor de seguridad fue determinado mediante un análisis que consideró los 5 factores mencionados. A través de estos cálculos, se logró asegurar que todas las máquinas fueran seguras para operar bajo las condiciones establecidas. Cada máquina alcanzó o superó este mínimo de 1.9, proporcionando una capa adicional de confianza en la operación de la planta. La máquina con el factor de seguridad más bajo es la trituradora con un factor de seguridad de 2.07 que se ubica en sus engranajes para dar el torque al eje con cuchillas. El resto de máquinas cuenta con factores de seguridad mayores a 2.4. Con estos resultados se comprueba el cumplimiento del requisito S03.

**Cuadro26**  
*Valores de factor de seguridad*

<b>Factor de seguridad</b>	<b>Valor</b>
FS material	1.1
FS esfuerzo	1.2
FS geometría	1.0
FS teoría de fallo	1.2
FS confiabilidad	1.2
<b>FS general</b>	<b>1.9</b>

Fuente: elaboración propia

## 8.6. Máquinas diseñadas

Se completó el diseño de las todas las máquinas involucradas en la línea de reciclaje, a excepción de la extrusora. Cada una fue diseñada para manejar un flujo de 150 kg/h y cumplir con las dimensiones establecidas. Las características de la extrusora se consideraron como "no aplica", ya que el integrante cortó comunicación y no concluyó ni presentó el diseño final de la máquina a la fecha en que este documento se finalizó. Para el resto de máquinas se aseguraron las conexiones entre las máquinas para mantener una operación continua. Se revisaron las dimensiones de entrada y salida de cada máquina para asegurar compatibilidad entre ellas. Los miembros del equipo encargados de cada máquina proporcionaron planos detallados y manuales de operación, instalación y mantenimiento, lo que facilita la futura construcción y operación de la planta. De igual manera, se implementaron en las máquinas botones de paro de emergencia y que cada pieza que fuera punzo cortante de las máquinas, no fuera visible o al alcance del operario. Cada característica mencionada puede ser observada en los trabajos de graduación de cada integrante. Este apartado demuestra el cumplimiento de los requisitos S01, S02, M01, M03, M04 y M05.

**Cuadro 27**  
*Características de máquinas*

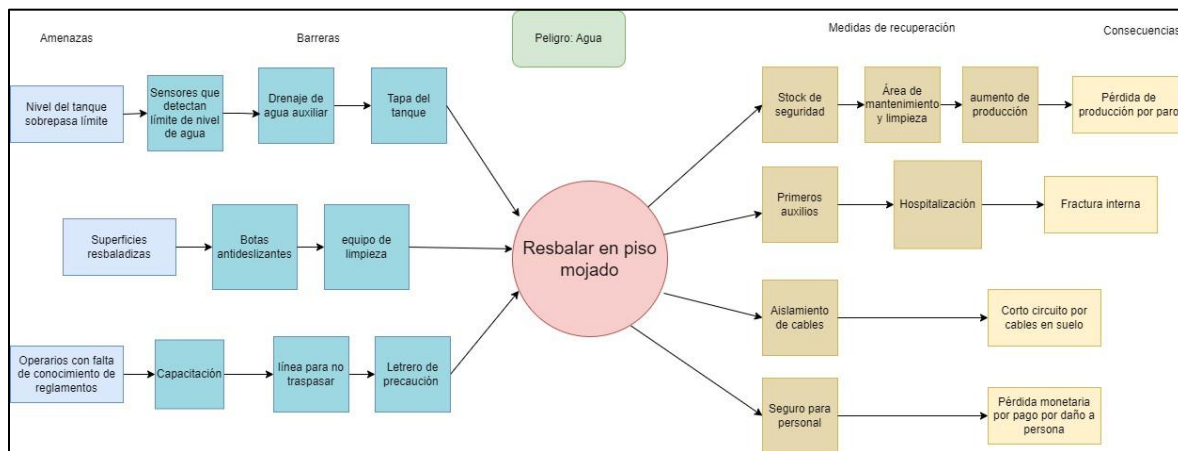
<b>Máquina</b>	<b>Partes punzocortantes cubiertas</b>	<b>Procesa botellas no mayor de 600ml</b>	<b>Botón de Paro de emergencia</b>	<b>Planos con listado de materiales</b>
Separadora	N/A	Si	Si	Si
Desetiquetadora	Si	Si	Si	Si
Lavadora	N/A	Si	Si	Si
Trituradora	Si	Si	Si	Si
Extrusora	N/A	N/A	N/A	N/A
Peletizadora	Si	Si	Si	Si

Fuente: *elaboración propia*

## 8.7. Mitigación de riesgos para las máquinas

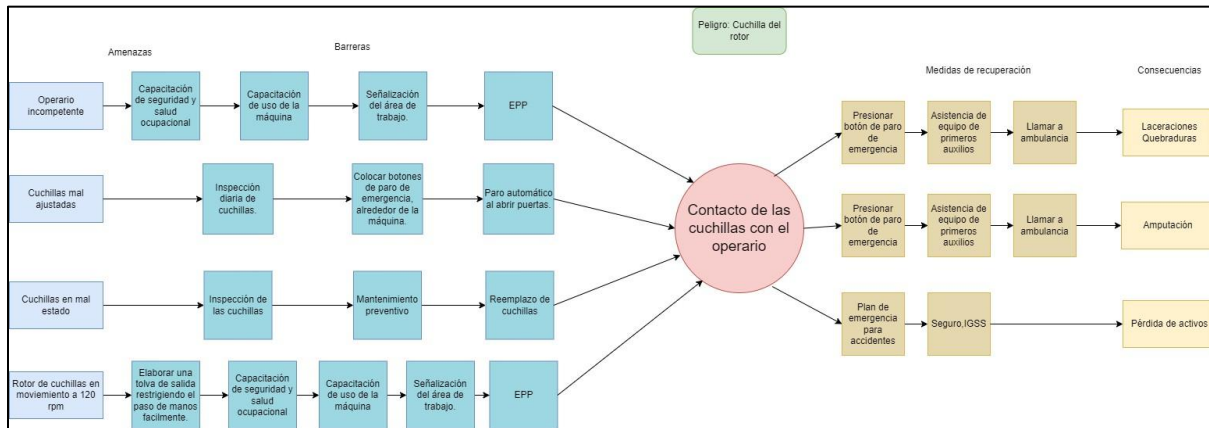
La implementación de la metodología Bowtie permitió identificar y mitigar riesgos clave asociados a cada máquina. Se establecieron barreras preventivas y se diseñaron métodos de recuperación para minimizar tanto el impacto como la frecuencia de los riesgos. Cada máquina fue evaluada por sus posibles peligros, y se crearon soluciones específicas para minimizar los riesgos. Este enfoque proactivo aseguró que las operaciones en la planta fueran seguras para los trabajadores y eficientes en términos de productividad. Los resultados de la sección mitigación de riesgos para las máquinas cumple el requisito S04 como se puede observar de la figura 14 a la figura 19.

**Figura 14**  
*Análisis Bowtie para máquina separadora*



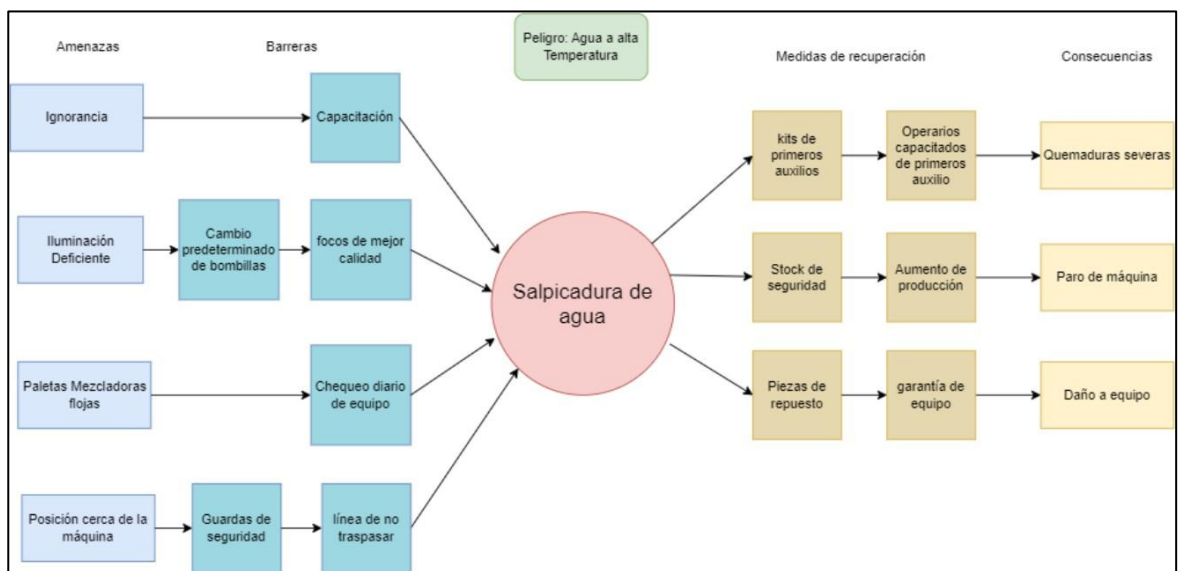
Fuente: *elaboración propia*

**Figura 15**  
**Análisis Bowtie para deseticadora**



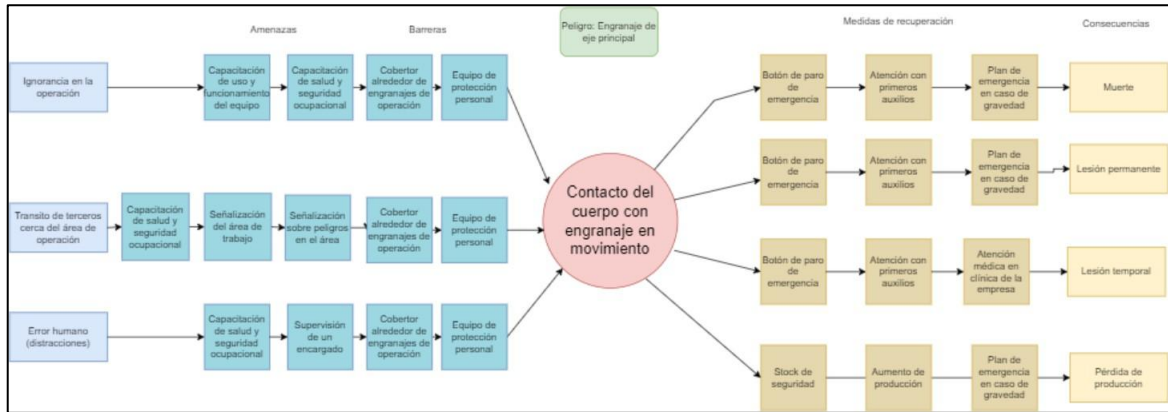
Fuente: *elaboración propia*

**Figura 16**  
**Análisis Bowtie para lavadora en caliente**



Fuente: *elaboración propia*

**Figura 17**  
**Análisis Bowtie para trituradora**



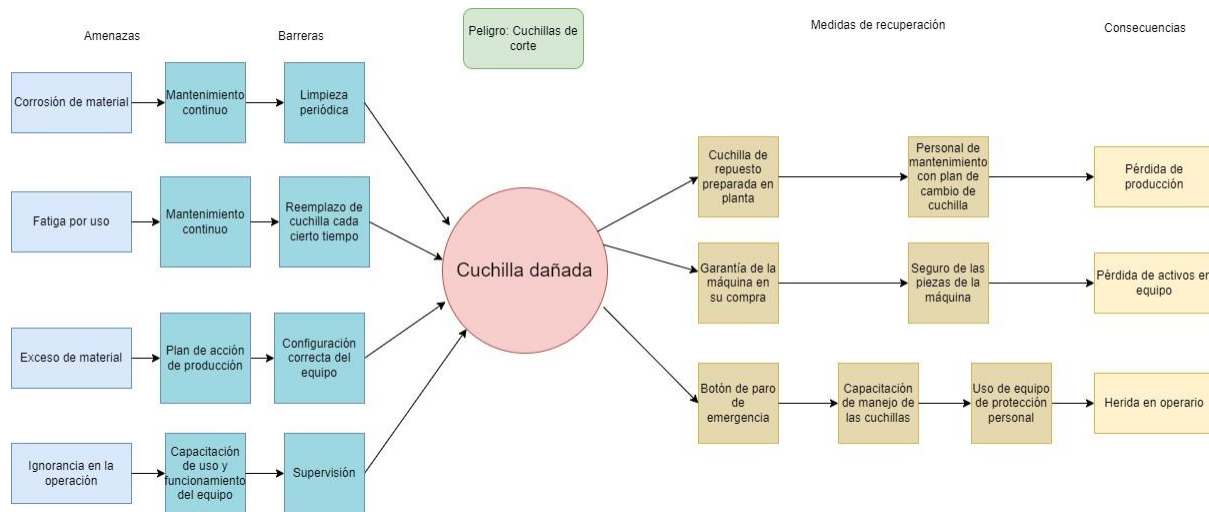
Fuente: *elaboración propia*

**Figura 18**  
**Análisis Bowtie para extrusora**



Fuente: *elaboración propia*

**Figura 19**  
**Análisis Bowtie para peletizadora**

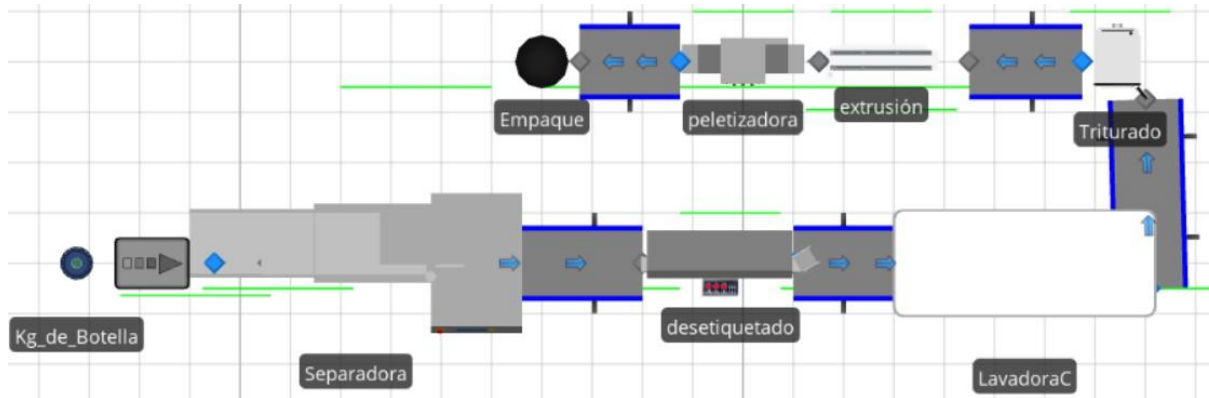


Fuente: *elaboración propia*

## 8.8. Diseño de línea de reciclaje

Se diseñó la línea de reciclaje en forma de U, necesitando un área mínima de 114 metros cuadrados para la línea de reciclaje (19 x 6 metros). La disposición de las máquinas y el flujo de trabajo simulado en el software Simio permitieron optimizar la eficiencia de la producción de la planta. Al usar el programa, se pudo visualizar el flujo de materiales y ajustar la configuración para evitar interrupciones. De igual manera se establecieron las características importantes para cada estación de trabajo de las máquinas. El diseño se puede observar en la figura 20.

**Figura 20**  
*Mapa de línea de reciclaje*



Fuente: captura de pantalla de *Simio*

## 8.9. Cálculo de demanda a cubrir

Se calculó una capacidad de producción de hasta 1,314 toneladas de PET reciclado anualmente, trabajando a 150 kg/h las 24 horas al día. Sin embargo, la planta está preparada para ajustarse a demandas menores, como flujos de 110.5 kg/h, en función de las necesidades del mercado. El cálculo de demanda fue clave para proyectar la capacidad productiva de la planta. Al evaluar el mercado actual y la capacidad instalada, se concluyó que la planta buscaría cubrir una demanda de 216,000 kg al año o 18,000 kg mensuales.

**Cuadro 28**  
*Condiciones de producción y demanda establecida*

Condición de producción	Cantidad de PET Producido
Producción anual 24/7 y 150kg/h	1, 314 toneladas
Producción anual 24/7 y 110.5kg/h	967.980 toneladas
Demanda a cubrir	216 toneladas

Fuente: *elaboración propia*

## 8.10. Planificación de producción anual

Se calcula una producción anual basada en el flujo de 110.5 kg/h, con ajustes para períodos de mantenimiento y días festivos. De igual forma se comparten los resultados obtenidos en la simulación de SIMIO del proceso productivo de la línea de reciclaje. Para los tiempos mostrados en dicho cuadro, no se toman en consideración los tiempos muertos por vacaciones, asuetos, feriados, mantenimientos programados, almuerzos o tiempo fuera del horario laboral. Se pueden

observar los datos de la producción anual en unidades de kg en el cuadro 29 y 30.

**Cuadro 29**

*Tabla de unidades de producción - parte 1*

<b>Unidades (kg)</b>	<b>ene</b>	<b>feb</b>	<b>mar</b>	<b>abril</b>	<b>mayo</b>	<b>jun</b>
Inventario Inicial	0	1,448	2,012	808	2,256	4,588
Pronóstico de la demanda	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000
Producción real	19,448	18,564	16,796	19,448	20,332	17,680
Inventario Final	1,448	2,012	808	2,256	4,588	4,268
Inventario de Seguridad	250	250	250	250	250	250
Unidades en exceso	1,198	1,762	558	2,006	4,338	4,018
Unidades demoradas	0	0	0	0	0	0

Fuente: *elaboración propia*

**Cuadro 30**

*Tabla de unidades de producción parte - 2*

<b>Unidades (kg)</b>	<b>jul</b>	<b>ago</b>	<b>sept</b>	<b>oct</b>	<b>nov</b>	<b>dic</b>	<b>Totales</b>
Inventario Inicial	4,268	4,832	6,280	4,192	6,524	7,088	
Pronóstico de la demanda	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	<b>216,000</b>
Producción real	18,564	19,448	15,912	20,332	18,564	11,492	<b>216,580</b>
Inventario Final	4,832	6,280	4,192	6,524	7,088	580	
Inventario de Seguridad	250	250	250	250	250	250	
Unidades en exceso	4,582	6,030	3,942	6,274	6,838	330	
Unidades demoradas	0	0	0	0	0	0	

Fuente: *elaboración propia*

Con base a los resultados del Cuadro 31, se puede comprobar que la línea de reciclaje cumple con la demanda anual establecida de 216,000 kg de PET al producir 220,147 kg. De igual forma, considerando el valor teórico del tiempo que tarda en salir del proceso de producción 1 kg de pellets de PET, que es aproximadamente de 32.58 segundos, se puede comprobar que el resultado de la simulación da un valor considerablemente cercano, que es de 32.9 segundos. Validando los cálculos para la producción anual. Por último, se observa que las máquinas diseñadas al tener su porcentaje

de utilización menor al 100 %, se comprueba que la línea de reciclaje tiene la capacidad suficiente para producir la cantidad requerida de pellets sin experimentar retrasos o congestión en el flujo de producción. Esta sección demuestra que se cumplieron los requisitos P01, P02 y P03.

**Cuadro 31**  
*Resultado de simulación de producción anual*

<b>Parámetro</b>	<b>valor</b>
Unidades producida al año	220,147 kg
Tiempo promedio en el sistema por unidad	3.426 minutos
Tiempo promedio entre salidas de unidades	32.952 segundos
Tiempo promedio de espera por unidad	0.309 segundos
Porcentaje de Utilización de Separadora *	96.163 %
Porcentaje de Utilización de Desetiquetadora *	96.080 %
Porcentaje de Utilización de Lavadora 2 (Lavado en Caliente) *	96.166 %
Porcentaje de Utilización de Trituradora *	96.155 %
Porcentaje de Utilización de Extrusora *	96.173 %
Porcentaje de Utilización de Peletizadora *	96.163 %

Fuente: *elaboración propia*

## 8.11. Módulos adicionales a implementar

Se identificaron y propusieron módulos adicionales para mejorar la operación de la planta, como el sistema de bandas transportadoras, una planta de tratamiento de aguas y una máquina separadora de corriente de Foucault o de Eddy. Estos módulos garantizan que la planta pueda operar de una forma más automática y continua. La adición de módulos como el sistema de transporte y el tratamiento de aguas fue crucial para optimizar la eficiencia de la planta. El sistema de bandas transportadoras asegura que las botellas se muevan de manera rápida y segura entre las máquinas. La planta de tratamiento de aguas reduce el impacto ambiental y permite la reutilización del agua en el proceso. Y la máquina de corriente busca identificar los residuos o basura que las botellas pueden llevar en su interior para poder remover de forma más eficiente. En el cuadro 32 se puede ver el módulo y la función que realizaría para la planta de reciclaje.

Cuadro 32: Módulos a tomar en cuenta en el futuro

<b>Módulo</b>	<b>Función en la línea de reciclaje</b>
Módulo de Transporte	Permite reciclar y purificar el agua utilizada en las lavadoras (lavadora en caliente y separadora por densidades), reduciendo el consumo de agua y el impacto ambiental.
Planta de tratamiento de aguas	Facilita el movimiento eficiente de las botellas y materiales entre las diferentes máquinas mediante bandas transportadoras, garantizando un flujo continuo en el proceso.
Máquina de detección de residuos	Detecta y separa automáticamente residuos metálicos no ferrosos (como aluminio) de los materiales reciclables, mejorando la pureza del PET reciclado.

Fuente: elaboración propia

1. Se concluyó el diseño de una línea de reciclaje PET que cuenta con 6 máquinas (se- paradora, desetiquetadora, lavadora, trituradora, extrusora y peletizadora) en el que cada máquina maneja un flujo de al menos 150 kg/h.
2. Se realizó un esquema general de la planta de reciclaje utilizando el programa de simulación Simio.
3. Se realizó un plan de mitigación de riesgos para la fabricación y funcionamiento de la planta por medio de análisis Bowtie.
4. Se definió una agenda global para los diseños de cada máquina y la planta, manteniendo comunicación entre los integrantes y compartiendo la información relevante para el diseño de la planta.
5. Se garantizó la correcta compatibilidad entre las máquinas a ser diseñadas al contar con el mismo flujo volumétrico para cada máquina y establecer alturas de entrada y salida de materiales coherentes
6. Se diseñó un plan de producción anual para la planta con base a una demanda estable- cida de 216 toneladas de PET anuales, tomando en cuenta asuetos, feriados, inventario de seguridad, horario laboral y días de paro por mantenimiento que duran 2 días cada trimestre para satisfacer una demanda.
7. La línea de reciclaje procesa botellas PET no mayores de 600 ml con un flujo másico de por lo menos 150 kg/h.
8. Cada máquina diseñada fue realizada con un factor de seguridad superior a 1.9
9. Se adoptaron prácticas de comunicación y organización como minutas y carpetas para la gestión integral del grupo.

---

### Recomendaciones

---

- Elaborar un programa y plan de seguridad industrial completo para toda la planta de reciclaje. El evaluar posibles amenazas que puedan desatar peligros y causar daños es importante para no sólo las máquinas, sino también para los procesos y el ambiente de trabajo. Lo que no se cubrió en este proyecto es la creación de un programa y plan de seguridad industrial más amplio que abarque todos los aspectos de la planta en su conjunto. Es decir, el trabajo no contempla las amenazas que puedan presentarse en otras áreas clave fuera de la línea de producción directa como infraestructura de la planta, áreas de almacenamiento y procesos auxiliares. De igual manera, es importante evaluar los peligros químicos existentes en las máquinas, como por ejemplo la lavadora en caliente que utiliza soda cáustica para la operación, y su forma adecuada de desecho y manejo.
- Se sugiere realizar una investigación complementaria enfocada en los módulos de trans- porte, la máquina clasificadora de botellas y la planta de tratamiento de aguas. Estos componentes, aunque cruciales para la optimización y eficiencia de la línea de recicla- je, presentan una complejidad técnica que amerita un estudio detallado y específico. Dada la magnitud y el alcance del presente trabajo, se recomienda considerar esta investigación como un proyecto independiente, permitiendo un análisis exhaustivo que contribuya de manera significativa al desarrollo de una línea de reciclaje más completa y autónoma.
- Se recomienda realizar un análisis financiero completo del proceso de producción de pellets de PET para poder establecer la viabilidad del proyecto, en donde los ingresos puedan ser suficientes para cubrir los costos directos e indirectos de fabricación, impuestos y otras variables relevantes al sistema. Actualmente, el presente trabajo está centrado exclusivamente en el diseño

de la línea de reciclaje de seis máquinas, por lo que no se han incluido gastos operativos importantes como hídricos, energéticos, administrativos y de infraestructura; ni costos detallados de las máquinas. Para conocer los costos de fabricación y materiales de cada máquina se puede consultar los trabajos de graduación de dichas máquinas.

- Se aconseja realizar una revisión exhaustiva de las regulaciones y normativas nacionales que sean aplicables a la implementación de la planta de reciclaje. Esto permitirá evaluar el grado de cumplimiento legal del diseño propuesto y realizar las adaptaciones necesarias para garantizar que la planta cumpla con los requisitos normativos y ambientales vigentes en el país o región donde se desee implementar. Es importante destacar que este trabajo se enfocó exclusivamente en el diseño técnico de la línea de reciclaje, sin considerar un contexto específico de planta, debido a que el diseño es genérico y está pensado para ser adaptable por cualquier entidad que desee implementar una línea de reciclaje de PET. Dado que cada planta de reciclaje es distinta en términos de ubicación, infraestructura, capacidad operativa y contexto normativo, la revisión de leyes, regulaciones y normas municipales no se abordó en este proyecto, ya que dichas regulaciones varían considerablemente entre localidades.

## Referencias

- Aceretech. (2023). *Una línea de producción eficiente para el reciclaje de PET*.  
<https://www.aceretech.com/webls-tran-c/msg/msg235.html>
- Álvarez, Daniel; De León, Saul, y Molina, Javier. 2022. «Reporte de extensión: Máquina de extrusión para plástico HDPE triturado». *Informe técnico de Universidad del Valle de Guatemala*.
- BMI Machines. (2024). *Paso a paso: Cómo se fabrica una botella de PET*.  
<https://www.bmimachines.com/paso-a-paso-como-se-fabrica-una-botella-de-pet/>
- Bunting Magnetics. (s.f.). Separador de corriente de Foucault de servicio pesado.  
<https://www.buntingmagnetics.com/productos/separadores-de-corriente-de-foucault/>
- Condorchem Envitech. (2024). *Membranas para el tratamiento de aguas residuales*.  
<https://condorchem.com/es/blog/membranas-tratamiento-aguas-residuales/>
- Corzosa. (s.f.). *Máquinas sopladoras: Tipos y aplicaciones*.  
<https://www.corzosa.com/maquinas-sopladoras-tipos-y-aplicaciones/>
- Ecoologic. (s.f.). Reciclaje de PET.  
<https://www.ecoologic.com/reciclaje-de-pet>
- Eden Agua. (2024). *¿Qué es un filtro de sedimentos para el agua y cómo funciona?*  
<https://www.edenagua.com/blog/que-es-un-filtro-de-sedimentos-para-el-agua-y-como-funciona/>
- EntreMundos. (2024). *Efectos de los desechos plásticos en los ríos, los lagos y el mar de Guatemala*.  
<https://www.entremundos.org/revista/medio-ambiente/efectos-de-los-desechos-plasticos-en-los-rios-los-lagos-y-el-mar-de-guatemala/>
- Equimar. (2024). *Plantas biológicas: Tipos de plantas de tratamiento*.  
<https://www.equimar.mx/tipos-de-plantas-de-tratamiento-que-manejamos/plantas-biologicas/>
- Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (2014a). *Acuerdo Gubernativo Número 229-2014 y sus reformas (Acuerdo Gubernativo 33-2016)*.  
<https://www.igssgt.org/wp-content/uploads/2022/04/Acuerdo-Gubernativo-229-2014-y-Reformas-Acuerdo-Gubernativo-33-2016.pdf>

- Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (2014b). *Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional*.  
<https://www.igssgt.org/wp-content/uploads/2022/04/REGLAMENTO.pdf>
- Gómez, K.; Barón, C.; Esteban, P. y Estrada, C. (2017). *Metodología para transformar necesidades en requisitos, integrando ingeniería de sistemas, calidad y pensamiento esbelto*.  
[https://www.researchgate.net/publication/317123456\\_Metodologia\\_para\\_transformar\\_necesidades\\_en\\_requisitos\\_integrando\\_ingenieria\\_de\\_sistemas\\_calidad\\_y\\_pensamiento\\_esbelto](https://www.researchgate.net/publication/317123456_Metodologia_para_transformar_necesidades_en_requisitos_integrando_ingenieria_de_sistemas_calidad_y_pensamiento_esbelto)
- IGC Perú. (2024). *Extrusoras de tornillo y sus sistemas de calentamiento*.  
<https://igc.com.pe/extrusoras-de-tornillo-sistemas-calentamiento/>
- Industries, K. (s.f.). *Reciclaje de plástico: Método mecánico vs. químico*.  
<https://www.kindustries.com/reciclaje-de-plastico-metodo-mecanico-vs-quimico/>
- Ingeniero de sistemas - Educaweb.com. (s.f.).  
<https://www.educaweb.com/profesion/ingeniero-sistemas-103/>
- Interempresas. (2024). *Línea de reciclado de envases de PET*.  
<https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/21582-Linea-de-reciclado-de-envases-de-PET.html>
- Izaro. (2017). *Cinta transportadora de listones*.  
<https://www.izaro.com/cinta-transportadora-de-listones/>
- Libre, P. (2020). *Guatemala y su contaminación con plásticos*.  
<https://www.prensalibre.com/guatemala-y-su-contaminacion-con-plasticos/>
- Máquina para fabricación de pellet: Conoce cómo son y cómo funcionan. (2021).  
<https://amesti.cl/blog/maquina-para-hacer-pellet-conoce-como-son-y-como-funcionan/>
- Mariano. (2011). Reciclado mecánico de PET (Súper-limpieza). *Tecnología de los Plásticos*.  
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/reciclado-mecanico-de-pet-super.html>
- México, P. T. (s.f.). *Desetiquetadora: Facilita la clasificación de botellas de plástico*.  
<https://www.plasticosmexico.com/desetiquetadora-facilita-la-clasificacion-de-botellas-de-plastico/>
- Naciones Unidas. (2024). *Informe de la ONU sobre contaminación por plásticos*.  
<https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos>
- Pio, L. (s.f.). *¿En qué consiste el reciclaje químico?*  
<https://www.reciclajequimico.com/en-que-consiste-el-reciclaje-quimico/>
- Plan de mitigación de riesgos: 5 estrategias a considerar. (s.f.).  
<https://zipforecasting.com/es/business-impact-analysis/risk-mitigation-plan.html>
- Plastic bottle label remover. (2020).  
<https://www.plasticrecyclingmachine.net/plastic-bottle-label-remover/>
- Properties of rPET-containing bottles | Food Packaging Forum. (2020).  
<https://www.foodpackagingforum.org/news/properties-of-rpet-containing-bottles>
- Recicla, R. R. (2023). *¿Qué es el PET?*  
<https://reducereutilizarecicla.org/que-es-el-pet/>

- Reciclado PET - Cirplus. (s.f.).  
<https://cirplus.io>
- Reciclaje de PET para avanzar hacia una economía circular. (2020).  
<https://www.residuosprofesional.com/reciclaje-pet-economia-circular/>
- | Ecoologic. (s.f.). *Reciclaje del PET: ¿Cómo se recicla y reusa el PET?*  
<https://www.ecoologic.com/reciclaje-de-pet>
- Redacción Médica. (2024). *Recomendaciones para pacientes con quemaduras leves.*  
<https://www.redaccionmedica.com/recomendaciones-para-pacientes-con-quemaduras-leves/>
- Reduce Reutiliza Recicla. (2024). *¿Qué es el PET?*  
<https://reducereutilizarecicla.org/que-es-el-pet/>
- REMSA. (s.f.). *Botella PET 600ml.*  
<https://www.remsa.com/botella-pet-600ml/>
- Seibt. (2024). *Etapas del proceso de reciclaje de plástico.*  
<https://seibt.com.br/es/blog/etapas-del-proceso-de-reciclaje-de-plastico/>
- Silva, J. E. (2024). *Guatemala y su contaminación con plásticos.*  
<https://www.prensalibre.com/opinion/columnasdiarias/guatemala-y-su-contaminacion-con-plasticos/>
- Termoformas. (2024). *Proceso de reciclaje del PET.*  
<https://termoformas.es/proceso-de-reciclaje-del-pet/>
- Texas Department of Insurance. (2024). *Slips, trips, and falls safety training.*  
<https://www.tdi.texas.gov/pubs/videoresourcessp/spt5slipsfalls.pdf>
- TTA. (2024). *Sostenibilidad.*  
<https://tta.com.gt/sostenibilidad/>
- Universidad Carlos III de Madrid. (2024). *Riesgos mecánicos.*  
<https://www.uc3m.es/ss/Satellite/Prevencion/es/TextoMixta/>



## CAPÍTULO 12

### Anexos

Los anexos del 1 al 4 muestran las cantidades y tiempos previstos para la producción de PET, tomando en cuenta el año de producción y operando días hábiles.

**Anexo 1**  
*Tabla de condiciones de producción - parte 1*

<b>Condiciones 2024</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>	<b>Jun</b>
<b>Pronóstico de la Demanda (kg)</b>	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000
<b>Número de días hábiles</b>	22	21	19	22	23	20
<b>Horas normales al día</b>	8	8	8	8	8	8
<b>Trabajadores</b>	7	7	7	7	7	7

Fuente: *Elaboración propia*

**Anexo 2****Tabla de condiciones de producción - parte 2**

<b>Condiciones 2024</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sept</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Totales</b>
<b>Pronóstico de la Demanda (kg)</b>	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	<b>216,000</b>
<b>Número de días hábiles</b>	21	22	18	23	21	13	<b>245</b>
<b>Horas normales al día</b>	8	8	8	8	8	8	
<b>Trabajadores</b>	7	7	7	7	7	7	

Fuente: *Elaboración propia***Anexo 3****Tabla de tiempo de producción - parte 1**

<b>Tiempo</b>	<b>ene</b>	<b>feb</b>	<b>mar</b>	<b>abr</b>	<b>may</b>	<b>jun</b>
Horas de Producciones disponibles	1,232	1,176	1,064	1,232	1,288	1,120
Horas de producción requeridas	1,232	1,176	1,064	1,232	1,288	1,120
Horas extras requeridas	0	0	0	0	0	0
Horas de personal contratado	0	0	0	0	0	0
Personas contratadas	0	0	0	0	0	0
Personas despedidas	0	0	0	0	0	0

Fuente: *Elaboración propia*

**Anexo 4****Tabla de tiempo de producción - parte 2**

<b>Tiempo</b>	<b>jul</b>	<b>ago</b>	<b>sept</b>	<b>oct</b>	<b>nov</b>	<b>dic</b>	<b>Totales</b>
Horas de producción disponibles	1,176	1,232	1,008	1,288	1,176	728	<b>13,720</b>
Horas de producción requeridas	1,176	1,232	1,008	1,288	1,176	728	<b>13,720</b>
Horas extras requeridas	0	0	0	0	0	0	0
Horas de personal contratado	0	0	0	0	0	0	0
Personas contratadas	0	0	0	0	0	0	0
Personas despedidas	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: *Elaboración propia*

Del Anexo 5 al anexo 11 se muestran las minutas que se llenaron cada vez que se realizaba una reunión del equipo. Se puede observar el objetivo principal del cuál trataba la reunión, los puntos principales que se discutieron y los compromisos que cada integrante se proponía para una fecha determinada. Se anotaba quienes de los integrantes estuvieron presentes, el lugar y la hora de reunión. Las reuniones eran de forma presencial o virtual.


**Anexo 5**  
**Minuta - 1.1**

MINUTA DE REUNIÓN		
FECHA: 17 de abril 2023	LUGAR: zoom	HORA: 21:00
OBJETIVO: Delimitar en la reunión las entregas a realizar y discutir el progreso de las máquinas		
INTEGRANTE	MÁQUINA	ASISTENCIA
Yessika	Peletizadora	SI
Edgar	Desetiquetadora	SI
Juan Ignacio	Lavadora	SI
Adrián	Trituradora	SI
Saúl	Extrusora	NO
<b>TEMAS TRATADOS</b>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Para la mayoría del grupo todavía no estaba claro el flujo de volumen que se iba a diseñar en la planta, para la cual sus respectivas máquinas debían de poder trabajar. Al discutir con el grupo, había integrantes con un flujo de 120 kg/h y otros con 150 kg/h. Al final de la discusión se determinó que el volumen de la línea de reciclaje sería 150 kg/h.</li> <li>2. Se discutió las entradas y salidas de máquinas. El enfoque principal fue la conexión entre la máquina de lavado a trituradora, ya que la salida de la máquina del lavado era baja y la trituradora necesita que el material entre por alto.</li> <li>3. Para el transporte de material se determinó que se usarían bandas transportadoras, de esta forma sería más automatizada la planta, que en el caso de usar operadores que vayan transportando el plástico en carretas.</li> <li>4. En el tema de los avances de máquinas cada integrante ya cuenta con sus diseños preliminares, por lo que se les solicitará por medio de correo el primer avance del diseño de sus máquinas. En el tema de los cálculos todavía siguen trabajando en ellos.</li> <li>5. Para el factor de seguridad se tuvo confusión sobre la manera de sacarlo o cuál utilizar. Ya que en primeras instancias se contaba con que el System Engineer lo iba a calcular para que todas las máquinas establezcan ese factor de seguridad, pero se estaba conversando que cada máquina debe de tener su propio factor de seguridad, por lo que se debe de buscar guía para saber qué método usar.</li> </ol>		

Fuente: *Elaboración propia*


**Anexo 6**  
**Minuta - 1.2**

6. Por último, varios integrantes dialogaban que no han podido avanzar como se espera ya que sus asesores no contestan o cuesta mucho que los ayuden, por lo que es un tema que se buscará trabajar.			
COMPROMISOS			
No.	TAREA	RESPONSABLE	FECHA A ENTREGAR
1	Cálculo en diseño de lavadoras	Juan Ignacio	5 de mayo
2	Determinar cálculos de fuerzas	Adrian	5 de mayo
3	Recalcular dimensiones	Edgar	5 de mayo
4	Terminar cálculo de componentes	Yessika	5 de mayo



Fuente: *Elaboración propia*

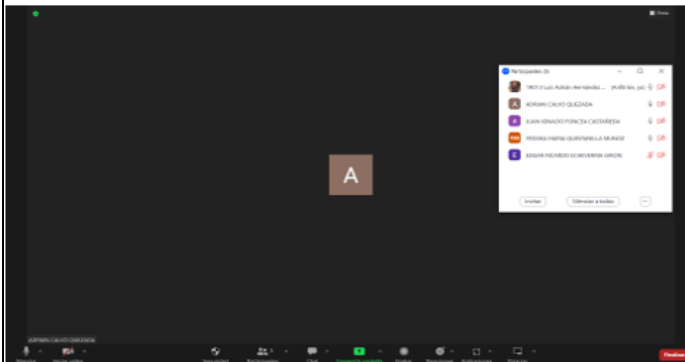
**Anexo 7**  
**Minuta - 2.1**

		
MINUTA DE REUNIÓN		
FECHA: 8 de mayo de 2023	HORA: 9:15 pm	
OBJETIVO: Identificar los avances, compartir el factor de seguridad y discutir sobre las metas como grupo.		
INTEGRANTE	MÁQUINA	ASISTENCIA
Juan Ignacio Foncea	Lavadora	SI
Yessika Quintanilla	Pelletizadora	SI
Edgar Echeverría	Desetiquetadora	SI
Adrian Calvo	Trituradora	SI
Saul De Leon	Extrusora	NO
TEMAS TRATADOS		
<ol style="list-style-type: none"> <li>Se definió la meta para el grupo sobre qué punto llegar para finales del mes de mayo. Se acordó que cada integrante lograría realizar los cálculos y diseños de sus máquinas; a tal punto de iniciar sus simulaciones.</li> <li>Se compartió el factor de seguridad mínimo que requeriría cada máquina. Este factor de seguridad es de 1.9 y todos estuvieron de acuerdo que cada máquina de la planta iba a llegar al mínimo.</li> <li>Juan Ignacio compartió el tema sobre las dimensiones de las máquinas. De verificar si cada máquina tiene un tamaño coherente y que siga la lógica de la línea de reciclaje. Sin embargo, todos coincidían con que sus dimensiones eran estándares para una línea con flujo de 150 Kg/h.</li> <li>Se trató el tema sobre los materiales. Para así identificar cuáles materiales iban a compartirse entre máquinas. Por lo que se les solicitará llenar una tabla sobre los materiales que sus máquinas requieren.</li> <li>Por último, se discutió sobre los avances y que se espera realizar para la próxima semana, por lo que cada integrante se propuso adelantar sus cálculos. Para así tenerlos casi terminados.</li> </ol>		

Fuente: *Elaboración propia*

**Anexo 8**  
**Minuta - 2.2**

COMPROMISOS			
No.	TAREA	RESPONSABLE	FECHA A ENTREGAR
1	Adelantar cálculos	Adrian Calvo	15 de mayo
2	Adelantar cálculos	Yessika Quintanilla	15 de mayo
3	Adelantar cálculos	Edgar Echeverría	15 de mayo
4	Adelantar cálculos	Juan Ignacio Foncea	15 de mayo
5			

Fuente: *Elaboración propia*

**Anexo 9**  
**Minuta - 3**



**MINUTA DE REUNIÓN**

FECHA: 19 de mayo de 2023	LUGAR: Salón	HORA: 16:30
OBJETIVO: Analizar la conexión y relación entre las máquinas peletizadora y extrusora-		

INTEGRANTE	MÁQUINA	ASISTENCIA
Yessika	Peletizadora	SI
Edgar	Desetiquetadora	NO
Juan Ignacio	Lavadora	NO
Adrian	Trituradora	NO
Saúl	Extrusora	SI


**TEMAS TRATADOS**

1. Se habló sobre las velocidades de sus máquinas, la peletizadora trabaja a 170mm/s, mientras que la extrusora trabaja a 3,000 mm/s. Por lo que se trabajará para cambiar la velocidad de la peletizadora para ver el impacto en su proceso
2. La unión entre las máquinas es directa por lo que se diseñará un acople que junte la máquina extrusora con la peletizadora

COMPROMISOS			
No.	TAREA	RESPONSABLE	FECHA A ENTREGAR
1	Encontrar nueva cuchilla que trabaje a la velocidad lineal deseada.	Yessika	5 de mayo
2	Crear Acople para máquina peletizadora	Saúl	5 de mayo
3			
4			

Fuente: *Elaboración propia*

**Anexo 10**  
**Minuta - 4.1**



**MINUTA DE REUNIÓN**

FECHA: 9 de julio de 2024	HORA: 17:00:00	Modalidad: Presencial
OBJETIVO: Discutir Los cambios y cálculos obtenidos de las máquinas lavadora y separadora		

INTEGRANTE	MÁQUINA	ASISTENCIA
Juan Ignacio Foncea	Separadora y Lavadora en caliente	Presencial

**TEMAS TRATADOS**

1. Cálculos Finales para máquinas Lavadora Frío, Desetiquetadora y Lavadora Caliente
2. Lavadora En frío/Separadora
3. Función adicional para lavadora en frío, separador por densidades y lavadora a temperatura ambiente.
4. Altura de salida es de 1.5m
5. Necesidad: Las botellas tienen que entrar a la primera máquina mínimo sin tapadera.
6. Tuberías de alimentación son 3 y no 1
7. Lavadora Caliente
8. 1764.19N/M de torque para vencer el fluido estacionario.
9. Si temp es Tamb y se quiere llevar a T 80 – 90°C, Se necesitan 1,071,914.1KJ en Soda Cáustica
10. Bomba de una separadora

Fuente: *Elaboración propia*

**Anexo 11**  
**Minuta - 4.1**

<p>11. Volumen de t 4.084m<sup>3</sup> de agua, Volumen del tanque 6.28m<sup>3</sup>, 1.3m de altura de agua, 2m de altura de cilindro y altura de máquina 2.5m</p> <p>12. Para los 4.084m<sup>3</sup> se usan 1,004.135kg de Soda Cáustica y la relación es de 18% (cada 100 litros de agua, se introduce 18kg de soda).</p> <p>13. La decisión que se tomó es echar 20kg cada media hora debido a que se quiso ser conservador y que es un proceso manual la forma de introducir la soda.</p> <p>14. Altura de salida de lavadora en caliente es 1.6, La trituradora se trabajo con una entrada a una altura de 3.84m.</p> <p>15. Cambios Finales en Diseño</p>			
COMPROMISOS			
No.	TAREA	RESPONSABLE	FECHA A ENTREGAR
1	Dimensiones Fijas de separadora	Juan Ignacio Foncea	16 de agosto
2	Simulación lavadora	Juan Ignacio Foncea	23 de agosto
3			
4			
5			

Fuente: Elaboración *propia*

**Anexo 12**  
**Minuta - 5**

			
MINUTA DE REUNIÓN			
FECHA: 28 de septiembre de 2024	LUGAR: zoom	HORA: 20:30	
OBJETIVO: Compartir Resultados y bosquejo de línea de reciclaje y discusión de temas inconclusos.			
INTEGRANTE	MÁQUINA	ASISTENCIA	
Yessika	Peletizadora	NO	
Edgar	Desetiquetadora	SI	
Juan Ignacio	Lavadora	SI	
Adrian	Trituradora	SI	
Saúl	Extrusora	NO	
<b>TEMAS TRATADOS</b>			
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Función del transporte entre cada máquina. Híbrido con partes de transporte por medio de operario y otros transportes por bandas transportadoras.</li> <li>2. Estado y suposiciones de máquina extrusora</li> <li>3. Área necesaria para la línea de reciclaje</li> <li>4. Resultados de la simulación con base al plan de producción anual</li> </ol>			
COMPROMISOS			
No.	TAREA	RESPONSABLE	FECHA A ENTREGAR
1			
2			
3			
4			

Fuente: Elaboración *propia*


En los Anexos 13 al 17 se muestran los distintos correos para dar seguimiento a los entregables de cada integrante del grupo y compartir noticias y decisiones para poder alinear el objetivo y diseño de las máquinas. Los Anexos 13 al 15 es la constante comunicación que se trataba de tener con el integrante de la máquina extrusora, sin embargo, se observa que en los últimos dos

(Anexo 14 y 15) no se tenía respuesta por parte de él, por lo que no se pudo contar con su colaboración.

### Anexo 13

#### Correo seguimiento extrusora - 1

Dimensión de máquina Recibidos x


 **LUIS ADRIAN HERNANDEZ MORALES** <her19013@uvg.edu.gt>  
para SAUL ▾ mié, 15 may, 14:14 ☆ ↶ ⋮

Buenas tardes Saúl,

Te escribo con la finalidad de poder conocer el estatus de la máquina extrusora. Si me puedes compartir las dimensiones de la máquina y si se tiene definido como una con la peletizadora.

Muchas gracias y feliz día.

---

 **SAUL EDUARDO DE LEON PAENCIA** <dele19408@uvg.edu.gt>  
para mí ▾ jue, 16 may, 8:00 ☆ ↶ ⋮

Buenos días Luis Adrian,


Te comento, las dimensiones o espacio que ocupa la máquina extrusora es de 2.25 m (largo) x 1.50 m (alto) x 0.75 m (ancho). Y se uniría al final del cañón por medio del dado o figura de extrusión de la peletizadora. Te adjunto una imagen como referencia.

Fuente: *Elaboración propia*

### Anexo 14

#### Correo seguimiento extrusora - 2

Estado de máquina extrusora

 **LUIS ADRIAN HERNANDEZ MORALES** <her19013@uvg.edu.gt>  
para SAUL ▾ mar, 20 ago, 10:25 ☆ ↶ ⋮

Buenos días Saúl,

Te escribo porque quería preguntarte el estado de la máquina extrusora. Si se tienen definidas las dimensiones, altura para la entrada de material y la salida de la tolva para la compatibilidad del dado peletizador.

Agradezco tu pronta respuesta. Saludos cordiales.


↶ Responder ↷ Reenviar

Fuente: *Elaboración propia*

### Anexo 15

#### Correo seguimiento extrusora - 3

Seguimiento de máquina

 **LUIS ADRIAN HERNANDEZ MORALES** <her19013@uvg.edu.gt>  
para SAUL ▾ lun, 9 sept, 11:25 ☆ ↶ ⋮

Buenos días Saúl,

Te escribo debido a la urgencia del estado de la máquina junto con sus datos generales de seguridad, dimensiones y eficiencia de la máquina, al igual que la compatibilidad con la peletizadora.

Estoy atento a tu respuesta, que tengas un excelente día.

↶ Responder ↷ Reenviar

Fuente: *Elaboración propia*

**Anexo 16**  
**Correo de comunicación - 1**



Fuente: *Elaboración propia*

**Anexo 17**  
**Correo de comunicación - 2**



Fuente: *Elaboración propia*