

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño de máquinas de separación y lavado para línea de  
reciclaje de tereftalato de polietileno**

Trabajo de graduación presentado por Juan Ignacio Foncea Castañeda  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2025







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño de máquinas de separación y lavado para línea de  
reciclaje de tereftalato de polietileno**

Trabajo de graduación presentado por Juan Ignacio Foncea Castañeda  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2025



Vo.Bo. Asesor

  
MBA Gustavo Adolfo Barrera Noriega

Vo.Bo. Terna Examinadora

  
MBA Gustavo Adolfo Barrera Noriega

  
Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

  
Ing. Héctor Francisco Gómez Hernández

Fecha de aprobación de examen de graduación: Guatemala, 18 de junio 2025.



A lo largo de este proceso académico y personal, he tenido la dicha de contar con el apoyo incondicional de personas que marcaron profundamente mi camino. Este trabajo no es únicamente el resultado de esfuerzo individual, sino el reflejo de una red de acompañamiento, inspiración y guía constante.

En primer lugar, agradezco a mi familia, por su amor y paciencia en los momentos más desafiantes. Su respaldo ha sido el pilar fundamental que me sostuvo y motivó a seguir adelante. A mis amigos y personas cercanas, gracias por su compañía, sus palabras de ánimo y su capacidad de recordarme que los logros también se celebran en comunidad.

Quiero expresar también mi más sincero agradecimiento a los catedráticos que, con su dedicación, exigencia y conocimiento, no solo contribuyeron a mi formación académica, sino que me motivaron a desarrollar mis conocimientos por fuera de lo que se encuentra en un pènsun. Su influencia ha sido clave en la construcción de mi criterio profesional y en el desarrollo de este proyecto.



<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>xiii</b>
<b>Resumen</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	7
4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>5. Marco teórico</b>	<b>9</b>
5.1. Materiales ingresados a la línea de reciclaje . . . . .	9
5.1.1. Plásticos . . . . .	9
5.1.2. Termoplásticos . . . . .	10
5.2. Componentes dentro de un módulo de lavado en una línea de reciclaje . . . . .	10
5.2.1. Correcta manipulación de compuestos químicos . . . . .	17
<b>6. Metodología</b>	<b>19</b>
6.1. Descripción de la metodología . . . . .	19
6.2. Identificación de las necesidades . . . . .	20
6.3. Definición de requisitos . . . . .	20
6.4. Diseños preliminares - Separadora por densidades . . . . .	22
6.5. Diseño seleccionado - Separadora . . . . .	23
6.6. Diagrama de proceso - Separadora por densidades . . . . .	24
6.7. Equipos auxiliares - Separadora por densidades . . . . .	25
6.8. Diagramas de cuerpo libre - Separadora por densidades . . . . .	26

6.9. Cálculos - Máquina separadora por densidades . . . . .	27
6.9.1. Cálculo del tiempo de residencia . . . . .	36
6.10. Simulaciones en ANSYS Workbench® y Autodesk Inventor® - Separadora por densidades . . . . .	46
6.11. Diseños preliminares - Lavadora en caliente . . . . .	52
6.12. Diseño seleccionado - Lavadora en caliente . . . . .	54
6.13. Diagrama de proceso - Lavadora en caliente . . . . .	55
6.14. Equipos auxiliares - Lavadora en caliente . . . . .	55
6.15. Diagramas de cuerpo libre - Lavadora en caliente . . . . .	62
6.16. Cálculos - Lavadora en caliente . . . . .	64
6.16.1. Ensayo estático estructural . . . . .	79
6.16.2. Simulación de flujo en la Lavadora en caliente con ANSYS Fluent . . . . .	82
6.17. Pin de sujeción . . . . .	89
6.18. Soldadura . . . . .	89
6.19. Pernos . . . . .	97
<b>7. Resultados</b>	<b>103</b>
7.1. Cumplimiento de requisitos . . . . .	103
7.2. Resultados tabulados . . . . .	105
7.3. Resultados de ensayos - Separadora por densidades . . . . .	107
7.4. Resultados de ensayos - Lavadora en caliente . . . . .	113
7.5. Presupuesto . . . . .	116
7.5.1. Presupuesto - Lavadora en caliente . . . . .	117
<b>8. Analisis de resultados</b>	<b>119</b>
<b>9. Recomendaciones</b>	<b>123</b>
<b>10. Conclusiones</b>	<b>125</b>
<b>11. Bibliografía</b>	<b>127</b>
<b>12. Anexos</b>	<b>131</b>
12.1. Manual de uso de los sistemas . . . . .	131
12.2. Manual de uso - Recomendaciones: Separadora por densidades . . . . .	131
12.3. Manual de uso - Recomendaciones: Lavadora en caliente . . . . .	133
12.4. Planos de construcción . . . . .	135

---

## Lista de figuras

---

1.	Resultados de la flotabilidad de distintos plásticos . . . . .	12
2.	Esquema de una máquina desetiquetadora . . . . .	13
3.	Sistema de lavado en caliente de Lidner Washtech. El sistema cuenta con tres módulos integrados entre sí para no requerir medidas de transportación adicionales a las instaladas. . . . .	14
4.	Máquina lavadora por fricción desarrollada por B+B Anlagenbau . . . . .	15
5.	Boceto realizado de la máquina separadora por densidad. El boceto contiene el diseño de ambos tanques y la manera en la que el material va a circular por este. . . . .	23
6.	Diseño seleccionado de la separadora por densidades, imagen utilizada por cortesía de Autodesk Inventor® . . . . .	24
7.	Diagrama de proceso de la máquina separadora por densidades . . . . .	25
8.	Diagrama esquemático - Separadora por densidades . . . . .	25
9.	Diagrama de disponibilidad para la selección de válvulas de servicio . . . . .	26
10.	Diagramas de cuerpo libre del sistema de separación diseñado. Imágenes utilizadas por cortesía de Autodesk Inventor® . . . . .	27
11.	Bomba 2.0 HP FPS FTB2CI . . . . .	40
12.	Ingreso de materiales en Engineering Data, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc . . . . .	47
13.	Modelo importado en Ansys Workbench con materiales asignados y contactos verificados, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc . . . . .	47
14.	Listado de contactos asignados a la simulación, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc . . . . .	48
15.	Mallado y métrica del mallado para el modelo en Ansys Workbench, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	48
16.	Configuración de la simulación con soporte fijo y aplicación de presión en las superficies internas, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	49
17.	Modelo importado en Ansys Workbench para el análisis de flujo en tuberías, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	50
18.	Configuración del Fluent Launcher para la simulación de flujo en tuberías, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	50

19.	Modelo mallado en Ansys Fluent con las selecciones de entrada y salida, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	51
20.	Preparación de la solución en Fluent para la simulación de flujo, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	52
21.	Boceto realizado de la máquina de lavado en caliente. El boceto describe los componentes principales de la máquina. . . . .	53
22.	Diseño seleccionado de la lavadora en caliente, imagen utilizada por cortesía de Autodesk Inventor® . . . . .	54
23.	Diagrama de proceso de la máquina lavadora en caliente . . . . .	55
24.	Módulo de tornillo sinfín utilizado en el sistema de lavado en caliente. . . . .	56
25.	Variador de frecuencia que controla la velocidad de los componentes giratorios del sistema. . . . .	61
26.	Variador de frecuencia Danfoss VLT AutomationDrive FC302 . . . . .	62
27.	Diagramas de cuerpo libre para la lavadora en caliente, imágenes utilizadas por cortesía de Autodesk Inventor® . . . . .	63
28.	Diagrama de deflexión del eje generado por el acelerador de diseño en Autodesk Inventor®. . . . .	70
29.	Diagrama de momento flector a lo largo del eje generado por el acelerador de diseño en Autodesk Inventor®. . . . .	70
30.	Diagrama de fuerza cortante a lo largo del eje generado por el acelerador de diseño en Autodesk Inventor®. . . . .	71
31.	Motor vertical de U.S. Motors, modelo HOLLOSHAFT®, adecuado para agitadores industriales. . . . .	76
32.	Geometría simplificada de la lavadora en caliente en Ansys Workbench, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	79
33.	Configuración de los contactos para la lavadora en caliente en Ansys Workbench, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	80
34.	Mallado del modelo de la lavadora en caliente, mostrando el refinamiento en áreas críticas, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	81
35.	Aplicación de la carga y precarga en la simulación de la lavadora en caliente, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	81
36.	Curva de comportamiento de la precarga aplicada a los pernos, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	82
37.	Modelo CAD de la lavadora en caliente importado a DesignModeler, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	83
38.	Métricas del mallado generado para la simulación, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	83
39.	Mallado adaptado utilizando Make Polyhedra en ANSYS Fluent, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	84
40.	Configuración del Fluent Launcher para la simulación, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	84
41.	Configuración del modelo multifásico en ANSYS Fluent, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	85
42.	Definición de las fases en el modelo multifásico, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	85
43.	Configuración del modelo viscoso en ANSYS Fluent, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . .	86

44.	Configuración de las condiciones de las zonas de celdas, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . . .	86
45.	Creación de la zona de fases para la simulación, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . . .	87
46.	Configuración de las iso-superficies en ANSYS Fluent, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . . .	87
47.	Configuración de la animación para la simulación, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . . .	88
48.	Inicialización y aplicación de patch en las regiones de la simulación, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc. . . . . .	88
49.	Menú del generador de pin de sujeción, imagen utilizada por cortesía de Autodesk Inventor®. . . . . .	89
50.	Menú de configuración de soldadura en ranura (Groove Weld) en Autodesk Inventor, imagen utilizada por cortesía de Autodesk Inventor® . . . . . .	90
51.	Menú de configuración de soldadura de filete (Fillet Weld) en Autodesk Inventor, imagen utilizada por cortesía de Autodesk Inventor® . . . . . .	90
52.	Aplicación de soldadura en ranura en la estructura. . . . . .	91
53.	Aplicación de soldadura de filete en la base de la estructura. . . . . .	91
54.	Selección de componentes para la conexión atornillada en el "Design Accelerator". . . . . .	98
55.	Cálculo y verificación de la conexión atornillada utilizando el "Design Accelerator". <sup>en</sup> Autodesk Inventor. . . . . .	98
56.	Dimensiones de roscas hexagonales para la selección de pernos. . . . . .	99
57.	Resistencias determinísticas mínimas a la tensión y a la fluencia de algunos aceros laminados en caliente y estirados en frío. . . . . .	100
58.	Tamaños preferidos y números de Renard (serie R) para la selección de pernos y componentes. . . . . .	100
59.	Visualización de la conexión atornillada en el modelo de la estructura. . . . . .	101
60.	Deformación total bajo presión máxima. . . . . .	107
61.	Deformación total bajo presión operacional. . . . . .	107
62.	Deformación direccional bajo presión máxima. . . . . .	108
63.	Deformación direccional bajo presión operacional. . . . . .	108
64.	Tensión principal máxima bajo presión máxima. . . . . .	109
65.	Tensión principal máxima bajo presión operacional. . . . . .	109
66.	Esfuerzo equivalente de von Mises bajo presión máxima. . . . . .	110
67.	Esfuerzo Equivalente de von Mises bajo presión operacional. . . . . .	110
68.	Factor de seguridad bajo presión máxima. . . . . .	111
69.	Factor de seguridad bajo presión operacional. . . . . .	111
70.	Distribución de presión en las tuberías. . . . . .	112
71.	Distribución de velocidad del fluido en las tuberías. . . . . .	113
72.	Deformación total en la lavadora en caliente. . . . . .	113
73.	Deformación direccional en la lavadora en caliente. . . . . .	114
74.	Error estructural en la lavadora en caliente. . . . . .	114
75.	Esfuerzo equivalente de von Mises en la lavadora en caliente. . . . . .	114
76.	Factor de seguridad general de la lavadora en caliente. . . . . .	115
77.	Factor de seguridad en los pernos de la lavadora en caliente. . . . . .	115
78.	Distribución de la mezcla dentro de la lavadora en caliente. . . . . .	115



---

## Lista de cuadros

---

1.	Rangos de densidad de distintos tipos de plásticos . . . . .	11
2.	Identificación de códigos . . . . .	21
3.	Requisitos de diseño . . . . .	21
4.	Resultados del cálculo del factor de seguridad para PVC . . . . .	45
5.	Rango de factores de servicio . . . . .	60
6.	Propiedades mínimas del metal de aporte . . . . .	92
7.	Cargas constantes permisibles y tamaños mínimos de soldadura de filete . . . . .	92
8.	Cumplimiento de requisitos de diseño . . . . .	103
9.	Cálculos realizados - Separadora por densidades . . . . .	105
10.	Cálculos realizados - Lavadora en caliente . . . . .	105
11.	Resultados de los cálculos de soldadura . . . . .	106
12.	Factores de seguridad - Separadora por densidades . . . . .	106
13.	Factores de seguridad - Lavadora en caliente . . . . .	106
14.	Presupuesto estimado - Máquina separadora por densidades . . . . .	116
15.	Presupuesto de la lavadora en caliente (con módulo SINFIMASA e importación incluida) . . . . .	117



Se realizó el diseño y análisis de una máquina separadora por densidades y una lavadora en caliente, secciones clave para una línea de reciclaje de plásticos PET. Ambos equipos fueron desarrollados para cumplir con los requisitos del sistema de reciclaje, asegurando su integración con otras máquinas del proceso. El objetivo principal fue procesar un flujo másico de 150 kg/h, lo cual se logró mediante simulaciones estructurales y de dinámica de fluidos utilizando *ANSYS Workbench*, complementadas con modelado CAD en *Autodesk Inventor®*. Este diseño surge como respuesta a la creciente contaminación por plásticos PET en ríos, lagos y vertederos de Guatemala, proponiendo una solución sostenible para las comunidades afectadas.

El diseño de estos sistemas se enfocó en remover residuos y otros materiales indeseados del PET, mejorando la pureza del producto final reciclado. Se realizaron análisis detallados de la geometría de los equipos, la capacidad de los tanques, la potencia de las bombas, equipos auxiliares y la resistencia de los materiales. Los resultados de las simulaciones confirmaron que el acero inoxidable SAE 304, empleado en los componentes, es capaz de soportar las tensiones críticas y evitar fallas plásticas, garantizando un factor de seguridad superior a 2.

El análisis de la lavadora en caliente consideró tanto las cargas dinámicas como las térmicas, logrando un diseño que resiste las condiciones operativas sin comprometer su integridad. Además, las simulaciones permitieron realizar ajustes dinámicos al diseño, contemplando el costo de fabricación y eliminando la necesidad de producir prototipos físicos. Se incluye una lista de materiales necesarios para la fabricación de ambas máquinas, así como un costo estimado con el objetivo de ofrecer una solución económica y competitiva frente a las máquinas disponibles en el mercado. El propósito final es implementar este diseño en áreas donde aún no se realiza el reciclaje de PET, contribuyendo a la reducción de la contaminación plástica.

Aunque el PET tiene múltiples usos y beneficios, su desecho inadecuado ha generado un problema ambiental significativo. La acumulación de botellas, envases y otros productos plásticos ha alcanzado niveles alarmantes, lo que hace imperativo implementar medidas prácticas para poder reutilizar este material. Este proyecto ofrece alternativas concretas hacia un futuro sostenible mediante una gestión responsable de los residuos plásticos. Además, se propone una solución que fomenta la conciencia ambiental en las comunidades guatemaltecas y promueve el reciclaje como parte integral de la vida cotidiana.



El Tereftalato de Polietileno (PET) es uno de los polímeros más utilizados a nivel mundial debido a sus propiedades termoplásticas, permitiendo su transformación en una amplia variedad de productos, como botellas, envases y otros artículos de uso diario. A pesar de sus ventajas, el uso masivo de PET ha generado serios desafíos ambientales. La producción mundial de plásticos ha crecido exponencialmente en las últimas décadas, lo que ha incrementado la acumulación de residuos plásticos en cuerpos de agua y vertederos, afectando de manera significativa a los ecosistemas y la salud pública. En Guatemala, como en muchas otras partes del mundo, este problema ha adquirido dimensiones alarmantes, especialmente en ríos y lagos, donde los residuos de PET representan una porción considerable de los desechos plásticos acumulados (Hunt et al., 2015).

Estudios recientes han demostrado que, a nivel global, el PET es uno de los principales responsables de la contaminación plástica debido a su resistencia y durabilidad, tardando hasta 500 años en descomponerse (Programme, 2019). Este problema se ve agravado en países como Guatemala, donde la infraestructura de reciclaje es limitada y la mayoría de los residuos plásticos no reciben un tratamiento adecuado. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) estima que entre el 60% y 80% de los desechos en los mares son plásticos, y una parte significativa de ellos corresponde a PET.

El reciclaje de plásticos, y en particular del PET, ha surgido como una solución clave para mitigar este impacto ambiental. Existen diferentes métodos de reciclaje para el PET, incluyendo reciclaje mecánico, químico y energético, que buscan transformar los residuos plásticos en nuevos productos aprovechables. Sin embargo, el éxito de estos procesos depende de la eficacia con la que se puedan separar, limpiar y procesar los materiales.

Este trabajo aborda el diseño de dos máquinas para una línea de reciclaje de PET en Guatemala: una separadora por densidades y una lavadora en caliente. La primera clasifica el PET de otros plásticos y residuos según su densidad, mientras que la segunda elimina contaminantes como etiquetas y adhesivos, mejorando la pureza del material reciclado. Ambas tecnologías buscan fortalecer la capacidad de reciclaje del país, reducir la contaminación plástica y fomentar prácticas sostenibles.



Para el desarrollo del proyecto grupal, se optó por dividir la línea de reciclaje de PET en módulos específicos. Aunque el enfoque fue colaborativo, cada integrante diseñó un módulo individualmente, lo que permitió especializarse en distintos aspectos técnicos del proceso. Esta estrategia aprovechó las fortalezas del equipo, facilitó una distribución eficiente de tareas y aseguró la coherencia e integración de los diseños en el sistema general.

Para el presente trabajo se seleccionó el módulo de lavado, el cual se dividió en dos máquinas principales: una separadora por densidades y una lavadora en caliente. Estas máquinas son cruciales en el proceso de preparación del material como también para la eliminación de impurezas, residuos y contaminantes adheridos al PET, lo que garantiza un material de alta calidad para su reutilización posterior en la línea de reciclaje.

El principal objetivo de las líneas de reciclaje es reducir los desechos plásticos a nivel global, contribuyendo al mismo tiempo al cuidado del medio ambiente. El reciclaje de plásticos PET ayuda a disminuir la demanda de materias primas vírgenes, reduce el consumo de energía en los procesos de producción y minimiza la cantidad de residuos que terminan en los vertederos. Además, el reciclaje fomenta la economía circular, al permitir la reutilización de materiales y reducir la dependencia de recursos no renovables.

Para este proyecto, cada módulo aborda un aspecto clave de la línea de reciclaje. Los módulos incluyen:

1. **Recolección y clasificación:** Se enfoca en la recolección de residuos plásticos PET y su clasificación inicial, separando el PET de otros plásticos y materiales no reciclables.
2. **Lavado y limpieza:** Este módulo, que incluye las dos máquinas diseñadas (lavadora por fricción y secadora térmica), elimina las impurezas del PET recolectado, como etiquetas y residuos, garantizando un material de mayor calidad para su reutilización.
3. **Trituración y granulación:** Los plásticos se trituran en pequeños fragmentos o gránulos para facilitar su manejo y posterior procesamiento.

4. **Extrusión y pelletización:** Los gránulos se funden y extruyen para formar pellets, que luego se utilizan como materia prima en la fabricación de nuevos productos.
5. **Control de calidad:** Garantiza que los productos reciclados cumplan con los estándares de calidad establecidos a lo largo de todo el proceso.

El reciclaje de polímeros PET es fundamental debido a las diversas ventajas que presenta en comparación con otros tipos de plásticos. Entre estas ventajas destacan:

1. **Resistencia química:** El PET actúa como una barrera eficaz contra el oxígeno y no reacciona con el agua ni los alimentos.
2. **Inastillables:** Son más seguros y económicos que el vidrio para el almacenamiento y transporte de productos, ya que no se quiebran.
3. **Flexibles:** Pueden moldearse en diferentes formas, lo que los hace versátiles para la producción de embalajes variados.
4. **Totalmente reciclables:** El PET es completamente reciclable (Packaging Options Direct, n.d.).

Según el Instituto Mexicano del Plástico Industrial, México comercializa 30 mil millones de botellas y garrafones de PET anualmente, pero solo el 5 % de estos se reciclan o reutilizan (The Food Tech, 2010). Por otro lado, países como Noruega, Japón, Suecia e India han alcanzado tasas de reciclaje de PET del 97 %, 84.8 %, 84 % y 80 %, respectivamente, según datos de 2018 (Tiseo & Statista, 2020). Estos países han implementado estrategias y sistemas eficientes que podrían servir de inspiración para reducir los desechos plásticos en Guatemala.

Un ejemplo es Noruega, donde se ha adoptado un sistema integral de reciclaje desde la infancia. Este sistema involucra a los ciudadanos en la separación de residuos desde sus hogares, empleando un código de colores para clasificar los residuos en espacios públicos. Este plan ha sido implementado con éxito gracias, en parte, a la empresa privada Infinitum, que desde 1999 gestiona el reciclaje de PET a nivel nacional Christopoulou, 2018. Aunque Guatemala no cuenta con un esquema similar ni con el apoyo de una empresa privada directamente, una posible solución sería la instalación de líneas de reciclaje de PET en sectores específicos con alta concentración de residuos. Estas líneas, aunque más pequeñas, podrían tener un impacto significativo en la reducción de la contaminación plástica.

En 2016, se reportó que Guatemala recicla solo el 9 % del plástico que consume, y la mayoría de este material reciclado permanece en el mercado local Washington State Department of Ecology, n.d. Aunque este porcentaje es bajo, existe un gran potencial para aumentar las capacidades de reciclaje en el país, lo que reduciría la contaminación plástica y promovería una mayor conciencia ambiental en las comunidades.

Adicionalmente, es fundamental que, junto con la instalación de más líneas de reciclaje, se realicen campañas educativas dirigidas a las comunidades locales para explicar cómo pueden participar activamente en la recolección y separación de residuos. Esta estrategia no solo incrementaría la cantidad de plásticos reciclados, sino que también impulsaría la creación de nuevos productos a partir de PET reciclado, que podrían ser utilizados por embotelladoras y otras industrias que demandan plásticos como materia prima.

En Guatemala, los puntos de reciclaje de plásticos PET se concentran únicamente en la ciudad capital, lo que limita gravemente las opciones de reciclaje en el resto del país. Como consecuencia, los plásticos desechados en áreas fuera de la capital permanecen sin procesar, incrementando la contaminación. Este problema no solo se debe a la falta de infraestructura de reciclaje, sino también a la escasa educación sobre el impacto ambiental que generan los desechos plásticos. La implementación de líneas de reciclaje PET en diferentes regiones del país representa una oportunidad para reducir la cantidad de plásticos desechados inadecuadamente, al tiempo que ofrece beneficios económicos y de desarrollo para las comunidades locales (The Food Tech, 2010).

La contaminación plástica en Guatemala es especialmente crítica en sus ríos, siendo el Motagua uno de los más afectados. Este río recibe residuos de múltiples afluentes y desemboca en el Caribe, contribuyendo significativamente a la contaminación marina. Según The Ocean Cleanup, el río Las Vacas arrastra miles de toneladas de basura hacia el Motagua, agravando el problema en la región (The Ocean Cleanup, s.f.). Reducir la cantidad de plásticos en los ríos es esencial no solo para el medio ambiente local, sino también para disminuir el impacto global. La implementación de sistemas de reciclaje contribuiría a esta reducción y mejoraría la salud de comunidades cercanas, como las del río Las Vacas y Villalobos.

Una solución viable es instalar líneas de reciclaje cerca de los ríos más contaminados, lo que facilitaría el manejo adecuado de plásticos y el acceso de las comunidades al reciclaje de PET. No obstante, esta propuesta enfrenta retos como el alto costo de implementación y la necesidad de una participación activa por parte de la población para garantizar su efectividad.

Dentro de la línea de reciclaje, el módulo de lavado es esencial para obtener un PET de alta calidad. Este proceso comienza con la separación de plásticos PET de otros materiales, asegurando la homogeneidad del producto. Además, elimina adhesivos, etiquetas y residuos, lo que mejora significativamente la pureza del material reciclado.



### 4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de separación por densidades y un sistema de lavado en caliente que permita separar el tereftalato de polietileno (PET) de otros plásticos y residuos.

### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de separación por densidades que permita separar el PET de otros materiales plásticos.
- Calcular la potencia necesaria para las bombas encargadas de la recirculación del agua en el sistema de separación, garantizando un flujo continuo y minimizando pérdidas mediante un circuito cerrado.
- Diseñar una lavadora en caliente que incluya un tanque resistente a la corrosión, equipado con un sistema de agitación que asegure el contacto uniforme del material con la mezcla calentada a 80 grados centígrados, optimizando la remoción de impurezas.
- Incorporar un sistema de control en la lavadora en caliente para mantener una temperatura constante de 80 grados centígrados, permitiendo ajustes automáticos en el proceso, como la adición de hidróxido de sodio cuando sea necesario.
- Determinar la geometría, dimensiones y materiales adecuados para los componentes de ambas máquinas, incluyendo tanques, ejes de agitación y paletas, asegurando que cumplan con los estándares de seguridad y resistencia estructural en condiciones industriales.
- Especificar las uniones del sistema y las conexiones de tuberías, utilizando técnicas de ensamblaje que aseguren un sellado adecuado para evitar fugas.



## 5.1. Materiales ingresados a la línea de reciclaje

El reciclaje de los materiales plásticos abre el camino a la reducción de desechos que impactan de manera negativa al ambiente. Al reciclar los plásticos desde casa, se reduce la cantidad de desechos enviados a vertederos, conserva recursos naturales, previene contaminación al reducir la necesidad de recolectar nueva materia prima para producción, ahorra energía y otros aspectos que, en conjunto, benefician a las comunidades y el ambiente (Agency, 2021). Los plásticos conforman el 85 % de los residuos que llegan al océano y se advierte que, para el 2040, los volúmenes del material alcanzará un nivel donde tanto los humanos como los ecosistemas y el ambiente enfrentan niveles críticos de supervivencia (Rukikaire, 2021).

### 5.1.1. Plásticos

La producción de plásticos ha aumentado durante los años en cuanto a la demanda de mercado durante las últimas décadas debido a que son materiales económicos, livianos y resistentes que pueden moldearse en una infinidad de productos dependientes de la aplicación a la cual serán enfocados (Daboner et al., s.f.). Uno de los plásticos más comúnmente utilizados en la actualidad es el Tereftalato de polietileno, o de manera simplificada, PET. Esta, al igual que otras materias primas, deben ser procesadas de la forma más eficiente mientras también se considera la reducción de costos, y dentro de las consideraciones que no deben ser ignoradas, se encuentra la automatización de los procesos (Daboner et al., s.f.). Se entiende por plástico como cualquier material formado principalmente por algún polímero natural o sintético con sus aditivos correspondientes para concederle las características deseadas. La producción de plásticos previo a su procesado y uso en aplicaciones de consumo, conlleva emisiones que generan un significativo impacto ambiental (Casallas Murcia, 2014).

### 5.1.2. Termoplásticos

Los materiales termoplásticos son polímeros caracterizados por largas cadenas moleculares y estos usualmente se ablandan al exponerlos a un calentamiento y un endurecimiento al enfriarse (Grigore, 2017). Existen tres tipos de polímeros termoplásticos:

1. Cristalinos - Usualmente translúcidos con cadenas moleculares que representan un arreglo regular. Comparado a los otros tipos, estos tienen una resistencia mecánica al impacto mayor, un ejemplo de este polímero es el polipropileno.
2. Amorfos - Usualmente transparentes con sus moléculas en arreglo aleatorio, un ejemplo de este tipo es el cloruro de polivinilo o también conocido como PVC.
3. Semi-cristalinos - Son plásticos naturalmente de color opaco como resultado de la difusión de luz en los bordes cristalinos. Estos tienen valores de contracción más altos que los plásticos amorfos entre la solidificación y las temperaturas de transición. Por lo tanto, el riesgo de sobrecarga es considerablemente reducido.

## 5.2. Componentes dentro de un módulo de lavado en una línea de reciclaje

La sección de lavado dentro de una línea de reciclaje consiste en varios lavados del plástico. El primer lavado del material consiste en separar el material plástico del tereftalato de polietileno. Este resultado se obtiene por medio de un lavado y separación en frío. El lavado en frío no cumple únicamente con el objetivo de separar los materiales, sino que también da un lavado inicial como preparación al tratamiento del material. Una vez en el tanque, el tereftalato de polietileno se hunde al fondo del tanque debido a su densidad (Ruj et al., 2015).

Al tener separado el plástico del tereftalato de polietileno, este continúa en el proceso por medio de bandas transportadoras para ingresar en una máquina desetiquetadora. La función de esta máquina es remover las etiquetas y algunos pegamentos que pueda tener el envase o recipiente de tereftalato de polietileno. Luego de pasar por este proceso, el material ingresa a un lavado en caliente, donde el material llega a su última etapa preparativa. El lavado en caliente permite remover cualquier residuo restante en los envases luego de pasar por la máquina desetiquetadora. Este sistema de lavado en caliente opera de manera similar a la del primer lavado, con la distinción siendo que en lugar de utilizar agua, utiliza una mezcla de agua con distintos ácidos (Cosimbescu et al., 2021). El uso de distintos ácidos depende del tamaño deseado resultante de los copos despolimerizados. Durante esta etapa, también se espera separar cualquier material que no sea tereftalato de polietileno que logró cruzar durante la primera separación.

### Tanque de separación sedimentación - flotación

Para aplicaciones en donde no es necesario separar una gran variedad de materiales, tal como en este proyecto, se recomienda el uso de tanques de separación que utilizan el método

de sedimentación y flotación. En el caso de este proyecto, únicamente materiales plásticos serán procesados, por lo que no es requerido el uso de maquinaria separadora más compleja. La separación del tereftalato de polietileno en forma individual es un factor indispensable en la evaluación de la calidad del material reciclado (Hoseini et al., 2022). Las dimensiones del tanque de separación varía según la capacidad de la planta donde se realice la instalación. En el caso de disponer de un espacio relativamente reducido, es posible utilizar tanques de 2 metros de largo por 0.8 metros de alto mientras que, al disponer de un mayor espacio, es posible utilizar tanques de 4 metros de largo por 1.8 metros de alto (Meckensheim, 2013). En el momento que la línea comienza a operar, el tanque de separación se llena de agua, el material es depositado en el tanque y, gracias a las diferencia de densidades existente entre los materiales plásticos y el tereftalato de polietileno, los materiales del segundo tipo se sedimentarán mientras que los del primero flotarán en la superficie del agua (Bauer et al., 2018).

La flotación de distintos plásticos se basa en la diferencia de flotabilidad de los distintos tipos de plásticos. En las líneas de reciclaje, es imposible disponer de los materiales plásticos separados directamente a menos que los plásticos llegaran a la planta separados desde un inicio. Los plásticos mayormente utilizados en empaques son:

Cuadro 1: Rangos de densidad de distintos tipos de plásticos

Plástico	Rango de densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Cloruro de polivinilo	1.38 - 1.51
Tereftalato de polietileno	1.38 - 1.41
Policarbonato	1.20 - 1.22
Poliestireno	1.04 - 1.08
Acronitrilo butadieno estireno	1.04 - 1.06
Polietileno	0.89 - 0.98
Polipropileno	0.85 - 0.91

*Fuente:* Guo et al., Guo et al., 2016.

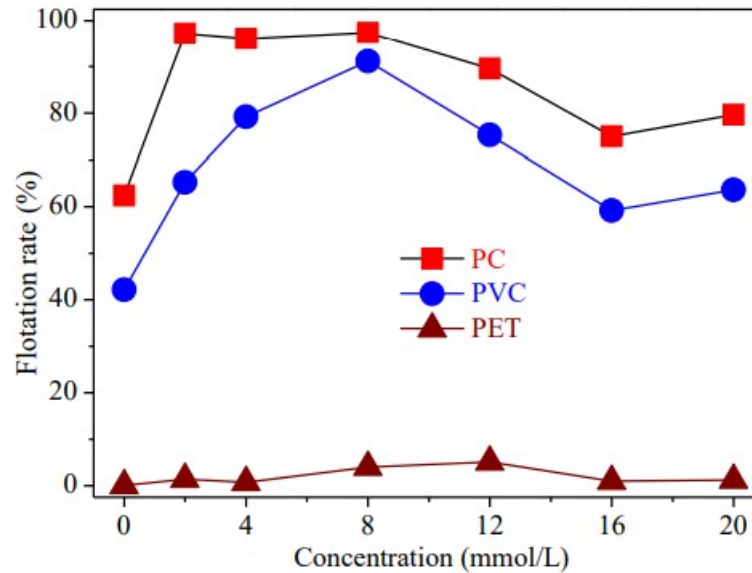
Conociendo los rangos de densidad de los distintos plásticos, es posible separarlos por medio del tanque de flotación. Por ejemplo, es sencillo separar el tereftalato de polietileno del polipropileno dada la diferencia de densidades de estos, pero sería más complicado separar el cloruro de polivinilo del tereftalato de polietileno debido a sus densidades muy similares.

El tanque de separación por flotación puede utilizar agua, pero es recomendable utilizar compuestos químicos humectantes tales como el ftalato de bis(2 - etilhexilo) y el sebacato de dibutilo debido a que estos agentes pueden adherirse fácilmente a los plásticos y estos modifican al tereftalato de polietileno, el plástico de interés del proyecto. Los agentes humectantes permiten alcanzar las óptimas condiciones de flotación, permitiendo separar el plástico de interés del resto y descartar los que no serán utilizados (Guo et al., 2016).

La Figura 1 muestra la eficiencia obtenida tras sumergir distintos plásticos en una solución de sebacato de dibutilo. El uso de agentes humectantes permite distinguir la flotabilidad de los distintos plásticos que pueden ser introducidos dentro de la línea de reciclaje, y permite distinguir los plásticos unos de otros, permitiendo descartar los que no serán utilizados. La Figura 1 también muestra los resultados esperados dentro de la planta elaborada, los cuales son que los plásticos que no serán utilizados queden flotando en la superficie del tanque de

separación y que el tereftalato de polietileno quede en el fondo del mismo. Es por esto que, el uso de agentes humectantes es recomendable, ya que de esta manera es posible dar uso del material de interés y separarlo de los materiales descartables.

Figura 1: Resultados de la flotabilidad de distintos plásticos



Fuente: Guo et al., Guo et al., 2016.

Al utilizar agentes humectantes como lo es el sebacato de dibutilo, es necesario tomar medidas de seguridad previo y durante su uso debido a que es un químico combustible (Hatlelid, 2019). Compuestos químicos como este requieren medidas de prevención y protección personal previo y durante este esté en uso para prevenir y conocer qué cuidados otorgar a los operadores que puedan llegar a sufrir un accidente al estar expuesto al químico. De igual manera, para la aplicación deseada, también se puede utilizar agua como agente humectante.

El ingreso de todo el material plástico al tanque de flotación debe tomar en cuenta un periodo de tiempo suficiente para que este se sumerja en su totalidad. Una vez sumergido, el material se irá separando según su densidad. Existe una medida estandarizada de tanque con un largo de 4 metros con la opción de aumentarlo a 6 metros, lo cual permitiría una mayor introducción del material pero también representa un mayor consumo de agua dentro del mismo (Co., 2020b). Utilizando las mismas especificaciones presentadas por la empresa Amstar Machinery Co. Ltd., el tanque de flotación tendrá un grosor interior dentro del rango de 1500 mm a 2000 mm hecho de aluminio 6061-T651. La selección de este material permite que el tanque soporte la presión y cargas provocadas por el volumen de agua introducido.

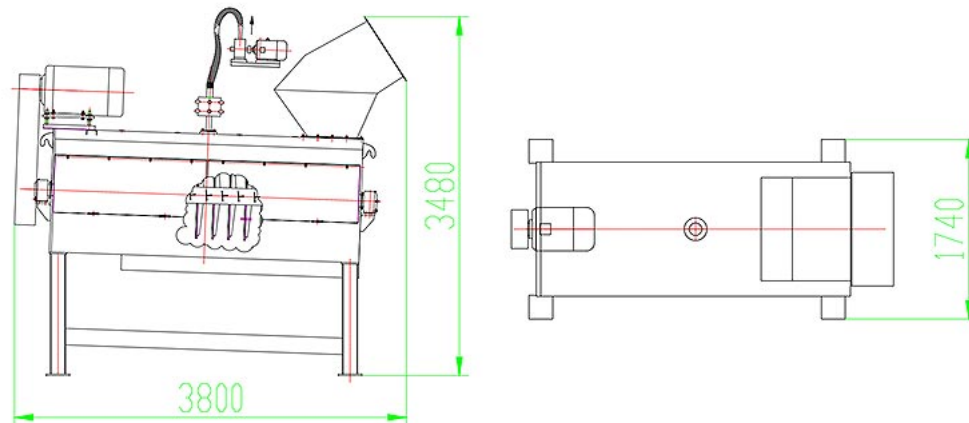
Para el diseño del tanque, se recomienda el uso del acero inoxidable o aluminio, con la profundidad deseada para contener el volumen de agua a utilizar. En el interior del tanque, el fondo tendrá una "V" profunda para asegurar que no se acumulen plásticos que se hundan en la parte inferior del tanque. La parte inferior del tanque también dispone de un canal para guiar y recolectar los plásticos que queden estancados en el fondo del tanque. El diseño del tanque de flotación también dispone de la superficie superior expuesta, la cual permite la remoción de material descartable, así como un agujero. En la salida del tanque hay un rodillo de paleta, el cual descarga los materiales flotantes en la superficie y garantiza una

descarga mínima de agua. En el caso de la recolección del tereftalato de etileno del fondo del tanque, hay un transportador de tornillo de una longitud determinada según las dimensiones del tanque, para garantizar que el material sea recolectado. Por último, para evitar fugas de agua, el tanque cuenta con un sello de aire mecánico para el eje del tornillo sinfín. (Systems., 2020).

### Máquina desetiquetadora

El uso de este equipo permite la remoción de las etiquetas y pegamento residual en la superficie de los envases ingresados a la línea de reciclaje. Este equipo se encuentra entre los equipos de lavado en frío y caliente y, dado que la máquina desetiquetadora no remueve en su totalidad todos los residuos por aparte del material de interés, el material pasa por un lavado en caliente que remueve cualquier residuo que no fue removido durante esta sección. Luego de pasar por el tanque de separación, el material ingresa a la máquina desetiquetadora observable en la Figura 2. También es posible ingresar el material a la desetiquetadora sin la necesidad de las bandas, pero esta opción requiere de espacios de almacenamiento que sean movibles para poder ingresar el material de forma manual.

Figura 2: Esquema de una máquina desetiquetadora



Fuente: Zhangjiagang Lianguan Recycling Science Technology Co., 2017.

### Sistema de lavado en caliente

El proceso del lavado en caliente depende parcialmente del tamaño del tereftalato de polietileno ya que, con un tamaño de ingreso determinado, es posible desarrollar el diseño y construcción de un tanque que cumpla con los requerimientos. El tereftalato de polietileno es transportado de la desetiquetadora hacia un tanque lleno con agua caliente donde también se rocía agua hirviendo sobre el material para remover pegamentos y residuos de las etiquetas de los envases que no fueron removidos en previas etapas del proceso. Dentro del diseño del equipo se encuentra un túnel con una malla, rodeando el tornillo sinfín, para que por el túnel puedan caerse los contaminantes y los mismos puedan ser descartados. La Figura 3 muestra un sistema de lavado en caliente que cuenta con tres módulos integrados.

Figura 3: Sistema de lavado en caliente de Lidner Washtech. El sistema cuenta con tres módulos integrados entre sí para no requerir medidas de transportación adicionales a las instaladas.



*Fuente:* Nolan, 2019.

La Figura 3 muestra un sistema desarrollado por Linder Washtech en 2019, donde se elaboran tres procesos distintos sobre el material introducido. La primera etapa consiste de un reactor en el cual se mezcla el material triturado con agua caliente y se lava. Luego se transporta por medio de un tornillo sinfín e ingresa a una lavadora por rociado. Durante la segunda etapa, el calor del agua y el fluido rociado, sea agua o un compuesto químico, remueven y desintegran pegamentos y residuos de las etiquetas mientras se conserva el tereftalato de polietileno. En su tercera y última etapa, el tereftalato de polietileno ingresa a una lavadora por fricción, el cual es un equipo utilizado para remover el agua caliente o la solución cáustica (Nolan, 2019). La Figura 4 muestra una lavadora por fricción, la cual permite la remoción de cualquier sustancia residual en los envases plásticos previo a que estos pasen a la siguiente etapa del tratamiento.

Esta lavadora es similar a la desarrollada por otras empresas expertas en reciclaje de plásticos ya que cada una, a pesar de tener un distinto acople en la integración dentro de la línea de reciclaje, utiliza el mismo principio para la remoción de residuos en los envases plásticos. El principio utilizado por este tipo de lavadora es la fuerza centrífuga y, debido a las revoluciones por minuto reguladas por un operador, el fluido de trabajo es expulsado de los envases y este puede ser extraído para ser reutilizado en el proceso de lavado. Como resultado, luego de la extracción del fluido de trabajo, los envases están preparados para el siguiente tratamiento. De forma similar a la separadora por flotación, la lavadora por fricción debería utilizar únicamente agua ya que de esta forma, el agua extraída puede ser reutilizada en el proceso en la primera parte del lavado, evitando utilizar más recursos de los necesarios y previendo la posible contaminación del agua utilizada en el proceso completo.

Es recomendable el uso de únicamente agua durante este proceso aunque también es posible tener el tanque lleno de agua hirviendo mientras que la sustancia rociada sobre el material es un tipo de ácido, tal como el etilenglicol. Surgen complicaciones al dar uso de compuestos químicos a causa del aumento del riesgo que enfrentan los operadores al utilizar

Figura 4: Máquina lavadora por fricción desarrollada por B+B Anlagenbau



Fuente: BUB Anlagenbau GmbH, n.d.

el etilenglicol. Este compuesto químico puede ser utilizado como fluido de trabajo en el rocío sobre los envases que pasan por el lavado en caliente, pero requiere de mucho cuidado en la prevención de accidentes en el momento del rociado (NIOSH, 2021).

### **Transportación del material**

Dentro del módulo de lavado así como en toda la línea de reciclaje, se utilizan distintos métodos de transporte del material según la etapa en la que este se encuentre. Específicamente dentro del módulo de lavado, se utilizan principalmente los siguientes equipos:

1. Transportador de tornillo - Mecanismo con una hoja helicoidal giratoria de tornillo, generalmente dentro de un tubo, para mover materiales líquidos o granulares.
2. Tambor rotatorio - El tambor cilíndrico que incluye las secciones de zaranda es el lugar donde se produce la separación. Generalmente, posee partes vacías en el extremo que le permiten quedar apoyado y girar en las ruedas del muñón. Las ruedas están apoyadas sobre rodamientos, que están aislados del material procesado. El sistema de correa de transmisión mantiene al tambor girando y, al mismo tiempo, ofrece cierta seguridad si existe una sobrecarga del tambor.
3. Transportador rascador - Son ideales para el transporte de todo tipo de viruta, seca, húmeda o con refrigerante. La ventaja de utilizar este tipo de transportador es que reduce la interrupción de los ciclos automáticos, reduce calentamientos en la bancada, reduce los tiempos improductivos, evita la mano de obra necesaria para la extracción de material y ahorra espacio ya que pueden ser incorporados directamente a los equipos utilizados.

## Sistema de secado o deshidratación

El proceso de secado del tereftalato de polietileno puede ser realizado de varias maneras. Para este proyecto, se consideraron dos distintos tipos de remoción de agua a la salida del lavado en caliente del tereftalato de polietileno. Los dos distintos tipos considerados son:

1. Secador centrífugo
2. Secador térmico

El secador centrífugo funciona de manera similar a una máquina de lavado por fricción, ya que en ambos sistemas, se monta un eje de longitud determinada con varios paneles o paletas. Alrededor del eje se encuentra un túnel de pantalla de malla y el eje es potenciado por medio de un motor eléctrico montado. Mientras el material, que en este caso sería el tereftalato de polietileno es alimentado, el eje gira a alrededor de 1,000 rpm, generando que el material sea empujado hacia las paredes internas del túnel. Mientras el material gira, el agua es expulsada y es recolectada dentro del túnel de pantalla de malla para que esta sea reutilizada dentro de los procesos de lavado. Usualmente, el secador centrífugo disminuye el contenido de humedad del material a un rango de 20 % a 30 % (Co., 2020a).

El secador centrífugo puede tener una variación de potencia según la que sea requerida y el espacio de instalación disponible. Por ejemplo, la potencia del motor puede tener un valor variable dentro del rango de 37kW a 55kW, lo cual depende del diámetro del eje que están rotando. En el caso de seleccionar un motor de 37kW, se haría girar un eje con diámetro de 400mm, girando a 1400 rpm y con una capacidad de 400 a 800 kg/h (Co., 2020a). En cuanto al secador térmico, este usualmente es la continuación del secador centrífugo para poder reducir el rango de humedad en la salida del secador centrífugo a un valor menor al 3 % (Co., 2020a). Los secadores térmicos también pueden operar sin la necesidad del secador centrífugo como la etapa previa, con la desventaja que requeriría un mayor período de tiempo para obtener la remoción del agua.

El principio de operación de este tipo de secador es dar uso de aire caliente para secar el material, similar a como funciona un secador de pelo. Dentro de este secador, el material plástico se aspira mediante un soplador de transporte y se mezcla con aire caliente a través de un conjunto largo de tubos de acero inoxidable que se enrolla hacia adelante y hacia atrás. Mientras el material es mezclado, la humedad es deshidratada de manera efectiva. En el momento que el material llegue al final del sistema de secado, este termina con un aparato de separación de ciclones en donde el aire caliente es mezclado con aire frío, haciendo que la humedad residual sea reducida aún más. El separador por ciclones es el último componente que puede remover polvos y contaminantes en el flujo del material por la línea de reciclaje (Co., 2020c). Las especificaciones del secador requiere de una potencia de soplador de 5.5kW y una potencia de calentado de 36kW considerando el uso de tubería con diámetro de 159mm y que esta sea de acero inoxidable tipo 304 (Co., 2020c). Se utiliza el acero inoxidable tipo 304 debido a su alta resistencia al deterioro como la corrosión y la fragilización por fase sigma, la cual es una fase intermetálica no magnética compuesta principalmente de hierro y cromo que se forma en aceros inoxidables ferríticos y austeníticos durante la exposición de temperaturas en el rango de 590 °C a 980 °C (Acevedo & Sáenz, 2018).

Para el diseño de los dos sistemas seleccionados del módulo de lavado, se realizó una

investigación previa centrada la selección de material o materiales de los cuales estarán compuestos los distintos componentes que conforman cada sistema. Las dos principales opciones eran acero y aluminio. Tanto el acero como el aluminio son materiales resistentes y duraderos, haciéndolos ideales para su uso en aplicaciones industriales en las cuales están expuestos a cargas y tensiones constantes. El aluminio es un material ligero, por lo que en aplicaciones en las cuales se busca reducir el peso es un material ideal. El acero y el aluminio son altamente conductivos, por lo que en sistemas tales como la lavadora en caliente son materiales útiles que permiten alcanzar las temperaturas de trabajo deseadas. Ambos materiales son muy comunes en la industria y tienen alta disponibilidad a nivel mundial, haciéndolos materiales más accesibles y económicos que otros tipos de metales. Por último, ambos materiales son fácilmente trabajables, lo cual los hace ideales para la fabricación de partes o componentes completos dentro de los sistemas industriales (Kutz, 2002).

### **5.2.1. Correcta manipulación de compuestos químicos**

El sistema de lavado en caliente fue diseñado con el objetivo de poder utilizar distintos fluidos de trabajo. Estos incluyen agua o una mezcla de agua con compuestos químicos. Uno de los compuestos utilizados comúnmente en líneas de reciclaje, específicamente en los sistemas de lavado en caliente, es la mezcla de agua con etilenglicol. Dicho compuesto químico conlleva medidas de seguridad previo, durante y posterior a su uso debido a sus propiedades. Se señala que el etilenglicol es nocivo en caso de ingestión y puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas (Carl Roth GmbH + Co. KG, s.f.). Es por eso que, dentro de los requerimientos de diseño, se deben incluir las precauciones adecuadas de seguridad ocupacional para el manejo correcto de este tipo de compuestos químicos.

Por otro lado, la mezcla de agua con soda cáustica es una alternativa preferida en ciertos sistemas de reciclaje debido a su capacidad efectiva para eliminar aceites, grasas y otros contaminantes orgánicos presentes en los envases plásticos, y además es menos peligrosa en comparación con el etilenglicol si se maneja adecuadamente (Noyes, 2002). La soda cáustica, aunque es corrosiva, es más fácil de neutralizar y presenta un menor riesgo de intoxicación grave para los operadores en caso de una exposición accidental. Esto permite reducir los costos asociados con medidas de seguridad y tratamiento de residuos, haciendo que la mezcla de agua con soda cáustica sea una opción más segura y eficaz para el lavado en caliente dentro de la línea de reciclaje.

De igual manera, se deben considerar situaciones en las cuales una o más personas se encuentren en peligro al entrar en contacto con el compuesto o presenten síntomas de intoxicación, por lo que se debe mantener un protocolo específico que indique qué se debe realizar en este tipo de situaciones.



## 6.1. Descripción de la metodología

El diseño de la línea de reciclaje completa se dividió en varias partes, según cada uno de los equipos diseñados dentro de la planta. Las etapas de la línea de reciclaje se resumen en dos partes, la primera siendo la preparación del material y la segunda el tratamiento de este. La primera etapa es la más extendida, ya que dentro de esta se incorpora el proceso de la separación y lavado parcial del plástico. Esta etapa es una de las que más equipos utiliza dentro de una línea de reciclaje, tomando en cuenta que se utiliza el tanque de separación, la máquina desetiquetadora, el sistema de lavado en caliente y el sistema de secado. Cada uno de los equipos aporta al propósito de preparar el material mientras es tratado y también busca trabajar únicamente con tereftalato de polietileno y la remoción de cualquier pegamento y etiqueta que este pueda tener.

Se considera que el tanque de separación también es un equipo de lavado, ya que este da un lavado inicial en frío al material ingresado en la línea de reciclaje mientras también separa el tereftalato de polietileno del material descartable. Luego de pasar por la etapa de separación, la preparación del material pasa por la máquina desetiquetadora, donde este sistema se encarga de remover las etiquetas de las botellas y parte del pegamento que estas utilizan. Luego, el tereftalato ingresa a una nueva etapa de lavado, donde ahora, el lavado es en caliente para poder suavizar parcialmente el material, así como remover los residuos de las etiquetas y pegamento que no se pudo remover en el sistema anterior.

Para el diseño de los dos sistemas de lavado de la línea de reciclaje, se tomaron en cuenta distintos requerimientos, los cuales influyen en la manera de operación de la línea de reciclaje. En el caso de la máquina de separación, los aspectos principales a tomar en cuenta fueron los esfuerzos a los cuales los componentes están sometidos, así como qué materiales se recomienda utilizar para que el proceso pueda ser realizado sin que los componentes lleguen

al punto de falla.

## 6.2. Identificación de las necesidades

Para lograr entender las necesidades del diseño de una línea de reciclaje en Guatemala, primero se investigó sobre qué vías o recursos existen localmente para aquellos ciudadanos interesados en reciclar plásticos, específicamente el tereftalato de poliuretano. Para abarcar el proyecto, se realizó una visita técnica a una planta de reciclaje con el objetivo de conocer el funcionamiento de los distintos equipos, cómo estos están instalados y qué funciones realizan.

Fue posible conocer los distintos equipos necesarios para tener una línea de reciclaje, así como se pudo formular una idea de cómo se realizaría el diseño de cada máquina según el módulo al que pertenece. También se pudo determinar que, considerando que la planta visitada es especializada en el área del reciclaje, el diseño elaborado por los integrantes del grupo no buscaba competir con las empresas, sino que buscaba poder replicar el modelo de la planta para poder aplicarlo en una menor escala y tener una mayor disposición para que más personas puedan reciclar materiales plásticos.

Otra planta que también se especializa en reciclaje es la Recicladora La Joya, donde uno de los materiales con los cuales trabajan es el tereftalato de polietileno, el cual lo tratan con maquinaria de alta tecnología que permite una eficiente separación y clasificación de los materiales para su reciclaje. Esta planta tiene una capacidad de procesar más de 500 toneladas de materiales reciclables mensualmente, y también colabora en conjunto con la comunidad, ofreciendo programas educativos y de capacitación en reciclaje y medio ambiente. El proyecto realizado fue abarcado con el objetivo de simular la operación de una línea de reciclaje moderna, considerando de igual manera el factor de repetibilidad de la línea para que estas puedan ser replicadas en distintos puntos del país y aumentar la cantidad de material que es reciclado a nivel nacional.

## 6.3. Definición de requisitos

Tras realizar una investigación sobre los distintos sistemas incorporados dentro de una línea de reciclaje, se buscó definir los requisitos de diseño de los dos sistemas de lavado. Dentro de la investigación realizada, se buscaron opciones disponibles en el mercado en cuanto a líneas de reciclaje y, específicamente, acerca del tanque de separación y de la lavadora en caliente. Luego de tener un marco de referencia en cuanto a qué se encuentra disponible en el mercado, se plantearon distintos requisitos de diseño, seguridad y facilidad de uso para el operador de cada sistema. El Cuadro 2 y el Cuadro 3 detallan los requisitos y recursos que el diseño debe cumplir.

Cuadro 2: Identificación de códigos

Código	Significado
RD	Requisitos de dimensionamiento
RS	Requisitos de seguridad
RO	Requisitos de operación
RM	Requisitos de mantenimiento

Cuadro 3: Requisitos de diseño

Código	Requisito
RD01	La capacidad de procesamiento de las máquinas de lavado debe ser de al menos 150 kg/hr.
RD02	Los tanques de la máquina separadora por densidades deben tener una capacidad máxima de 2500 litros de agua.
RD03	El tanque de la lavadora en caliente debe tener una capacidad máxima de 5000 litros de fluido de trabajo.
RD04	El dimensionamiento de los tanques de la separadora por densidad no debe exceder las dimensiones de: 3m x 5m x 3m (ancho, largo, alto).
RO01	La alimentación a la lavadora en caliente debe acoplarse adecuadamente a la salida de la máquina desetiquetadora.
RO02	La lavadora en caliente debe operar con una mezcla de hidróxido de sodio y agua, y la temperatura del fluido de trabajo no debe exceder los 150 grados Celsius.
RO03	El sistema de control de la lavadora en caliente debe garantizar el mantenimiento de la temperatura de trabajo constante en 80 grados Celsius y permitir la adición precisa de hidróxido de sodio según las condiciones de operación.
RM01	La lavadora en caliente debe contar con un sistema de filtrado para eliminar impurezas y residuos durante el proceso de lavado.
RM02	El diseño de ambos sistemas debe permitir el acceso para el mantenimiento, reemplazo de componentes, y limpieza regular.

Continuación en siguiente página

Cuadro 3 – continuación de la página previa

Código	Requisito
RS01	Los componentes del sistema y las estructuras circundantes deben ser capaces de soportar temperaturas de hasta 150 grados Celsius.
RS02	Se deben implementar medidas de seguridad, como el uso de equipos de protección personal (EPP), extintores y sistemas de detección de incendios en el área de trabajo.
RS03	Los operadores deben ser capacitados en el uso seguro de la mezcla de hidróxido de sodio y en la operación de las máquinas de separación por densidades y lavado en caliente.
RS04	Se debe asegurar que las instalaciones eléctricas y equipos cumplan con los códigos y estándares de seguridad ocupacional, incluyendo monitoreo de la calidad del aire para evitar exposición a polvo y productos químicos.

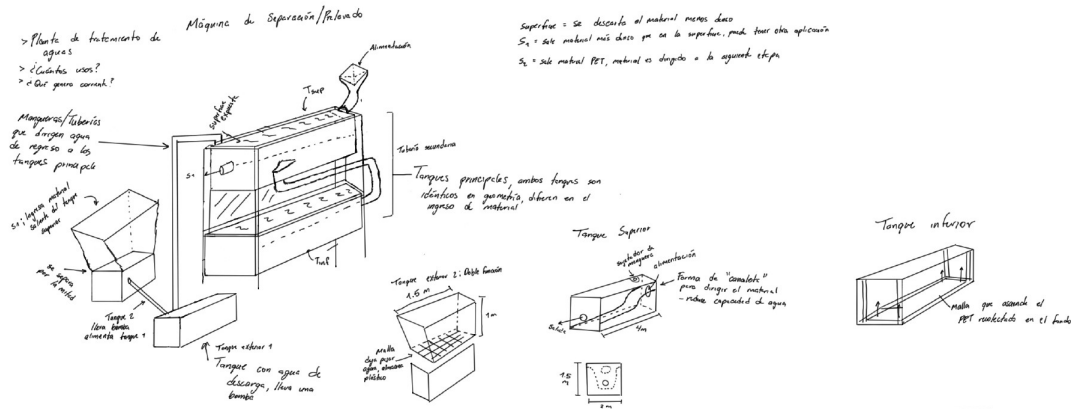
## 6.4. Diseños preliminares - Separadora por densidades

Luego de realizar una investigación sobre los equipos disponibles en cuanto a tanques separadores utilizados en la industria, se realizó un boceto preliminar de la máquina separadora mostrado en la Figura 5. En la selección del diseño de la separadora se consideraron diseños existentes y el funcionamiento de ellos, realizando iteraciones para poder obtener el diseño final. El diseño final consiste de dos tanques principales que toman la función de separar el material por su densidad. El principio del funcionamiento de la máquina depende de la separación del plástico sumergido en agua. Dada la diferencia de densidad entre el plástico convencional y el PET, el PET se separa de los otros tipos de plásticos HDPE, PP y PS. Lo que se busca con la máquina es que cualquier otro tipo de plástico que no sea PET quede en la superficie y es considerado como material descartable mientras que todo el material que quede en el fondo de los tanques es considerado como PET. La máquina también contiene una segunda etapa en la cual se repite el proceso de separación para asegurar que el material ingresado a la máquina separe el PET de otros tipos de plástico.

El boceto mostrado en la Figura 5 contiene todo el sistema de la separadora de material por medio de su densidad. El tanque superior está equipado con una salida en el extremo opuesto al punto de alimentación, lo que permite desechar cualquier material de menor densidad. Además, el tanque superior cuenta con una parte superior expuesta que permite a los operadores recoger cualquier material flotante y desecharlo. Así mismo, el tanque superior cuenta con una salida que dirige el material descartable hacia un contenedor externo de dos partes. Dicho contenedor cuenta de dos mitades, en la cual la inferior retiene el agua con

el que salió el material del tanque y el material descartable. Este tanque doble almacena el material descartable y la mitad superior puede ser transportada con el material que no será utilizado. La geometría de los tanques centrales difiere, ya que el tanque superior tiene una forma similar a la de una canaleta para conducir el material a lo largo del tanque. En esta geometría, también se encuentra una salida cerca del fondo del tanque en uno de sus lados, que se conecta con el tanque inferior mediante tuberías para redirigir el material más denso hacia abajo.

Figura 5: Boceto realizado de la máquina separadora por densidad. El boceto contiene el diseño de ambos tanques y la manera en la que el material va a circular por este.



Fuente: Elaboración propia.

En el tanque de salida se ha instalado una rejilla en el fondo para facilitar la recolección del tereftalato de polietileno (PET) que se acumula durante el proceso de separación. Una vez que se ha acumulado una capa completa de PET, un sistema mecánico permite que un operador eleve la rejilla y retire el material recolectado.

Para compensar el arrastre del material en el sistema y asegurar un flujo constante, se han incorporado tres tuberías de alimentación y tres tuberías de transferencia que conectan el primer tanque con el segundo tanque de la máquina. El agua utilizada en el proceso se recircula a través de un sistema de bombeo, donde una bomba extrae el agua del segundo tanque y la reenvía al primer tanque. Esta recirculación garantiza que el sistema mantenga un nivel constante de agua, minimizando el desperdicio y asegurando que la operación.

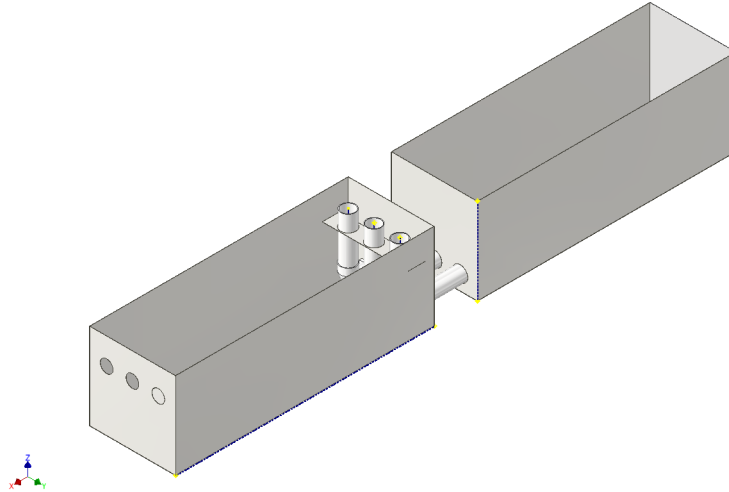
Para controlar el nivel de agua en los tanques, se puede instalar sensores de nivel que activan y desactivan la bomba según los límites definidos. Estos sensores aseguran que los tanques no se rebalsen ni se queden sin suficiente agua durante el proceso de separación. El uso de estos controladores de nivel garantiza el funcionamiento del sistema y la integridad de la operación, evitando interrupciones y pérdidas de agua innecesarias.

## 6.5. Diseño seleccionado - Separadora

Después de iterar el diseño y evaluar su viabilidad en términos de presupuesto, espacio y materiales, se optó por una versión más sencilla de la separadora por densidades, eliminando

la necesidad de estructuras de soporte. El diseño final reduce el número de tanques de cuatro a dos, simplificando su forma para optimizar el transporte del material entre ellos. Estos dos tanques permiten un mayor tiempo de separación, donde el material útil se sedimenta en el fondo y el material descartable flota en la superficie. Ambos tanques están alineados para facilitar la recirculación del agua con una bomba, y el sistema opera a temperatura ambiente, minimizando el riesgo de pérdida de agua por evaporación.

Figura 6: Diseño seleccionado de la separadora por densidades, imagen utilizada por cortesía de Autodesk Inventor®



*Fuente:* Elaboración propia.

Una vez realizado el boceto de la máquina, se procedió a generar el ensamblaje de la separadora en el software *Autodesk Inventor®*, como se muestra en las Figura 6. Se decidió que no sería necesaria una estructura de soporte para los tanques, ya que estos serán colocados directamente sobre el suelo, evitando la necesidad de traslado una vez se haya seleccionado su ubicación definitiva.

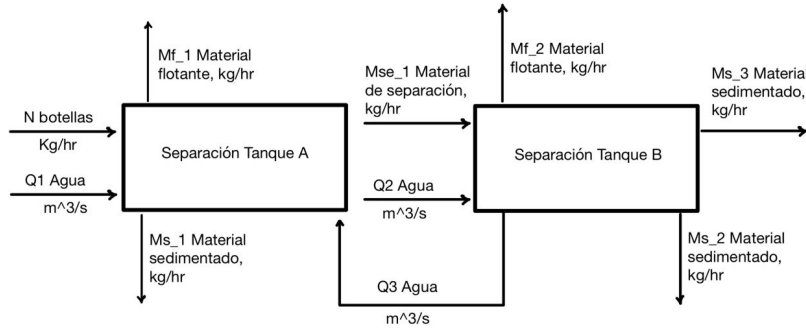
## 6.6. Diagrama de proceso - Separadora por densidades

Los diagramas de proceso son una representación gráfica de los pasos que se siguen para completar una tarea o alcanzar un objetivo. Para la máquina separadora por densidades se detalla la secuencia de pasos que permiten la separación del PET de otros polímeros. La Figura 7 presenta el diagrama de proceso de la máquina.

El proceso inicia con el llenado inicial de los tanques al nivel operativo, luego se da la alimentación del material al tanque inicial, en el cual se da la primera etapa de separación. Luego, por medio de tuberías de PVC, el material que queda en la superficie del tanque inicial es transportado hacia el segundo tanque, donde se da la segunda etapa de separación. La separación de los materiales se produce en función de sus densidades, permitiendo que los materiales de menor densidad floten mientras que los de mayor densidad se sedimenten. En esta aplicación, todos los polímeros que quedan en la superficie son considerados como

material descartable. Finalmente tras descartar el material, el PET sedimentado en el fondo de los tanques es extraído para su posterior tratamiento en la línea de reciclaje.

Figura 7: Diagrama de proceso de la máquina separadora por densidades

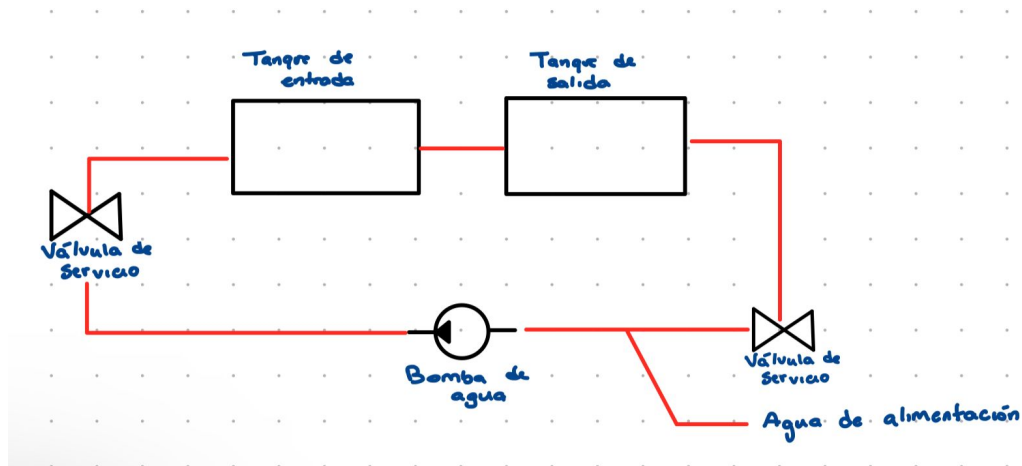


Fuente: Elaboración propia.

## 6.7. Equipos auxiliares - Separadora por densidades

El diseño de la máquina separadora incorpora válvulas de servicio estratégicamente ubicadas para interrumpir el flujo de agua entre los tanques de separación y los demás componentes del sistema. Se ha colocado una válvula en la línea de suministro de agua hacia el tanque de entrada, y otra en el punto de extracción o succión del agua hacia la bomba. La inclusión de estas válvulas permite realizar intervenciones de mantenimiento y ajustes en los componentes sin la necesidad de drenar el agua de trabajo, lo que influye en la operación al reducir tiempos muertos y facilita el acceso directo a la bomba. El esquema mostrado en la Figura 8 muestra la instalación de los componentes para comprender su funcionamiento.

Figura 8: Diagrama esquemático - Separadora por densidades

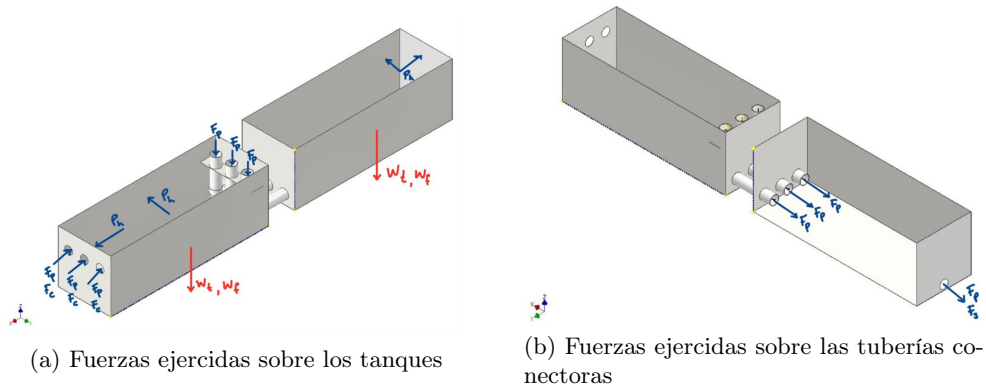


Fuente: Elaboración propia.



los componentes.

Figura 10: Diagramas de cuerpo libre del sistema de separación diseñado. Imágenes utilizadas por cortesía de Autodesk Inventor®



Donde:

- $W_t$ : Peso del tanque
- $W_f$ : Peso del fluido en el tanque
- $P_h$ : Presión hidroestática
- $F_p$ : Fuerzas debidas al flujo del fluido
- $F_e$ : Fuerzas debidas al flujo del fluido en las entradas
- $F_s$ : Fuerzas debidas al flujo del fluido en la salida

A partir de los diagramas de cuerpo libre del sistema de separación por densidades, se pueden realizar los cálculos necesarios para analizar los esfuerzos generados. Las dimensiones iniciales del diseño fueron seleccionadas bajo un criterio propio, pero estas son ajustables para definir medidas óptimas que garanticen un proceso adecuado de separación del plástico dentro del sistema. En particular, las dimensiones de los tanques dependen del tiempo requerido para completar la separación del plástico y del espacio necesario para que el material pueda llevar a cabo este proceso de manera efectiva.

## 6.9. Cálculos - Máquina separadora por densidades

El diseño de esta máquina tiene como objetivo principal la separación del PET de otros polímeros, como polipropileno, poliestireno y policarbonato, entre otros. Para lograr este propósito, se debe analizar y cuantificar los principios físico-químicos que rigen la separación de materiales dentro del sistema, considerando factores como la densidad de los polímeros y las fuerzas de flotabilidad e interacción con el fluido. Se requiere, por lo tanto, determinar los mecanismos y condiciones operativas que permitirán la segregación efectiva del PET una

vez que todo el material introducido en la máquina se encuentre completamente sumergido en agua.

Para poder iniciar con los cálculos relacionados a la máquina separadora, primero se tomó como objetivo calcular el tiempo requerido para separar el PET de otros tipos de plástico tales como el polietileno, polipropileno, poliestireno o policarbonato, entre otros. Se realizó el cálculo del tiempo requerido de sumersión del PET en agua para conocer cuánto tiempo necesita para separarse de los otros materiales y para verificar que las dimensiones de los tanques permitan que el material ingresado pueda sumergirse el tiempo suficiente antes de ser evacuado del sistema.

## Separación del PET

La separación del PET de otros plásticos se basa en la diferencia de densidades, utilizando la ecuación de la fuerza de flotación:

$$F_b = \rho_{\text{agua}} \cdot V \cdot g \quad (1)$$

$$F_p = \rho_{\text{plástico}} \cdot V \cdot g \quad (2)$$

$$F_n = F_b - F_p \quad (3)$$

Donde:

- $F_b$  es la fuerza de flotación.
- $F_p$  es el peso del plástico.
- $\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$  es la densidad del agua.
- $\rho_{\text{PET}} = 1380 \text{ kg/m}^3$  es la densidad del PET.
- $\rho_{\text{PE}} = 940 \text{ kg/m}^3$  y  $\rho_{\text{PP}} = 900 \text{ kg/m}^3$  para otros plásticos.
- $V = 0.0006 \text{ m}^3$  es el volumen de la partícula.
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  es la gravedad.

**Resultados:**

- Para el PET:  $F_n = -2.24 \text{ N}$  (se hunde).
- Para el PE:  $F_n = 0.35 \text{ N}$  (flota).
- Para el PP:  $F_n = 0.59 \text{ N}$  (flota).

Estos resultados confirman que el PET se hunde en el agua, mientras que los otros polimeros flotan.

## Cálculo del diámetro característico de la botella de PET

Las botellas ingresan a la máquina en su forma original, sin ser trituradas previamente únicamente con un corte sobre el cuello de la botella. Para calcular correctamente el coeficiente de arrastre y la velocidad de sedimentación, es necesario definir el diámetro característico equivalente, el cual se basa en el volumen de la botella.

Se considera una botella de PET típica de 600 mL con una geometría aproximada a un cilindro con altura  $H_b = 0.21$  m y diámetro  $D_b = 0.07$  m.

El volumen de la botella se aproxima a:

$$V_b = \frac{\pi D_b^2 H_b}{4} \quad (4)$$

$$V_b = \frac{\pi(0.07)^2(0.21)}{4} = 0.0008 \text{ m}^3 \quad (5)$$

El diámetro característico  $d_c$  de un objeto en un fluido se define como:

$$d_c = \frac{6V_b}{A_s} \quad (6)$$

Donde  $A_s$  es el área superficial de la botella sumergida:

$$A_s = \pi D_b H_b + \frac{\pi D_b^2}{2} \quad (7)$$

$$A_s = \pi(0.07)(0.21) + \frac{\pi(0.07)^2}{2} = 0.0515 \text{ m}^2 \quad (8)$$

Sustituyendo:

$$d_c = \frac{6(0.0008)}{0.0515} = 0.0932 \text{ m} \quad (9)$$

**Resultado:** Se usará  $d_c = 0.093$  m como el diámetro característico para los cálculos de arrastre y velocidad.

## Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro fundamental en la dinámica de fluidos que permite determinar el régimen de flujo alrededor del objeto en un fluido. En este caso, su cálculo es esencial para definir si el flujo alrededor de las botellas de PET en el tanque es laminar, transicional o turbulento. Esto influye directamente en la resistencia experimentada

por el material y en su comportamiento dentro del sistema de separación. Un valor de  $Re$  demasiado alto indicaría un flujo completamente turbulento, lo que podría afectar la estabilidad del proceso de separación, mientras que un valor demasiado bajo podría no representar adecuadamente las condiciones reales de operación.

$$Re = \frac{\rho_f v d_c}{\mu} \quad (10)$$

Se asume una velocidad corregida de  $v = 0.04$  m/s para que el flujo se mantenga dentro del rango de transición. Sustituyendo los valores:

$$Re = \frac{(1000)(0.04)(0.093)}{0.001} \quad (11)$$

$$Re = 3,720 \quad (12)$$

Este valor confirma que el flujo está dentro del rango de transición ( $2000 < Re < 4000$ ), lo cual es ideal para representar la condición de arrastre del material en el fluido sin que existan efectos excesivos de turbulencia o flujo descontrolado.

## Coefficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre  $C_d$  es un factor clave para determinar la resistencia que el fluido ejerce sobre el objeto en movimiento. En este caso, su cálculo es necesario para estimar la velocidad de sedimentación del PET en el tanque. Un coeficiente de arrastre alto indicaría una mayor resistencia al movimiento del PET, lo que reduciría su velocidad de hundimiento y prolongaría su tiempo de separación. Por el contrario, un  $C_d$  bajo implicaría una menor resistencia y una velocidad de caída más rápida, lo cual podría afectar la eficiencia de separación si el material no permanece el tiempo suficiente en el tanque.

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{6}{(1 + \sqrt{Re})} + 0.4 \quad (13)$$

Sustituyendo  $Re = 3,720$ :

$$C_d = \frac{24}{3720} + \frac{6}{(1 + \sqrt{3720})} + 0.4 \quad (14)$$

$$C_d = 0.00645 + \frac{6}{61} + 0.4 \quad (15)$$

$$C_d = 0.00645 + 0.0984 + 0.4 = 0.503 \quad (16)$$

**Resultado:** Se usará  $C_d = 0.503$ .

Estos valores permiten realizar un análisis preciso de la interacción del PET con el fluido, asegurando que la separación se lleve a cabo bajo condiciones controladas y optimizadas para la eficiencia del sistema.

### Cálculo de la velocidad de sedimentación

$$v = \sqrt{\frac{4gd_c(\rho_s - \rho_f)}{3\rho_f C_d}} \quad (17)$$

Sustituyendo:

$$v = \sqrt{\frac{4 \times 9.81 \times 0.093 \times (1380 - 1000)}{3 \times 1000 \times 0.431}} \quad (18)$$

$$v = \sqrt{\frac{14.6}{1293}} \quad (19)$$

$$v = \sqrt{0.0113} \quad (20)$$

$$v = 0.106 \text{ m/s} \quad (21)$$

### Cálculo del tiempo de separación

$$t = \frac{H}{v} \quad (22)$$

Sustituyendo  $H = 0.65$  m:

$$t = \frac{0.65}{0.106} = 6.13 \text{ s} \quad (23)$$

### Validación del caudal de PET

Para garantizar la salida de PET a 150 kg/h, el flujo de botellas se define como:

$$n_{\text{botellas}} = \frac{150}{0.02} \quad (24)$$

$$n_{\text{botellas}} = 7500 \text{ botellas/h} = 2.08 \text{ botellas/s} \quad (25)$$

El volumen total de botellas por segundo es:

$$V_{\text{botellas}} = 2.08 \times 0.0008 = 0.00167 \text{ m}^3/\text{s} \quad (26)$$

El caudal de agua del sistema debe ser mayor que  $0.00167 \text{ m}^3/\text{s}$  para asegurar la separación del material.

## Volumen de operación

Una vez validadas las dimensiones del tanque, se calcula el volumen de operación, que define la cantidad de agua disponible para el proceso de separación. La ecuación general es:

$$V_{\text{tanque}} = L \times A \times H \quad (27)$$

Donde:

- $L = 2.99 \text{ m}$  (longitud del tanque).
- $A = 0.99 \text{ m}$  (ancho del tanque).
- $H = 0.99 \text{ m}$  (altura del tanque).

Sustituyendo los valores:

$$V_{\text{tanque}} = 2.96 \text{ m}^3 \quad (28)$$

Para evitar sobrellenado, se aplica un factor de llenado  $f = 0.65$ :

$$V_{\text{operación}} = 2.96 \times 0.65 = 1.92 \text{ m}^3 \quad (29)$$

Esto asegura un volumen suficiente de operación para permitir la separación del material sin riesgo de desbordamiento.

## Presión hidrostática

Para determinar las fuerzas sobre las paredes del tanque, se calcula la presión hidrostática:

$$P_{\text{hidrostática}} = \rho g H \quad (30)$$

Sustituyendo valores:

$$P_{\text{hidrostática}} = 1000 \times 9.81 \times 0.65 = 6376.5 \text{ Pa} = 0.00638 \text{ MPa} \quad (31)$$

### **Esfuerzo de presión en las paredes del tanque**

La fuerza total que actúa sobre cada pared del tanque es producto de la presión hidrostática y el área de la pared. Se hizo el análisis del esfuerzo normal debido a la presión hidrostática ejercido por el fluido de trabajo dentro de los tanques. Aunque podrían existir algunos efectos menores de flexión debido a la deformación de las paredes, el esfuerzo predominante en este caso es el esfuerzo normal generado por la presión uniforme sobre las paredes. La fuerza que actúa sobre una pared del tanque es el producto de la presión hidrostática por el área de la pared (Budynas & Nisbett, 2015). Los siguientes cálculos muestran las áreas calculadas para las distintas paredes:

$$A = \text{Largo} \times \text{Ancho} \quad (32)$$

$$A_{\text{corta}} = 1m \times 1m = 1m^2$$

$$A_{\text{larga}} = 3m \times 1m = 3m^2$$

Conociendo el área de las paredes y la presión hidrostática es posible calcular la fuerza total que actúa sobre estas.

$$F = P \times A \quad (33)$$

La fuerza total sobre una placa corta es:

$$F = 6376.5Pa \times 1m^2 = 6376.5N$$

Para una placa larga se utiliza el mismo procedimiento:

$$F = 6376.5Pa \times 3m^2 = 19,129.5N$$

El esfuerzo en las paredes del tanque se calcula dividiendo la fuerza total que actúa sobre la pared entre el área efectiva de la sección transversal de la pared. Esta fórmula se basa en los principios de la resistencia de los materiales, visto en Beer et al., 2015, sobre esfuerzos y deformaciones en elementos sometidos a cargas. El área efectiva de la sección transversal es el producto de la longitud de la pared y su espesor, en este caso se tienen dos valores de área efectiva.

$$A_{efectiva} = 1m \times 0.003175m = 0.003175m^2$$

$$A_{efectiva} = 3m \times 0.003175 = 0.009525m^2$$

Entonces, el esfuerzo total sería:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{6376.5N}{0.003175m^2} = 2.01MPa$$

$$\sigma_l = \frac{19,129.5N}{0.009525m^2} = 2.01MPa$$

El esfuerzo sobre las placas cortas y largas es de 2.01 MPa y se debe a que aunque la fuerza aplicada sobre las placas largas es mayor, el área efectiva de las placas también es mayor, resultando en el mismo esfuerzo. El esfuerzo es una cantidad local que describe la fuerza por unidad de área en un punto específico de la estructura. La presión se distribuye de manera uniforme a una profundidad fija de 0.65m, nivel de llenado de los tanques bajo criterio propio. Utilizando el mismo procedimiento, también se realizaron los cálculos para un nivel de llenado de 0.8 que, bajo criterio propio, es un escenario en el cual el funcionamiento del sistema alcanza niveles críticos de operación.

$$P_{h\ 0.8} = 1000\text{ kg/m}^3 \times 9.81\text{ m/s}^2 \times 0.8\text{ m} = 7848\text{ Pa} = 0.00785\text{ MPa}$$

Los valores de área efectiva siguen siendo los mismos, pero dado el cambio del valor de la presión hidrostática según el nivel de llenado, los valores de fuerza y esfuerzo total calculados cambian.

$$F = 7848 \times 1m^2 = 7848N$$

$$F = 7848 \times 3m^2 = 23,544N$$

$$\sigma_c = \frac{7848N}{0.003175m^2} = 2.47MPa$$

$$\sigma_l = \frac{23,544N}{0.009525m^2} = 2.47MPa$$

## Velocidad del plástico

Para simplificar el cálculo, se supuso que cada botella de PET tiene una masa promedio de 20 gramos (Plásticos, 2023). Dado que se requiere transportar 150 kg de botellas por

hora, es posible determinar el número de botellas transportadas por segundo partiendo de su masa.

$$\dot{m}_{PET} = \frac{150kg}{3600s} = 0.0417kg/s$$

$$n_{botellas} = \frac{\dot{m}_{PET}}{0.02kg/botella} \approx 2botellas/s$$

### Volumen del flujo de botellas

El volumen de una botella de 600 mL es de  $0.0006m^3$ . El volumen total de las botellas transportadas por segundo se obtiene multiplicando el número de botellas por el volumen de cada una:

$$V_{botellas} = n_{botellas} \times V_{botella} \tag{34}$$

$$V_{botellas} = 2botellas/s \times 0.0006m^3 = 0.0012m^3/s$$

### Selección de bomba

Para transportar el material, se selecciona una bomba basada en el área de las tuberías y el caudal volumétrico.

### Área de las tuberías

El sistema utiliza tres tuberías de 3.5 in de diámetro, por lo que convertimos el diámetro a metros:

$$D = 3.5 \text{ in} = 0.0889 \text{ m}$$

El área transversal de una tubería es calculada como:

$$A_{tubería} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.0889 \text{ m})^2}{4} = 0.0062 \text{ m}^2$$

El área total de las tres tuberías de alimentación es:

$$A_{total} = 3 \times A_{tubería} = 3 \times 0.0062 \text{ m}^2 = 0.0186 \text{ m}^2$$

El valor de tiempo obtenido anteriormente permite que una vez ingresado el material al sistema, el PET alcance el fondo del tanque previo a su evacuación. Para un diseño completo, es necesario verificar que la longitud del tanque sea suficiente para que el PET se desplace horizontalmente dentro del tiempo de residencia sin ser evacuado antes de completar su separación. El siguiente cálculo se basa en la velocidad horizontal del flujo de agua, la velocidad de caída del PET y la distancia que el material debe recorrer antes de separarse.

### 6.9.1. Cálculo del tiempo de residencia

El **tiempo de residencia** es un parámetro clave en el diseño de la máquina separadora por densidades, ya que determina cuánto tiempo el PET y otros plásticos permanecerán en el sistema antes de salir del tanque. Este tiempo debe ser suficiente para garantizar la separación efectiva de los materiales de distinta densidad.

El cálculo del tiempo de residencia permite validar que la longitud de los tanques y el flujo de agua sean adecuados para lograr la separación. Se define como la relación entre el **volumen total del sistema** y el **caudal volumétrico de agua** que lo atraviesa:

$$t_r = \frac{V_{\text{total}}}{Q_{\text{agua}}} \quad (35)$$

Donde:

- $t_r$  es el **tiempo de residencia** (s),
- $V_{\text{total}}$  es el **volumen total del sistema** (m<sup>3</sup>),
- $Q_{\text{agua}}$  es el **caudal volumétrico de agua** (m<sup>3</sup>/s).

### Cálculo del volumen total del sistema

El sistema está compuesto por dos tanques conectados por tuberías, cada uno con las siguientes dimensiones:

- Largo:  $L = 2.99$  m
- Ancho:  $W = 0.99$  m
- Altura de llenado:  $H = 0.65$  m

El volumen de un solo tanque se calcula como:

$$V_{\text{tanque}} = L \times W \times H \quad (36)$$

$$V_{\text{tanque}} = 2.99 \times 0.99 \times 0.65 = 1.92 \text{ m}^3 \quad (37)$$

Dado que el sistema cuenta con dos tanques idénticos:

$$V_{\text{total}} = 2 \times V_{\text{tanque}} = 2 \times 1.92 = 3.84 \text{ m}^3 \quad (38)$$

### Cálculo del caudal volumétrico de agua

El caudal volumétrico de agua en el sistema ha sido determinado previamente como:

$$Q_{\text{agua}} = 0.028 \text{ m}^3/\text{s} \quad (39)$$

### Cálculo del tiempo de residencia

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$t_r = \frac{3.84}{0.028} \quad (40)$$

$$t_r = 137.14 \text{ s} \quad (41)$$

Esto indica que el \*\*PET permanecerá en el sistema aproximadamente 137.14 segundos\*\*, lo que es suficiente para permitir su separación eficiente en el agua.

### Validación del tiempo de separación del PET

Para garantizar que el tiempo de residencia sea adecuado, se compara con el tiempo requerido para que el PET alcance la separación deseada. La separación de plásticos en agua depende de su densidad y velocidad de caída relativa al flujo (Clayton T. Crowe, 2011).

La velocidad de caída del PET en agua a 25°C se estima en  $v_{\text{PET}} = 0.02 \text{ m/s}$  (Mark A. Browne, 2018). La distancia vertical recorrida en el tiempo de residencia se calcula como:

$$h_{\text{caída}} = v_{\text{PET}} \times t_r \quad (42)$$

Sustituyendo valores:

$$h_{\text{caída}} = 0.02 \times 137.14 = 2.74 \text{ m} \quad (43)$$

Dado que la altura del tanque es  $H = 0.65 \text{ m}$ , la distancia de caída indica que el PET tendrá tiempo suficiente para sedimentarse antes de alcanzar la salida del sistema.

## Pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción se calculan usando la ecuación de Darcy-Weisbach (White, 2011). Para poder calcular la pérdida se debe calcular primero la longitud equivalente de las tuberías y accesorios del sistema. El método de longitud equivalente convierte la pérdida de presión causada por los accesorios en una longitud equivalente de la tubería recta (Munson et al., 2013).

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (44)$$

Donde:

- $h_f$  es la pérdida de carga por fricción en metros
- $f$  es el factor de fricción de Darcy calculado
- $D$  es el diámetro de la tubería en metros
- $v$  es la velocidad del fluido en la tubería (m/s)
- $g$  es la aceleración debido a la gravedad

El único valor restante por calcular es el factor de fricción, que es calculado utilizando la ecuación de Colebrook-White. Dado que la ecuación es implícita y requiere iteración, se utiliza una aproximación aceptada como lo es la ecuación Swamee-Jain, adecuada para flujo turbulento en tuberías rugosas:

$$f = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)\right)^2} \quad (45)$$

donde:

- $\epsilon$  es la *rugosidad absoluta de la tubería* (en metros).
- $Re$  es el *número de Reynolds*, que indica el tipo de flujo dentro de la tubería.

Para las tuberías de PVC, la rugosidad absoluta es aproximadamente  $\epsilon = 0.0015$  mm. Este valor se obtiene de tablas estándar de propiedades de materiales (Cengel & Boles, 2015).

## Longitud equivalente

En sistemas de tuberías, los accesorios como codos y válvulas introducen pérdidas de carga adicionales. Para simplificar el cálculo, estas pérdidas se consideran en términos de una *longitud equivalente*, que suma la longitud física de la tubería más la longitud adicional que representan los accesorios:

$$L_{total} = L_{tubería} + L_{equivalente} \quad (46)$$

El método de longitud equivalente consiste en asignar una longitud de tubería cilíndrica que se supone produce en el sistema una pérdida de carga de valores similares para los componentes, para codos usualmente el valor parte de un factor de 30 L/D y para válvulas de servicio completamente abiertas es de 8 L/D (Toolbox, 2023).

$$L_{codos} = 30 \times 3.5 = 105in = 2.67m$$

$$L_{v.ser} = 8 \times 3.5 = 28in = 0.71m$$

Utilizando los valores de longitud equivalente con la longitud de las tuberías reales, se hizo la sumatoria de las longitudes para obtener la longitud total:

$$L_{total} = 10m + 2.67 + 0.71 \approx 13.5m$$

Tras obtener el valor del factor de fricción y la longitud equivalente, se regresa al uso de la ecuación Darcy-Weisbach para calcular la pérdida por fricción:

$$h_f = 0.062 \times \frac{13.5m}{0.0889m} \times \frac{0.0268m/s}{2 \times 9.81m/s^2} \approx 0.0129m$$

### Altura dinámica total (TDH)

La altura total dinámica es la suma de la altura estática o geométrica a vencer y las pérdidas de carga de la instalación. En el caso de esta aplicación, la altura total dinámica sería la pérdida de carga por los componentes que ya fue calculada y la altura de bombeo del tanque. Bajo criterio propio, se seleccionó una altura de alimentación de agua del tanque a  $0.7m$  de la altura total de  $1m$ .

$$TDH = H + h_f = 0.7 + 0.0129 = 0.713m$$

Finalmente, el cálculo para la potencia de la bomba es:

$$P_{bomba} = \frac{1000 \times 9.81 \times 0.0281 \times 0.713}{0.7} = 280.78 \text{ W}$$

### Conversión de la potencia a caballos de fuerza

Finalmente, se convierte la potencia obtenida a caballos de fuerza (hp), que es la unidad comúnmente utilizada para especificar la potencia de las bombas:

$$P_{\text{bomba}}(\text{hp}) = \frac{280.78 \text{ W}}{745.7} = 0.377 \text{ hp}$$

Al obtener el valor de la potencia, se realizó una investigación sobre posibles proveedores para la bomba debido a que no es el único parámetro a utilizar para la selección. Dentro de los criterios a considerar aparte de la potencia está el caudal requerido, altura manométrica total, el tipo de bomba, régimen de operación y la compatibilidad con el slurry. La bomba seleccionada fue la bomba centrífuga con código FTB2CI, disponible en el mercado de Guatemala. Esta bomba está diseñada para manejar lodos y líquidos con sólidos en suspensión, lo cual se adapta adecuadamente a la mezcla de agua y plástico. Las bombas de esta serie están hechas de hierro colado, son autocebantes y ofrecen facilidad de operación. El modelo representado en la Figura 11 muestra la bomba seleccionada. Se seleccionó un modelo de bomba de *2HP* para cumplir con la potencia requerida y un margen considerable adicional en el caso el sistema requiera más potencia.

Figura 11: Bomba 2.0 HP FPS FTB2CI



Fuente: Guatemala, 2023

## Factor de seguridad

El factor de seguridad es una medida de cuánto puede soportar el material antes de fallar. A continuación se presentan los cálculos utilizando tanto el criterio de Ullman como el criterio de Soderberg para el acero inoxidable (SAE 304) y PVC.

## Factor de seguridad según el criterio de Ullman

El criterio de Ullman se utiliza para ajustar el factor de seguridad base en función de diferentes contribuciones, lo que asegura que los materiales del ensamblaje puedan resistir los esfuerzos a los que están sometidos.

$$n = n_{\text{material}} \times n_{\text{esfuerzo}} \times n_{\text{geometría}} \times n_{\text{análisis de fallas}} \times n_{\text{confiabilidad}} \quad (47)$$

Utilizando los valores indicados para la máquina:

- $n_{\text{material}} = 1.2$
- $n_{\text{esfuerzo}} = 1.1$
- $n_{\text{geometría}} = 1.1$
- $n_{\text{análisis de fallas}} = 1.1$
- $n_{\text{confiabilidad}} = 1.2$

Sustituyendo en la ecuación:

$$n = 1.2 \times 1.1 \times 1.1 \times 1.1 \times 1.2 = 1.92$$

## Factor de seguridad para acero inoxidable (SAE 304) - Criterio Soderberg

Para el acero inoxidable, se utilizó el criterio de Soderberg, el cual es aplicable a materiales metálicos bajo cargas cíclicas. Este criterio establece que la vida a fatiga de un componente depende del esfuerzo de trabajo como de la resistencia a la fatiga del material (Budynas & Nisbett, 2015). En este caso, el acero es expuesto a esfuerzos repetidos debido al flujo constante de agua y material plástico por lo que el criterio Soderberg ofrece una aproximación aceptable del factor de seguridad necesario para evitar fallos por fatiga. Este criterio compara la tensión máxima con el límite de fluencia del material, permitiendo evaluar el margen de seguridad en estas condiciones (Fox et al., 2015; Munson et al., 2013).

El criterio de Soderberg se utiliza para calcular el factor de seguridad considerando cargas cíclicas. Se consideran cargas cíclicas debido a que las condiciones operativas de la máquina son variables. Esto se refiere a que no se conoce con exactitud el número de botellas ingresadas, o con exactitud que el nivel del agua esté al nivel deseado por lo que no es adecuado asumir que la carga sobre las paredes del tanque sea constante durante el proceso del plástico. La ecuación general es:

$$\frac{\sigma_{\text{máxima}}}{\sigma_{\text{fluencia}}} + \frac{\sigma_{\text{alternante}}}{\sigma_{\text{fatiga}}} = \frac{1}{FS} \quad (48)$$

Donde:

- $\sigma_{\text{máxima}}$  es la tensión media esperada en el material.
- $\sigma_{\text{alternante}}$  es la tensión alternante (cíclica) esperada.
- $\sigma_{\text{fluencia}}$  es el límite de fluencia del material.
- $\sigma_{\text{fatiga}}$  es el límite de fatiga del material.
- $FS$  es el factor de seguridad.

La tensión alternante esperada se define como la mitad de la diferencia entre la tensión máxima y la mínima en el ciclo de carga, en este caso la tensión parte del esfuerzo de presión en las paredes del tanque. La tensión mínima sería igual a cero porque la carga mínima es cuando no hay nada presente dentro de los tanques.

### Condiciones máximas

Bajo las condiciones máximas, donde se espera una tensión media  $\sigma_{\text{máxima}} = 2.47$  MPa y una tensión alternante  $\sigma_{\text{alternante}} = 1.235$  MPa:

$$\frac{\sigma_{\text{máxima}}}{\sigma_{\text{fluencia}}} + \frac{\sigma_{\text{alternante}}}{\sigma_{\text{fatiga}}} = \frac{1}{FS}$$

Sustituyendo los valores  $\sigma_{\text{fluencia}} = 505$  MPa y  $\sigma_{\text{fatiga}} = 215$  MPa:

$$\frac{2.47}{505} + \frac{1.235}{215} = \frac{1}{FS}$$

Se calcula cada término:

$$0.00489 + 0.00574 = \frac{1}{FS}$$

Sumando los términos:

$$0.0106 = \frac{1}{FS} \Rightarrow FS = \frac{1}{0.0106} = 94.03$$

Por lo tanto, el factor de seguridad bajo condiciones máximas es  $FS = 94.03$ .

### Condiciones operativas

Bajo condiciones operativas, donde se espera una tensión media  $\sigma_{\text{máxima}} = 2.01$  MPa y una tensión alternante  $\sigma_{\text{alternante}} = 1.005$  MPa:

$$\frac{\sigma_{\text{máxima}}}{\sigma_{\text{fluencia}}} + \frac{\sigma_{\text{alternante}}}{\sigma_{\text{fatiga}}} = \frac{1}{FS}$$

Sustituyendo los valores:

$$\frac{2.01}{505} + \frac{1.005}{215} = \frac{1}{FS}$$

Calculamos cada término:

$$0.00398 + 0.00467 = \frac{1}{FS}$$

Sumando los términos:

$$0.00865 = \frac{1}{FS} \Rightarrow FS = \frac{1}{0.00865} = 115.54$$

Por lo tanto, el factor de seguridad bajo condiciones operativas es  $FS = 115.54$ .

## Cálculo del factor de seguridad para PVC

El análisis del **factor de seguridad** es esencial para garantizar que las tuberías de PVC que conectan los tanques sean capaces de soportar las **cargas internas generadas por la presión del fluido sin fallar estructuralmente**. Este cálculo se basa en normativas establecidas, como las de *ASTM* e *ISO*, que especifican la resistencia del material bajo distintas condiciones de operación (ASTM International, 2013; International Organization for Standardization, 2018).

## Cálculo del esfuerzo de diseño hidrostático ( $S$ )

El **esfuerzo de diseño hidrostático** es la resistencia del PVC ante presiones internas prolongadas y se obtiene dividiendo la **Base de Diseño Hidrostático (HDB)** entre el **factor de seguridad ( $F$ )** recomendado:

$$S = \frac{\text{HDB}}{F} \tag{49}$$

Donde:

- HDB = 4000 psi es la **resistencia hidrostática a largo plazo del PVC**, según normativas ASTM (ASTM International, 2013).
- $F = 2.0$  es el **factor de seguridad recomendado** para tuberías de PVC.

Sustituyendo los valores:

$$S = \frac{4000}{2} = 2000 \text{ psi} \quad (50)$$

Esto indica que el **PVC puede operar de manera segura con un esfuerzo máximo de 2000 psi** antes de considerarse en riesgo de falla.

### Cálculo de la clasificación de presión ( $P$ )

La presión máxima de trabajo que puede soportar la tubería se determina con la ecuación ISO para la clasificación de presión:

$$P = \frac{2S}{DR - 1} \quad (51)$$

Donde:

- DR es la relación de dimensión de la tubería, definida como:

$$DR = \frac{\text{Diámetro Exterior}}{\text{Espesor de Pared}} \quad (52)$$

Para este análisis, se usa un diámetro exterior de 88.9 mm (3.5 in) y un espesor de pared de 3.175 mm.

$$DR = \frac{88.9}{3.175} = 28 \quad (53)$$

Sustituyendo en la ecuación de presión:

$$P = \frac{2(2000)}{28 - 1} \quad (54)$$

$$P = \frac{4000}{27} = 148.15 \text{ psi} \quad (55)$$

Convirtiendo a MPa:

$$P = 1.02 \text{ MPa} \quad (56)$$

Este valor representa la presión máxima que la tubería puede soportar sin riesgo de falla (International Organization for Standardization, 2018).

Por lo tanto, el factor de seguridad para el PVC es  $FS = 13.49$ .

## Consideraciones adicionales

- **Temperatura de operación:** El PVC pierde resistencia a temperaturas superiores a 23°C, por lo que se debe aplicar un **factor de corrección** si la operación ocurre en temperaturas elevadas (ASTM International, 2013).
- **Golpe de ariete:** Se debe considerar el efecto de golpe de ariete para evitar sobrecargas súbitas de presión que podrían debilitar la tubería a largo plazo (Perry & Green, 1997).

Cuadro 4: Resultados del cálculo del factor de seguridad para PVC

Parámetro	Valor calculado
Esfuerzo de Diseño Hidrostático $S$	2000 psi
Relación de Dimensión $DR$	28
Presión Máxima de Trabajo $P$	148.15 psi (1.02 MPa)

El cálculo confirma que la tubería de PVC es segura para operar bajo la presión del sistema. No obstante, se deben considerar factores ambientales y operativos como temperatura y golpes de ariete, para garantizar la integridad estructural del sistema a largo plazo.

## Validación del volumen del tanque

Para confirmar que el volumen del tanque sea suficiente, se recalcula el volumen mínimo requerido utilizando la ecuación:

$$V_{\text{requerido}} = Q_{\text{agua}} \times t_{\text{PET}} \quad (57)$$

Dado que el caudal volumétrico del sistema es:

$$Q_{\text{agua}} = 0.028 \text{ m}^3/\text{s} \quad (58)$$

Sustituyendo los valores:

$$V_{\text{requerido}} = 0.028 \times 2.74 = 0.07672 \text{ m}^3 \quad (59)$$

Dado que el **\*\*volumen real del tanque es 1.92 m<sup>3</sup> por tanque y hay dos tanques\*\***, el volumen disponible es:

$$V_{\text{total}} = 2 \times 1.92 = 3.84 \text{ m}^3 \quad (60)$$

Comparando:

$$V_{\text{total}} \gg V_{\text{requerido}} \quad (61)$$

Lo que confirma que el tamaño del tanque **\*\*es más que suficiente\*\*** para garantizar la separación del material.

## 6.10. Simulaciones en ANSYS Workbench® y Autodesk Inventor® - Separadora por densidades

En esta sección se presentan los ensayos propuestos para el sistema de separación por densidades. Los ensayos tienen como objetivo validar la capacidad de estos sistemas para operar de manera segura y eficiente bajo condiciones de operación realistas. El sistema fue evaluado a través de análisis estáticos y dinámicos para garantizar su integridad estructural y eficiencia operativa.

El sistema está diseñado para separar materiales plásticos a una tasa de 150 kg/h. Para asegurar que el sistema pueda manejar esta tasa de separación sin comprometer la seguridad o eficiencia operativa, se realizaron varios análisis estructural y de flujo para validar la resistencia de los tanques y la estabilidad del flujo de agua, así como análisis de componentes específicos para evaluar su comportamiento.

### Ensayos realizados - Separadora por densidades

#### Ensayo estático estructural

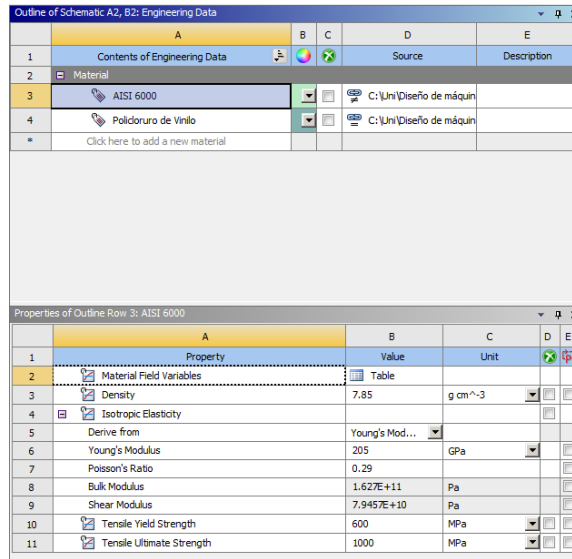
#### Preparación y configuración del modelo - Separadora

Para los ensayos estructurales de la separadora por densidades, se empleó la herramienta de simulación *Static Structural* de Ansys Workbench. Se comenzó con la preparación del modelo CAD en Autodesk Inventor, donde se diseñaron los componentes de la separadora con dimensiones y detalles que representan su estructura física en la realidad. Posteriormente, se importó este modelo a Ansys Workbench para el análisis.

#### Asignación de materiales:

La correcta asignación de materiales es fundamental para una simulación precisa. Se utilizó la base de datos de materiales de Ansys Workbench para asignar propiedades específicas, como el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y la densidad, a cada componente del modelo. Se verificó que los materiales seleccionados correspondieran a los usados en la máquina real, utilizando acero SAE 304 para el cuerpo de los tanques y policloruro de vinilo para las tuberías, asegurando que el análisis refleje condiciones de operación. La Figura 12 muestra el ingreso de materiales en *Engineering Data*, ejemplificando los valores asignados al material.

Figura 12: Ingreso de materiales en Engineering Data, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc



### Revisión y configuración de contactos:

Una vez importado el modelo, se revisaron los contactos generados automáticamente entre las distintas partes de la separadora. Dado que el software puede no identificar todos los contactos críticos, se configuraron manualmente aquellas áreas que requerían un contacto específico, como superficies que interactúan bajo carga o en condiciones de fricción. Esta revisión garantizó una transferencia de carga adecuada entre los componentes.

Figura 13: Modelo importado en Ansys Workbench con materiales asignados y contactos verificados, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

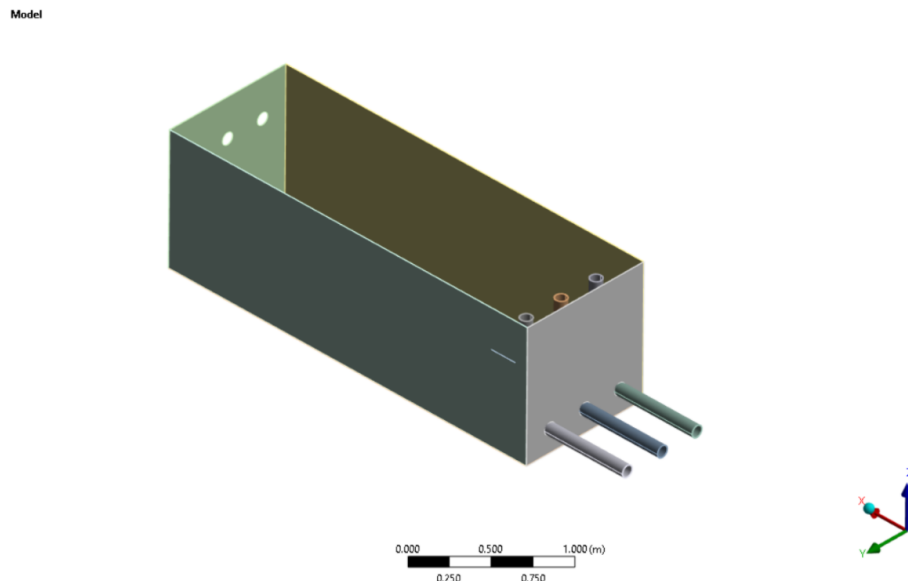
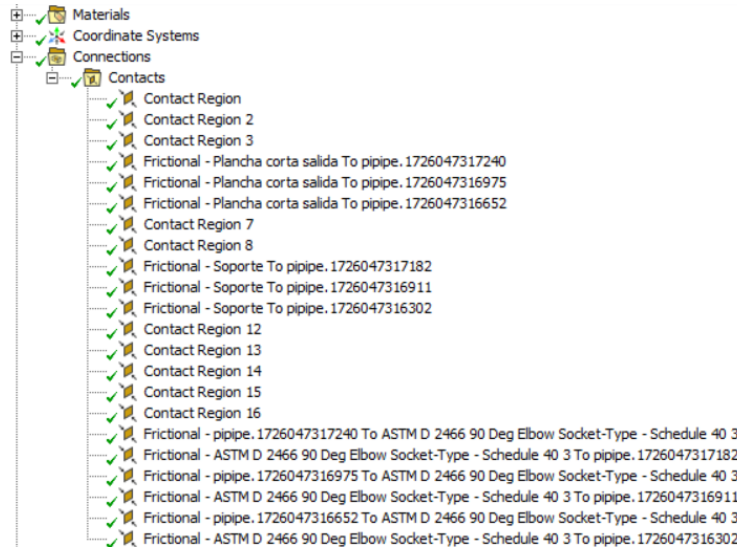


Figura 14: Listado de contactos asignados a la simulación, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc

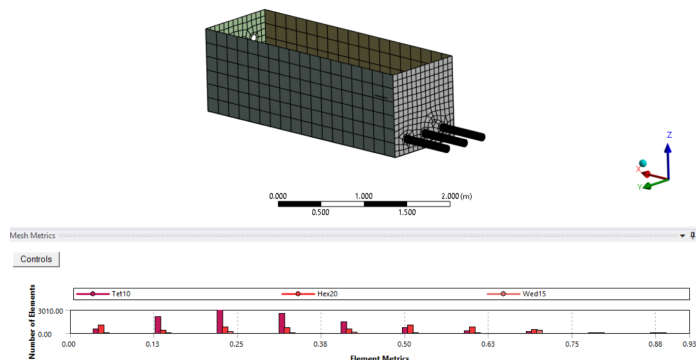


## Generación del mallado

El proceso de mallado es un paso esencial para la simulación. Se generó un mallado tridimensional utilizando elementos tetraédricos para capturar la geometría compleja del modelo. Se realizó un refinamiento del mallado en áreas críticas, como puntos de contacto y zonas con cambios bruscos de geometría, para asegurar una mayor precisión en la representación de esfuerzos y deformaciones.

Se utilizó un enfoque de mallado adaptativo, donde se compararon diferentes tamaños de elemento hasta obtener un equilibrio óptimo entre la precisión de los resultados y la eficiencia computacional.

Figura 15: Mallado y métrica del mallado para el modelo en Ansys Workbench, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

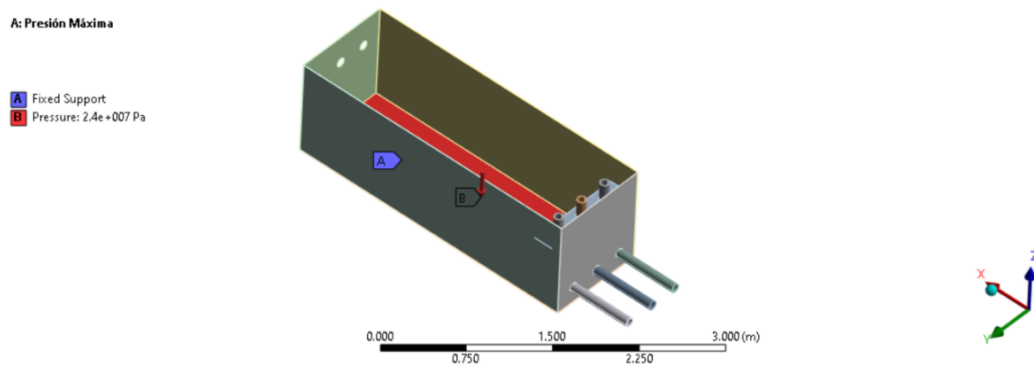


## Configuración de la simulación

Para la configuración de la simulación, se aplicaron las condiciones de contorno que replican las restricciones físicas presentes durante la operación de la máquina. Se definió un *Fixed Support* en la base y puntos de anclaje de la separadora, emulando cómo estaría fija en su entorno operativo.

Se aplicaron cargas de presión sobre las superficies internas de los tanques, simulando el flujo de agua y el impacto del material que está siendo separado. Se realizaron dos simulaciones: una utilizando la presión máxima de operación y otra con la presión nominal para evaluar el comportamiento en diferentes escenarios.

Figura 16: Configuración de la simulación con soporte fijo y aplicación de presión en las superficies internas, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

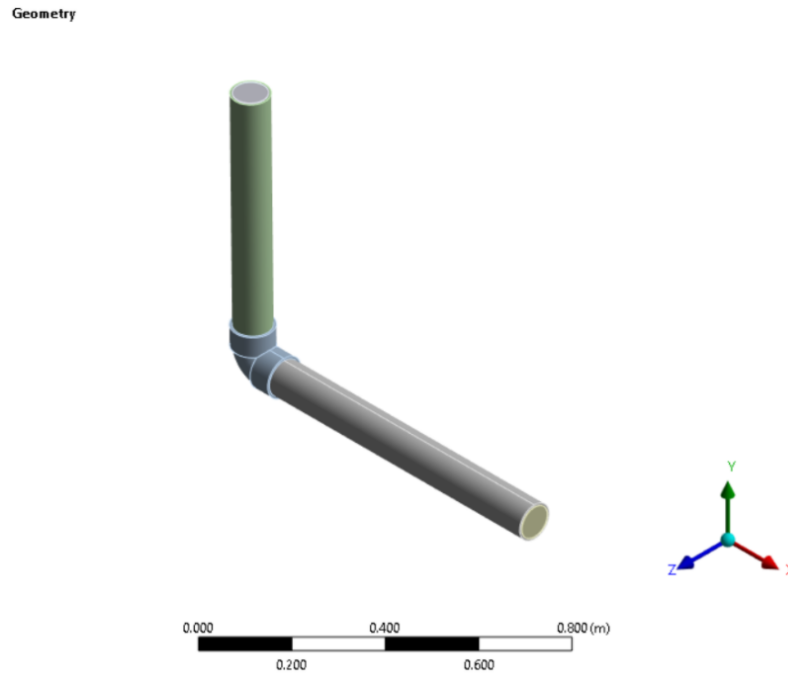


## Simulación de flujo en tuberías

### Preparación y configuración del modelo

Para realizar la simulación del flujo de fluido dentro de las tuberías, se utilizó Ansys Workbench como herramienta de simulación. El primer paso fue la creación y preparación del modelo geométrico en un software CAD y luego se importó a Ansys Workbench. Una vez importado, el modelo se verifica para asegurar la integridad geométrica y las dimensiones correctas, como se muestra en la siguiente figura:

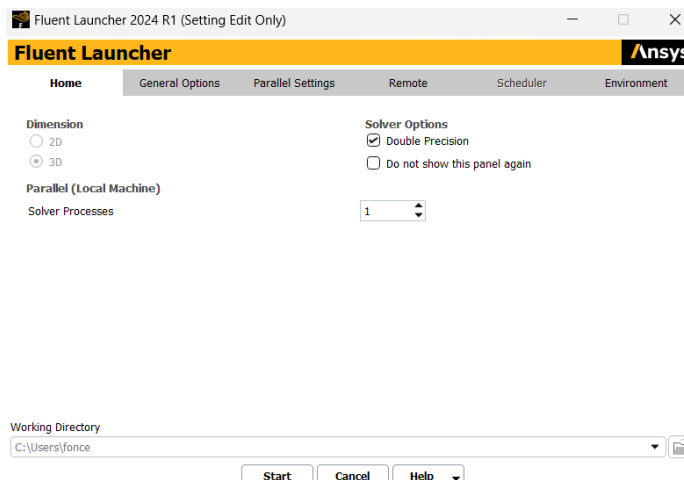
Figura 17: Modelo importado en Ansys Workbench para el análisis de flujo en tuberías, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Inicio de Ansys Fluent

Una vez que se ha importado y verificado el modelo en Ansys Workbench, se procede a iniciar Ansys Fluent para configurar la simulación de flujo. El lanzador de Fluent permite seleccionar las opciones de configuración iniciales. Es importante seleccionar la opción de "Double Precision" para asegurar mayor precisión en los cálculos. La siguiente figura muestra cómo se debe configurar el Fluent Launcher antes de iniciar la simulación:

Figura 18: Configuración del Fluent Launcher para la simulación de flujo en tuberías, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

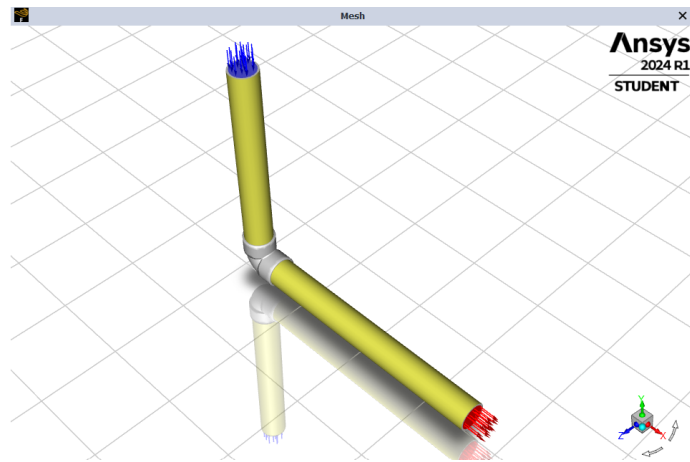


Después de configurar Fluent Launcher, se procede a abrir la simulación para definir las condiciones de contorno y otros parámetros de la simulación.

## Generación del mallado

El siguiente paso fue la generación del mallado del modelo dentro de Fluent. Se utilizó un mallado que representa con precisión el flujo a través de las tuberías. Se prestó especial atención a las áreas críticas, como las curvas de las tuberías, para capturar el comportamiento del fluido en estas regiones. En la siguiente figura se muestra el modelo mallado y abierto dentro de Fluent:

Figura 19: Modelo mallado en Ansys Fluent con las selecciones de entrada y salida, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Configuración de la simulación

Dentro de Ansys Fluent, se configuran las condiciones de contorno para definir cómo interactúa el fluido con las superficies de las tuberías:

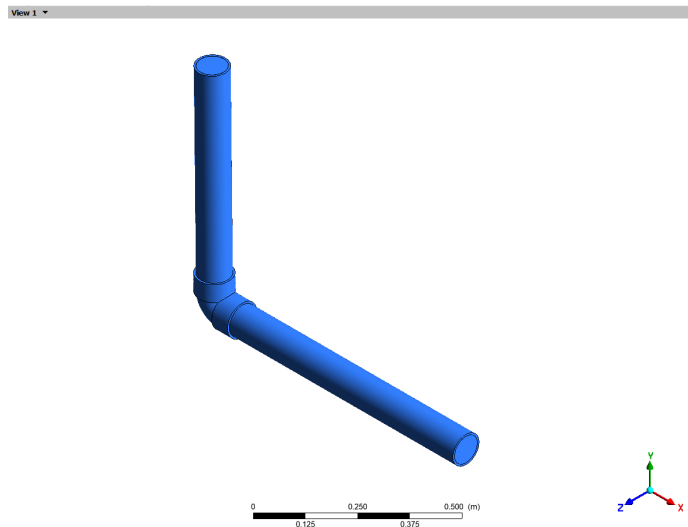
- **Inlet:** Se estableció como entrada de flujo la parte de la tubería por donde el fluido ingresa al sistema. Se especificaron condiciones de velocidad o presión para esta entrada. - **Outlet:** Se definió la salida del fluido en la tubería, permitiendo que el fluido sea transportado hacia el siguiente segmento del sistema. - **Wall:** Se configuraron las paredes internas de la tubería como superficies que interactúan con el fluido, considerándolas como límites impermeables.

En la simulación, se asignaron estas secciones nombradas para identificar fácilmente las áreas clave del modelo, como inlet, outlet y wall. Estas selecciones permitieron aplicar las condiciones de contorno de manera eficiente durante la configuración de Fluent.

## Preparación de la solución

Antes de ejecutar la simulación, se preparó la solución en Fluent definiendo los parámetros de cálculo y condiciones de inicio. En la Figura 20 se muestra la preparación del modelo antes de definir los resultados de la simulación:

Figura 20: Preparación de la solución en Fluent para la simulación de flujo, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Asignación de contornos

Durante la simulación, se configuraron distintos contornos para analizar el comportamiento del flujo en las tuberías:

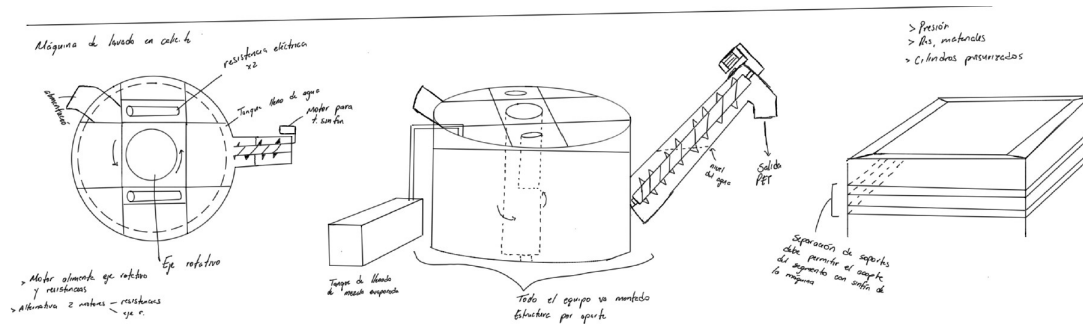
Se generó un contorno de presión para visualizar cómo se distribuye la presión a lo largo de las tuberías. Los resultados mostraron variaciones de presión, especialmente en las zonas curvas de la tubería. Para entender cómo se mueve el fluido dentro de las tuberías, se generaron líneas de corriente o streamline contour que representa la trayectoria de las partículas de fluido, observando la dirección y velocidad del flujo en diferentes regiones.

## 6.11. Diseños preliminares - Lavadora en caliente

Para el diseño de la lavadora en caliente, también se realizó una investigación sobre qué existe en el mercado y de qué manera opera este equipo. El diseño de esta maquinaria es basado en que el material de entrada y salida es tereftalato de polietileno, con la diferencia que luego de pasar por el equipo, el material estará limpio y tendrá un color blanco opaco o transparente, indicador de que el proceso fue exitoso. Para este equipo, se tuvo que considerar principalmente la presión a la cual se encuentra el tanque debido a la temperatura elevada del agua dentro de este.

El boceto mostrado en la Figura 21 muestra el modo de operación del sistema de lavado en caliente. El material triturado ingresa por el espacio abierto en la cara superior del tanque. En el centro del tanque, se encuentra un eje rotativo que genera una corriente de agua dentro del tanque y permite guiar al material triturado hacia el tornillo sin fin. En el espacio de la máquina que utiliza el tornillo sin fin, el nivel del fluido de trabajo se encuentra al mismo nivel que dentro del tanque de lavado y, conforme el material es dirigido hacia la salida, se irá removiendo una porción del fluido sobre el material. Llegando a la salida del sistema, el material seguirá húmedo, pero no se tendrá una pérdida de fluido de trabajo significativa por este medio. Se consideró la pérdida de fluido de trabajo por evaporación debido a la alta temperatura, entonces se incorporó un tanque adicional dentro del diseño que alimente el tanque central. Dentro del tanque calentado se encuentra un nivelador que funciona de la misma manera que el del sistema de separación por densidades, donde el nivelador detecta una pérdida de fluido de trabajo y tras reducir por debajo del límite determinado, se enciende la bomba del tanque adicional para adicionar más fluido de trabajo al tanque. Así mismo, el nivelador también delimita qué tan lleno estará el tanque para evitar sobrellenarlo.

Figura 21: Boceto realizado de la máquina de lavado en caliente. El boceto describe los componentes principales de la máquina.



Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño de la lavadora en caliente, se consideraron varios factores críticos para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento del proceso. Uno de los factores principales fue la estabilidad térmica del fluido de trabajo, manteniendo una temperatura de operación entre 80 y 85°C. Se evaluó la pérdida de fluido por evaporación debido a esta temperatura, por lo que se incorporó un sistema de control para mantener el nivel adecuado del líquido. Además, se tomaron medidas adicionales para asegurar que las resistencias eléctricas utilizadas para calentar la mezcla no permitieran que la temperatura del fluido de trabajo excediera los 85°C, con el fin de evitar acercarse a la temperatura de fusión del tereftalato de polietileno (240°C), el material principal a limpiar.

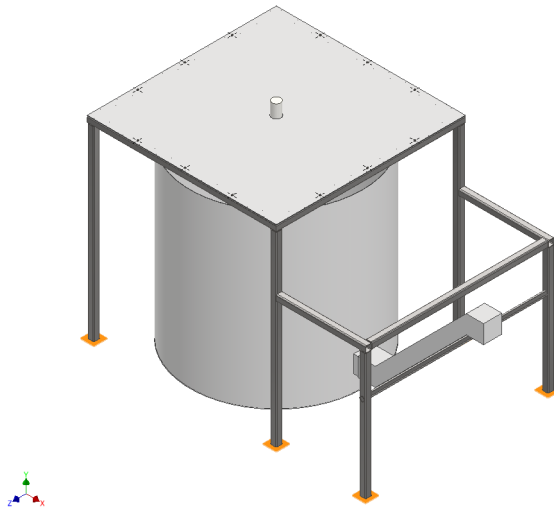
El rango de 80 a 85°C fue seleccionado porque es eficaz para la remoción de contaminantes adheridos al PET y minimiza la evaporación del agua y la soda cáustica, manteniendo la efectividad del proceso (J. A. Smith, 2017). Según (L. Smith & Jenkins, 2017) las soluciones de soda cáustica a esta temperatura logran un equilibrio óptimo entre la solubilidad de los contaminantes orgánicos y la estabilidad de la mezcla, proporcionando una limpieza eficaz sin un consumo excesivo de energía. Adicionalmente, se diseñó la estructura metálica para soportar el peso del eje central, el agitador, y el tornillo sin fin, asegurando que las cargas generadas durante la operación fueran adecuadamente soportadas. Dado que el diseño del tornillo sin fin era un componente esencial pero no directamente fabricado, se optó por buscar

proveedores de módulos de tornillo sinfín de extracción, integrando así un sistema robusto que se ajustara a los requerimientos de transporte y salida del material lavado desde el tanque central.

## 6.12. Diseño seleccionado - Lavadora en caliente

A lo largo del desarrollo de esta máquina se exploraron varios diseños para lograr una solución eficiente y viable dentro del proceso de reciclaje de PET. El diseño presentado es el resultado de un balance entre la capacidad de manejo de materiales, durabilidad de componentes y condiciones operativas. Esta máquina está concebida para disolver pegamentos y otros residuos, dejando el PET limpio y listo para su posterior procesamiento. El sistema de lavado en caliente, basado en una mezcla de soda cáustica y agua está acoplado a un tornillo sinfín que garantiza la extracción continua del material lavado, manteniendo el fluido de trabajo dentro del tanque. El funcionamiento del sistema se basa en la rotación de un eje central que genera una corriente en el fluido de trabajo, facilitando la disolución de contaminantes. El diseño ha sido realizado para asegurar que el material fluya uniformemente hacia la salida, logrando una tasa de procesamiento de 150 kg/hr. La viabilidad del diseño no solo radica en su capacidad de procesamiento, sino también en su facilidad de mantenimiento, siendo aspectos priorizados durante las etapas del desarrollo. Así como para la separadora, se utilizó el boceto realizado para generar el ensamblaje de la lavadora en caliente como se muestra en la Figura 22.

Figura 22: Diseño seleccionado de la lavadora en caliente, imagen utilizada por cortesía de Autodesk Inventor®



*Fuente:* Elaboración propia.

Para el sistema de lavado en caliente, se diseñó una estructura que soporta los componentes relacionados con el agitador y proporciona un espacio definido para la sección del tornillo sinfín de extracción. Aunque el componente del tornillo sinfín no fue diseñado en detalle, se incluyó en el ensamblaje con fines ilustrativos. La estructura también incorpora el motor que acciona el tornillo sinfín, y para el tanque central, cuenta con una abrazadera

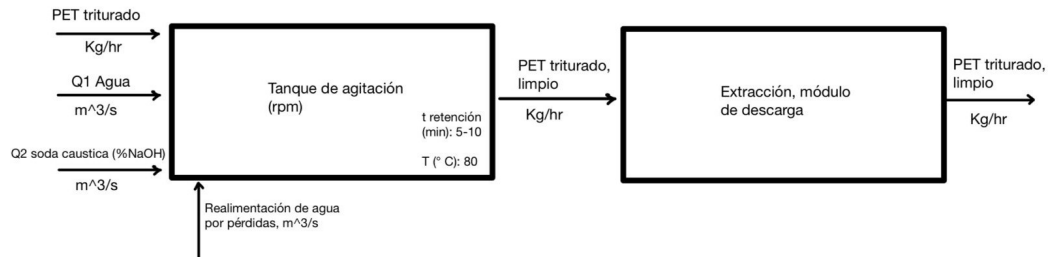
y una chumacera para sujetar el eje vertical. Tras completar el diseño de ambos sistemas, se generaron diagramas de cuerpo libre para identificar los esfuerzos que actúan sobre las diferentes partes, asegurando así su integridad estructural.

### 6.13. Diagrama de proceso - Lavadora en caliente

El proceso comienza con el llenado del tanque principal con agua. A continuación, se añade la cantidad correspondiente de soda cáustica, la cual reacciona exotérmicamente con el agua, elevando la temperatura de la mezcla. Simultáneamente, el motor pone en funcionamiento el eje agitador para asegurar una mezcla homogénea. Una vez alcanzada la temperatura adecuada, se introduce el PET triturado en el tanque para ser tratado. El material permanece en la solución entre 5 y 10 minutos, tiempo durante el cual la agitación facilita la limpieza y eliminación de impurezas adheridas al PET.

Transcurrido este tiempo, se activa el módulo de tornillo sinfín ubicado en la salida del tanque. Este mecanismo extrae el PET procesado de forma automatizada, reduciendo el riesgo de contacto directo del operador con la mezcla cáustica. Gracias a la corriente generada por el agitador, el PET es impulsado hacia el tornillo sinfín, que lo conduce hacia la salida del sistema. La Figura 23 presenta el diagrama de proceso de la máquina.

Figura 23: Diagrama de proceso de la máquina lavadora en caliente



Fuente: Elaboración propia.

### 6.14. Equipos auxiliares - Lavadora en caliente

#### Módulo de tornillo sinfín

El módulo de tornillo sinfín, suministrado por SINFIMASA, es el componente principal utilizado para la extracción del material lavado desde el tanque central. Este dispositivo transporta el PET una vez que ha sido separado de los contaminantes mediante el proceso de lavado en caliente. El tornillo sinfín asegura que el material se mueva de manera continua y controlada hacia la siguiente fase del procesamiento. Funciona mediante la rotación de un eje helicoidal, que desplaza el material en dirección axial. La eficiencia del tornillo sinfín depende de su diseño geométrico y de su capacidad para manejar el material en condiciones húmedas, lo que facilita el transporte sin pérdida significativa del fluido de trabajo.

Figura 24: Módulo de tornillo sinfín utilizado en el sistema de lavado en caliente.



Fuente: Sinfimasa, 2023.

Para poder presupuestar el módulo de sinfín con la empresa, se deben determinar varios aspectos que influyen sobre el diseño y costo del módulo. Dentro de estos está el paso y diámetro del tornillo, longitud total del tornillo, material de construcción, tipo de material a transportar, potencia para el motor, capacidad de transporte disposición del equipo y condiciones de trabajo.

Como primer paso se calculó el volumen y la masa del tornillo dado que la potencia del motor también depende del propio peso del tornillo. El volumen se calcula utilizando la siguiente ecuación que considera el área lateral de la hélice multiplicada por la longitud total del tornillo:

$$V_{helice} = \pi \times D_e \times t_{helice} \times L \quad (62)$$

Donde:

- $V_{helice}$  es el volumen de la hélice
- $D_e$  es el diámetro exterior del tornillo
- $t_{helice}$  es el espesor de la hélice
- $L$  es la longitud del tornillo

$$V_{helice} = \pi \times 0.25m \times 0.01m \times 4m \approx 0.0314m^3$$

Partiendo del volumen de la helice se puede determinar la masa de la misma al multiplicar por la densidad del material acero SAE 304.

$$m_{helice} = V_{helice} \times \rho_{SAE304} = 0.0314m^3 \times 8000kg/m^3 \approx 251.33kg$$

El volumen del eje se calcula como un cilindro sólido:

$$V_{eje} = \pi \times \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 \times L = \pi \times \left(\frac{0.08}{2}\right)^2 \times 4 \approx 0.0201m^3$$

De igual manera que la hélice, la masa del eje se determina multiplicando el volumen por la densidad del material:

$$m_{eje} = V_{eje} \times \rho_{SAE304} = 0.0201m^3 \times 8000kg/m^3 \approx 160.8kg$$

La masa total del tornillo sinfín es la sumatoria entre la masa de la hélice y la masa del eje:

$$m_{total} = m_{helice} + m_{eje} = 251.33 + 160.8 \approx 410kg$$

## Fuerzas actuantes en el tornillo sinfín

El tornillo sinfín transporta el material dentro del tanque central mediante la acción de la hélice giratoria. Para el diseño adecuado del tornillo, se deben considerar varias fuerzas, como se detalla a continuación:

### a. Fuerza de empuje del material ( $F_t$ )

La fuerza de empuje del material, también conocida como fuerza de transporte, es necesaria para vencer la fricción entre el material transportado (PET lavado) y la superficie de la hélice del tornillo. El coeficiente de fricción típico para materiales plásticos con acero inoxidable es de 0.36 (Liu & Wang, 2021). Por lo tanto, se utiliza esta referencia para el cálculo de la fuerza de transporte:

$$F_t = m_{flujos} \cdot g \cdot \mu \tag{63}$$

Donde:

- $m_{flujos}$  es la masa transportada por segundo.
- $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).
- $\mu$  es el coeficiente de fricción entre el PET lavado y la hélice del tornillo, tomado de Liu y Wang (2021).

Para este cálculo:

$$m_{\text{flujo}} = \frac{150 \text{ kg/hr}}{3600 \text{ s/hr}} \approx 0.0417 \text{ kg/s}$$

$$F_t = 0.0417 \text{ kg/s} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.36 \approx 0.147 \text{ N}$$

### b. Fuerza por el peso del tornillo ( $F_p$ )

La fuerza del peso del tornillo sinfín se proyecta en el plano inclinado debido a su configuración inclinada. Para esta máquina, el tornillo sinfín tiene una inclinación de  $30^\circ$ , valor típico en aplicaciones de transporte de material sólido (Kapur, 2019). Se calcula la fuerza del peso proyectada como:

$$F_p = m_{\text{total}} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (64)$$

Donde:

- $m_{\text{total}}$  es la masa total del tornillo, calculada previamente como 410 kg.
- $\alpha$  es el ángulo de inclinación del tornillo.

Sustituyendo:

$$F_p = 410 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot \sin(30^\circ) \approx 1975.3 \text{ N}$$

### c. Fuerza total necesaria ( $F_{\text{total}}$ )

La fuerza total necesaria para operar el tornillo sinfín se obtiene sumando las fuerzas de empuje y peso del tornillo:

$$F_{\text{total}} = F_t + F_p \quad (65)$$

Sustituyendo los valores calculados:

$$F_{\text{total}} = 0.147 \text{ N} + 1975.3 \text{ N} \approx 1975.45 \text{ N}$$

## Cálculo del torque y potencia del motor

### a. Torque necesario ( $T_{\text{total}}$ )

El torque necesario para operar el tornillo sinfín se calcula multiplicando la fuerza total por el radio medio del tornillo. De acuerdo con Kapur, 2019, el diámetro medio recomendado para tornillos sinfín en aplicaciones similares es de 0.25 m:

$$T_{\text{total}} = F_{\text{total}} \cdot \frac{D_m}{2} \quad (66)$$

Donde:

- $D_m$  es el diámetro medio del tornillo.

Sustituyendo:

$$T_{\text{total}} = 1975.45 \text{ N} \cdot \frac{0.25 \text{ m}}{2} \approx 246.9 \text{ Nm}$$

### b. Potencia requerida del motor ( $P_{\text{motor}}$ )

La potencia requerida para el motor se calcula usando la velocidad angular del tornillo y el torque total. La velocidad operativa de tornillos sinfín en aplicaciones industriales de transporte de materiales suele ser de 125 rpm (Liu & Wang, 2021), un valor adecuado para este diseño:

$$P_{\text{motor}} = \frac{T_{\text{total}} \cdot \omega}{\eta_{\text{motor}}} \quad (67)$$

Donde:

- $\omega$  es la velocidad angular del tornillo.
- $\eta_{\text{motor}}$  es la eficiencia del motor, tomada como 0.8 Liu y Wang, 2021.

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 125}{60} \approx 13.09 \text{ rad/s}$$

$$P_{\text{motor}} = \frac{246.9 \text{ Nm} \cdot 13.09 \text{ rad/s}}{0.8} \approx 4045.5 \text{ W} \approx 5.4 \text{ hp}$$

El costo estimado del tornillo sinfín también depende de un factor de servicio. El factor de servicio es un multiplicador aplicado a la carga nominal de un equipo para asegurar su confiabilidad bajo ciertas condiciones de operación. En el caso de un tornillo sinfín, el factor de servicio toma en cuenta aspectos como:

- Cargas variables o intermitentes
- Horas de operación continuas
- Condiciones ambientales
- Frecuencia de arranques y paradas

Cuadro 5: Rango de factores de servicio

Factor de servicio	Descripción
1.0 - 1.25	Cargas ligeras y operación continua en condiciones normales.
1.25 - 1.4	Cargas moderadas o ciclos de trabajo más exigentes.
1.4 - 1.8	Aplicaciones con cargas pesadas, arranques frecuentes, o ambientes adversos.
1.8 - 2.0	Condiciones severas, cargas de impacto, o temperaturas extremas.

El siguiente cuadro presenta el rango de factores de servicio seleccionables y

El factor de servicio seleccionado debe asegurar que el equipo soporte la carga nominal así como las condiciones adicionales del entorno para poder garantizar una vida útil prolongada y menor necesidad de mantenimiento. Se seleccionó un factor de servicio de 1.4 porque se considera que la carga manejada en el proceso es moderada y el ciclo de trabajo es relativamente exigente.

Con lo que se conoce sobre el tornillo sinfín, se estimó que el costo del motorreductor de tornillo sinfín y el tornillo sinfín está entre 8,000 y 12,000 USD. Este rango de costo se basa en la estimación dada por SINFIMASA, mencionando que el valor final de la sección depende de la eficiencia del motor, la relación de transmisión seleccionada y el material que comprende el componente. En este caso, es adecuado tener un rango de costo estimado para poder incluir el componente de salida de la máquina dentro del presupuesto.

## Variador de frecuencia

El variador de frecuencia se utiliza para controlar la velocidad de rotación del motor que impulsa tanto el eje central del agitador como el tornillo sinfín. Al ajustar la frecuencia de alimentación del motor, el variador permite modificar la velocidad de los componentes giratorios sin necesidad de parar la máquina. Este control es crucial para adaptar el proceso a diferentes tasas de alimentación de material o cambios en las condiciones operativas, asegurando un control preciso del proceso.

Para seleccionar un variador adecuado para la lavadora en caliente, se deben considerar varios aspectos técnicos relacionados con el motor, la carga y las condiciones de operación. Estos factores garantizan que el variador elegido pueda manejar de manera adecuada el motor y cumplir con los requisitos de la máquina.

- **Potencia del motor:** Se debe seleccionar un variador que coincida con la potencia del motor del tornillo sinfín, calculada en aproximadamente 5.4 hp. Se recomienda redondear a un modelo de al menos 7.5 hp para proporcionar un margen de seguridad y flexibilidad en caso de sobrecargas inesperadas.
- **Voltaje de operación:** Es necesario conocer el voltaje de operación del motor. Por

Figura 25: Variador de frecuencia que controla la velocidad de los componentes giratorios del sistema.



Fuente: Danfoss, 2023

lo general, los motores industriales funcionan a 220 V o 380 V trifásico. Si el sistema está en una planta con suministro de 380 V, se recomienda un variador compatible con esta tensión. Los variadores de frecuencia están disponibles para ambos niveles de tensión, por lo que se debe elegir uno acorde a la red eléctrica.

- **Corriente nominal:** El variador debe manejar la corriente nominal del motor más un 10-15 % adicional para evitar sobrecargas y garantizar una operación estable. La corriente nominal se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \eta \cdot FP} \quad (68)$$

Donde:

- $P$  es la potencia en kW.
  - $V$  es el voltaje de operación.
  - $\eta$  es la eficiencia del motor (típicamente 0.8 a 0.9).
  - FP es el factor de potencia (usualmente entre 0.8 a 0.85).
- **Tipo de control:** Se recomienda un variador con control vectorial, ya que permite un mejor control del par y la velocidad, especialmente cuando el tornillo sinfín está bajo carga. Si se requiere una regulación de velocidad muy precisa, el control vertical de lazo cerrado es el más adecuado.
  - **Condiciones de operación:** La lavadora en caliente opera en condiciones de alta temperatura y humedad debido al proceso de lavado con soda cáustica. Se recomienda un variador de frecuencia con protección IP54 o superior, garantizando resistencia al polvo y a salpicaduras de agua. Si el variador se instala en un gabinete cerrado, debe considerarse una ventilación adecuada o un sistema de enfriamiento adicional para evitar sobrecalentamientos.

Con base en los factores mencionados, un modelo de variador adecuado para esta aplicación es el Danfoss VLT AutomationDrive FC 302. Este variador tiene las siguientes características:

- **Modelo:** Danfoss VLT AutomationDrive FC 302
- **Potencia:** 20 HP / 15 kW (suficiente para el motor de 5.4 hp y de 9.92 hp con margen)
- **Voltaje de Entrada:** 380-480 V, trifásico
- **Frecuencia de Entrada:** 50/60 Hz
- **Rango de Frecuencia de Salida:** 0-400 Hz
- **Corriente Nominal:** 15 A (aprox.)
- **Control:** Vectorial de lazo cerrado
- **Protección:** IP54
- **Dimensiones:** Compacto para fácil instalación en gabinete

Figura 26: Variador de frecuencia Danfoss VLT AutomationDrive FC302



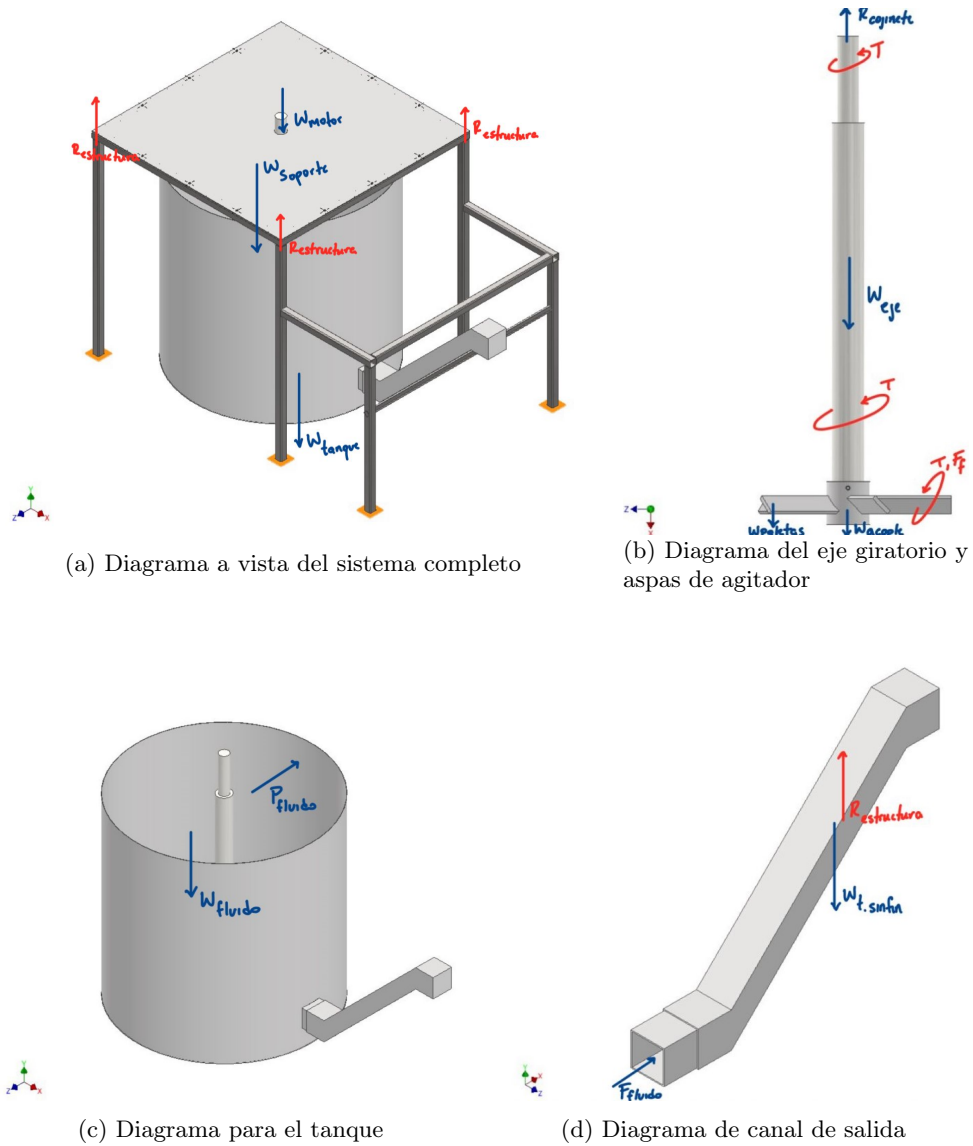
Esta selección asegura que el variador cumpla con las necesidades operativas de la lavadora en caliente, permitiendo un funcionamiento seguro del tornillo sinfín y el motor acoplado.

### 6.15. Diagramas de cuerpo libre - Lavadora en caliente

Donde:

- $W_{tanque}$ : Peso del tanque
- $W_{fluido}$ : Peso del fluido de trabajo
- $W_{carga}$ : Peso por componentes colocados sobre la plancha de soporte

Figura 27: Diagramas de cuerpo libre para la lavadora en caliente, imágenes utilizadas por cortesía de Autodesk Inventor®



- $R_{estructura}$ : Reacción del marco con la plancha de soporte
- $P_{fluido}$ : Presión ejercida por el fluido de trabajo
- $R_{cojinete}$ : Reacción sobre la chumacera que sujeta el eje
- $W_{eje}$ : Peso del eje agitador
- $W_{platinas}$ : Peso de las platinas del agitador
- $W_{acople}$ : Peso del componente acoplado al eje agitador
- $T$ : Torque generado por el motor sobre el eje
- $W_{tsinfin}$ : Peso del segmento del canal de salida

## 6.16. Cálculos - Lavadora en caliente

### Cálculo de volumen y peso del tanque central

A pesar de consultar con un fabricante del componente, Aceros Forta (Aceros Forta, 2024), se realizaron los cálculos considerando que los valores obtenidos serían utilizados posteriormente en la simulación en ANSYS Workbench®.

El volumen del tanque central se calcula utilizando la fórmula del volumen de un cilindro:

$$V_{\text{tanque}} = \pi \times \left( \frac{D_{\text{tanque}}}{2} \right)^2 \times h_{\text{tanque}} \quad (69)$$

$$V_{\text{tanque}} = \pi \times \left( \frac{2}{2} \right)^2 \times 2 = \pi \times 1^2 \times 2 = 6.28 \text{ m}^3$$

Tomando en cuenta el requisito de diseño RD03 y las dimensiones del tanque, se optó por utilizar una altura de fluido a 1.3 m, y utilizando el mismo criterio, el volumen del fluido es de:

$$V_{\text{fluido}} = 4.08 \text{ m}^3$$

El peso del tanque y del fluido se calcula multiplicando este volumen por la densidad del material (acero inoxidable) y la aceleración de la gravedad:

$$W_{\text{tanque}} = V_{\text{tanque}} \times \rho_{\text{tanque}} \times g \quad (70)$$

$$W_{\text{tanque}} = 6.28 \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$W_{\text{tanque}} = 483858.7 \text{ N} \approx 483 \text{ kN}$$

$$W_{\text{fluido}} = 4.08 \text{ m}^3 \times 1335 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$W_{\text{fluido}} = 53486.42 \text{ N} \approx 53.5 \text{ kN}$$

## Cálculo del flujo volumétrico y la presión del fluido de trabajo

El flujo volumétrico del sistema debe cumplir con la tasa de salida de material establecida para la lavadora en caliente, que es de 150 kg/hr. Para calcular el flujo volumétrico con base en esta tasa de salida, utilizamos la densidad del PET ( $\rho_{PET}$ ) y el tiempo de operación.

La ecuación general para calcular el flujo volumétrico ( $Q$ ) es:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

Donde:

- $Q$  es el flujo volumétrico  $m^3/s$ ,
- $\dot{m}$  es la tasa de masa de salida en  $kg/s$ ,
- $\rho$  es la densidad de la mezcla, que se aproxima a  $1100 kg/m^3$  para la mezcla de agua y soda cáustica.

Utilizando el mismo criterio aplicado para la separadora, se calculó un flujo másico de slurry, contemplando en este escenario que la concentración de sólidos es mayor dado que el material PET introducido está en copos de menor tamaño que el estado original de las botellas. Se planteó el escenario en donde el 40 % de la mezcla es plástico y el restante 60 % es la mezcla de agua con soda cáustica.

$$\dot{m}_{slurry} = \frac{\dot{m}_{PET}}{\text{Concentración de sólidos}} = \frac{150 \text{ kg/h}}{0.40} = 375 \text{ kg/h}$$

$$\dot{V}_{slurry} = \frac{375 \text{ kg/h}}{1000 \text{ kg/m}^3} = \frac{0.375 \text{ m}^3/\text{h}}{3600 \text{ s/h}} = 1.042 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

En este escenario, el área de salida no es determinada por tubería, sino que por una ventanilla de salida de dimensiones seleccionadas a criterio propio con base en las dimensiones originales de las botellas. La ventanilla rectangular de salida del material del tanque central es de 200 mm X 200 mm, dando como área el producto entre las dimensiones de ambos lados.

$$A = 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} = 40,000 \text{ mm}^2 = 0.04 \text{ m}^2$$

La velocidad del fluido entonces es:

$$V = \frac{\dot{V}_{slurry}}{A} = \frac{1.04 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{0.04 \text{ m}^2} = 0.0026 \text{ m/s}$$

La tasa de salida establecida para el material es de 150 kg/hr, que convertida a segundos es:

$$\dot{m} = \frac{150 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} = 0.0417 \text{ kg/s}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$Q = \frac{0.0417}{1100} = 3.788 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Entonces, el caudal total sería de:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{agua}} + Q_{\text{PET}} \approx 0.0341 + 3.788 \times 10^{-5} \approx 0.0341 \text{ m}^3/\text{s}$$

La aproximación del valor se debe a la fluctuación de la densidad de la mezcla utilizada en el sistema.

## Presión hidrostática

La presión hidrostática ejercida por el fluido de trabajo en las paredes del tanque es calculada con la ecuación:

$$P_h = \rho gh$$

Donde:

- $P_h$  es la presión hidrostática (Pa),
- $\rho$  es la densidad del fluido, aproximada en 1100 kg/m<sup>3</sup>,
- $g$  es la aceleración debida a la gravedad, con un valor de 9.81 m/s<sup>2</sup>,
- $h$  es la altura del fluido en el tanque, que es 1.3 m.

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$P_h = 1100 \times 9.81 \times 1.3 = 14,028.3 \text{ Pa}$$

## Esfuerzo de presión circunferencial

El esfuerzo circunferencial o hoop stress es importante para calcular la tensión interna en las paredes del tanque debido a la presión interna del fluido. La ecuación para el el esfuerzo es:

$$\sigma_h = \frac{P_h r}{t}$$

Donde:

- $\sigma_h$  es el esfuerzo circunferencial en (Pa),
- $P_h$  es la presión interna del fluido (Pa),
- $r$  es el radio interno del tanque (1 m dado que el diámetro del tanque es 2 m),
- $t$  es el espesor de la pared del tanque, que es 6.35 mm = 0.00635 m.

Sustituyendo los valores:

$$\sigma_h = \frac{14,028.3 \times 1}{0.00635} = 2,209,181.10 \text{ Pa} = 2.21 \text{ MPa}$$

El esfuerzo circunferencial en las paredes del tanque es de 2.21 MPa, lo que está por debajo del límite elástico del material del tanque (acero SAE 304, con un límite elástico de aproximadamente 215 MPa), garantizando así la integridad estructural del tanque bajo las condiciones de operación normales.

## Calor y proporción de soda cáustica

### Calor necesario para elevar la temperatura del fluido

Este cálculo se fundamenta en el concepto básico de transferencia de calor, asumiendo que el sistema es cerrado y que no hay pérdidas significativas de calor al ambiente. Se trata de un modelo estándar ampliamente aplicado en termodinámica para determinar el calor necesario para cambiar la temperatura de una masa específica de fluido. Para determinar la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura del fluido de trabajo, se utiliza la ecuación clásica de capacidad calorífica (Cengel & Boles, 2015):

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \tag{71}$$

Donde  $Q$  representa el calor necesario, medido en kilojulios (kJ);  $m$  es la masa del fluido en kilogramos (kg), que se calcula como  $m = \rho \times V$ , donde  $\rho$  es la densidad del fluido (1100 kg/m<sup>3</sup> para una mezcla de agua y soda cáustica), y  $V$  es el volumen del fluido en metros cúbicos (m<sup>3</sup>). La capacidad calorífica específica  $C_p$  es aproximadamente 4180 J/kg·°C para la mezcla de agua y soda cáustica (J. M. Smith et al., 2017). El cambio de temperatura  $\Delta T$  es la diferencia entre la temperatura final e inicial del fluido, medida en grados Celsius (°C).

El volumen operativo del tanque es de 4.09 m<sup>3</sup> y la densidad de la mezcla está influenciada por la concentración de NaOH. Para simplificar, se toma como punto de partida una

densidad aproximada de  $1000 \text{ kg/m}^3$ , correspondiente al agua, y se corrige en función de la concentración. Así, la masa total del fluido es:

$$m_{\text{total}} = \rho_{\text{mezcla}} \cdot V_{\text{tanque}} = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 4.09 \text{ m}^3 = 4090 \text{ kg}$$

Se asume que la mayor parte del fluido es agua y que las propiedades del agua dominan el comportamiento térmico de la mezcla para poder aproximar el cálculo del calor necesario para elevar la temperatura de la mezcla a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$Q_{\text{agua}} = m_{\text{agua}} c_{p\text{agua}} \Delta T = 4090 \text{ kg} \times 4180 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \times 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{agua}} = 1,025,772,000 \text{ J} = 1,025,772 \text{ kJ}$$

## Relación de soda cáustica y agua

La proporción de soda cáustica en la mezcla es crucial para garantizar la efectividad de limpieza y controlar la cantidad de calor liberado durante la disolución, ya que un exceso de soda cáustica puede elevar la temperatura del sistema a un valor superior al deseado, afectando la seguridad del proceso (Perry et al., 2008).

El calor de disolución de la soda cáustica en agua es exotérmico, lo que significa que el calor generado por la adición de NaOH a agua contribuye a aumentar la temperatura de la mezcla (Perry et al., 2008). Por lo tanto, es necesario calcular cuánto NaOH se debe añadir para alcanzar la temperatura deseada de  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Para obtener una mezcla adecuada sin sobrecalentamiento, se debe calcular la cantidad de NaOH que puede ser disuelta sin generar exceso de calor. Se asume que la contribución de  $X \%$  de NaOH se ajusta para mantener el equilibrio térmico, considerando tanto el calor necesario para elevar la temperatura del fluido de trabajo como el calor de disolución que la soda cáustica genera cuando se disuelve en agua (Perry et al., 2008).

El calor de disolución de la soda cáustica (NaOH) es exotérmico y tiene un valor aproximado de  $44.5 \text{ kJ/mol}$ . La masa molar del NaOH es de  $40 \text{ g/mol}$ , lo que significa que por cada  $40 \text{ g}$  de NaOH disuelto en agua, se liberan  $44.5 \text{ kJ}$ .

Utilizando el calor necesario para elevar la temperatura, se considera el calor de disolución de la soda cáustica para determinar la cantidad de NaOH que debe ser añadida a la mezcla sin generar un exceso de calor. El calor liberado por la disolución de NaOH se calcula como:

$$Q_{\text{disolución}} = n_{\text{NaOH}} \times \Delta H_{\text{disolución}}$$

Donde:

- $n_{\text{NaOH}}$  es la cantidad de moles de NaOH,

- $\Delta H_{\text{disolución}} = 44.5 \text{ kJ/mol}$  es el calor de disolución de NaOH.

Para mantener el equilibrio térmico y que la disolución del NaOH contribuya al aumento de temperatura sin exceder el calor requerido, calculamos la cantidad de NaOH necesaria para alcanzar la temperatura de  $80^\circ\text{C}$ . Dado que cada 40 g de NaOH genera 44.5 kJ, el número de moles requerido es:

$$n_{\text{NaOH}} = \frac{Q_{\text{deseado}}}{\Delta H_{\text{disolución}}} = \frac{1,025,772 \text{ kJ}}{44.5 \text{ kJ/mol}} \approx 23,051.1 \text{ mol}$$

La masa total de NaOH requerida es entonces:

$$m_{\text{NaOH}} = n_{\text{NaOH}} \times 40 \text{ g/mol} = 23,051.1 \text{ mol} \times 40 \text{ g/mol} = 922,044 \text{ g} = 922.04 \text{ kg}$$

## Relación porcentual de NaOH y agua

Finalmente, para determinar la concentración de NaOH en la mezcla, se calcula la relación en porcentaje de la masa de NaOH respecto a la masa total del fluido:

$$\% \text{NaOH} = \frac{m_{\text{NaOH}}}{m_{\text{total}}} \times 100 = \frac{922.04 \text{ kg}}{4090 \text{ kg}} \times 100 \approx 22.54 \%$$

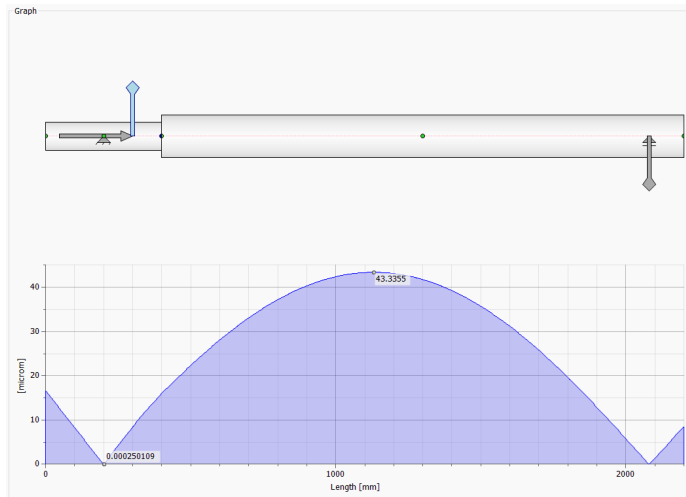
Por lo tanto, la relación de soda cáustica a agua necesaria para mantener la temperatura de  $80^\circ\text{C}$  y asegurar la correcta disolución de los contaminantes del PET es de aproximadamente 22.54 %.

## Deflexión máxima del eje agitador

El análisis de deflexión máxima del eje agitador fue realizado utilizando el acelerador de diseño en Autodesk Inventor®. La deflexión es la medida del desplazamiento que experimenta el eje bajo la aplicación de una carga. Este cálculo se hace para garantizar que el eje no sufra deformaciones excesivas durante la operación y se mantenga dentro de los límites seguros de funcionamiento.

En la Figura 28, se muestra el diagrama de deflexión donde se observa que la carga aplicada genera un desplazamiento máximo de  $43.3355 \mu\text{m}$  en el centro del eje. Este valor es considerablemente bajo, lo que indica que el diseño del eje es adecuado para las condiciones de carga establecidas.

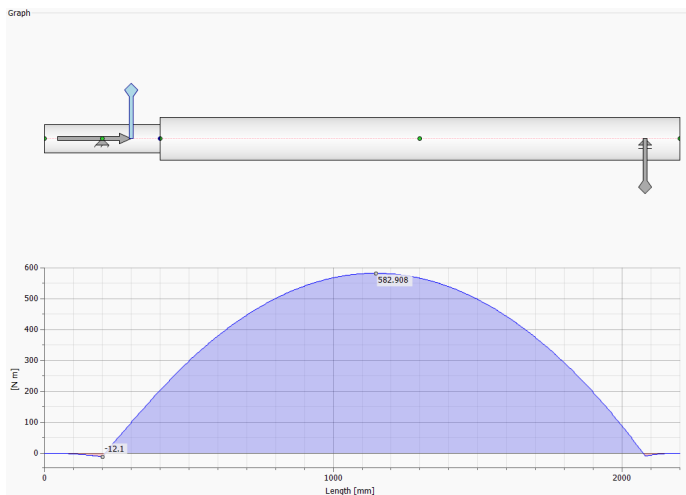
Figura 28: Diagrama de deflexión del eje generado por el acelerador de diseño en Autodesk Inventor®.



La curva azul representa el desplazamiento del eje a lo largo de su longitud, medido en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ). El eje horizontal muestra la longitud total del eje en milímetros (mm). La deflexión máxima  $43.3355 \mu\text{m}$  ocurre en el centro del eje, lo cual es clave para garantizar la integridad estructural del eje.

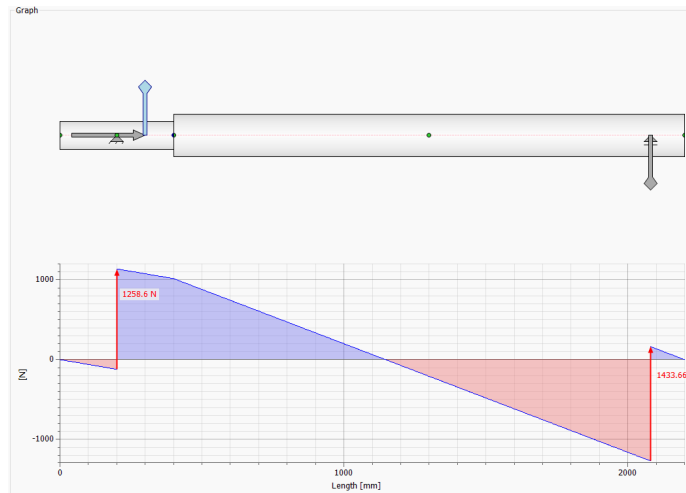
Además, en la Figura 29, se presenta el momento flector a lo largo del eje. Esto proporciona una visión clara de las fuerzas internas generadas por la carga aplicada y cómo varían a lo largo del eje.

Figura 29: Diagrama de momento flector a lo largo del eje generado por el acelerador de diseño en Autodesk Inventor®.



De igual forma, la Figura 30 muestra la distribución de las fuerzas cortantes que actúan en el eje debido a la carga aplicada.

Figura 30: Diagrama de fuerza cortante a lo largo del eje generado por el acelerador de diseño en Autodesk Inventor®.



## Cálculo de la velocidad crítica del eje

La velocidad crítica de un eje es un valor fundamental en el diseño de sistemas rotativos. Esta velocidad se refiere a la frecuencia a la cual las frecuencias naturales del eje coinciden con las frecuencias de excitación, lo que provoca un aumento drástico en las vibraciones debido a resonancia. Superar la velocidad crítica puede resultar en daños severos al sistema, por lo que es crucial conocer este valor para asegurar un funcionamiento seguro.

Para calcular la velocidad crítica  $\omega$ , se emplea la siguiente ecuación, que relaciona la deflexión  $y_i$  de cada sección del eje con el peso  $w_i$  correspondiente a esa sección:

$$\omega = \sqrt{\frac{g \sum w_i y_i}{\sum w_i y_i^2}}$$

Donde:

- $\omega$  es la velocidad crítica en radianes por segundo (rad/s).
- $g$  es la aceleración debido a la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).
- $w_i$  es el peso de cada sección del eje (en Newtons).
- $y_i$  es la deflexión de cada sección del eje (en metros).

Sin embargo, para simplificar el cálculo en este caso, se utilizará la deflexión máxima del eje  $y_{\text{máx}}$  como valor representativo del comportamiento global del sistema. De este modo, la velocidad crítica se puede aproximar utilizando la ecuación simplificada:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{y_{\text{máx}}}}$$

Donde:

- $y_{\text{máx}}$  es la deflexión máxima del eje, obtenida de la simulación en Autodesk Inventor®.
- $g$  es la aceleración debida a la gravedad.

Sustituyendo los valores:

$$\omega = \sqrt{\frac{9.81 \text{ m/s}^2}{43.3355 \times 10^{-6} \text{ m}}}$$

$$\omega = \sqrt{226373.3} \approx 475.8 \text{ rad/s}$$

Para convertir esta velocidad crítica en revoluciones por minuto (rpm), utilizamos la relación:

$$\text{rpm} = \omega \times \frac{60}{2\pi}$$

Sustituyendo:

$$\text{rpm} = 475.8 \times \frac{60}{2\pi} \approx 4,544 \text{ rpm}$$

Por lo tanto, la velocidad crítica del eje se estima en  $\approx 4,544$  rpm.

Este valor es clave para garantizar que el eje opere por debajo de la velocidad crítica, permitiendo evitar problemas de resonancia y asegurando la estabilidad durante el funcionamiento del sistema.

## Potencia del motor

El cálculo de la potencia del motor se basa en varios parámetros clave, como la velocidad angular, el torque y el momento de inercia. Este cálculo es fundamental para determinar la potencia necesaria para el correcto funcionamiento del sistema y, en este caso, también para facilitar la búsqueda de proveedores potenciales del motor adecuado.

## Cálculo de la velocidad angular

La velocidad angular  $\omega$  se obtiene a partir de las revoluciones por minuto (rpm). Asumimos una velocidad de operación de 400 rpm, un valor típico para agitadores industriales que generalmente operan entre 200 y 400 rpm, dependiendo de la viscosidad del fluido y la configuración del proceso (Round, 2004). Para convertir esta velocidad a radianes por segundo (rad/s), usamos la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{2\pi \times N}{60} \quad (72)$$

Donde:

- $N$  es la velocidad en revoluciones por minuto (rpm).
- $\omega$  es la velocidad angular en radianes por segundo (rad/s).

Sustituyendo:

$$\omega = \frac{2\pi \times 400}{60} = 41.88 \text{ rad/s}$$

### Cálculo de la aceleración angular ( $\alpha$ )

Suponiendo que el motor tarda 400 segundos en alcanzar la velocidad de operación, la aceleración angular  $\alpha$  se calcula como:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad (73)$$

Donde:

- $\omega$  es la velocidad angular en radianes por segundo (rad/s).
- $t$  es el tiempo en segundos.

Sustituyendo:

$$\alpha = \frac{41.88}{400} = 0.1047 \text{ rad/s}^2$$

### Torque y momento de inercia

El torque se calcula utilizando el momento de inercia y la aceleración angular. Si conocemos el momento de inercia  $I$  del sistema, el torque  $\tau$  se puede calcular con la ecuación:

$$\tau = I \times \alpha \quad (74)$$

Donde:

- $\tau$  es el torque en Newton-metros (Nm).

- $I$  es el momento de inercia (en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ).
- $\alpha$  es la aceleración angular en radianes por segundo cuadrado ( $\text{rad}/\text{s}^2$ ).

El momento de inercia de un eje cilíndrico se calcula con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{1}{2}mr^2$$

Donde:

- $I$  es el momento de inercia en  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ .
- $m$  es la masa del eje en  $\text{kg}$ .
- $r$  es el radio del eje en  $\text{m}$ .

Sustituyendo los valores de  $m = 25 \text{ kg}$  y  $r = 0.5 \text{ m}$ :

$$I_{sup} = \frac{1}{2} \times 25 \text{ kg} \times (0.5 \text{ m})^2 = 0.0308 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Este cálculo contempla únicamente la sección superior del eje, por lo que se repitió el proceso para la sección inferior con sus correspondientes dimensiones. También se tuvo que contemplar el momento de inercia generado en el acople inferior y por las aspas del agitador. De la misma manera que el eje, el momento de inercia generado por el fluido en movimiento fue calculado como momento en cilindro, pero en el caso de las aspas se aplicó el cálculo para la geometría correspondiente:

$$I_{inf} = 0.702 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{aco} = 0.247 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{fluido} = 2246.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Conociendo el momento de inercia para cada sección del eje y del fluido de trabajo, se realizó la sumatoria de momentos para poder calcular el torque requerido para vencer la fuerza estacionaria generada por el fluido y para poder generar una corriente dentro del tanque central.

$$I_{Total} = I_{sup} + I_{inf} + I_{aco} + I_{fluido} = 2246.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{Total} = 2246.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

## Cálculo del torque

El torque necesario para alcanzar la velocidad angular se calcula utilizando el momento de inercia  $I$  y la aceleración angular  $\alpha$ :

$$\tau = I \times \alpha$$

Donde:

- $\tau$  es el torque en Nm.
- $I$  es el momento de inercia.
- $\alpha$  es la aceleración angular en  $\text{rad/s}^2$ .

Para calcular  $\alpha$ , usamos la relación entre la velocidad angular final  $\omega_f$ , la velocidad angular inicial  $\omega_i = 0$ , y el tiempo  $t$  requerido para alcanzar la velocidad de operación:

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_i}{t}$$

Sustituyendo  $\omega_f = 31.42 \text{ rad/s}$  (para 300 rpm) y  $t = 300 \text{ s}$ :

$$\alpha = \frac{31.42 \text{ rad/s}}{300 \text{ s}} = 0.1047 \text{ rad/s}^2$$

Ahora sustituimos los valores de  $I = 2247.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  y  $\alpha = 0.1396 \text{ rad/s}^2$ :

$$\tau = 2247.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \times 0.1047 \text{ rad/s}^2 \approx 314 \text{ Nm}$$

## Cálculo de la potencia del motor

El cálculo realizado de la potencia del motor tomó como referencia una eficiencia del 80 %, ya que los motores utilizados en la industria incluye esta eficiencia como estándar (ToolBox, 2015).

La potencia  $P$  requerida por el motor se calcula multiplicando el torque por la velocidad angular:

$$P = \tau \times \omega \tag{75}$$

Sustituyendo los valores de torque  $\tau = 314 \text{ Nm}$  y la velocidad angular  $\omega = 31.42 \text{ rad/s}$ :

$$P = 314 \times 31.42 \approx 7400 \text{ W}$$

## Conversión de potencia a caballos de fuerza (Horsepower)

Para convertir la potencia de vatios a caballos de fuerza (HP), usamos la siguiente ecuación:

$$P_{HP} = \frac{P_W}{745.7} \quad (76)$$

Sustituyendo:

$$P_{HP} = \frac{7400}{745.7} \approx 9.92 \text{ HP}$$

Con el valor de la potencia necesaria para operar en las condiciones esperadas, se realizó una investigación sobre posibles proveedores de motores verticales para agitadores industriales. El proveedor seleccionado fue HOLLISHAFT®<sup>®</sup>, ya que su catálogo incluye motores verticales que trabajan a las RPM requeridas. Se optó por un motor de 20 Hp de U.S. Motors (US Motors, 2024), brindando un margen de operación seguro. Al utilizar aproximadamente la mitad de la capacidad del motor, se asegura que el sistema pueda operar eficientemente y con flexibilidad para soportar mayores exigencias si fuera necesario, garantizando así durabilidad y rendimiento. En la Figura 31 se muestra una captura de la ficha técnica de las especificaciones del motor seleccionando.

Figura 31: Motor vertical de U.S. Motors, modelo HOLLISHAFT®<sup>®</sup>, adecuado para agitadores industriales.

**Enclosure Types**

**Non-Reverse Backstop Ratchet Design, BALLOMATIC®**

- First technology of its kind in the market
- Prevents reverse rotation within 4.5 degrees of rotation
- Unlimited depth setting
- Can be used in certain Hazardous Location applications

**Weather Protected Type I (WPI)**

Constructed to minimize the entrance of rain, snow and airborne particles. Enclosures exceed NEMA requirements. The ventilation system is designed to provide optimum cooling to the thrust bearing and electrical components and is available in all motor sizes.

**Weather Protected Type II (WPII)**

Enclosure offers protection against hostile outdoor environments. The special ventilation system minimizes the entrance of high velocity air, moisture and airborne particles into the motor's passages.

Unique design allows the use of standard internal components. Special enclosures can be adapted with minimum delay.

**Totally Enclosed Fan Cooled (TEFC) and Hazardous Location**

Non-sparking, non-reverse ratchet design. Available for severe environments where destructive dusts, vapors and other harmful substances are found. Perfect for use in hazardous locations where Underwriters Laboratories (UL™) approval is necessary.

**CORRO-DUTY®**

Cast iron CORRO-DUTY® motors are available with external corrosion-resistant paint and hardware for extremely harsh environments.



**4 Zone Design**

U.S. MOTORS® brand vertical pump motors are designed with four functional zones. This design ensures easy installation and service and provides operator protection and convenience.

**ZONE 1**

Canopy cap allows easy access to the coupling, non-reverse ratchet and thrust bearing.

**ZONE 2**

Thrust bearings, generously sized oil reservoir, and large weather-protected air intake for continuous cooling to the motor and thrust bearings.

**ZONE 3**

Winding section develops the driving torque and houses the insulation systems.

**ZONE 4**

Compact mounting base designed for momentary upthrusts of the pump.

ZONE 1

ZONE 2

ZONE 3

ZONE 4

WPI 15-5000 HP and WPII 300-5000 HP

## Factor de seguridad según el criterio de Ullman

De igual manera que para la separadora, se calculó un factor de seguridad utilizando el criterio de Ullman primero para usarlo de parámetro de medición para el cálculo del factor de seguridad utilizando el criterio de Soderberg.

$$n = n_{\text{material}} \times n_{\text{esfuerzo}} \times n_{\text{geometría}} \times n_{\text{análisis de fallas}} \times n_{\text{confiabilidad}} \quad (77)$$

Utilizando los valores indicados para la máquina:

- $n_{\text{material}} = 1.3$
- $n_{\text{esfuerzo}} = 1.2$
- $n_{\text{geometría}} = 1.1$
- $n_{\text{análisis de fallas}} = 1.1$
- $n_{\text{confiabilidad}} = 1.2$

Sustituyendo en la ecuación:

$$n = 1.3 \times 1.2 \times 1.1 \times 1.1 \times 1.2 = 2.265$$

## Factor de seguridad según el criterio von Mises

Se calculó el factor de seguridad con la ecuación que relaciona la resistencia máxima del material con las tensiones aplicadas.

$$FS = \frac{\sigma_{\text{fluencia}}}{\sigma_{\text{máxima}}} \quad (78)$$

Los esfuerzos combinados incluyen esfuerzos axiales, radiales y de torsión, utilizando la teoría de von Mises (Budynas & Nisbett, 2015), se utilizó la fórmula que es comúnmente utilizada para esfuerzos combinados en sólidos sometidos a tensiones multiaxiales. La ecuación del esfuerzo combinado es la siguiente:

$$\sigma_{\text{von}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_z\sigma_x + 3\tau_{xy}^2}$$

## Esfuerzo axial

El esfuerzo axial se calcula como:

$$\sigma_{\text{axial}} = \frac{F_{\text{axial}}}{A}$$

Donde:

- $F_{axial} = 2543 \text{ N}$
- $A$  es el área transversal del eje en su sección mayor  $A = \frac{\pi d^2}{4}$ :

$$A = \frac{\pi(0.15)^2}{4} = 0.01767 \text{ m}^2$$

Sustituyendo:

$$\sigma_{axial} = \frac{2543}{0.01767} \approx 143.87 \text{ MPa}$$

### Esfuerzo torsional

El esfuerzo torsional se calcula como:

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J}$$

Donde:

- el torque aplicado.
- $r$  es el radio del eje.
- $J$  es el momento polar de inercia  $J = \frac{\pi d^4}{32}$ :

$$J = \frac{\pi(0.15)^4}{32} = 3.976 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

Sustituyendo:

$$\tau = \frac{313.83 \times 0.075}{3.976 \times 10^{-6}} = 5919 \text{ kPa} = 5.92 \text{ MPa}$$

### Esfuerzo combinado (von Mises)

El esfuerzo combinado según la teoría de von Mises se calcula como:

$$\sigma_{von} = \sqrt{\sigma_{axial}^2 + 3\tau^2}$$

Sustituyendo los valores calculados:

$$\begin{aligned}\sigma_{von} &= \sqrt{(143.87)^2 + 3(5.92)^2} \\ \sigma_{von} &\approx 144.23 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Entonces, sustituyendo se obtiene:

$$FS = \frac{505}{143.87} \approx 3.51 \tag{79}$$

## Ensayos realizados - Lavadora en caliente

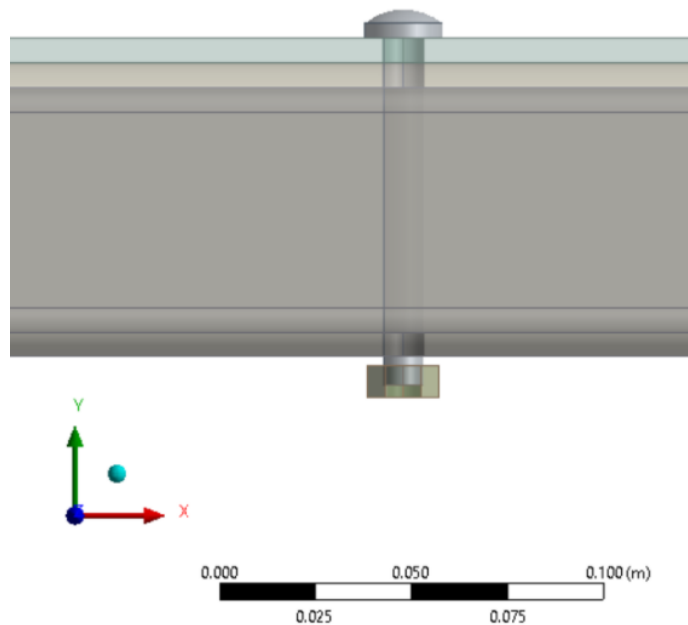
La lavadora en caliente utiliza un tanque central donde una mezcla de soda cáustica y agua se agita para limpiar materiales plásticos. Para verificar la integridad y resistencia estructural bajo las condiciones operativas de la máquina, se realizaron ensayos estáticos y dinámicos utilizando Ansys Workbench.

### 6.16.1. Ensayo estático estructural

#### Preparación del modelo para la simulación

El primer paso consiste en importar el modelo tridimensional de la lavadora, el tanque central y sus componentes desde Autodesk Inventor a Ansys Workbench. Una vez importado el modelo, es importante simplificar la geometría utilizando la herramienta *Face Delete* para eliminar características innecesarias y así optimizar el tiempo de simulación. La Figura 32 muestra la geometría que fue simplificada para esta simulación. Se removieron características que originalmente presentaron un problema en la generación del mallado del modelo.

Figura 32: Geometría simplificada de la lavadora en caliente en Ansys Workbench, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



#### Asignación de materiales

Una vez importado el modelo, se procede a la asignación de materiales a todas las superficies que componen la lavadora. En este caso, se utilizó acero como material de los componentes, cuyos valores de densidad, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

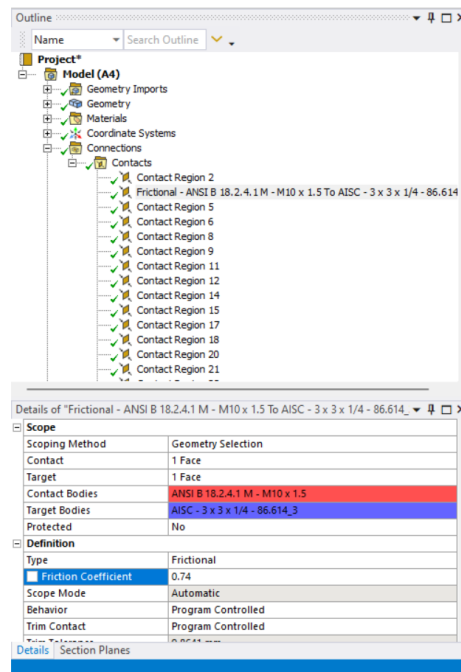
fueron especificados según las propiedades del material en Ansys. Esta etapa es fundamental para asegurar que el comportamiento mecánico simulado sea lo más cercano posible a la realidad.

## Configuración de la simulación

El siguiente paso es revisar y configurar los contactos entre las diferentes partes del modelo. En la simulación, se definieron diferentes tipos de contacto: - **Bonded**: Para representar uniones fijas entre componentes que no permiten movimiento relativo. - **Frictional**: Para aquellas superficies donde se espera que haya cierto deslizamiento bajo carga, con un coeficiente de fricción correspondiente a los materiales que están en contacto.

La Figura 33 muestra el árbol de operaciones generado por el programa, donde se editaron los tipos de contacto según interactuaban los componentes entre sí.

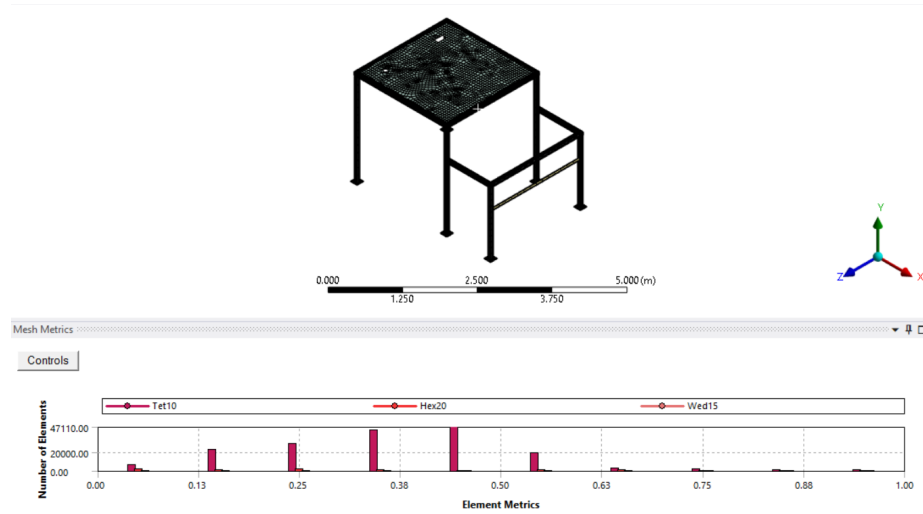
Figura 33: Configuración de los contactos para la lavadora en caliente en Ansys Workbench, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Generación del mallado

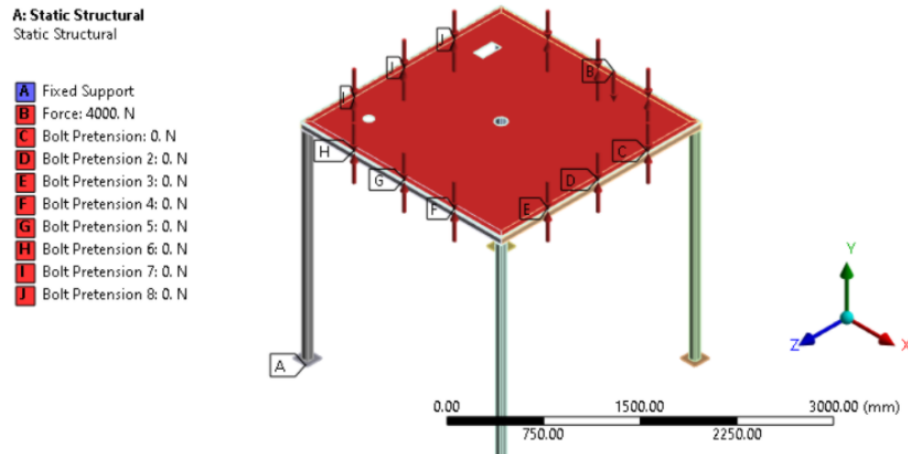
La generación del mallado es un paso crítico para asegurar la precisión de la simulación. En Ansys, se utilizó un mallado hexaédrico, que fue refinado en áreas críticas como las uniones entre el tanque y la estructura de soporte. Esto asegura que se obtengan resultados precisos en términos de tensiones y deformaciones. La figura a continuación muestra el mallado generado para la estructura de la lavadora:

Figura 34: Mallado del modelo de la lavadora en caliente, mostrando el refinamiento en áreas críticas, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



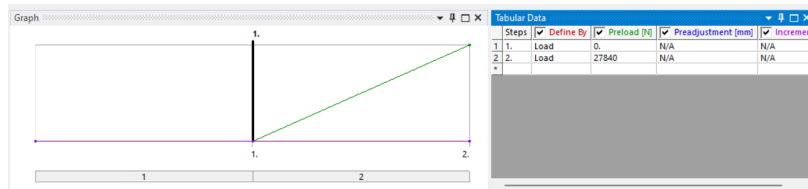
Para preparar la simulación, se asignaron las condiciones de contorno y la precarga de la siguiente manera que los *Fixed Supports* fueran asignados en los puntos de conexión de la estructura con el suelo para representar una base fija y la *Preload* aplicada sobre los pernos representa la sujeción entre los pernos y la plancha de soporte. Con la precarga aplicada se simula la tensión durante la instalación. La Figura 35 muestra la aplicación de la carga sobre la plancha de soporte y la precarga aplicada sobre los pernos.

Figura 35: Aplicación de la carga y precarga en la simulación de la lavadora en caliente, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



También se preparó un enfoque de comportamiento escalonado para simular el aumento progresivo de la tensión en los pernos. La Figura 36 muestra la curva de comportamiento de la precarga aplicada.

Figura 36: Curva de comportamiento de la precarga aplicada a los pernos, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



Se realizaron ensayos dinámicos para evaluar la capacidad del tanque y la estructura de la lavadora en caliente de resistir fuerzas variables durante la agitación del fluido. Para ello, se consideró la influencia del eje central y las paletas que generan la mezcla.

El torque y la velocidad angular del eje central se calcularon basados en el momento de inercia del sistema y las RPM (revoluciones por minuto) del motor. Esto asegura que el sistema esté adecuadamente dimensionado para manejar la mezcla de soda cáustica y agua a la velocidad necesaria.

Los resultados del análisis dinámico incluyen los modos de vibración, las frecuencias naturales del sistema, y la respuesta en frecuencia de la estructura, ayudando a garantizar que la estructura pueda operar de manera segura y sin fallas por resonancia o fatiga.

## Resultados evaluados

Para la solución se consideraron varios aspectos que influyen sobre el comportamiento de la estructura de la máquina. Se evaluó la deformación total para analizar de qué manera se deforma la estructura bajo presión y carga, la deformación direccional para evaluar los desplazamientos en la dirección vertical, el esfuerzo equivalente de Von Mises para identificar las zonas de mayor tensión y potenciales puntos de falla, el error estructural para verificar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos y factores de seguridad para asegurar que la estructura y los componentes de la máquina cumplen con el factor de diseño.

### 6.16.2. Simulación de flujo en la Lavadora en caliente con ANSYS Fluent

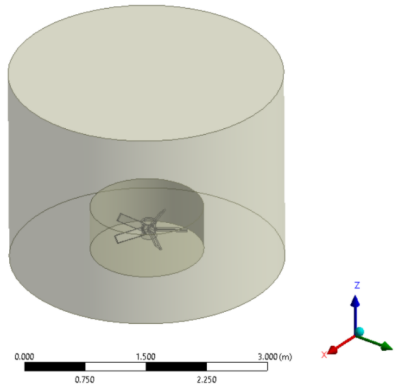
En esta sección se presenta la simulación realizada para la lavadora en caliente utilizando ANSYS Fluent. La simulación tiene como objetivo analizar el comportamiento del flujo de la mezcla de soda cáustica y agua en el tanque central. A continuación, se detallan los pasos seguidos para la preparación y configuración de la simulación, integrando las imágenes proporcionadas.

#### Preparación del modelo CAD

El modelo CAD de la lavadora fue inicialmente preparado en Autodesk Inventor y luego importado a DesignModeler de ANSYS para realizar las modificaciones necesarias. Durante este proceso, se simplificó la geometría para asegurar que las características principales

de la lavadora se representaran correctamente, eliminando detalles que no aportaban a la simulación. En la Figura 37 se muestra el modelo CAD importado.

Figura 37: Modelo CAD de la lavadora en caliente importado a DesignModeler, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



El modelo fue simplificado para tomar en cuenta únicamente la geometría del agitador sin el eje al cual se encuentra acoplado. Se modeló un cilindro para representar el tanque central de la máquina sin tener representada la ventanilla de salida de material.

Para simular el proceso de mezclado en ANSYS se puede utilizar el sistema de análisis *Fluid Flow (Fluent)*, donde el tanque y el flujo del agitador son representados como líquidos. Se mantuvo la geometría del agitador como sólido para observar el comportamiento del fluido al interactuar con este.

## Generación y adaptación del mallado

Una vez importado el modelo, se generó el mallado, dividiendo el modelo en elementos finitos para un análisis preciso. Se utilizó la función *Make Polyhedra* para mejorar la calidad del mallado dentro de la configuración de la simulación para poder asegurar la representación detallada de las superficies. La Figura 38 muestra la métrica del mallado generado por la herramienta *Mesh*, utilizando la función dentro de la preparación de la simulador Fluent se obtuvo un mallado refinado como es visto en la Figura 39

Figura 38: Métricas del mallado generado para la simulación, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

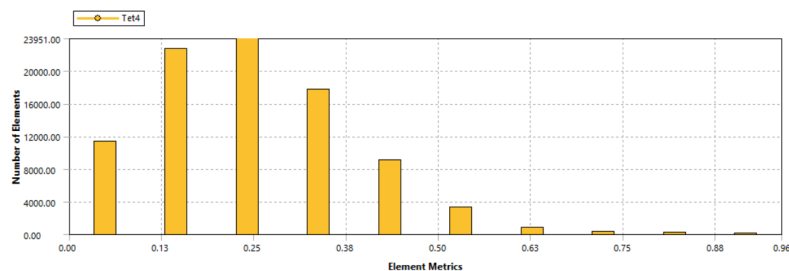
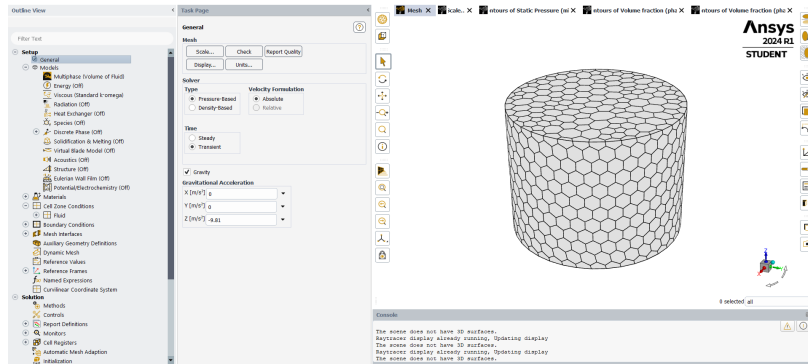


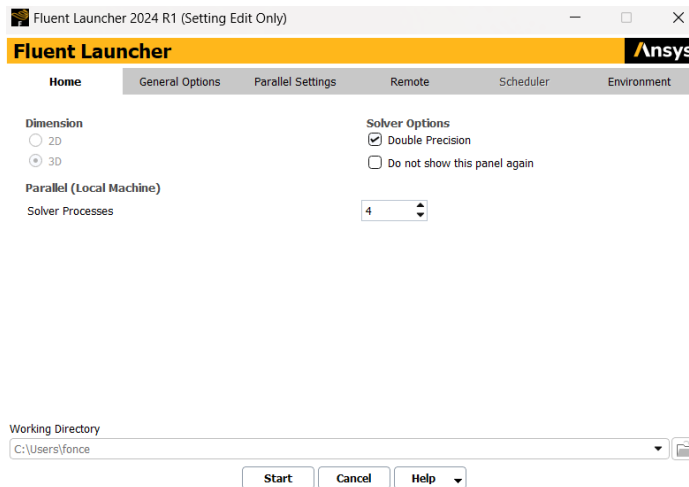
Figura 39: Mallado adaptado utilizando Make Polyhedra en ANSYS Fluent, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Configuración del solver en ANSYS Fluent

Para comenzar la simulación en Fluent, se inició el programa utilizando la opción de *Double Precision* y se seleccionaron 4 procesadores para asegurar un rendimiento óptimo durante la simulación.

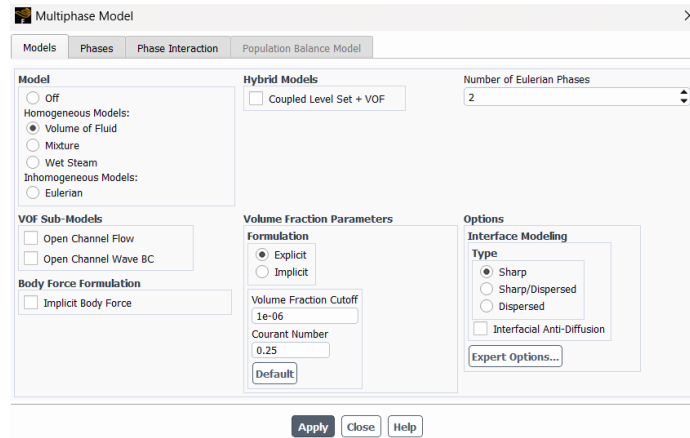
Figura 40: Configuración del Fluent Launcher para la simulación, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Configuración del multiphase model

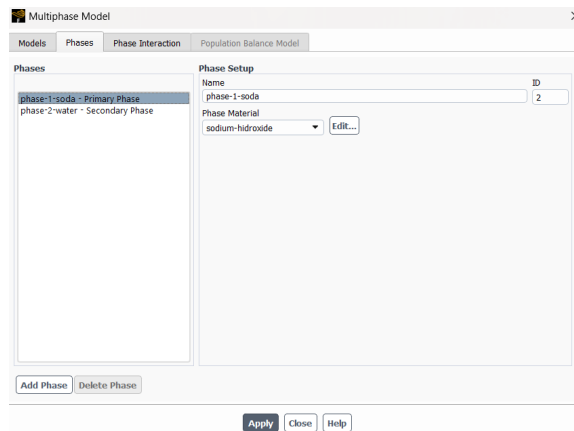
El siguiente paso fue la configuración del modelo multifásico utilizando el *Volume of Fluid (VOF)* para representar la interacción entre la soda cáustica y el agua. Se establecieron 2 fases Eulerianas para la simulación.

Figura 41: Configuración del modelo multifásico en ANSYS Fluent, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



Dentro de la pestaña *Phases*, se definieron la fase primaria (soda cáustica) y la fase secundaria (agua), asegurando que el software reconociera correctamente ambas fases y sus propiedades.

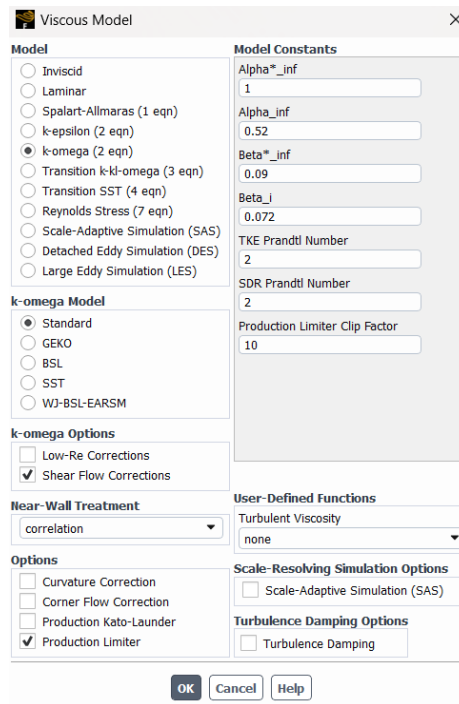
Figura 42: Definición de las fases en el modelo multifásico, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Configuración del modelo viscoso

Para capturar los efectos de la turbulencia en el flujo, se seleccionó el modelo *k-omega* con la opción *Standard*, lo cual permitió un análisis detallado de los efectos viscosos dentro del tanque.

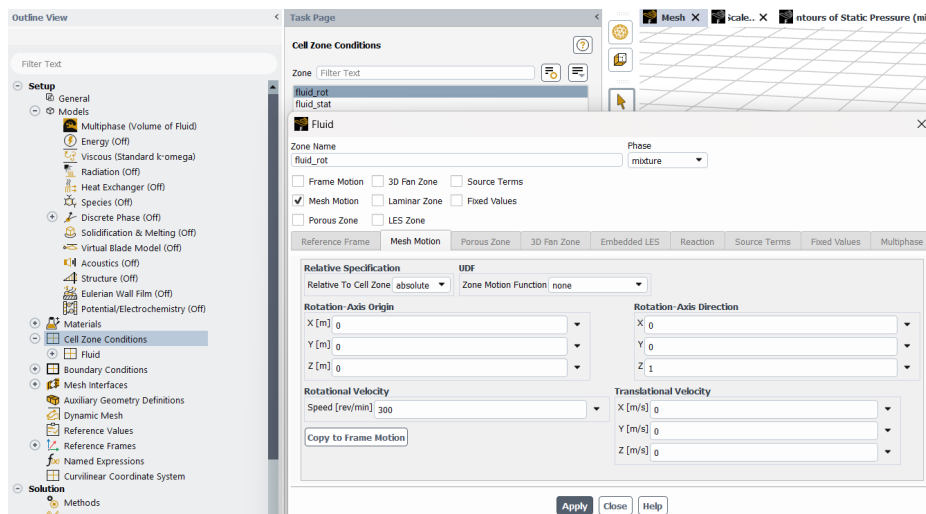
Figura 43: Configuración del modelo viscoso en ANSYS Fluent, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Configuración de las cell zone conditions

Se configuraron las condiciones de las zonas de celdas para representar el movimiento del fluido dentro del tanque. Se diferenciaron las zonas rotativas y estáticas del fluido, lo que permitió simular el comportamiento de la mezcla.

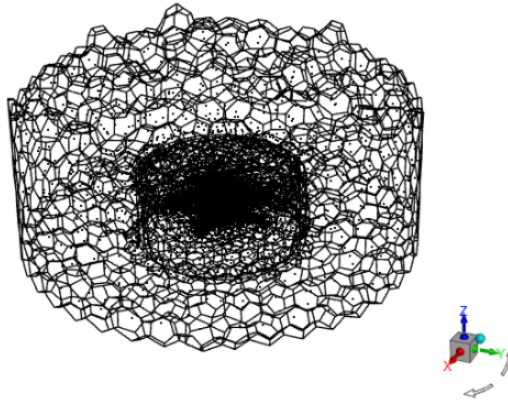
Figura 44: Configuración de las condiciones de las zonas de celdas, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Creación de la zona de fases

Se creó una zona de fases para permitir la simulación del movimiento y mezcla de las fases dentro del tanque central. Esta configuración fue fundamental para modelar el nivel de operación del fluido para mostrar la interacción entre el agua y la soda cáustica.

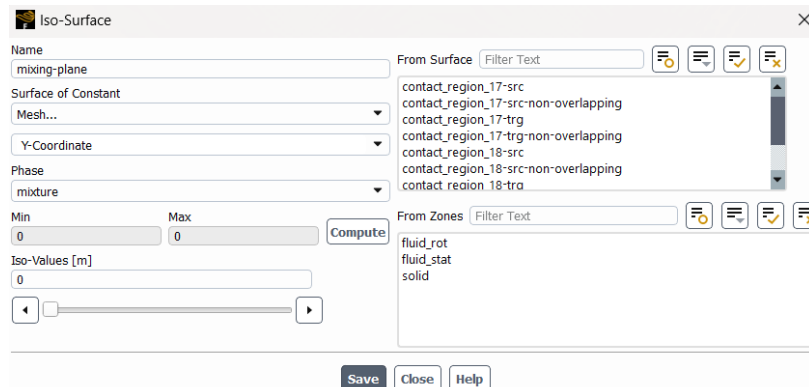
Figura 45: Creación de la zona de fases para la simulación, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Creación y configuración de Iso Surfaces

Para facilitar la interpretación de los resultados, se generó una *Iso-Surface* que permite observar el comportamiento del fluido en diferentes regiones del tanque, generando una sección entre planos para poder observar la mezcla dentro del tanque. La Figura 46 muestra la configuración de la superficie generada.

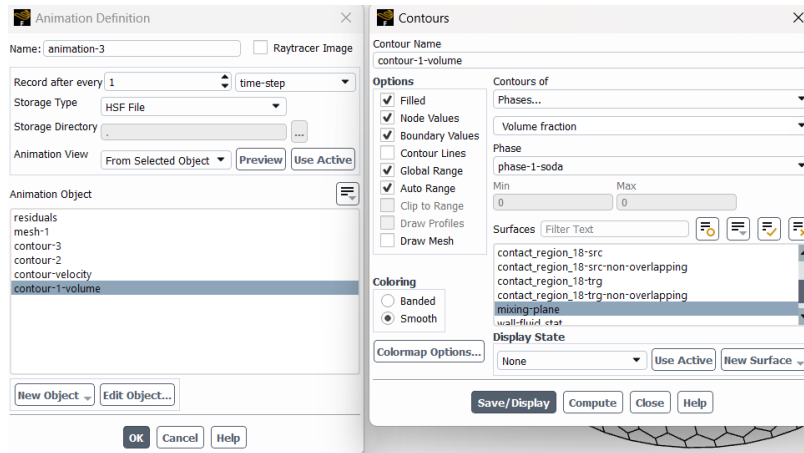
Figura 46: Configuración de las iso-surfaces en ANSYS Fluent, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Creación de la animación para visualización del flujo

Se configuró una animación que registró el comportamiento del fluido a lo largo de la simulación. Esta herramienta fue crucial para visualizar la evolución de la mezcla de fases en tiempo real y comprender mejor la dinámica del flujo.

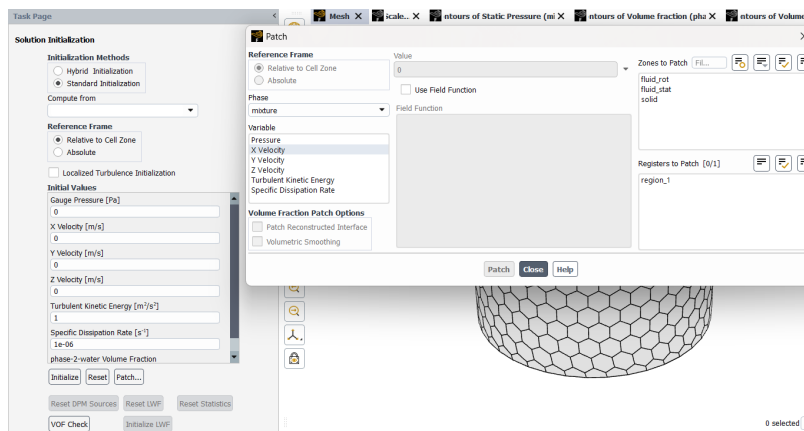
Figura 47: Configuración de la animación para la simulación, Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Inicialización del programa y patch de regiones

Antes de ejecutar la simulación, se realizó la inicialización del programa y se aplicaron los valores iniciales mediante la función *Patch* en las regiones de interés. Se realizó esta configuración para poder hacer que el programa interprete las fases operativas de la máquina.

Figura 48: Inicialización y aplicación de patch en las regiones de la simulación, imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.



## Resultados evaluados

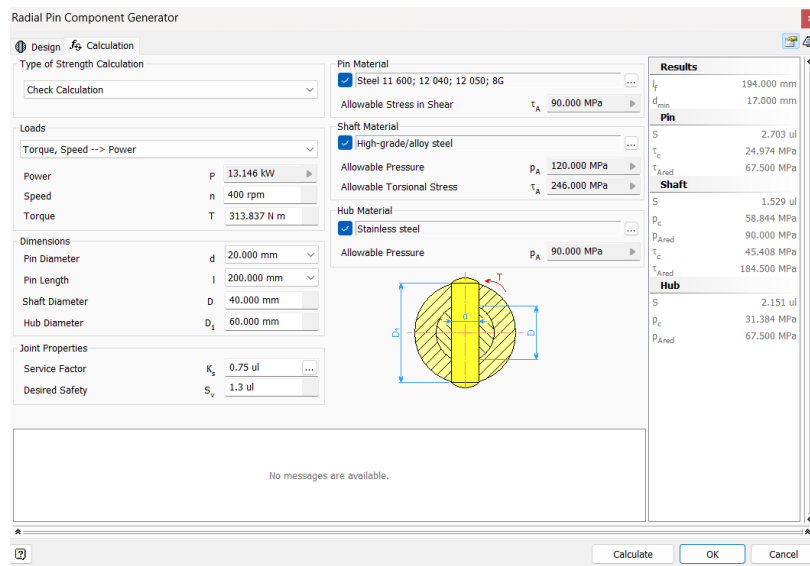
Finalmente, se ejecutó la simulación y se monitorearon las variables de interés, como la distribución de fases, presión, y velocidad del fluido. La simulación permitió obtener una comprensión detallada del comportamiento de la mezcla en el tanque central de la lavadora en caliente.

### 6.17. Pin de sujeción

La lavadora en caliente utiliza un pin de sujeción colocado entre el eje y el acople inferior. Se utilizó el acelerador de diseño para generar el componente y, dado que la sujeción que este comprende, se solicitó con un proveedor de pines de tamaños no estandarizados, *Spirol* para poder generar la parte. La Figura 49 muestra la calculadora del componente generado en Autodesk Inventor®.

Tras asignar las dimensiones del pin, así como los valores de velocidad en rpm y el torque en Nm a los que está sujeto este, el acelerador de diseño calculó la potencia, resultando en 13.15 kW.

Figura 49: Menú del generador de pin de sujeción, imagen utilizada por cortesía de Autodesk Inventor®.



### 6.18. Soldadura

#### Análisis de soldaduras en la estructura

La sección de soldaduras fue realizada utilizando el software Autodesk Inventor, aprovechando el módulo de aceleradores de diseño. Las uniones soldadas son aseguran la integridad

estructural de las máquinas diseñadas. Se utilizó el proceso de diseño asistido para definir las características de las soldaduras, como el tipo de soldadura y su tamaño. Este proceso fue realizado para ambas máquinas, en el caso de la separadora, el cuerpo de los tanques fue soldado con soldadura de filete, mientras que la lavadora en caliente fue ensamblada con soldadura de filete y ranura en ciertos elementos.

## Tipos de soldadura

Se consideraron dos tipos principales de soldaduras para las uniones:

- **Groove Weld (Soldadura en ranura):** Utilizada para unir piezas en configuraciones de borde. La selección de los conjuntos de caras y la dirección del relleno se realizó en el menú de Groove Weld, tal como se muestra en la Figura 50.
- **Fillet Weld (Soldadura de filete):** Utilizada en uniones en ángulo para proporcionar una unión fuerte y resistente. El proceso de selección de caras y definición del contorno de la soldadura se realizó en el menú de Fillet Weld, como se muestra en la Figura 51.

Figura 50: Menú de configuración de soldadura en ranura (Groove Weld) en Autodesk Inventor, imagen utilizada por cortesía de Autodesk Inventor®

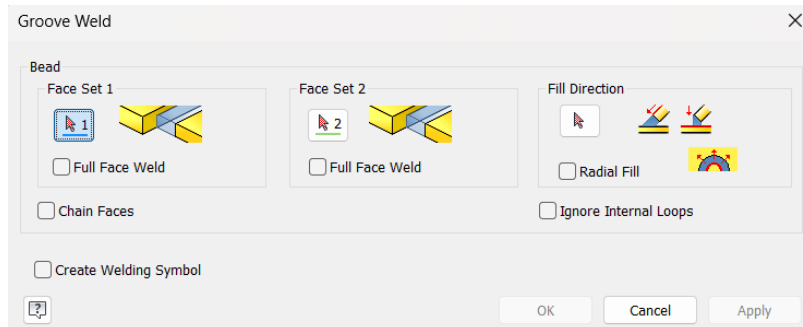
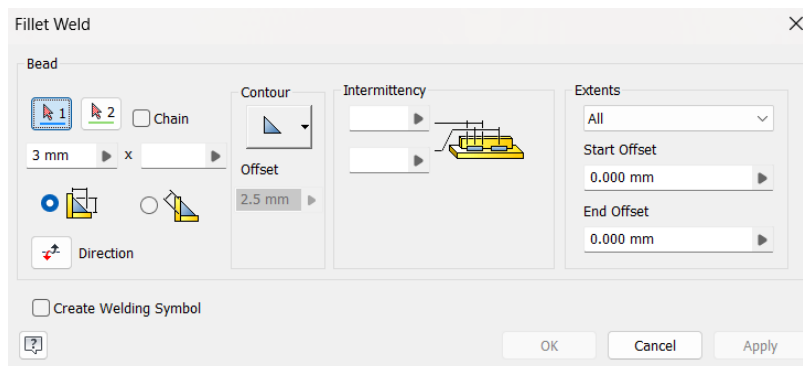


Figura 51: Menú de configuración de soldadura de filete (Fillet Weld) en Autodesk Inventor, imagen utilizada por cortesía de Autodesk Inventor®



## Aplicación de soldaduras en la estructura

La Figura 52 muestra la aplicación de la soldadura en ranura en la estructura, asegurando una unión firme en las esquinas de los soportes. Por otro lado, la Figura 53 muestra un ejemplo de la soldadura de filete aplicada en la base de las columnas de la estructura, proporcionando resistencia adicional en las áreas de contacto.

Figura 52: Aplicación de soldadura en ranura en la estructura.

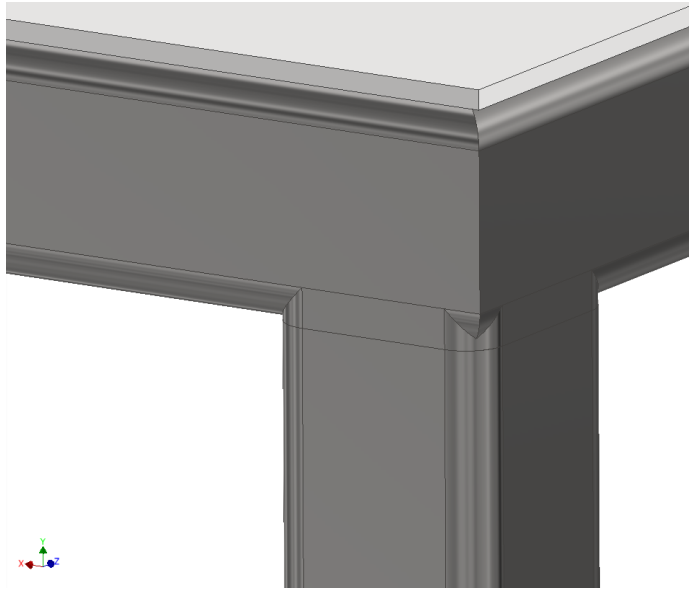
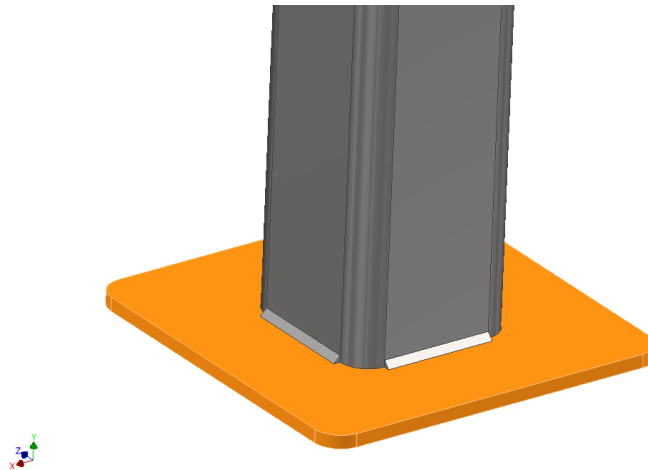


Figura 53: Aplicación de soldadura de filete en la base de la estructura.



## Selección del metal de aporte

La selección del metal de aporte es importante para garantizar la resistencia de la soldadura. El Cuadro 6 presenta las propiedades mínimas del metal de aporte según el número

de electrodo AWS, incluyendo resistencia a la tensión, resistencia a la fluencia y elongación porcentual.

Cuadro 6: Propiedades mínimas del metal de aporte

Número de electrodo AWS*	Resistencia a la tensión, kpsi (MPa)	Resistencia a la fluencia, kpsi (MPa)	Elongación porcentual
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

\* Sistema de numeración del código de especificaciones de la American Welding Society (AWS) para electrodos. En este sistema se usa como prefijo la letra E, en un sistema de numeración de cuatro o cinco dígitos en el cual los primeros dos o tres números designan la resistencia aproximada a la tensión. El último dígito incluye variables en la técnica de soldadura, como la fuente de corriente. El penúltimo dígito indica la posición de la soldadura, por ejemplo, plana, vertical o sobre la cabeza. El conjunto completo de especificaciones se puede obtener solicitándolo a la AWS.

### Cálculo de las cargas en soldaduras

Para calcular la capacidad de carga y el tamaño mínimo de la soldadura, se utilizó la Tabla 7, la cual presenta las cargas constantes permisibles y tamaños mínimos de soldadura de filete para diferentes metales de aporte y espesores del material.

Cuadro 7: Cargas constantes permisibles y tamaños mínimos de soldadura de filete

Programa A: carga permisible para varios tamaños de soldadura de filete						Programa B: tamaño mínimo de soldadura de filete, 1	
Nivel de resistencia del metal de aporte (EXX)							
	60*	70*	80	90*	100	110*	120
Esfuerzo cortante permisible en la garganta, ksi (1900 psi) de soldadura de filete o soldadura de muela con penetración parcial							
r =	18.0	21.0	24.0	27.0	30.0	33.0	36.0
Fuera unitaria permisible en soldadura de filete, kip/polg lineal							
r =	12.73k	14.85k	16.97k	19.09k	21.21k	23.33k	25.45k
Tamaño del cátodo h, polg	Fuera unitaria permisible para varios tamaños de soldadura de filete, kip/polg lineal						
1	12.73	14.85	16.97	19.09	21.21	23.33	25.45
3/8	11.14	12.89	14.85	16.70	18.57	20.41	22.27
3/4	9.55	11.14	12.73	14.32	15.92	17.50	19.09
5/8	7.96	9.28	10.61	11.93	13.27	14.58	15.91
1/2	6.37	7.42	8.48	9.54	10.61	11.67	12.73
7/16	5.57	6.50	7.42	8.35	9.28	10.21	11.14
3/8	4.77	5.57	6.36	7.16	7.95	8.75	9.54
5/16	3.98	4.64	5.30	5.97	6.63	7.29	7.95
1/4	3.18	3.71	4.24	4.77	5.30	5.83	6.36
3/16	2.39	2.78	3.18	3.58	3.98	4.38	4.77
1/8	1.59	1.86	2.12	2.39	2.65	2.92	3.18
1/16	0.795	0.930	1.06	1.19	1.33	1.46	1.59

\* En realidad, las soldaduras de filete fueron ensayadas por el AWS-AWS Test Committee.  
r = 0.707k.  
Fuente: Adaptada de Omer W. Bridgitt (ed.), *Steel: A Designer's Reference* (McGraw-Hill, 1942). The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, mayo de 1991, p. 3. Reproducción con autorización de Lincoln Electric Company.

Se verificó que los tamaños de soldadura aplicados cumplan con los requerimientos de la tabla para asegurar la resistencia estructural de las uniones soldadas en el cuerpo de la separadora por densidades y en la estructura de la lavadora en caliente.

Para realizar los cálculos, se reconocieron las longitudes de los bordes o los contactos entre superficies de los ensamblajes para poder calcular el área de garganta

El cálculo del valor *A* se realizó utilizando la ecuación base:

$$A = 1.414hd$$

Para este análisis se tomaron diferentes dimensiones de longitud y espesor. A continua-

ción, se presenta el cálculo para una de las iteraciones, en este caso, la primera iteración con una longitud de 1 m y un espesor de 3.175 mm.

Estos valores se sustituyen en la ecuación para calcular el área de la garganta:

$$A = 1.414(1)(3.175) = 4.49\text{mm}^2$$

Este valor de  $A$  se utiliza para el análisis de cortante primario y secundario, y otros factores de seguridad, como se detalla en el ejemplo 9-4 del libro de Shigley (Budynas & Nisbett, 2015).

### Análisis del cortante primario y secundario

La ecuación de cortante primario es:

$$\tau' = \frac{F}{A} \quad (80)$$

Sustituyendo:

$$\tau' = \frac{3473.53}{4.49} \approx 0.774 \text{ MPa}$$

Para el cortante secundario:

$$\tau'' = \frac{Mr}{I} \quad (81)$$

$$\tau'' = \frac{3473.53(1000)(3.175)}{117833.3} \approx 93.6 \text{ MPa}$$

$$\tau'' = \frac{3473.53(1000)(3.175)}{353500} \approx 31.2 \text{ MPa}$$

La magnitud del cortante  $\tau$  se calcula con la ecuación de Pitágoras:

$$\tau = \sqrt{(\tau'^2 + \tau''^2)^{1/2}} \quad (82)$$

$$\tau = \sqrt{(0.774^2 + 31.2^2)^{1/2}} \approx 31.2 \text{ MPa}$$

$$\tau = \sqrt{(0.774^2 + 93.6^2)^{1/2}} \approx 93.6 \text{ MPa}$$

Los factores de seguridad  $n$  para el material son:

$$n = \frac{S_y}{\tau} \quad (83)$$

$$n = \frac{0.577(505)}{31.2} \approx 9.34$$

$$n = \frac{0.577(505)}{93.6} \approx 3.11$$

El mismo procedimiento fue repetido para las otras iteraciones con dimensiones de 3 m de longitud y 3.175 mm de espesor, de 50.8 mm x 50.8 mm, y de 40.4 mm x 40.4 mm, obteniendo resultados consistentes.

El electrodo E6018 es un tipo de electrodo revestido utilizado en la soldadura por arco manual (SMAW), conocido comúnmente como soldadura con electrodo revestido. El uso de este electrodo se basa en sus propiedades mecánicas y características de soldadura, que lo hacen adecuado para aplicaciones específicas. A continuación, se describe el contexto de uso y los criterios de selección para el electrodo E6018:

## Propiedades del electrodo E6018

El E6018 es un electrodo de acero al carbono con un revestimiento de bajo contenido en hidrógeno, lo que ayuda a prevenir la aparición de porosidad y defectos en la soldadura debido a la captación de humedad (L. Smith & Jenkins, 2017). El bajo contenido de hidrógeno también reduce el riesgo de fisuras por hidrógeno en las soldaduras, lo que es especialmente importante en aceros de mayor resistencia (Martinez & Rodriguez, 2018).

## Clasificación y significado

- **E:** Indica que es un electrodo para soldadura por arco.
- **60:** Señala una resistencia mínima a la tracción de 60,000 psi (414 MPa).
- **1:** Indica que se puede soldar en todas las posiciones (plana, horizontal, vertical y sobre cabeza).
- **8:** Define el tipo de revestimiento y la corriente eléctrica que puede utilizarse (CA/CC) (Newell, 2016).

## Características de soldadura

**Bajo hidrógeno:** Debido a su revestimiento de bajo hidrógeno, el electrodo E6018 es adecuado para soldaduras donde se busca minimizar el riesgo de fisuración por hidrógeno (Carr, 2020).

**Facilidad de uso:** El electrodo es relativamente fácil de manejar, lo que permite soldaduras limpias y con buena apariencia superficial, especialmente en aplicaciones estructurales (L. Smith & Jenkins, 2017).

**Soldadura en todas las posiciones:** Es versátil, ya que permite realizar soldaduras en

todas las posiciones, lo que lo hace ideal para aplicaciones complejas donde la orientación de las piezas a soldar no puede ser siempre controlada (Martinez & Rodriguez, 2018).

## Aplicaciones del electrodo E6018

**Construcción estructural:** Dado su límite de tracción y resistencia a la fisuración, el E6018 se utiliza comúnmente en la construcción de estructuras metálicas de acero al carbono y aceros de baja aleación (Carr, 2020).

**Tanques y tuberías de alta presión:** Es adecuado para soldar tuberías y recipientes a presión donde la integridad de la soldadura es crítica, especialmente en entornos con variaciones térmicas o cargas de impacto (L. Smith & Jenkins, 2017).

**Soldadura de mantenimiento y reparación:** El E6018 se utiliza en situaciones de reparación, donde la soldadura debe realizarse sobre acero sucio o contaminado, gracias a su capacidad para penetrar bien en este tipo de superficies (Martinez & Rodriguez, 2018).

## Selección del electrodo E6018

**Condiciones de servicio:** Se selecciona cuando las condiciones de servicio requieren alta resistencia mecánica y una baja susceptibilidad a la fisuración por hidrógeno, como en aplicaciones críticas donde el metal base tiene alta dureza o resistencia (Newell, 2016).

**Posiciones de soldadura:** Es ideal cuando se requiere una soldadura en múltiples posiciones debido a su versatilidad en este aspecto (L. Smith & Jenkins, 2017).

**Resistencia a la tensión:** Se elige en proyectos donde se busca una resistencia mínima de 60,000 psi, asegurando que las soldaduras soporten las cargas previstas en aplicaciones estructurales o de presión (Carr, 2020).

Utilizando este electrodo, se calcularon los factores de seguridad correspondientes a las uniones de las máquinas diseñadas. Se calculó un esfuerzo para medir la resistencia de la unión generada conociendo que el electrodo E6018 tiene un esfuerzo cortante permisible en la garganta de 18 ksi o 124.11 MPa. El cálculo de esfuerzo cortante en la garganta de las soldaduras fue resuelta de la siguiente manera:

$$\tau_1 = \frac{\tau_{\text{permisible}}}{\tau_{\text{corte1}}} \quad (84)$$

$$\tau_2 = \frac{\tau_{\text{permisible}}}{\tau_{\text{corte2}}} \quad (85)$$

Sustituyendo:

$$\tau_1 = \frac{124.11 \text{MPa}}{31.2 \text{MPa}} \approx 3.977 \text{MPa}$$

$$\tau_2 = \frac{124.11 \text{MPa}}{93.56 \text{MPa}} \approx 1.326 \text{MPa}$$

Previo a calcular los factores de seguridad relacionados al electrodo, se calculó un factor de diseño de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{S_{Sy}}{\tau} \quad (86)$$

Sustituyendo los valores, se obtuvo el siguiente resultado aplicable a la soldadura de ambas máquinas dado que se contempló utilizar el mismo electrodo:

$$F_d = \frac{0.577 \times 427}{124.11} \approx 1.985$$

Utilizando este factor, se pueden calcular los dos factores de seguridad relacionados al electrodo de la siguiente manera:

$$\eta_1 = F_d \times \frac{\tau_{permisible}}{\tau_1} \quad (87)$$

$$\eta_2 = F_d \times \frac{\tau_{permisible}}{\tau_2} \quad (88)$$

Sustituyendo:

### Primera unión - Separadora por densidades

$$\eta_1 = 1.985 \times \frac{124.11MPa}{3.977MPa} \approx 61.95$$

$$\eta_2 = 1.985 \times \frac{124.11MPa}{1.326MPa} \approx 185.81$$

### Segunda unión - Separadora por densidades

$$\eta_1 = 1.985 \times \frac{124.11MPa}{7.159MPa} \approx 34.41$$

$$\eta_2 = 1.985 \times \frac{124.11MPa}{35.705MPa} \approx 6.90$$

### Tercera unión - Lavadora en caliente

$$\eta_1 = 1.985 \times \frac{124.11MPa}{1.954MPa} \approx 126.12$$

$$\eta_2 = 1.985 \times \frac{124.11MPa}{1.922MPa} \approx 128.13$$

### Cuarta unión - Lavadora en caliente

$$\eta_1 = 1.985 \times \frac{124.11MPa}{3.474MPa} \approx 70.93$$

$$\eta_2 = 1.985 \times \frac{124.11MPa}{79.514MPa} \approx 3.09$$

## 6.19. Pernos

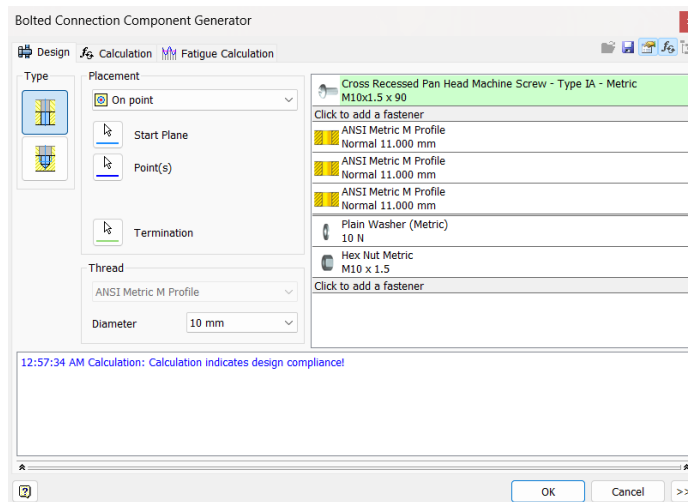
### Diseño de uniones semipermanentes

En esta parte del proyecto, se utilizaron los pernos como elementos de unión para la estructura de soporte de la lavadora en caliente. La simulación y el diseño de estas conexiones atornilladas se llevaron a cabo en Autodesk Inventor utilizando el "Design Accelerator", que permite configurar y validar las uniones atornilladas de manera eficiente y precisa.

### Configuración de la unión

El proceso comenzó seleccionando el tipo de conexión a realizar, en este caso, un ensamblaje con pernos que consta de tornillos, arandelas y tuercas, como se muestra en la figura a continuación:

Figura 54: Selección de componentes para la conexión atornillada en el "Design Accelerator".

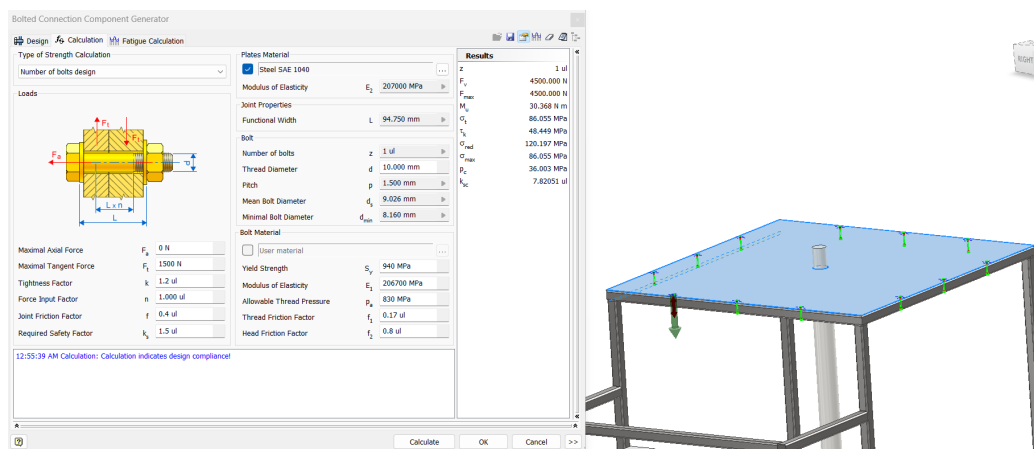


La opción de *On Point* se utilizó para definir el punto exacto donde se colocaría la conexión atornillada. Se seleccionaron tornillos M10x1.5x90 y se añadieron las arandelas y la tuerca correspondientes para asegurar una correcta fijación de las piezas, tal como se muestra en la interfaz del *Design Accelerator*.

### Cálculo y validación de la unión

Una vez definida la configuración del perno, se realizó un análisis de la capacidad de la conexión para soportar las cargas aplicadas en la estructura. En la pestaña de cálculo, se ingresaron las propiedades del material del tornillo, acero SAE 304, y se establecieron los parámetros como el número de pernos, diámetro de la rosca, y las fuerzas que actuarían sobre la unión.

Figura 55: Cálculo y verificación de la conexión atornillada utilizando el "Design Accelerator".<sup>en</sup> Autodesk Inventor.



En este análisis se consideraron la fuerza axial máxima ( $F_a$ ), la fuerza tangencial máxima

( $F_t$ ), y factores de ajuste y seguridad. La herramienta verificó que el diseño cumpliera con los requerimientos de resistencia, indicando que la conexión era adecuada para soportar las cargas operativas, como se observa en la figura.

### Selección del tamaño y resistencia de los pernos

Para seleccionar el tamaño y resistencia adecuados de los pernos, se consultaron las tablas de dimensiones y propiedades de los pernos:

Figura 56: Dimensiones de roscas hexagonales para la selección de pernos.

Tabla A-31 Dimensiones de roscas hexagonales	Altura $H$				
	Tamaño nominal, pulg	Ancho $W$	Hexagonal regular	Gruesa ranurada Contra-tuerca	
$\frac{1}{4}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{7}{32}$	$\frac{9}{32}$	$\frac{5}{32}$	
$\frac{5}{16}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{17}{64}$	$\frac{21}{64}$	$\frac{3}{16}$	
$\frac{3}{8}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{21}{64}$	$\frac{13}{32}$	$\frac{7}{32}$	
$\frac{7}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{29}{64}$	$\frac{1}{4}$	
$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{5}{16}$	
$\frac{9}{16}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{31}{64}$	$\frac{39}{64}$	$\frac{5}{16}$	
$\frac{5}{8}$	$\frac{15}{16}$	$\frac{35}{64}$	$\frac{23}{32}$	$\frac{3}{8}$	
$\frac{3}{4}$	$1\frac{1}{8}$	$\frac{41}{64}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{27}{64}$	
$\frac{7}{8}$	$1\frac{5}{16}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{29}{32}$	$\frac{31}{64}$	
1	$1\frac{1}{2}$	$\frac{55}{64}$	1	$\frac{35}{64}$	
$1\frac{1}{8}$	$1\frac{11}{16}$	$\frac{31}{32}$	$1\frac{5}{32}$	$\frac{39}{64}$	
$1\frac{1}{4}$	$1\frac{7}{8}$	$1\frac{1}{16}$	$1\frac{1}{4}$	$\frac{23}{32}$	
$1\frac{3}{8}$	$2\frac{1}{16}$	$1\frac{11}{64}$	$1\frac{3}{8}$	$\frac{25}{32}$	
$1\frac{1}{2}$	$2\frac{1}{4}$	$1\frac{9}{32}$	$1\frac{1}{2}$	$\frac{27}{32}$	
Tamaño nominal, mm	M5	8	4.7	5.1	2.7
M6	10	5.2	5.7	3.2	
M8	13	6.8	7.5	4.0	
M10	16	8.4	9.3	5.0	
M12	18	10.8	12.0	6.0	
M14	21	12.8	14.1	7.0	
M16	24	14.8	16.4	8.0	
M20	30	18.0	20.3	10.0	
M24	36	21.5	23.9	12.0	
M30	46	25.6	28.6	15.0	
M36	55	31.0	34.7	18.0	

Estas tablas proporcionaron la información necesaria para garantizar que los pernos seleccionados cumplieran con los estándares de resistencia requeridos para la estructura de soporte. Adicionalmente, se utilizaron los tamaños preferidos de la serie Renard, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Figura 57: Resistencias determinísticas mínimas a la tensión y a la fluencia de algunos aceros laminados en caliente y estirados en frío.

**Tabla A-20**

Resistencias determinísticas mínimas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD). [Las resistencias listadas son valores ASTM mínimos estimados en el intervalo de tamaños de 18 a 32 mm ( $\frac{3}{4}$  a  $1\frac{1}{4}$  pulg.). Estas resistencias resultan adecuadas para usarse con el factor de diseño definido en la sección I-10, a condición que los materiales se ajusten a los requisitos ASTM A6 o A568 o que se requieran en las especificaciones de compra. Recuerde que un sistema de numeración no es una especificación.] Fuente: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS núm.	SAE y/o AISI núm.	Procesamiento	Resistencia a la tensión, MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación en 2 pulg., %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

Figura 58: Tamaños preferidos y números de Renard (serie R) para la selección de pernos y componentes.

**Tabla A-17**

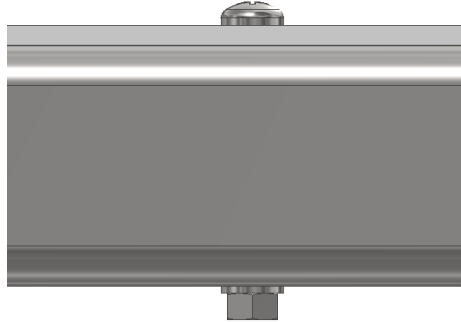
Tamaños preferidos y números de Renard (serie R). (Cuando pueda elegir, use uno de estos tamaños; sin embargo, no todas las partes o artículos están disponibles en todos los tamaños que se muestran en la tabla.)

Fración de pulgadas
$\frac{1}{64}, \frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{3}{32}, \frac{1}{8}, \frac{5}{32}, \frac{3}{16}, \frac{1}{4}, \frac{5}{16}, \frac{3}{8}, \frac{7}{16}, \frac{1}{2}, \frac{9}{16}, \frac{5}{8}, \frac{11}{16}, \frac{3}{4}, \frac{7}{8}, 1, 1\frac{1}{4}, 1\frac{1}{2}, 1\frac{3}{4}, 2, 2\frac{1}{4}, 2\frac{1}{2}, 2\frac{3}{4}, 3, 3\frac{1}{4}, 3\frac{1}{2}, 3\frac{3}{4}, 4, 4\frac{1}{4}, 4\frac{1}{2}, 4\frac{3}{4}, 5, 5\frac{1}{4}, 5\frac{1}{2}, 5\frac{3}{4}, 6, 6\frac{1}{4}, 6\frac{1}{2}, 6\frac{3}{4}, 7, 7\frac{1}{4}, 7\frac{1}{2}, 7\frac{3}{4}, 8, 8\frac{1}{4}, 8\frac{1}{2}, 8\frac{3}{4}, 9, 9\frac{1}{4}, 10, 10\frac{1}{4}, 11, 11\frac{1}{4}, 12, 12\frac{1}{4}, 13, 13\frac{1}{4}, 14, 14\frac{1}{4}, 15, 15\frac{1}{4}, 16, 16\frac{1}{4}, 17, 17\frac{1}{4}, 18, 18\frac{1}{4}, 19, 19\frac{1}{4}, 20$
Décimas de pulgadas
0.010, 0.012, 0.016, 0.020, 0.025, 0.032, 0.040, 0.05, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.16, 0.20, 0.24, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 1.00, 1.20, 1.40, 1.60, 1.80, 2.0, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4.0, 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 5.0, 5.2, 5.4, 5.6, 5.8, 6.0, 7.0, 7.5, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5, 12.0, 12.5, 13.0, 13.5, 14.0, 14.5, 15.0, 15.5, 16.0, 16.5, 17.0, 17.5, 18.0, 18.5, 19.0, 19.5, 20
Milímetros
0.05, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.16, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90, 1.0, 1.1, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.5, 2.8, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 8.0, 9.0, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 35, 40, 45, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 250, 300
Números de Renard*
1a. elección, R5: 1, 1.6, 2.5, 4, 6.3, 10
2a. elección, R10: 1.25, 2, 3.15, 5, 8
3a. elección, R20: 1.12, 1.4, 1.8, 2.24, 2.8, 3.55, 4.5, 5.6, 7.1, 9
4a. elección, R40: 1.06, 1.18, 1.32, 1.5, 1.7, 1.9, 2.12, 2.36, 2.65, 3, 3.35, 3.75, 4.25, 4.75, 5.3, 6, 6.7, 7.5, 8.5, 9.5

\* Se pueden multiplicar por, o dividir entre, potencias de 10.

Estos tamaños fueron seleccionados para asegurar la disponibilidad de los componentes y cumplir con las mejores prácticas de diseño. Finalmente, se generó un modelo visual que muestra la colocación de los pernos y cómo se integra en la estructura de la lavadora en caliente. Esto permitió verificar visualmente la correcta instalación y dimensiones de los componentes.

Figura 59: Visualización de la conexión atornillada en el modelo de la estructura.



Este proceso de diseño y validación de la conexión atornillada garantizó que la estructura fuese segura y capaz de soportar las cargas esperadas durante el funcionamiento de la lavadora en caliente, asegurando la integridad de la unión y la eficiencia operativa del sistema.



## 7.1. Cumplimiento de requisitos

Cuadro 8: Cumplimiento de requisitos de diseño

Código	Requisito	Cumple/No cumple
RD01	La capacidad de procesamiento de las máquinas de lavado debe ser de al menos 150 kg/hr.	✓
RD02	Los tanques de la máquina separadora por densidades deben tener una capacidad máxima de 2500 litros de agua.	✓
RD03	El tanque de la lavadora en caliente debe tener una capacidad máxima de 5000 litros de fluido de trabajo.	✓
RD04	El dimensionamiento de los tanques de la separadora por densidades no debe exceder las dimensiones de: 3m x 5m x 3m (ancho, largo, alto).	✓
RD05	Las botellas PET deben ser transportadas mediante tuberías desde el tanque de entrada hacia el de salida en la máquina de separación por densidades.	✓
RO01	La alimentación a la lavadora en caliente debe acoplarse adecuadamente a la salida de la máquina desetiquetadora.	✓
RO02	La lavadora en caliente debe operar con una mezcla de hidróxido de sodio y agua, y la temperatura del fluido de trabajo no debe exceder los 150 grados Celsius.	✓

Continuación en la siguiente página

<b>Código</b>	<b>Requisito</b>	<b>Cumple/No cumple</b>
RO03	El sistema de control de la lavadora en caliente debe garantizar el mantenimiento de la temperatura de trabajo constante en 80 grados Celsius y permitir la adición precisa de hidróxido de sodio según las condiciones de operación.	✓
RM01	La lavadora en caliente debe contar con un sistema de filtrado para eliminar impurezas y residuos durante el proceso de lavado.	✓
RM02	El diseño de ambos sistemas debe permitir un fácil acceso para el mantenimiento, reemplazo de componentes, y limpieza regular.	✓
RS01	Los componentes del sistema y las estructuras circundantes deben ser capaces de soportar temperaturas de hasta 150 grados Celsius.	✓
RS02	Se deben implementar medidas de seguridad, como el uso de equipos de protección personal (EPP), extintores y sistemas de detección de incendios en el área de trabajo.	✓
RS03	Los operadores deben ser capacitados en el uso seguro de la mezcla de hidróxido de sodio y en la operación de las máquinas de separación por densidades y lavado en caliente.	✓
RS04	Se debe asegurar que las instalaciones eléctricas y equipos cumplan con los códigos y estándares de seguridad ocupacional, incluyendo monitoreo de la calidad del aire para evitar exposición a polvo y productos químicos.	✓

## 7.2. Resultados tabulados

### Resultados - Separadora por densidades

Cuadro 9: Cálculos realizados - Separadora por densidades

Descripción	Valor obtenido
Número de Reynolds	3720
Coefficiente de arrastre	0.503
Velocidad de sedimentación	0.106 m/s
Tiempo de separación	6.13
Caudal de PET	0.0281
Volumen de operación	1.92m <sup>3</sup>
Presión hidrostática	6376.5 Pa
Esfuerzo de presión hidrostática	2.47 MPa
Velocidad de plástico	0.012m <sup>3</sup> /s
Tiempo de residencia	137.14 s
Potencia de bomba	0.377 hp
Factor de seguridad utilizando el criterio de Ullman	1.92
Factor de seguridad para el acero, criterio Goodman	94.03
Factor de seguridad para el PVC	13.49

### Resultados - Lavadora en caliente

Cuadro 10: Cálculos realizados - Lavadora en caliente

Descripción	Valor obtenido
Volumen del tanque (m <sup>3</sup> )	6.28
Volumen del fluido (m <sup>3</sup> )	4.09
Peso del fluido de trabajo (N)	53,486.42
Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /s)	0.0341
Presión hidrostática (kPa)	14.03
Esfuerzo circunferencial (MPa)	2.21
Calor necesario, temperatura del fluido (kJ)	1,025,772
Relación de soda cáustica y agua (%)	22.54 NaOH
Tiempo de llenado del tanque (minutos)	40.84
Deflexión máxima del eje (μm)	55.2843
Velocidad crítica del eje (rpm)	4,019
Potencia del motor (HP)	9.92
Esfuerzo torsional (MPa)	0.9437
Esfuerzo combinado de von Mises (MPa)	144.23
Factor de seguridad utilizando el criterio de Ullman	2.265
Factor de seguridad	3.51

## Resultados - Soldadura

Cuadro 11: Resultados de los cálculos de soldadura

Descripción	Material	Electrodo E6018
Factor de seguridad L = 1 m	10.71	61.95
Factor de seguridad L = 1 m	3.57	185.80
Factor de seguridad L = 3 m	19.28	34.41
Factor de seguridad L = 3 m	96.14	6.90
Factor de seguridad L = 55.8 mm	5.26	126.12
Factor de seguridad L = 55.8 mm	5.17	128.13
Factor de seguridad L = 20.2 mm	9.35	70.93
Factor de seguridad L = 20.2 mm	214.12	3.09

## Factores de seguridad - Separadora por densidades

Cuadro 12: Factores de seguridad - Separadora por densidades

Elemento	Factor de seguridad	Cumple
Acero SAE 304	94.03	✓
Tanques	5.24	✓
PVC	13.49	✓
Planchas cortas	10.71	✓
Planchas largas	96.14	✓
Electrodo E6018 1 m	61.95	✓
Electrodo E6018 3 m	6.90	✓

## Factores de seguridad - Lavadora en caliente

Cuadro 13: Factores de seguridad - Lavadora en caliente

Elemento	Factor de seguridad	Cumple
Acero SAE 304	3.51	✓
Estructura	3.36	✓
Pernos	4.02	✓
Tanque	6.90	✓
Electrodo E6018 2 pulg.	126.12	✓
Electrodo E6018 3/4 pulg.	70.93	✓
Tubería cuadrada 2 pulg.	5.26	✓
Tubería cuadrada 3/4 pulg.	9.35	✓

### 7.3. Resultados de ensayos - Separadora por densidades

La solución del problema incluyó la resolución de ecuaciones de equilibrio estructural utilizando el método de elementos finitos. Se llevaron a cabo las simulaciones bajo dos condiciones de presión (máxima y operativa) para obtener un análisis comparativo.

#### Simulación estático estructural

Los resultados presentados muestran primero el resultado obtenido para la simulación bajo presión máxima y luego bajo presión operativa. Se utilizó el caso de la presión máxima para simular una instancia en la que el uso de la máquina no es el adecuado y el tanque se encuentra a un nivel mayor del recomendado. Esto permite identificar posibles áreas de falla y validar la integridad estructural del equipo en condiciones extremas y de uso cotidiano.

#### Deformación total

La deformación total muestra cómo la estructura se desplaza bajo la acción de las cargas aplicadas. Este análisis sirve para asegurar que las deformaciones estén dentro de límites aceptables y que la estructura mantenga su funcionalidad durante la operación.

Figura 60: Deformación total bajo presión máxima.

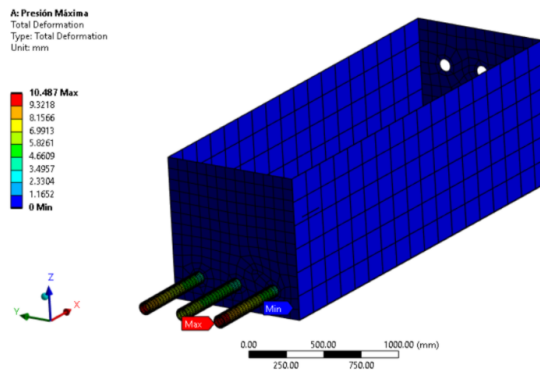
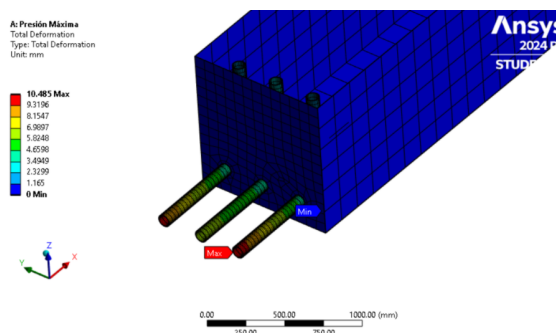


Figura 61: Deformación total bajo presión operativa.



## Deformación direccional

La deformación direccional analiza el desplazamiento en una dirección específica (en este caso, el eje X). Este resultado permite identificar cómo se comporta la estructura frente a cargas direccionales y evaluar si puede resistir fuerzas laterales o longitudinales durante la operación.

Figura 62: Deformación direccional bajo presión máxima.

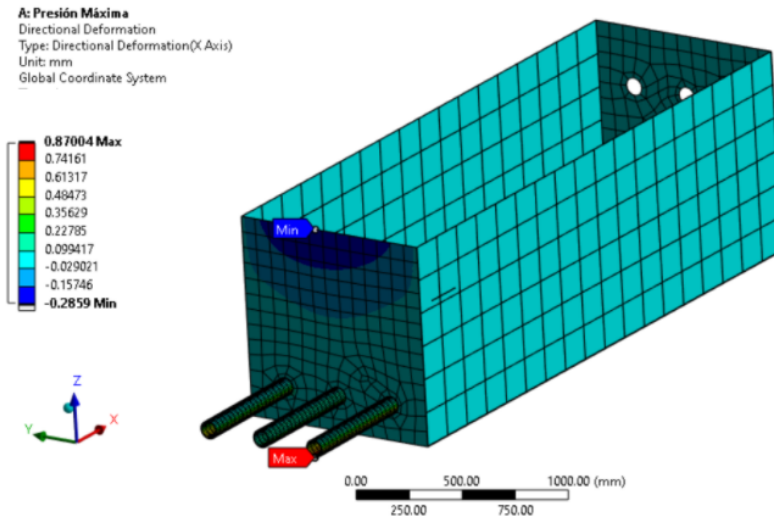
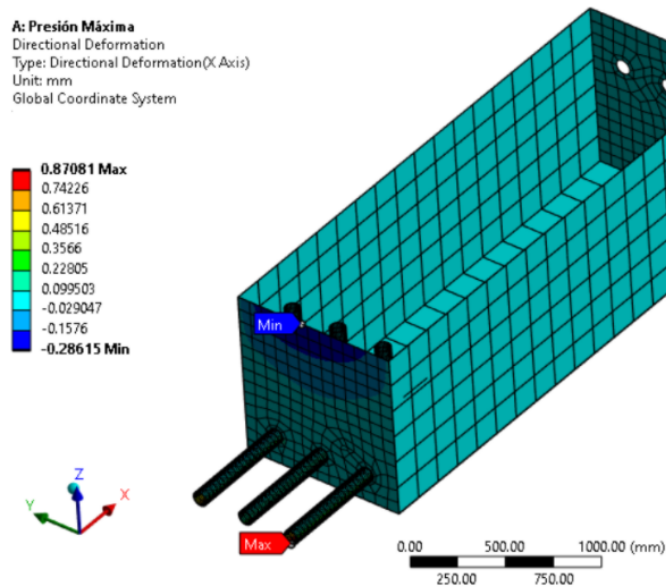


Figura 63: Deformación direccional bajo presión operacional.



## Tensión principal máxima

La tensión principal máxima indica las regiones de la estructura que experimentan las mayores tensiones. Permite identificar las áreas más vulnerables a la falla, asegurando que la estructura no exceda los límites de resistencia del material bajo las condiciones de carga máxima y operativa.

Figura 64: Tensión principal máxima bajo presión máxima.

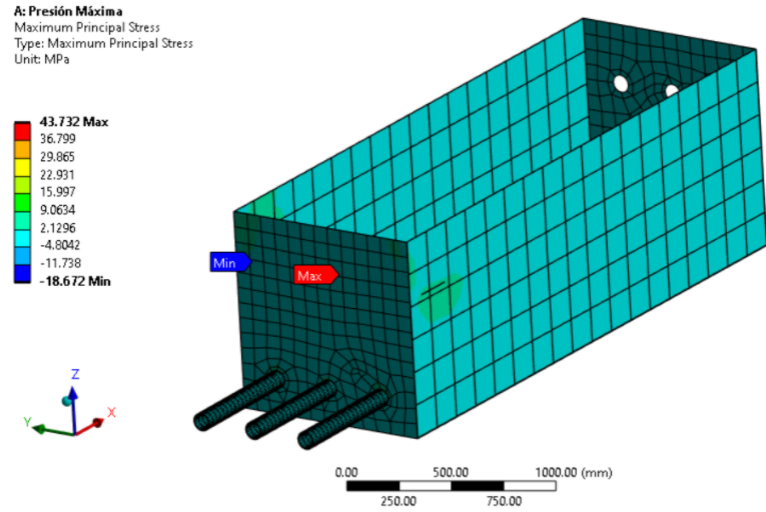
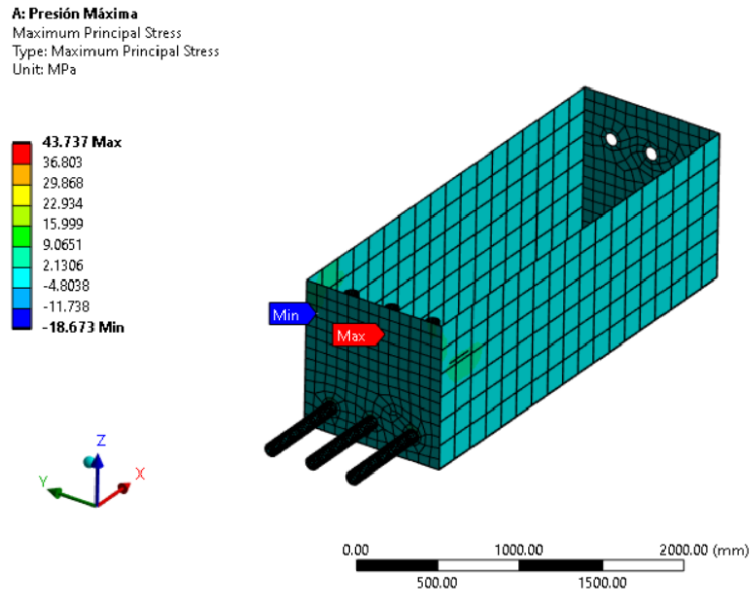


Figura 65: Tensión principal máxima bajo presión operacional.



## Esfuerzo equivalente (von Mises)

El Esfuerzo Equivalente de von Mises se utiliza para evaluar si el material de la estructura se encuentra dentro de los límites de resistencia plástica. Este análisis sirve para identificar que la estructura no sufra deformaciones permanentes bajo las condiciones de carga máxima y operativa.

Figura 66: Esfuerzo equivalente de von Mises bajo presión máxima.

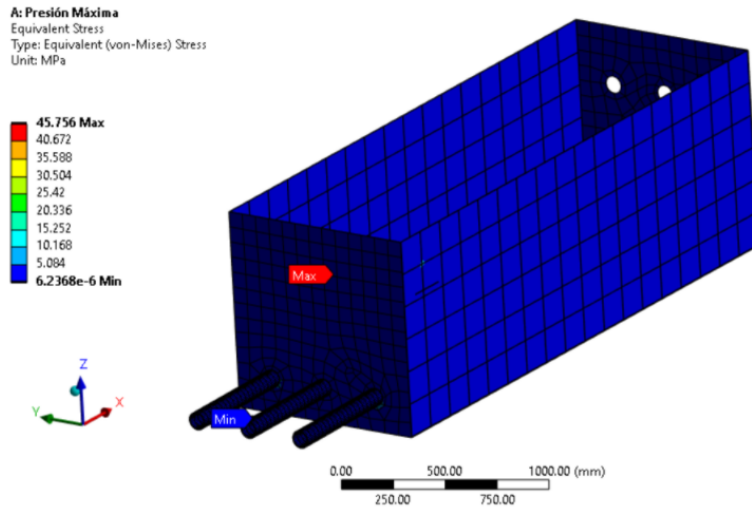
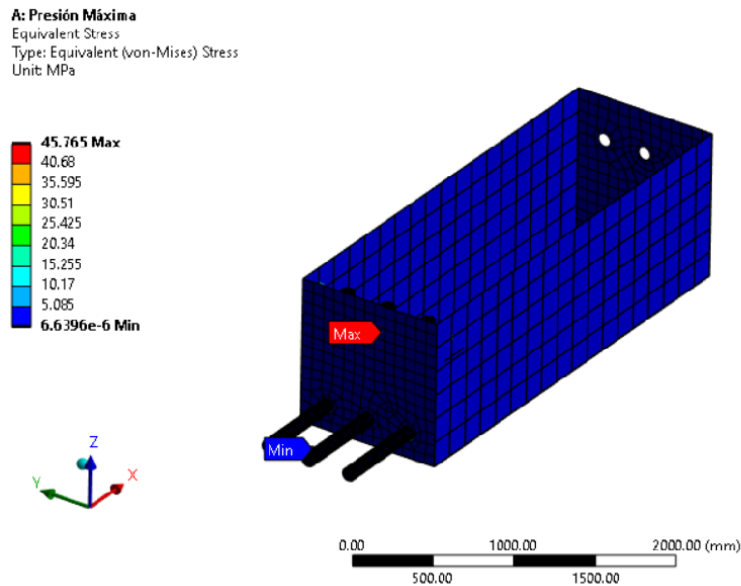


Figura 67: Esfuerzo Equivalente de von Mises bajo presión operacional.



## Factor de seguridad

El Factor de Seguridad representa la capacidad de la estructura para soportar cargas adicionales más allá de las condiciones operativas. Un factor superior a 1 indica un diseño seguro, mientras que valores cercanos o menores a 1 representan riesgo de falla. Este análisis permite verificar la integridad y confiabilidad de la máquina en condiciones de uso real. Para observar el área crítica del ensamblaje se utilizó una vista *Section Plane*.

Figura 68: Factor de seguridad bajo presión máxima.

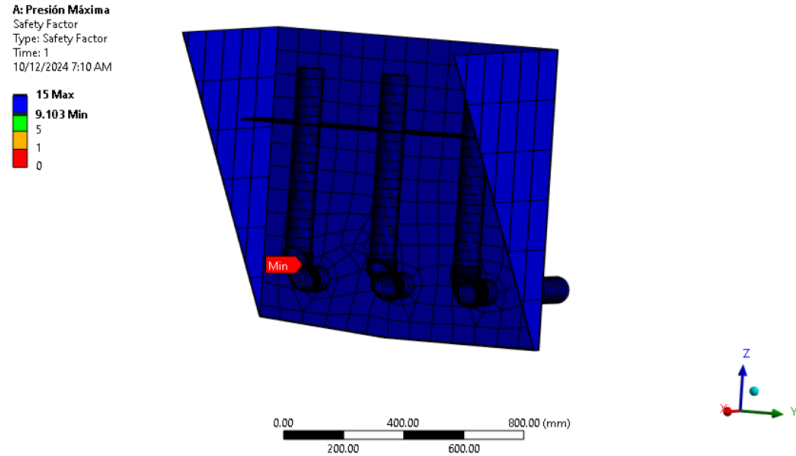
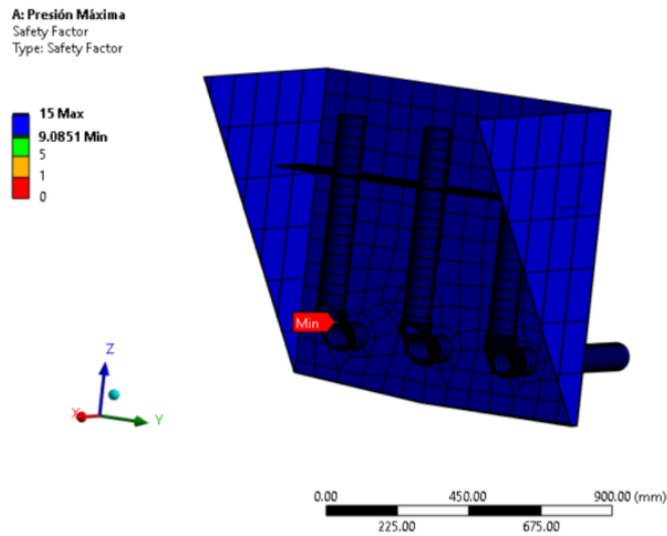


Figura 69: Factor de seguridad bajo presión operacional.



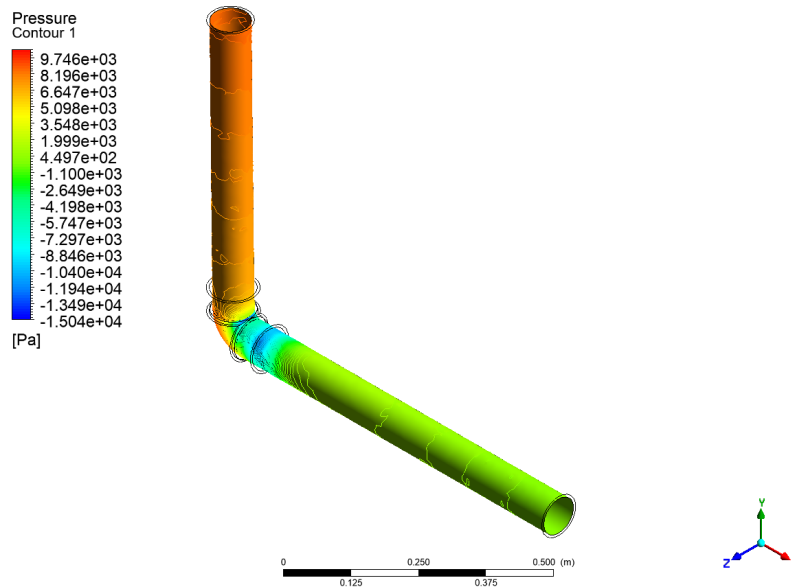
## Simulación de flujo en tuberías

El análisis de flujo en las tuberías es fundamental para evaluar la eficiencia y el comportamiento del fluido en el sistema de la máquina separadora por densidades. Las imágenes a continuación muestran la distribución de presión y la velocidad del fluido a través de la tubería bajo condiciones de operación.

### Distribución de presión

La distribución de presión dentro de la tubería es esencial para identificar puntos de posible acumulación de presión o zonas donde el fluido podría experimentar una pérdida de carga significativa.

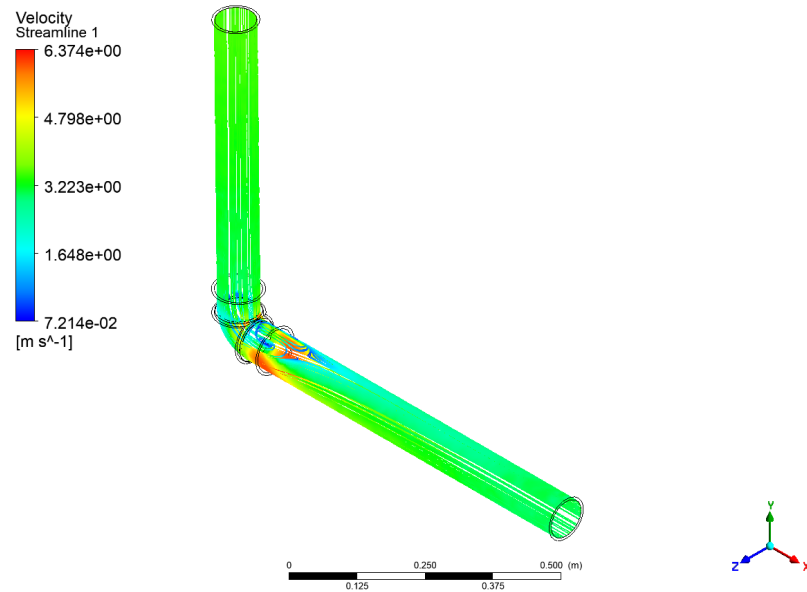
Figura 70: Distribución de presión en las tuberías.



### Distribución de velocidad

El análisis de la velocidad del fluido es crucial para entender cómo se comporta el fluido mientras atraviesa el sistema de tuberías. Esto permite identificar zonas donde el flujo se acelera o desacelera, lo que puede afectar la eficiencia del proceso de separación.

Figura 71: Distribución de velocidad del fluido en las tuberías.



## 7.4. Resultados de ensayos - Lavadora en caliente

Se realizaron dos tipos de simulaciones en la lavadora en caliente: una simulación estática estructural para analizar el comportamiento de la estructura bajo cargas, y una simulación tipo Fluent para evaluar el comportamiento del fluido dentro de la lavadora.

**Simulación estática estructural** La simulación estática estructural se realizó para analizar la respuesta de la estructura de la lavadora bajo diferentes condiciones de carga y presión, identificando las zonas de mayor deformación y esfuerzo.

Figura 72: Deformación total en la lavadora en caliente.

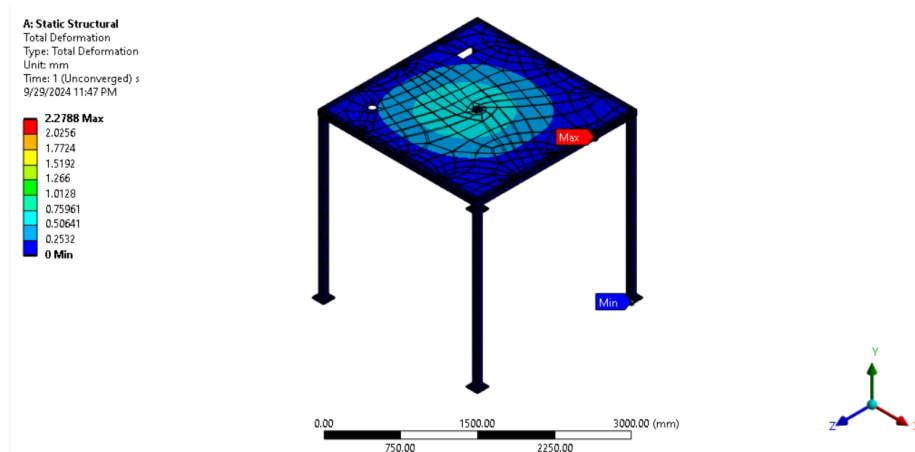


Figura 73: Deformación direccional en la lavadora en caliente.

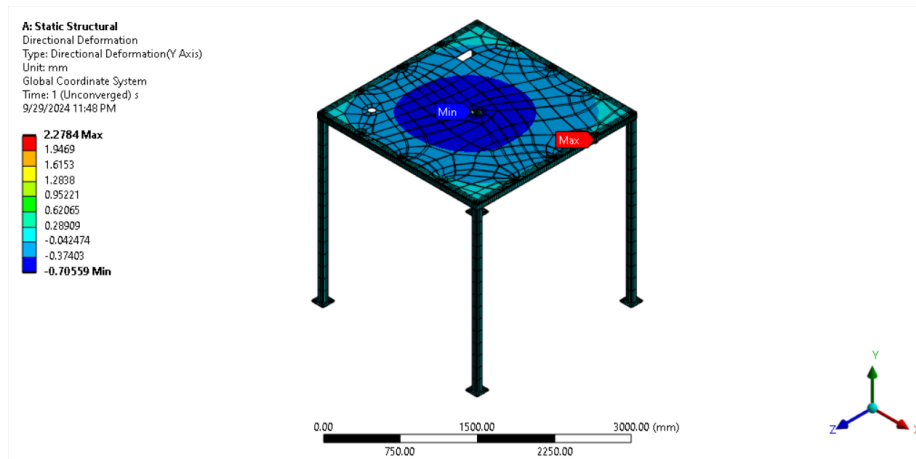


Figura 74: Error estructural en la lavadora en caliente.

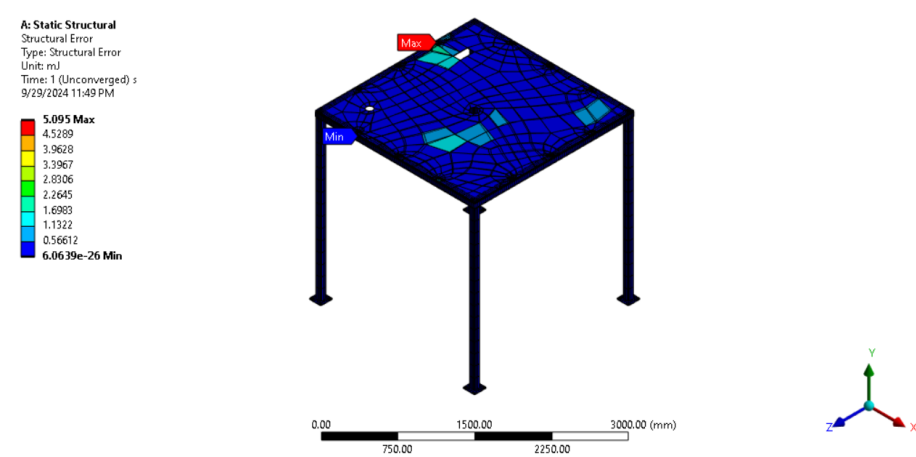


Figura 75: Esfuerzo equivalente de von Mises en la lavadora en caliente.

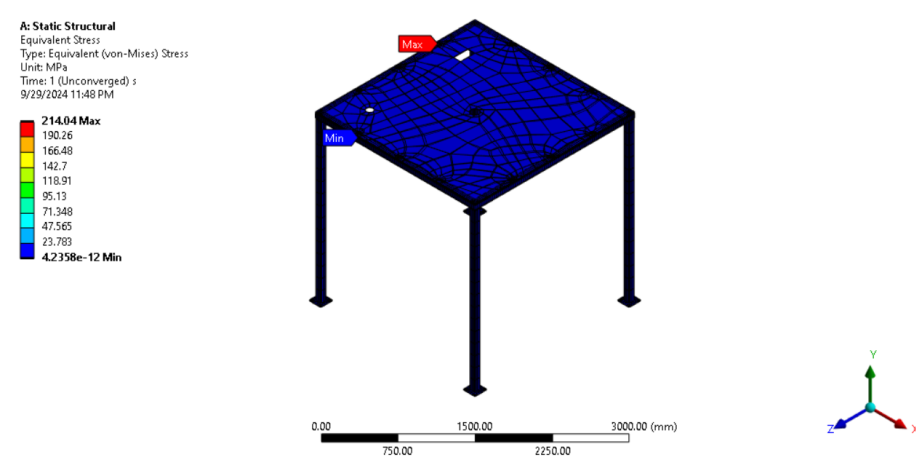


Figura 76: Factor de seguridad general de la lavadora en caliente.

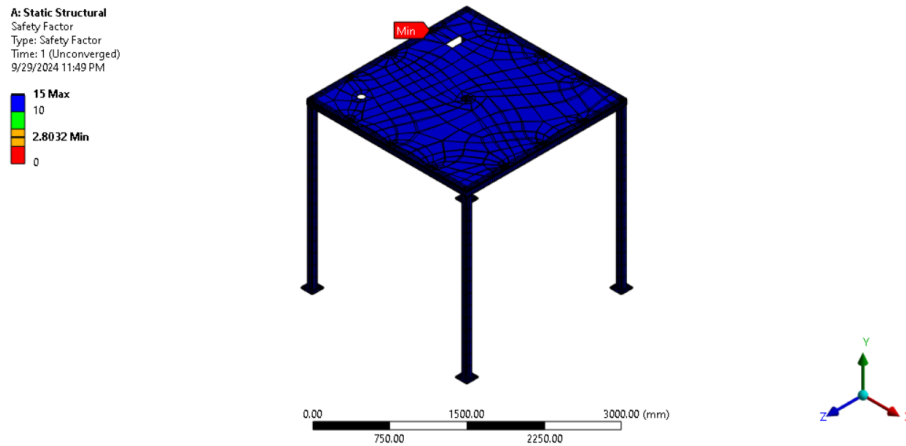
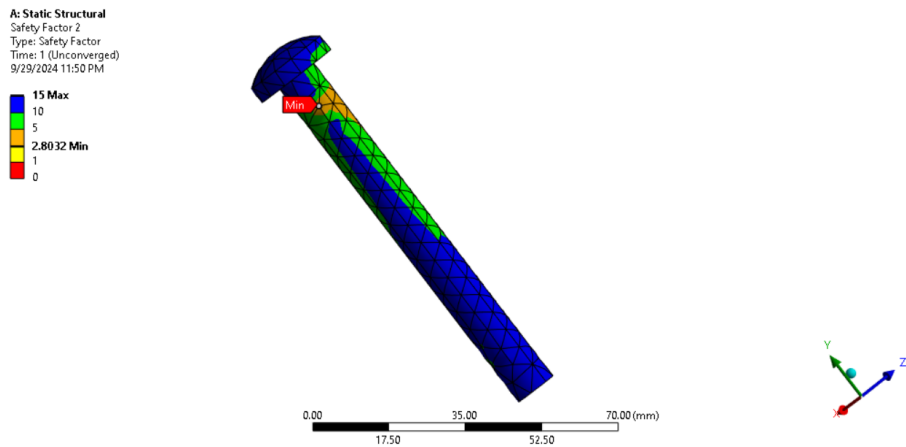
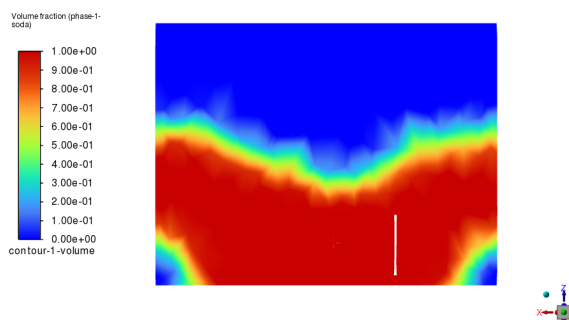


Figura 77: Factor de seguridad en los pernos de la lavadora en caliente.



**Simulación tipo Fluent** La simulación tipo Fluent permitió analizar el comportamiento del fluido dentro de la lavadora en caliente, evaluando la mezcla y la interacción del fluido dentro del sistema.

Figura 78: Distribución de la mezcla dentro de la lavadora en caliente.



## 7.5. Presupuesto

### Presupuesto - Separadora por densidades

Cuadro 14: Presupuesto estimado - Máquina separadora por densidades

Elemento	Descripción	Cantidad	Precio C/U (Q)	Precio total (Q)
Planchas largas	Planchas de acero 1m X 3m X 3.175mm	6	1,200	7,200
Planchas cortas	Planchas de acero 1m X 1m X 3.175mm	4	400	1,600
Tubería de PVC	Tuberías de PVC de 3.5 in (L = 32 in)	3	250	750
Tubería de PVC	Tuberías de PVC de 3.5 in (L = 26 in)	3	200	600
Tubería de PVC	Tuberías de PVC de 3.5 in (L = 20 in)	4	180	720
Codos ASTM 90 grados	Codos de PVC de 3.5 in	3	120	360
Plancha soporte	Plancha de acero 1m X 0.2m X 3.175mm	1	250	250
Válvulas de servicio	SLC10300TEU	2	350	700
Bomba centrífuga	2.0 HP FPS FTB2CI de Franklin Electric	1	5,666.49	5,666.49
<b>Subtotal materiales</b>				<b>Q 17,846.49</b>
<b>Mano de obra y manufactura</b>	Corte, soldadura y ensamblaje	–	–	<b>Q 3,569.29</b>
<b>Transporte y logística (5 %)</b>	Flete y entrega local	–	–	<b>Q 1,075.79</b>
<b>Costos adicionales (15 %)</b>	Herramientas, imprevistos, sellos, instalación	–	–	<b>Q 3,212.37</b>
<b>Costo total estimado</b>				<b>Q 25,703.94</b>

El costo de manufactura para la separadora por densidades contempla el corte de las planchas, un valor estimado de la soldadura por el Taller Industrial Sosa. El costo de manufactura también estima el costo de la instalación de los componentes y tuberías de PVC

del sistema, dando un total estimado de Q 25,703.94. Este valor es susceptible a cambio dependiendo de la calidad del trabajo realizado y otros factores que pueden reducir o elevar el costo de instalación del sistema tal y como es el tiempo de elaboración.

### 7.5.1. Presupuesto - Lavadora en caliente

Cuadro 15: Presupuesto de la lavadora en caliente (con módulo SINFIMASA e importación incluida)

Elemento	Descripción	Cantidad	Precio C/U (Q)	Precio total (Q)
Tuberías angulares	AISC 3 X 3 X 1/4 (varias longitudes)	12	850	10,200
Tuberías angulares	AISC 2 X 2 X 1/4 (86.25 in)	1	250	250
Plate Filleted Corners	164.2 X 164.2 X 6 mm	6	300	1,800
Planchas de acero	200 mm X 400 mm X 6.35 mm	4	1,200	4,800
Plancha de acero	2200 mm X 2200 mm X 1/4 in	1	7,000	7,000
Tanque cilíndrico	Fabricado en acero al carbono (2m x 2m x 6.35mm)	1	12,000	12,000
Tornillos M10 X 1.5 X 90	Acero grado 8.8	12	5	60
Arandelas 10N	Acero inoxidable	12	2	24
Tuercas M10 X 1.5	Acero grado 8.8	12	3	36
Eje central	Eje agitador macizo acero inox.	1	4,500	4,500
Platina para agitador	400 mm X 100 mm X 20 mm	5	450	2,250
Pasador RH600	SPIROL – acero tratado	1	1,129	1,129
Módulo de sin-fín	SINFIMASA (2,800 EUR)	1	23,800	23,800
Variador de frecuencia	Danfoss FC302 – 20 HP	1	25,000	25,000
<b>Subtotal materiales</b>				<b>Q 120,849</b>
<b>Manufactura</b>	Corte, soldadura, ensamblaje	–	–	<b>Q 18,000</b>
<b>Importación de componentes</b>	Aranceles, IVA, agentes, flete	–	–	<b>Q 12,482</b>

Continuación en la siguiente página

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio C/U (Q)</b>	<b>Precio total (Q)</b>
<b>Imprevistos (10 %)</b>	Logística, instalación, sellos, extras	-	-	<b>Q 15,133.10</b>
<b>Costo total estimado</b>				<b>Q 166,464.10</b>

Para el sistema de lavado en caliente se consideró la importación de componentes como el módulo de tornillo sinfín, el tanque cilíndrico, el pasador y el variador de frecuencias. La compra por medio de distribuidores locales no cumplía con las especificaciones necesarias, aparte de que los componentes disponibles presentaban un margen de ganancia adicional por parte de los distribuidores. Los costos de importación para los componentes mencionados incluyen el impuesto al valor agregado (IVA) del 12%. El envío de los componentes fue cotizado por medio de la empresa logística Ya y se incorporó dentro del subtotal de los componentes importados. El costo total estimado considera el costo de todos los componentes del sistema como los impuestos correspondientes, el rango presentado demuestra una variabilidad en el costo de cada uno de los componentes donde no se conozca una cifra fija.

---

## Analisis de resultados

---

El diseño y funcionamiento de la máquina separadora por densidades fueron evaluados mediante simulaciones estructurales y de dinámica de fluidos utilizando *ANSYS Workbench*. Estas simulaciones no solo fueron claves para analizar los conceptos de deformación, esfuerzos mecánicos, presiones internas y el comportamiento del flujo en las tuberías del sistema, sino que también permitieron prever problemas y optimizar el diseño sin necesidad de fabricar prototipos físicos inicialmente. El análisis se realizó considerando tanto las condiciones operativas normales como los escenarios de máxima carga, lo que permitió asegurar que el diseño funcionara de manera segura bajo diferentes condiciones.

El uso de *ANSYS Workbench* fue fundamental para la obtención de resultados precisos, ya que permitió simular con gran detalle los puntos críticos de mayor esfuerzo y deformación en la geometría. Uno de los primeros resultados obtenidos fue el de *deformación total*, que mostró un valor máximo de 10.487 mm, concentrado principalmente en las áreas cercanas a las conexiones de las tuberías con el segundo tanque (Figura 58). Estas áreas son particularmente vulnerables debido a la interacción constante con el fluido en movimiento, generando mayores esfuerzos y deformaciones localizadas. Por medio de las simulaciones, se pudo confirmar que el acero SAE 304 utilizado en los tanques podía soportar estos niveles de deformación sin comprometer su integridad estructural, debido a su alta resistencia mecánica y a la corrosión (Callister & Rethwisch, 2011). Adicionalmente, la *deformación direccional* en el eje X, mostró un valor máximo de 0.87004 mm (Figura 60), lo que indica que las tensiones están distribuidas y no representan un riesgo de deformación permanente.

El análisis de *esfuerzos equivalentes de von Mises* reveló un valor máximo de 45.756 MPa (Figura 64), especialmente en las zonas de entrada y salida de las tuberías, donde el peso del fluido y la presión interna generan concentraciones de tensión. El esfuerzo de von Mises es un criterio fundamental en el análisis de fallas, ya que permite predecir el punto en el que un material podría ceder debido a la combinación de tensiones normales y de corte (Budynas & Nisbett, 2015). En este caso, los valores calculados se mantuvieron dentro de los límites seguros para el acero SAE 304, cuyo límite elástico es significativamente mayor, alrededor de 505 MPa, lo que asegura que no habrá falla plástica bajo estas condiciones de operación.

El análisis de los *esfuerzos principales* también mostró concentraciones máximas de 43.732 MPa (Figura 63), corroborando la importancia de diseñar las conexiones de las tuberías de manera robusta, dado que son las áreas más propensas a experimentar altos esfuerzos debido a los cambios en la dirección del flujo y las fuerzas ejercidas por el fluido. Estos resultados permitieron modificar el diseño en esas áreas críticas sin necesidad de fabricar múltiples versiones de los componentes.

El uso de simulaciones para prever problemas y modificar el diseño antes de la fabricación tiene relevancia en el contexto industrial, ya que permite evitar posibles fallas estructurales y sobrecostos asociados a la manufactura de prototipos defectuosos. El análisis de las tuberías de PVC mostró que la mayor presión se concentraba en los codos (Figura 66). Estas zonas suelen ser problemáticas en sistemas de flujo debido a la brusca variación en la dirección del fluido. Sin embargo, el PVC demostró un comportamiento adecuado bajo las condiciones operativas definidas, garantizando que el sistema funcionará adecuadamente dentro de los parámetros esperados (Jana, 2021). La velocidad del flujo dentro de las tuberías también fue analizada, alcanzando un máximo de 6.374 m/s (Figura 69), lo cual asegura que tanto el agua como el plástico mantienen su velocidad mientras pasan del primer tanque al segundo.

Otro aspecto relevante fue el análisis del *factor de seguridad*, que mostró un valor mínimo de 9.0851 para la separadora por densidades (Figura 67). Este parámetro proporciona una medida de cuánta sobrecarga puede soportar el sistema sin comprometer su integridad estructural (Ullman, 2018). Un valor mayor que el factor de diseño dado de 2 garantiza que el sistema es confiable, incluso bajo condiciones de operación más severas que las previstas inicialmente.

Además del análisis estructural, se consideraron requisitos de diseño como la capacidad volumétrica de los tanques, que debía ser al menos 1.5 m<sup>3</sup>, y las dimensiones generales del sistema, que debían mantenerse dentro de los límites de 3 m x 5 m x 3 m. El uso de *Autodesk Inventor* para modelar los componentes del sistema permitió cumplir con estos requisitos espaciales, mientras que *ANSYS* se utilizó para validar la resistencia estructural. Estas herramientas de simulación combinadas permiten no solo modificar el diseño, sino también verificar su adecuación para la operación en planta, asegurando que el sistema sea compacto y adecuado para el espacio disponible.

Además, *Autodesk Inventor* proporcionó una plataforma versátil para diseñar con precisión los componentes, permitiendo realizar iteraciones rápidas durante la fase de diseño preliminar. Este software fue crítico para garantizar que los modelos CAD incluyeran todos los detalles geométricos necesarios, lo cual facilitó la exportación directa a *ANSYS Workbench* para las simulaciones. La integración entre ambos programas no solo ayudó a reducir el tiempo de desarrollo, sino que también permitió hacer ajustes dinámicos basados en los resultados obtenidos.

Finalmente, se diseñó el sistema con un enfoque en la accesibilidad de los componentes, lo que facilita las tareas de mantenimiento y reemplazo. Este enfoque es importante en cuanto a la reducción de tiempos de inactividad en entornos industriales, donde la eficiencia operativa es clave para mantener la competitividad. Las simulaciones también permitieron verificar que el diseño cumpliera con todos los requisitos normativos y operacionales, asegurando que cada pieza del sistema pudiera ser reemplazada o mantenida sin necesidad de desmontar todo el sistema, lo que reduce considerablemente los costos de mantenimiento.

El análisis de la máquina separadora de densidades proporciona una base sólida para entender el enfoque en el diseño de sistemas industriales, pero también es importante aplicar estos mismos principios a la evaluación de otros equipos. El análisis de la lavadora en caliente, por ejemplo, presenta un caso de estudio similar en cuanto a la evaluación estructural y térmica mediante simulaciones de *ANSYS Workbench*, pero con un enfoque más dirigido al comportamiento térmico y la distribución de cargas en un ambiente de operación dinámico.

Al igual que con la máquina separadora, el análisis de la lavadora en caliente comenzó con la configuración de simulaciones bajo condiciones operativas reales, incluyendo la carga de fluido, las fuerzas externas y el comportamiento térmico de los materiales. Las simulaciones permitieron evaluar la deformación total de la estructura bajo carga, obteniendo un valor máximo de 2.2788 mm (Barker & Thompson, 2017). Este resultado verifica que el diseño cumpliera con el requisito RD03, que establece una capacidad volumétrica máxima 5000 litros.

Una de las principales ventajas de utilizar *ANSYS Workbench* para estas simulaciones fue la posibilidad de realizar un análisis detallado de cómo la combinación de temperatura y carga afectaba la estructura. Este tipo de análisis es difícil de realizar mediante métodos analíticos tradicionales, ya que involucra múltiples variables que interactúan entre sí de manera compleja. En particular, se evaluaron los puntos críticos de la lavadora, como las áreas donde el fluido caliente interactúa directamente con las paredes metálicas, generando tensiones térmicas.

El análisis también incluyó un mallado refinado en las áreas de mayor concentración de esfuerzos para garantizar la precisión de los resultados. Se observaron esfuerzos de von Mises con un valor máximo de 214.04 MPa, que está por debajo del límite de fluencia del acero SAE 304 (aproximadamente 505 MPa (Singh & Patel, 2020)), asegurando que no se producirán deformaciones plásticas bajo las condiciones de operación. Estos cálculos fueron utilizados para garantizar la seguridad operativa de la lavadora en caliente, donde las fluctuaciones térmicas y las cargas dinámicas podrían generar fallas estructurales si no se sigue un proceso de diseño adecuado.

En el caso de la lavadora, se utilizó *ANSYS* para calcular la distribución de temperatura a lo largo de las paredes metálicas, lo que permitió identificar áreas donde era necesario agregar aislamiento térmico para evitar pérdidas de calor. Esto contribuye a reducir el consumo energético del sistema, lo que es crucial en aplicaciones industriales donde la eficiencia es un factor determinante para reducir costos operativos.

El factor de seguridad general de la estructura fue de 2.8032 (Figura 74), dentro de los márgenes recomendados para aplicaciones industriales. Además, se analizó la mezcla de fluido de trabajo, compuesta por soda cáustica y agua, asegurando que se mantuviera una concentración homogénea de 22.54 % de NaOH, un valor similar a la concentración de soda cáustica y agua en aplicaciones similares (Zhang & Li, 2019).

El análisis del eje central de la lavadora reveló un momento flector máximo de 582.9 Nm y una fuerza cortante de 1258.6, valores que aseguran la estabilidad del sistema durante su operación en el rango de 100 a 400 rpm dado que no se presenta un valor significativo que influya sobre el comportamiento físico del eje (Liu & Wang, 2021). Esto asegura que la mezcla del fluido sea sin generar vibraciones o esfuerzos torsionales que puedan comprometer

la integridad del eje de agitador y el sistema del que forma parte.

El uso de simulaciones para evaluar la distribución térmica también permitió analizar el comportamiento del agitador del sistema, asegurando que la mezcla de fluido se distribuyera uniformemente en todo el sistema (Figura 76). Obtener una distribución homogénea en este tipo de sistemas es especialmente importante para garantizar el funcionamiento esperado de los componentes involucrados. Si el flujo no fuera adecuado ciertas áreas dentro del tanque no alcanzarían la temperatura esperada, resultando en la necesidad de una mayor cantidad de soda cáustica ingresada a la mezcla para alcanzar el valor.

La elaboración de tablas de presupuesto correspondientes a las máquinas diseñados presenta una estimación del costo real. En el caso de algunos elementos, no se obtuvo una cifra fija dado que distintos proveedores ofrecen distintos precios para el mismo elemento tal como lo es para las tuberías estructurales de la lavadora en caliente o el acero SAE 304 utilizado en otros elementos. El propósito de generar dichos presupuestos fue para presentar una base aproximada del costo esperado de los sistemas diseñados, teniendo costos de Q21,415.79 y Q204,984.86 para la separadora por densidades y la lavadora en caliente respectivamente. Los costos totales mencionados tienen la posibilidad de cambiar según distintos costos de mercado para los elementos, así como si se toma la decisión de no importar materiales como se hizo para la lavadora en caliente. Además, ambos sistemas tienen espacio a mejora porque no son considerados sistemas completamente automatizados. En el caso de la separadora por densidades, otros componentes a utilizar incluyen válvulas cheque, filtros de sedimentación, filtros en Y y otros componentes que permite el mejor monitoreo del proceso llevado a cabo por el sistema pero como consecuencia, se eleva el costo total.

**Recomendaciones para la separadora por densidades**

A partir del análisis y simulaciones realizados sobre la máquina separadora por densidades, se pueden sugerir diversas mejoras que podrían aplicarse en futuras investigaciones para optimizar tanto el diseño como su funcionamiento. Estas recomendaciones tienen el potencial de estimular nuevas líneas de estudio y resolver ciertas limitaciones observadas en el presente diseño, así como mejorar aspectos metodológicos que podrían hacer más eficiente el sistema.

1. Optimización del diseño de las tuberías y conexiones: Los resultados de las simulaciones revelaron concentraciones de presión en los codos de las tuberías, lo que podría generar desgaste prematuro en estas áreas. Sería recomendable considerar el uso de codos con un ángulo de curvatura mayor para reducir las pérdidas de carga y las concentraciones de esfuerzo en esos puntos. Asimismo, la exploración de materiales compuestos en las tuberías podría aumentar su durabilidad y reducir los costos de mantenimiento a largo plazo.
2. Implementación de componentes auxiliares: Incorporar componentes adicionales como válvulas cheque o balance o un filtro de sedimentación así como el uso de sensores en puntos estratégicos del sistema permitiría monitorear en tiempo real el desempeño de la máquina. Esto optimizaría el uso de la bomba y ajustaría su operación según la demanda, prediciendo fallas antes de que ocurran y minimizando tiempos de inactividad.
3. Estudio detallado de la dinámica de fluidos (CFD): Modelar distintos plásticos con sus propiedades individuales (densidad, tamaño de partícula, comportamiento en suspensión) podría afinar el proceso de separación y mejorar la eficiencia del sistema.
4. Estudio detallado de sistemas similares: Iterar el diseño seleccionado de la separadora puede llegar a la selección de un diseño optimizado que permita garantizar un tiempo definido de sumersión del plástico en la longitud de los tanques para así poder garantizar la separación de los distintos plásticos.

5. Automatización del proceso de separación: Incorporar sistemas automatizados para la extracción y clasificación de los plásticos podría aumentar la capacidad de producción y reducir los costos laborales, eliminando la necesidad de intervención manual en varias etapas.
6. Estudio del impacto energético del sistema: Evaluar el consumo energético actual y considerar el uso de bombas más eficientes o energías renovables mejoraría la sostenibilidad. El aprovechamiento del calor generado también podría mejorar la eficiencia energética.
7. Filtración avanzada del agua: Implementar tecnologías de filtración más avanzadas, como ultrafiltración o filtros de membrana, podría eliminar partículas más pequeñas y garantizar una mayor calidad del agua reciclada, prolongando la vida útil del sistema.

## Recomendaciones para la lavadora en caliente

Basado en el análisis realizado y las condiciones de operación de la lavadora en caliente, se proponen varias recomendaciones que pueden ayudar a futuras investigaciones, así como mejorar el diseño y desempeño de la máquina. A continuación, se detallan estos puntos clave:

1. Optimización del consumo energético: La lavadora en caliente consume una gran cantidad de energía para mantener la mezcla de soda cáustica y agua a una temperatura adecuada. Sería recomendable investigar el uso de sistemas de transferencia de calor más avanzados, como intercambiadores de alta eficiencia o fuentes de energía renovable.
2. Investigación de materiales anticorrosivos: Dado que el fluido de trabajo es altamente corrosivo, se podría investigar el uso de aleaciones como el titanio o acero inoxidable de alta gama o incluso recubrimientos poliméricos especializados.
3. Incorporación de automatización avanzada y sensores inteligentes: El uso de sensores y otros componentes como una dosificadora permite monitorear en tiempo real la concentración de soda cáustica, optimizando las condiciones operativas y mejorando la efectividad general.
4. Optimización del sistema de agitación: Futuros estudios podrían explorar geometrías de agitadores más eficientes para mejorar la homogeneización del fluido y reducir la carga en el motor.
5. Estudio del impacto del fluido en el PET reciclado: Investigaciones sobre el efecto prolongado de la soda cáustica en el PET podrían ajustar las condiciones de operación para minimizar cualquier degradación.
6. Implementación de sistemas de recuperación de calor: Un sistema que recicle parte del calor residual podría mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo total.
7. Monitoreo de vibraciones: Un sistema de monitoreo de vibraciones en el eje central podría prevenir fallas mecánicas prematuras y prolongar la vida útil del equipo.
8. Análisis de fatiga de pernos y uniones: Un análisis detallado del ciclo de carga ayudaría a prever fallos por fatiga, asegurando la longevidad de las conexiones mecánicas.

1. El objetivo de diseñar un sistema eficiente de separación por densidades, que integre dos tanques con un sistema de transferencia de agua y material a través de tuberías interconectadas, fue alcanzado exitosamente. Se diseñó y simuló el sistema, asegurando que el proceso de separación sea adecuado, permitiendo la separación del tereftalato de polietileno (PET) a partir de otros materiales plásticos mediante sus diferencias de densidad, como se verificó en el análisis realizado.
2. El cálculo de la potencia requerida por la bomba que alimenta el tanque inicial se completó con éxito, estableciendo que la potencia del sistema de recirculación es suficiente para garantizar la alimentación continua del agua desde el segundo tanque al primero. La selección de la bomba se basó en los resultados de los cálculos realizados y los ensayos CFD.
3. En cuanto a la minimización de la pérdida de agua, el diseño integra un circuito cerrado de recirculación de agua que reutiliza el fluido procesado, cumpliendo con el objetivo de sostenibilidad. Se logró implementar un sistema que garantiza que el agua fluya de manera controlada, reduciendo significativamente el desperdicio y optimizando los recursos hídricos utilizados en el proceso.
4. El objetivo de determinar la geometría y dimensiones del sistema de separación también fue satisfecho. Los tanques fueron diseñados con las dimensiones adecuadas para soportar las condiciones operativas, sin exceder las limitaciones de tamaño impuestas. El diseño y análisis estructural, realizado con herramientas como ANSYS, confirmó que la geometría propuesta es capaz de soportar los esfuerzos generados durante el proceso, asegurando una operación segura.
5. El sistema de agitación propuesto cumple con los requisitos de distribución uniforme del fluido de trabajo y maximiza el contacto entre el material y el solvente. Los ensayos de simulación mostraron que la agitación es suficiente para lograr una mezcla homogénea entre fluido y solvente.

6. El uso de un sensor de temperatura y la incorporación del sistema de agitación aseguraron que se mantuvieran las condiciones adecuadas de trabajo para la remoción de residuos adheridos al PET reciclado, cumpliendo con los objetivos del proyecto.
7. El análisis de potencia necesario para el motor que impulsa el eje central muestra que el sistema puede manejar la tasa de flujo deseada sin sobrecargar el componente. La potencia calculada fue suficiente para mantener la operación constante de la máquina sin interrupciones significativas.
8. Las uniones del sistema fueron diseñadas y especificadas adecuadamente, asegurando que las entradas y salidas de material no presenten fugas significativas. La calidad de las uniones y la resistencia estructural del sistema fueron validadas por medio de simulaciones de uniones permanentes o no permanentes que confirmaron su viabilidad industrial.

- Aceros Forta. (2024). Productos - Aceros Forta. <https://acerosforta.com/productos/>
- Acevedo, F., & Sáenz, L. (2018). Characterization of an austenitic stainless steel AISI 304 H with 15 year in service exposed at high temperature.
- Agency, U. S. E. P. (2021). Recycling Basics.
- Aqua Sistemas. (2022). Válvulas para Agua - Unión Universal PVC de 4"Soldar. <https://aquasistemas.com.gt/tienda/plomeria-y-accesorios/valvulas-para-agua/union-universal-pvc-de-4-soldar/>
- ASTM International. (2013). *Standard Test Method for Obtaining Hydrostatic Design Basis for Thermoplastic Pipe Materials*.
- Barker, A., & Thompson, G. (2017). Finite Element Analysis for Industrial Design. *International Journal of Mechanical Design*, 45(4), 345-352.
- Bauer, M., Lehner, M., Schwabl, D., Flachberger, H., Kranzinger, L., Pomberger, R., & Hofer, W. (2018). Sink–float density separation of post-consumer plastics for feedstock recycling. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(3), 1781-1791.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2015). *Mechanics of Materials* (7th) [Chapter on Stresses and Strains]. McGraw-Hill Education.
- BUB Anlagenbau GmbH. (n.d.). Friction Washer for Plastic Washing. <https://www.bub-anlagenbau.de/products/washing/friction-washer/>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Diseño de ingeniería mecánica de Shigley*. McGraw-Hill Education.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2011). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (8th). John Wiley & Sons.
- Carl Roth GmbH + Co. KG. (s.f.). Ficha de Datos de Seguridad - Etilenglicol.
- Carr, S. (2020). Selection of Welding Electrodes for Structural Steel Fabrication. *Fabrication Engineering Journal*, 45(5), 105-112.
- Casallas Murcia, D. M. (2014). Mejoramiento del proceso de lavado de la hojuela de PeT en una planta de reciclaje.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8th). McGraw-Hill Education.
- Christopoulou, D. (2018, junio). Recycling in Norway, here's what you need to know.

- Clayton T. Crowe, B. C. W., Donald F. Elger. (2011). *Engineering Fluid Mechanics* (10th). John Wiley Sons.
- Co., A. M. (2020a). Centrifugal Dryer Dewatering Machine.
- Co., A. M. (2020b). Sink flotation separation tank.
- Co., A. M. (2020c). Thermal Dryer.
- Cosimbescu, L., Merkel, D. R., Darsell, J., & Petrossian, G. (2021). Simple but Tricky: Investigations of Terephthalic Acid Purity Obtained from Mixed PET Waste. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(35), 12792-12797.
- Daboner, A., Emmanuel, D., & Ofori, I. (s.f.). PLC/HMI AUTOMATION OF PET PLASTIC RECYCLING PLANT THAT PRODUCES PLASTIC PELLETS.
- Danfoss. (2023). VLT AutomationDrive FC 301/FC 302 [Accessed: 2024-10-10]. <https://www.danfoss.com/es-es/products/dds/low-voltage-drives/vlt-drives/vlt-automationdrive-fc-301-fc-302/#tab-overview>
- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J. (2015). *Introduction to Fluid Mechanics* (8th edition). John Wiley & Sons.
- Grigore, M. E. (2017). Methods of recycling, properties and applications of recycled thermoplastic polymers. *Recycling*, 2(4), 24.
- Guatemala, S. (2023). Bomba de Lodos Evans. <https://sismaguatemala.com/tienda/bombeo-de-agua/bomba-de-lodos-evans/>
- Guo, J., Li, X., Guo, Y., Ruan, J., Qiao, Q., Zhang, J., Bi, Y., & Li, F. (2016). Research on Flotation Technique of separating PET from plastic packaging wastes. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 178-184.
- Hatlelid, K. (2019). TOXICITY REVIEW FOR DIBUTYL SEBACATE (DBS).
- Hoseini, H., Ostad Movahed, S., & Jourabchi, S. (2022). The float-sink behavior of selected pre-microwave irradiated plastics by surface adsorption of several dual depressants. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-13.
- Hunt, D., Rogers, I., & Smith, P. (2015). *Plastics: Environmental and Social Impact*. Global Environmental Studies.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 161: Thermoplastics Pipes - Classification and Dimensions*.
- Jana, A. K. (2021). *PVC Technology*. Elsevier.
- Kapur, M. (2019). *Design of Machine Elements*. McGraw-Hill Education.
- Kutz, M. (2002). *Handbook of Materials Selection*. John Wiley Sons.
- Liu, X., & Wang, F. (2021). Agitator Design for Industrial Mixing Applications. *Journal of Industrial Mixing Engineering*, 27(5), 400-412.
- Mark A. Browne, T. S. G., Steve Niven. (2018). Plastic separation in aqueous environments. *Journal of Applied Polymer Science*, 135, 1-10. <https://doi.org/10.1002/app.46122>
- Martinez, P., & Rodriguez, L. (2018). Properties of Low-Hydrogen Electrodes in Critical Applications. *Journal of Welding and Joining*, 32(2), 123-130.
- Meckensheim, H. (2013). *Tanque de separación (Tanque de sedimentación-flotación)*.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (7th edition). Wiley.
- Newell, A. (2016). *Modern Welding: Technology and Practices*. Cengage Learning.
- NIOSH. (2021). Ethylene Glycol: Systemic Agent.
- Nolan, G. (2019). Lindner Washtech to launch new hot-wash system for effective plastic recovery at K 2019.
- Noyes, R. (2002). *Pollution Prevention Technology Handbook*. William Andrew Publishing.
- Packaging Options Direct. (n.d.). Benefits of PET plastic bottles.

- Perry, R. H., & Green, D. W. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (7th). McGraw-Hill.
- Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8th). McGraw-Hill Education.
- Plásticos, R. (2023). Botella PET 600ml - Genérica. <http://www.remsaplasticos.com/productos/botellas-pet/botella-pet-600ml%5C#:~:text=La%20botella%20Gen%C3%A9rica%20de%20600,peso%20total%20de%2018.8%20gr>.
- Programme, U. E. (2019). United Nations Environmental Program: Global Plastic Waste Report.
- Round, G. F. (2004). *Pumping Handbook* (3rd). Elsevier.
- Ruj, B., Pandey, V., Jash, P., & Srivastava, V. (2015). Sorting of plastic waste for effective recycling. *Int. J. Appl. Sci. Eng. Res*, 4(4), 564-571.
- Rukikaire, K. (2021). *Informe de la ONU sobre contaminación por plásticos advierte sobre falsas soluciones y confirma la necesidad de una acción mundial urgente*.
- Sinfimasa. (2023). Transportadores de Sinfín. <https://sinfimasa.com/productos/transportadores-sinfin/>
- Singh, R., & Patel, V. (2020). Mechanical Properties of High Strength Steels: A Comparison. *Materials Science and Engineering Journal*, 78(2), 450-460.
- Smith, J. A. (2017). *Industrial Cleaning Processes: Water and Caustic Soda Solutions*. Springer.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2017). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics* (8th). McGraw-Hill Education.
- Smith, L., & Jenkins, T. (2017). *Welding: Principles and Applications*. Cengage Learning.
- Systems., H. P. (2020). Sink Float Tank.
- The Food Tech. (2010). Necesario Reciclar mayor porcentaje de PET. *The Food Tech*. <https://thefoodtech.com/historico/necesario-reciclar-mayor-porcentaje-de-pet/>.
- The Ocean Cleanup. (s.f.). The Ocean Cleanup: Reducing plastic pollution in the Motagua River.
- Tiseo, I., & Statista. (2020, noviembre). Plastic bottle recycling rates worldwide 2018.
- ToolBox, E. (2015). Electric Motors - Efficiency [[Accessed: Day Month Year]]. [https://www.engineeringtoolbox.com/electrical-motor-efficiency-d\\_655.html](https://www.engineeringtoolbox.com/electrical-motor-efficiency-d_655.html)
- Toolbox, E. (2023). Equivalent Pipe Length Method. [https://www.engineeringtoolbox.com/equivalent-pipe-length-method-d\\_804.html](https://www.engineeringtoolbox.com/equivalent-pipe-length-method-d_804.html)
- Ullman, D. G. (2018). *The Mechanical Design Process* (6th). McGraw-Hill.
- US Motors. (2024). US Motors - Home. <https://acim.nidec.com/motors/usmotors>
- Washington State Department of Ecology. (n.d.). Recycle right: How empty is empty enough? How clean is clean enough? How dry is dry enough?
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Education.
- Zhang, T., & Li, Y. (2019). Chemical Stability of NaOH Solutions in Industrial Applications. *Journal of Chemical Processing*, 12(3), 22-30.
- Zhangjiagang Lianguan Recycling Science Technology Co., L. (2017). *Water type PET bottle label remover machine*.



## 12.1. Manual de uso de los sistemas

El uso de maquinaria representa una responsabilidad del encargado que supervisa la operación de las máquinas. Es por eso que se considera que, al montar la línea de reciclaje se capacite al personal en la utilización correcta de los sistemas. Los siguientes manuales de uso son recomendaciones y se deben considerar distintas pruebas para establecer el manual de uso correcto al finalizar la fabricación de ambos sistemas.

## 12.2. Manual de uso - Recomendaciones: Separadora por densidades

### Equipo de protección personal

Para garantizar la seguridad durante la operación y mantenimiento de la separadora por densidades, es necesario el uso de los siguientes elementos de protección personal:

- **Gafas de seguridad:** Evitan que partículas plásticas o salpicaduras de agua puedan dañar los ojos.
- **Mascarilla o respirador:** Para prevenir la inhalación de polvo o vapores.
- **Ropa protectora:** Un delantal de goma o impermeable puede ser útil para evitar la exposición al agua.
- **Botas antideslizantes:** Para evitar accidentes por resbalones, ya que el área de trabajo podría estar húmeda.

- **Casco de seguridad:** En caso de trabajos de mantenimiento mayores que involucren elevación o ajuste de componentes pesados.

## **Procedimiento**

El procedimiento para la operación y mantenimiento de la separadora por densidades se divide en varias etapas:

### **1. Preparación y seguridad**

- Verificar que todos los operadores tengan el equipo de protección adecuado antes de iniciar.
- Revisar que el sistema esté correctamente ensamblado y todas las conexiones estén firmes.
- Asegurarse de que el área de trabajo esté libre de obstrucciones y peligros.

### **2. Inspección visual**

- Revisar visualmente los tanques, tuberías y válvulas en busca de fugas, corrosión o desgaste.
- Asegurarse de que el filtro de sedimentación esté limpio y sin obstrucciones.
- Inspeccionar la bomba y sus conexiones para detectar posibles fallos o desgaste.

### **3. Limpieza (bomba, componentes auxiliares y cuerpo de la máquina)**

- Desconectar el sistema de la alimentación eléctrica antes de proceder con la limpieza.
- Limpiar las válvulas, la bomba y el filtro de sedimentación con agua limpia y cepillos no abrasivos.
- Limpiar el interior de los tanques para eliminar residuos plásticos o sedimentos.

### **4. Montaje**

- Volver a ensamblar todos los componentes limpiados, asegurando que todas las piezas estén bien ajustadas y sin fugas.
- Revisar que las válvulas de servicio estén bien instaladas y en posición de cerrado antes de reiniciar el sistema.

### **5. Pruebas**

- Realizar una prueba de funcionamiento con agua limpia para verificar que el sistema no presente fugas y que la bomba funcione adecuadamente.
- Asegurarse de que el caudal y la presión sean los adecuados para el proceso de separación por densidades.

### **6. Registro y documentación**

- Documentar todas las acciones de mantenimiento realizadas, incluyendo la fecha, el nombre del operador, y los resultados de la prueba de funcionamiento.
- Guardar un registro de cualquier componente reemplazado o ajustado durante el mantenimiento.

#### **7. Puesta en marcha**

- Verificar que el sistema esté en condiciones óptimas antes de reanudar la operación normal.
- Asegurarse de que todos los operadores estén preparados y al tanto de las medidas de seguridad.

### **12.3. Manual de uso - Recomendaciones: Lavadora en caliente**

#### **Equipo de protección personal**

Para operar y realizar el mantenimiento de la lavadora en caliente, el personal debe usar el siguiente equipo de protección personal, considerando la naturaleza corrosiva de la mezcla de trabajo y la temperatura elevada del proceso:

- Guantes resistentes a productos químicos.
- Protección ocular (gafas protectoras).
- Ropa resistente al calor y productos corrosivos.
- Calzado de seguridad antideslizante.
- Máscara o respirador (para posibles vapores de soda cáustica).
- Casco de seguridad (si es requerido por las normas del sitio).

#### **Procedimiento**

El procedimiento de uso y mantenimiento de la lavadora en caliente está dividido en diferentes etapas para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del equipo. A continuación se describen las etapas y los pasos a seguir:

##### **1. Preparación y seguridad**

- Apagar y desconectar la máquina completamente antes de comenzar cualquier tarea de mantenimiento.
- Colocar señales de mantenimiento en proceso en las áreas de trabajo.
- Verificar que todo el personal utilice el equipo de protección adecuado antes de comenzar.

## 2. Inspección visual

- Revisar el estado general del tanque, los ductos y las conexiones, buscando signos de corrosión o desgaste.
- Verificar la integridad del módulo del tornillo sinfín y sus hélices, asegurándose de que no haya daños visibles.
- Inspeccionar las conexiones eléctricas del controlador de temperatura, el sensor de nivel y el dosificador de soda cáustica.

## 3. Limpieza

- Limpiar el motor y las áreas circundantes para eliminar cualquier acumulación de suciedad o residuos.
- Limpiar el tornillo sinfín utilizando cepillos no abrasivos para evitar daños en las hélices.
- Limpiar el sensor de nivel y el dosificador de soda cáustica, asegurando un funcionamiento adecuado.

## 4. Montaje

- Revisar y ajustar los pernos y tuercas en todas las conexiones, aplicando el torque especificado por el fabricante.
- Montar el módulo del tornillo sinfín asegurándose de que esté alineado con la ventanilla del tanque central y la salida del material.

## 5. Pruebas

- Verificar el funcionamiento del variador de frecuencia, ajustando la velocidad del agitador y el tornillo sinfín según la tasa de salida deseada.
- Probar el controlador de temperatura para asegurar que el fluido de trabajo se mantenga en el rango de 80-85 °C.
- Comprobar el funcionamiento del sensor de nivel para asegurar el llenado adecuado del tanque y evitar sobrellenado.

## 6. Registro y documentación

- Registrar todas las actividades de mantenimiento realizadas, incluyendo ajustes y reparaciones.
- Documentar los resultados de las pruebas de funcionamiento y cualquier anomalía detectada durante el proceso de mantenimiento.

## 7. Puesta en marcha

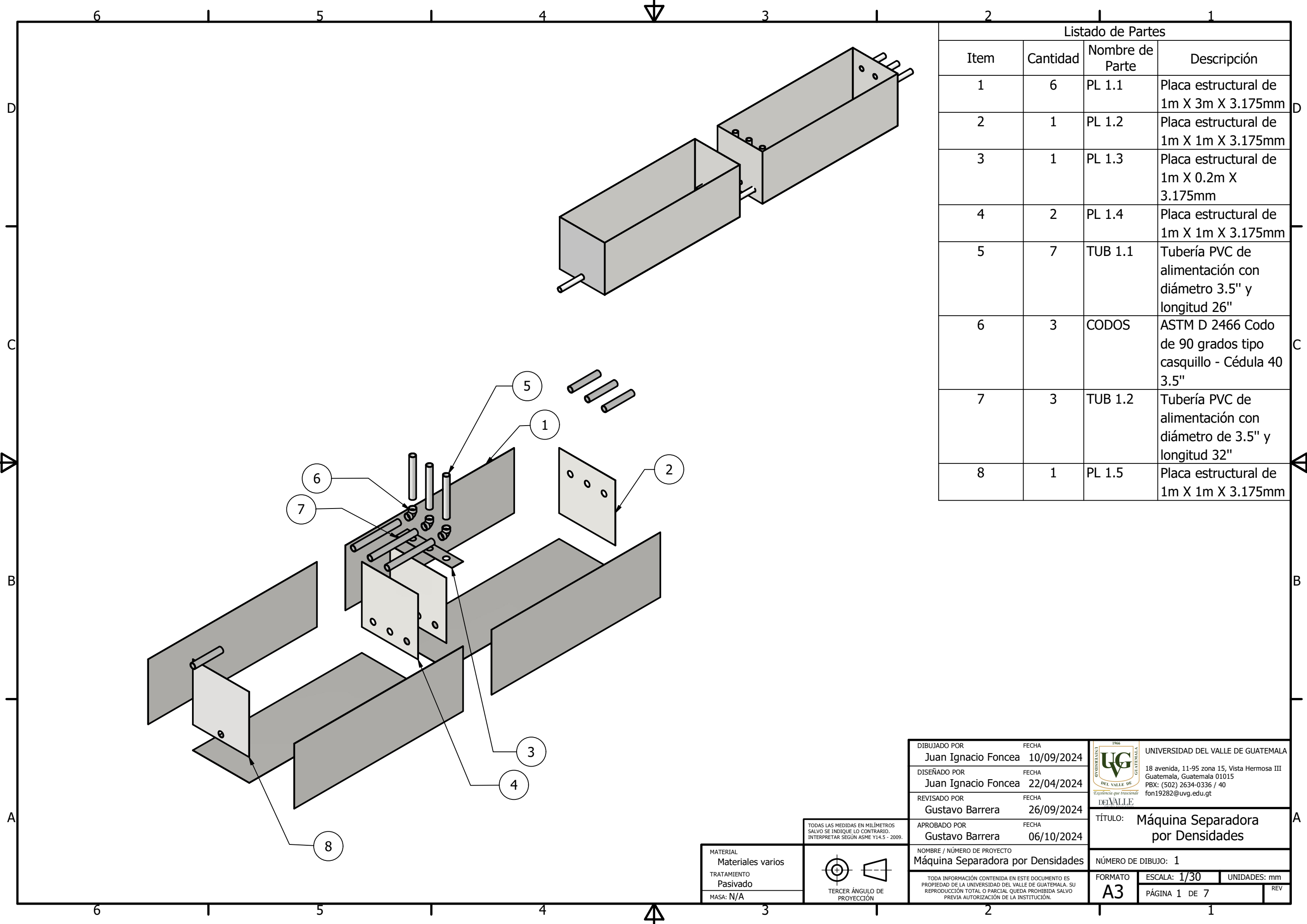
- Reconectar y encender la máquina, verificando que todos los sistemas operen sin problemas.
- Observar el flujo de trabajo del fluido y del material, asegurando que la mezcla circule de manera constante y sin obstrucciones.

## **Frecuencia de mantenimiento**

El mantenimiento preventivo debe realizarse cada 6 meses en condiciones de uso estándar. Para operaciones intensivas, se recomienda un mantenimiento preventivo cada 3 meses.


## **12.4. Planos de construcción**





Listado de Partes			
Item	Cantidad	Nombre de Parte	Descripción
1	6	PL 1.1	Placa estructural de 1m X 3m X 3.175mm
2	1	PL 1.2	Placa estructural de 1m X 1m X 3.175mm
3	1	PL 1.3	Placa estructural de 1m X 0.2m X 3.175mm
4	2	PL 1.4	Placa estructural de 1m X 1m X 3.175mm
5	7	TUB 1.1	Tubería PVC de alimentación con diámetro 3.5" y longitud 26"
6	3	CODOS	ASTM D 2466 Codo de 90 grados tipo casquillo - Cédula 40 3.5"
7	3	TUB 1.2	Tubería PVC de alimentación con diámetro de 3.5" y longitud 32"
8	1	PL 1.5	Placa estructural de 1m X 1m X 3.175mm

DIBUJADO POR	FECHA
Juan Ignacio Foncea	10/09/2024
DISEÑADO POR	FECHA
Juan Ignacio Foncea	22/04/2024
REVISADO POR	FECHA
Gustavo Barrera	26/09/2024
APROBADO POR	FECHA
Gustavo Barrera	06/10/2024

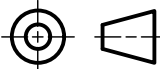

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**  
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
 Guatemala, Guatemala 01015  
 PBX: (502) 2634-0336 / 40  
 fon19282@uvg.edu.gt

TÍTULO: **Máquina Separadora por Densidades**

NÚMERO DE DIBUJO: 1

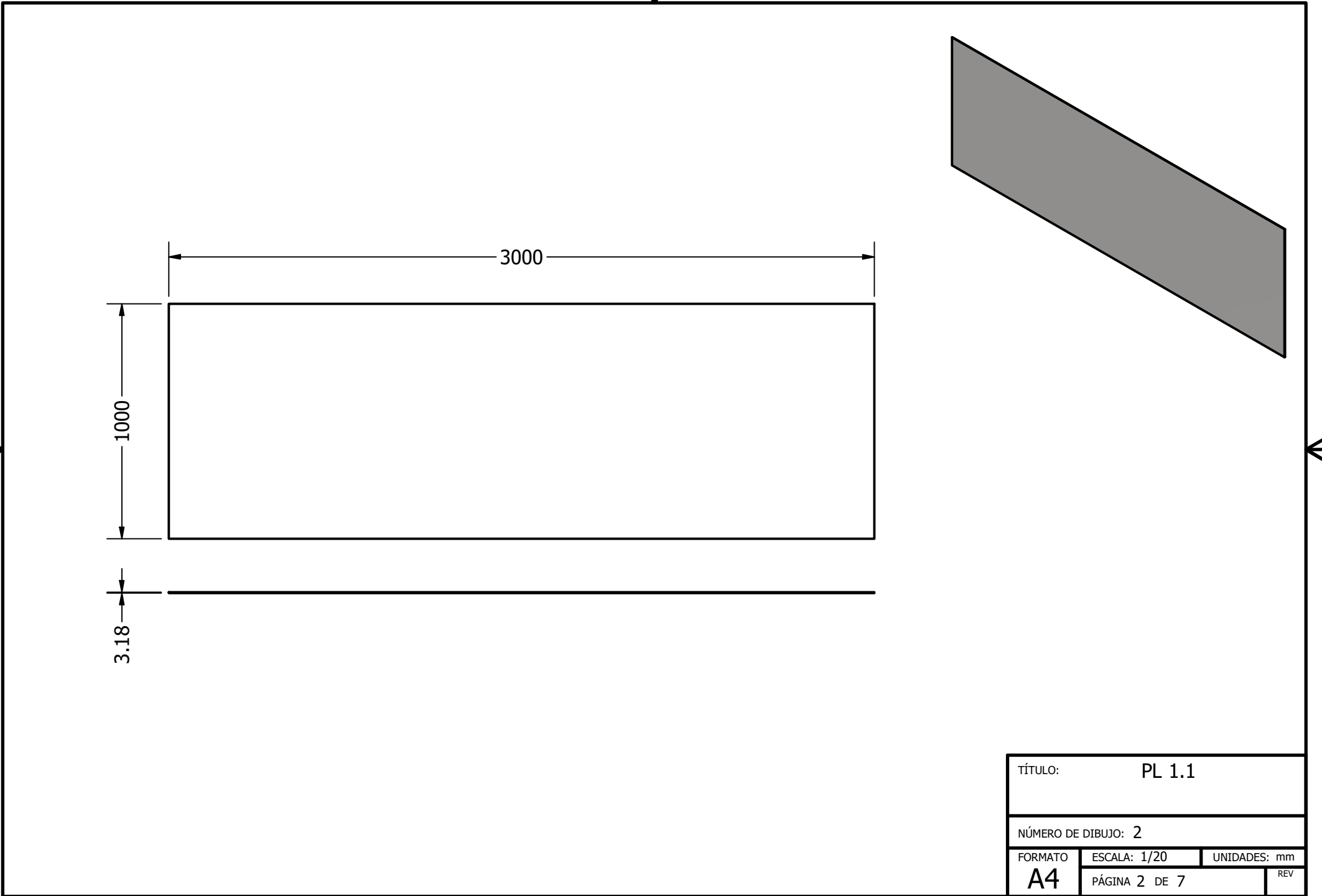
MATERIAL	Materiales varios
TRATAMIENTO	Pasivado
MASA:	N/A

TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

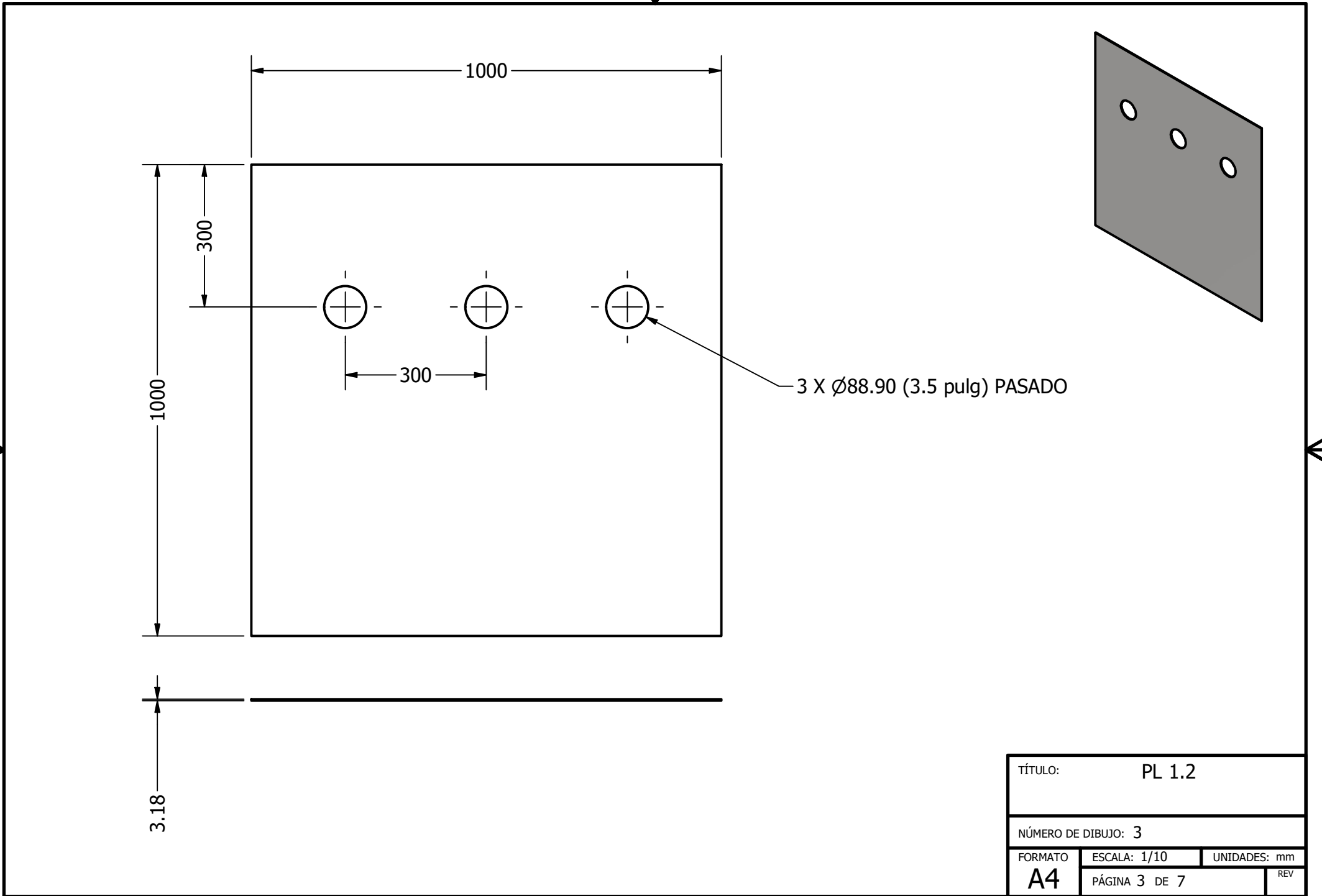
  
 TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
**Máquina Separadora por Densidades**  
 TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

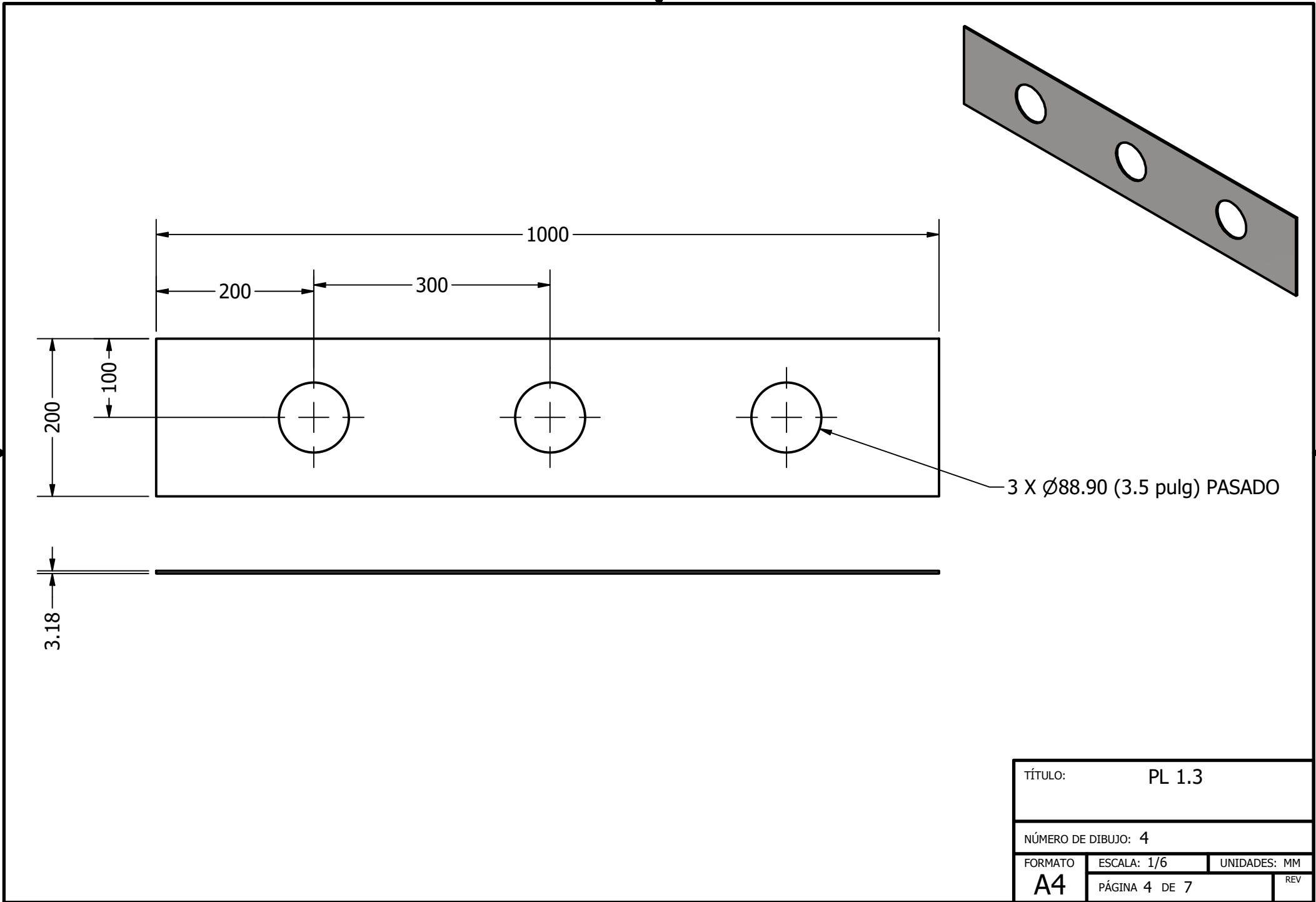
FORMATO	ESCALA: 1/30	UNIDADES: mm
<b>A3</b>	PÁGINA 1 DE 7	REV



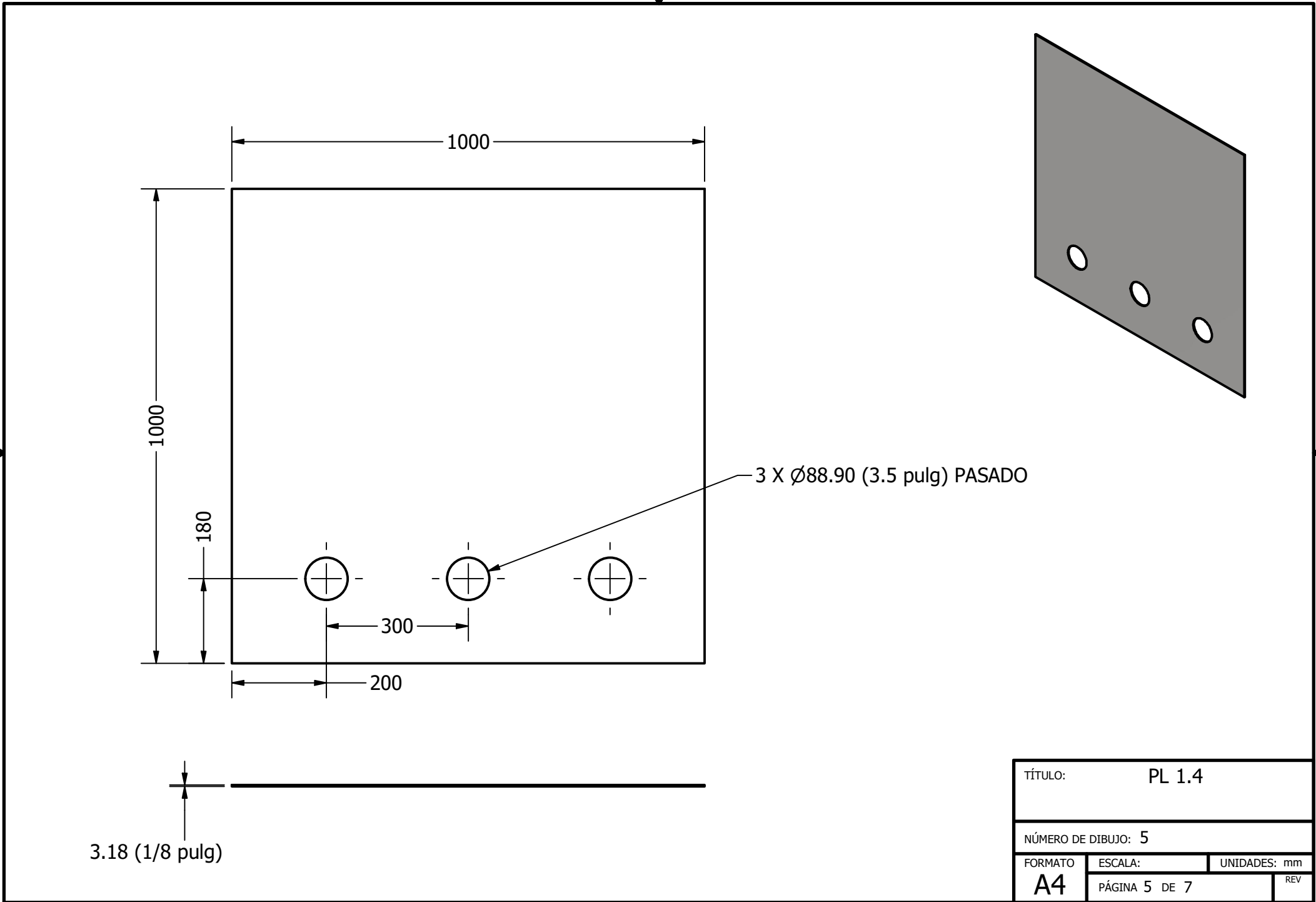
TÍTULO:		PL 1.1	
NÚMERO DE DIBUJO: 2			
FORMATO	ESCALA: 1/20	UNIDADES: mm	
A4	PÁGINA 2 DE 7		REV



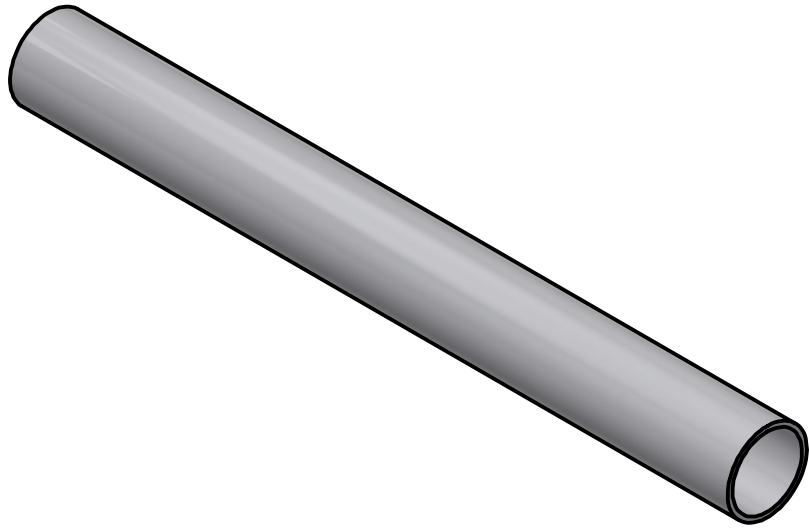
TÍTULO:		PL 1.2	
NÚMERO DE DIBUJO: 3			
FORMATO	ESCALA: 1/10	UNIDADES: mm	
A4	PÁGINA 3 DE 7		REV



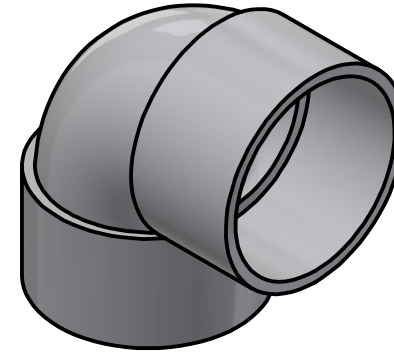
TÍTULO:		PL 1.3	
NÚMERO DE DIBUJO: 4			
FORMATO	ESCALA: 1/6	UNIDADES: MM	
A4	PÁGINA 4 DE 7		REV



TÍTULO:		PL 1.4	
NÚMERO DE DIBUJO: 5			
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:	mm
A4	PÁGINA 5 DE 7	REV	

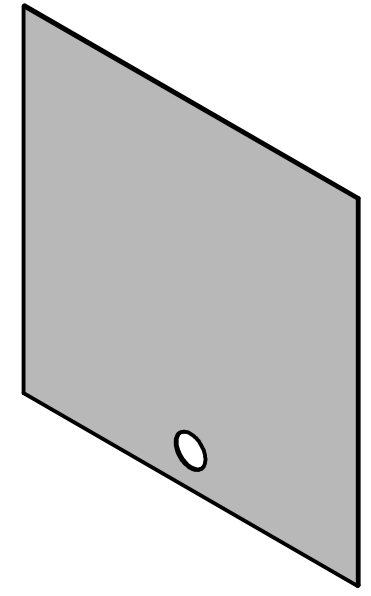
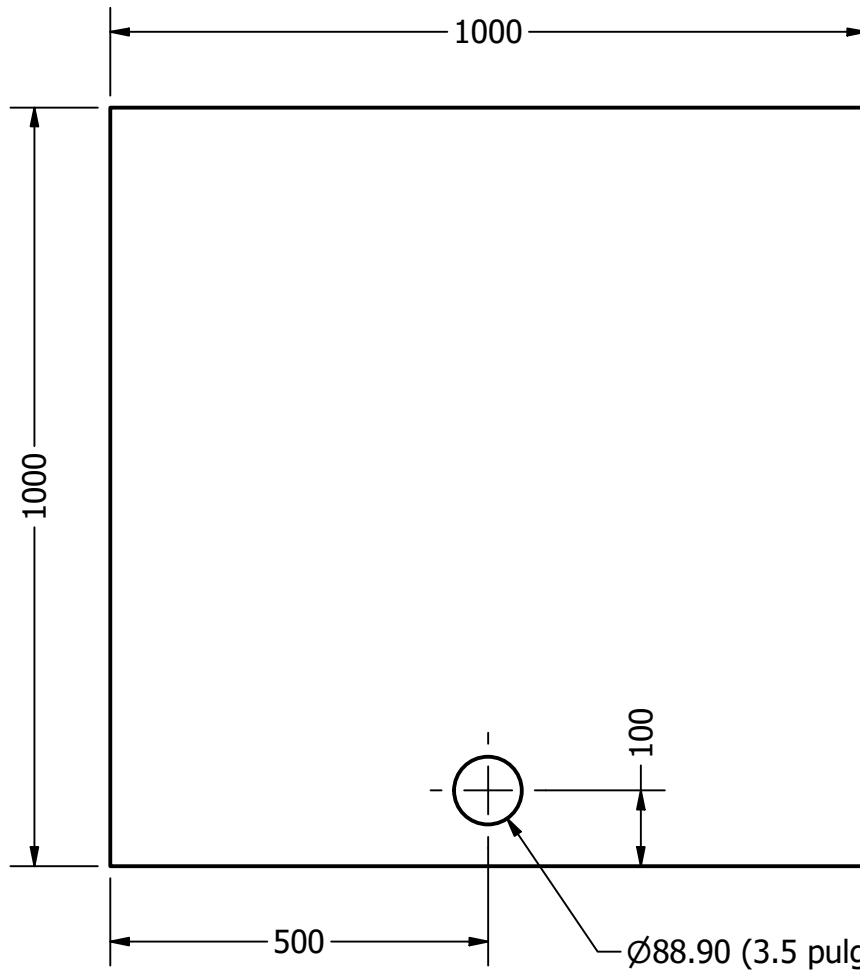


TUBERÍA PVC  
ESCALA 1:6



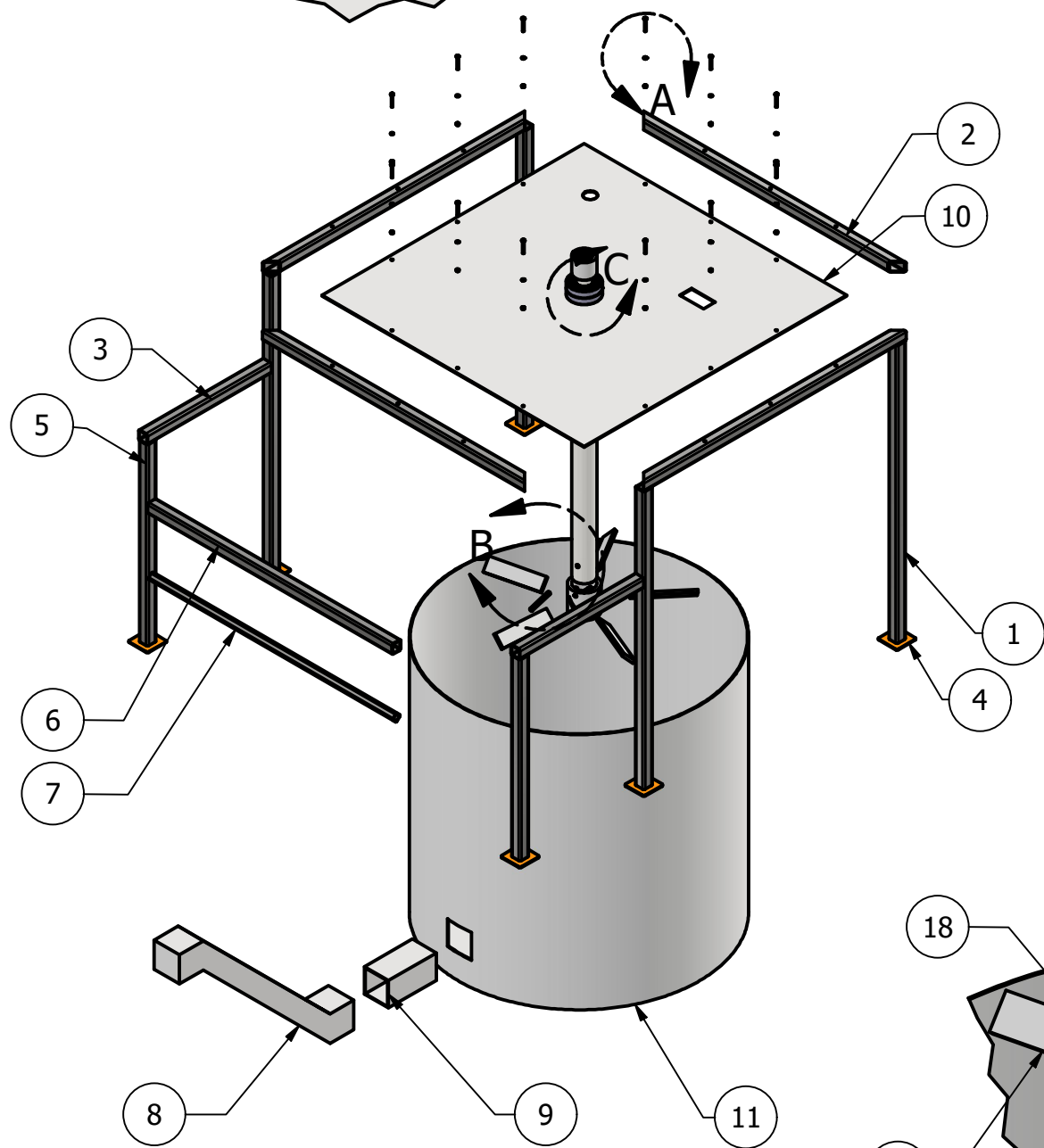
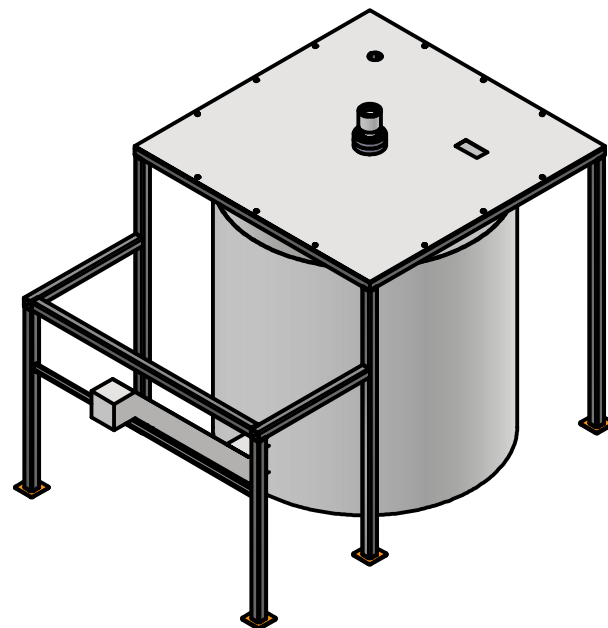
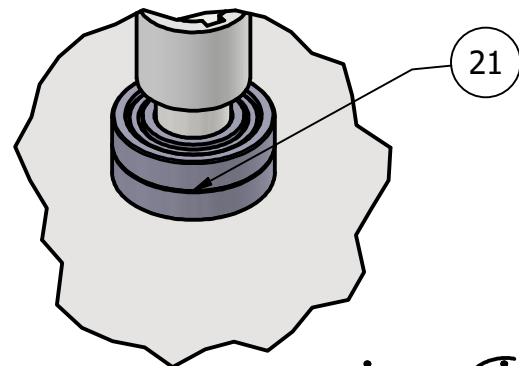
CODO PVC A 90 GRADOS  
ESCALA 1:3

TÍTULO:		Componentes Comprados	
NÚMERO DE DIBUJO: 6			
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES: mm	
A4		PÁGINA 6 DE 7	REV

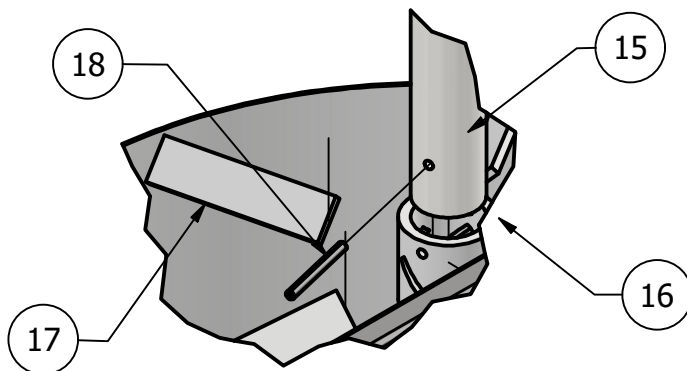
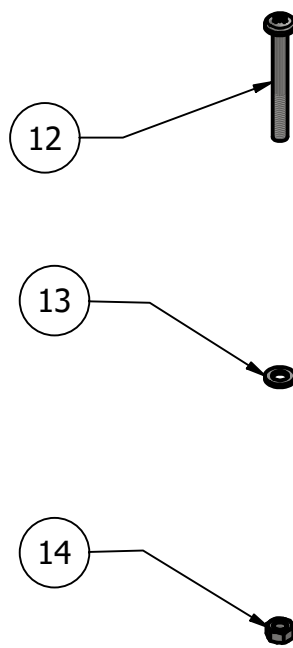


TÍTULO:		PL 1.5	
NÚMERO DE DIBUJO: 7			
FORMATO	ESCALA: 1/10	UNIDADES: mm	
<b>A4</b>	PÁGINA 7 DE 7		REV

DETALLE C  
ESCALA 1/10



DETALLE A  
ESCALA 1/5



DETALLE B  
ESCALA 1 / 15

Listado de Partes

Item	Cantidad	Nombre de Parte	Descripción
1	4	TUB 1.1	Tubería angular AISC - 3 x 3 x 1/4 - 85"
2	4	TUB 1.2	Tubería angular AISC - 3 x 3 x 1/4 - 86.5"
3	2	TUB 1.3	Tubería angular AISC - 3 x 3 x 1/4 - 41"
4	6	PL 1.1	Plate Filleted Corners (mm) 164.2 x 164.2 x 6
5	2	TUB 1.4	Tubería angular AISC - 3 x 3 x 1/4 - 57.5"
6	1	TUB 1.5	Tubería angular AISC - 3 x 3 x 1/4 - 80.6"
7	1	TUB 1.6	Tubería angular AISC - 2 x 2 x 1/4 - 86.25"
8	1	TSFEX	Módulo de tornillo sinfín para extracción provisto por SINFIMASA
9	4	AC1.1	Acople conector entre tanque y módulo de salida
10	1	PL 1.2	Placa de soporte de componentes
11	1	TCA	Tanque central de agitación de acero inoxidable provisto por ALPCO Industrial
12	12	TORNILLO M10 X 1.5 X 90, CRPHMSTIM	Tornillo para máquina de cabeza plana con ranura en cruz - Tipo IA - Métrico
13	12	ARANDELA 10 N ANSI B18.22M - 10 N	
14	12	TUERCA M10 X 1.5 ANSI B18.2.4.1 M - M10 x 1.5	
15	1	ECA	Eje central
16	1	AC1.2	acople inferior eje
17	5	PLATINAS	Platinas para agitador de acero inoxidable de 400 mm X 100 mm X 20 mm
18	1	Pasador RH600	Pasadores Twist-lok provisto por SPIROL
19	1	Motor vertical de U.S Motors	Vertical Hollow Shaft Motor - Inverter Duty, HO125V2SLGX, WP1
20	3	ANSI B17.1 - 1x1x3.5	Rectangular or Square Parallel Keys
21	2	Rodamientos MRC	Rodamientos de bolas de contacto angular de una sola hilera, serie 7300-P

DIBUJADO POR Juan Ignacio Foncea	FECHA 10/09/2024
DISEÑADO POR Juan Ignacio Foncea	FECHA 25/04/2024
REVISADO POR Gustavo Barrera	FECHA 26/09/2024
APROBADO POR Gustavo Barrera	FECHA 06/10/2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
Guatemala, Guatemala 01015  
PBX: (502) 2634-0336 / 40  
fon19282@uvg.edu.gt

TÍTULO: Lavadora en Caliente

NÚMERO DE DIBUJO: 8

TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

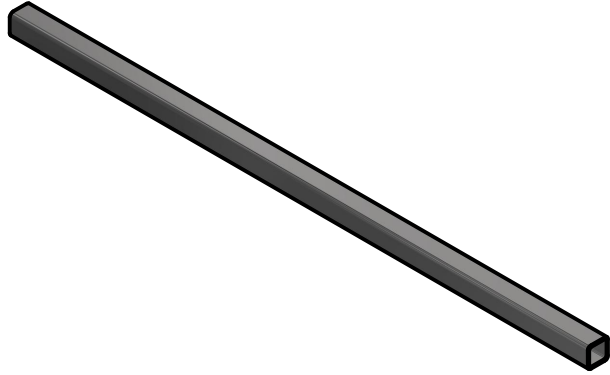


TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN

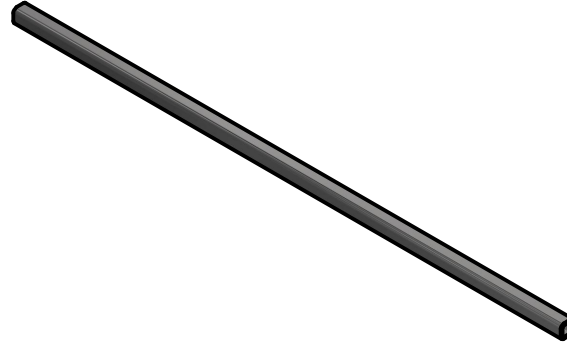
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO Lavadora en Caliente	
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.	

FORMATO A3	ESCALA: 1:30	UNIDADES: mm
PÁGINA 1 DE 10		REV

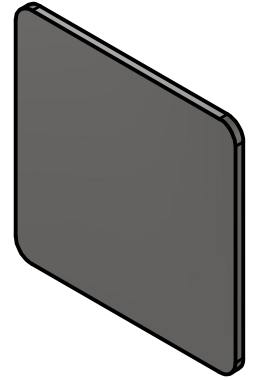
MATERIAL Materiales varios
TRATAMIENTO Galvanizado
MASA: N/A



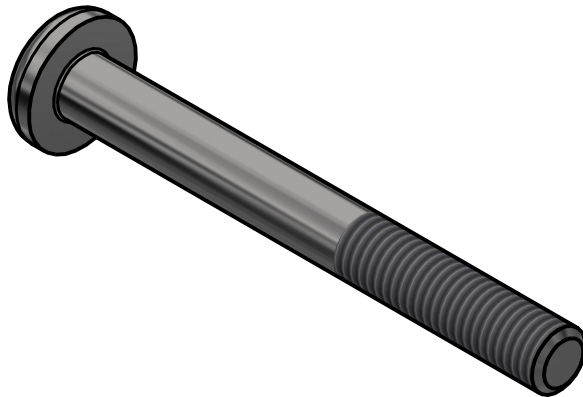
Tubería angular AISC - 3 x 3 x 1/4  
Escala 1:20



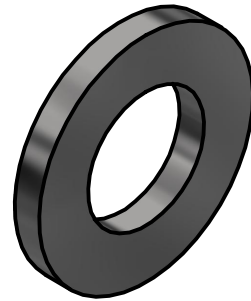
Tubería angular AISC - 2 x 2 x 1/4  
Escala 1:20



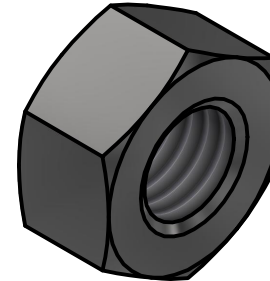
Tubería angular AISC - 3 x 3 x 1/4  
Escala 1:15



Tornillo para máquina con cabeza plana y ranura en cruz - Rosca métrica ISO gruesa, M10 X 1.5  
Escala 1:1

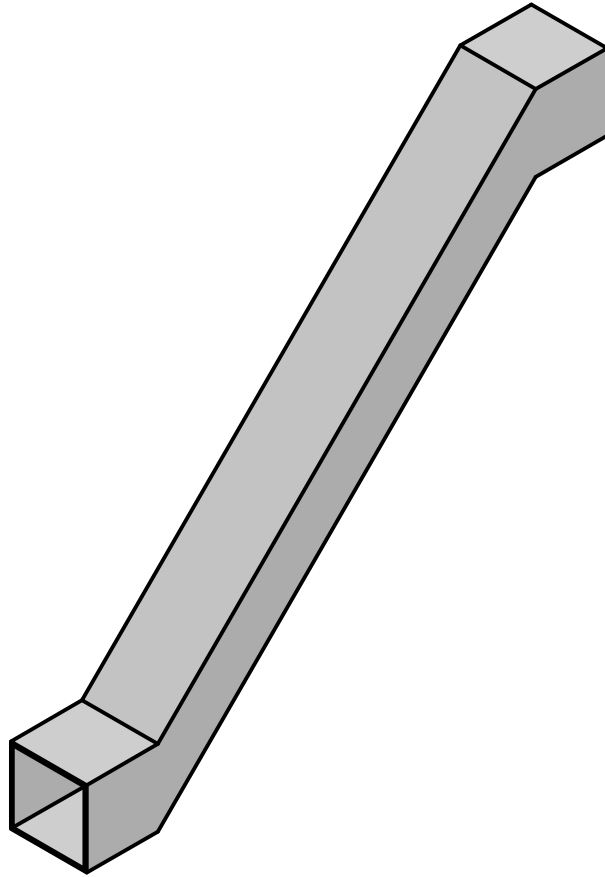


Arandela plana métrica  
Escala 2:1



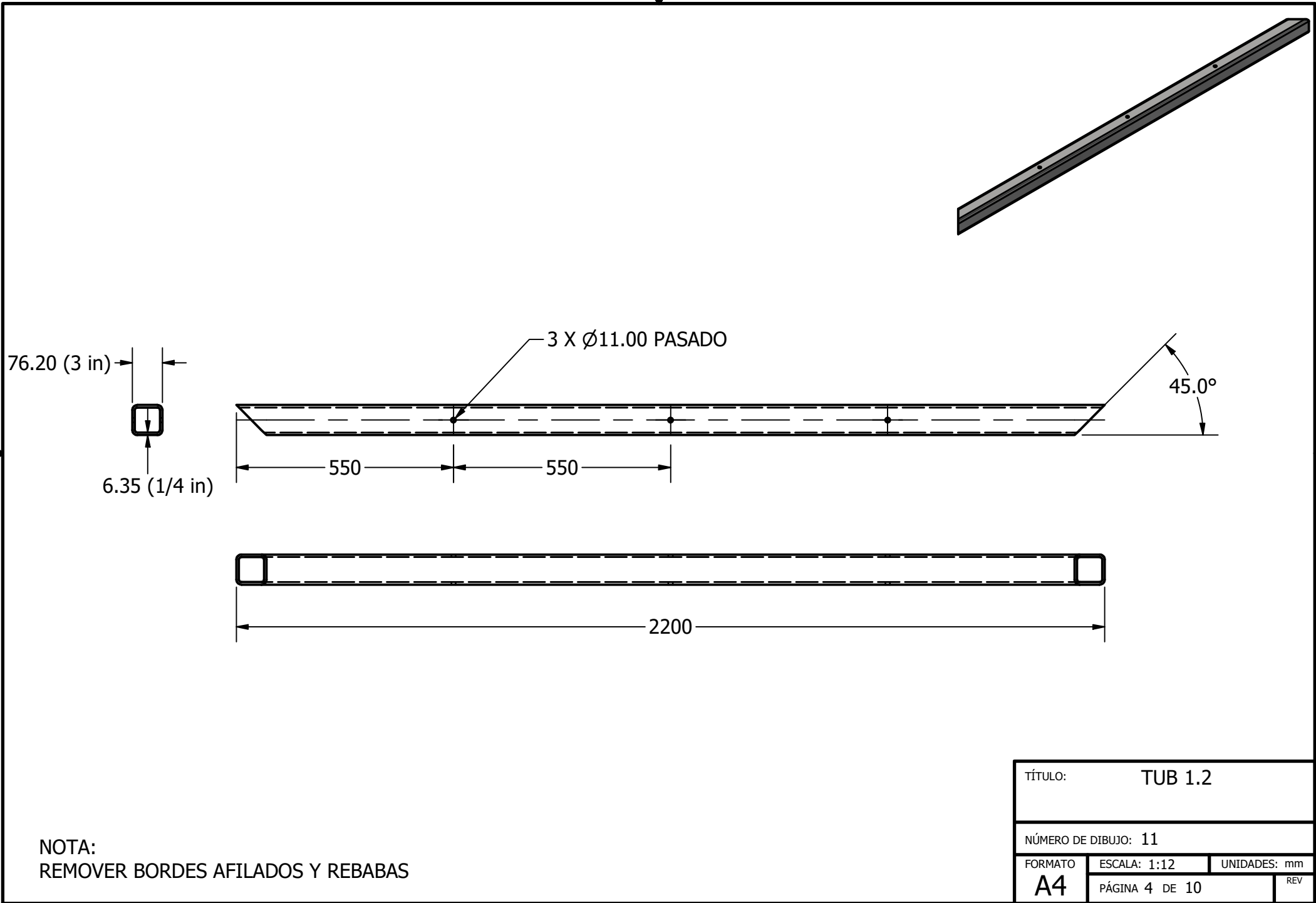
Tuerca hexagonal  
Escala 2:1

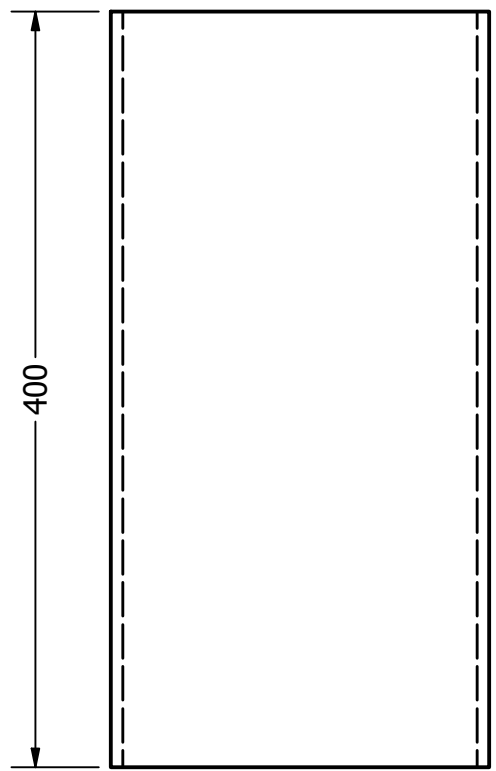
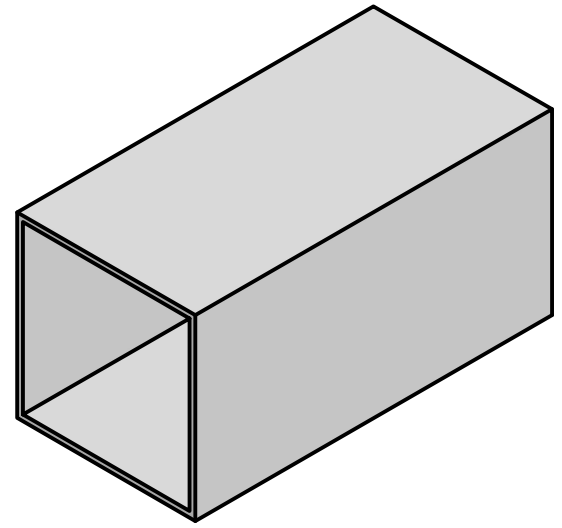
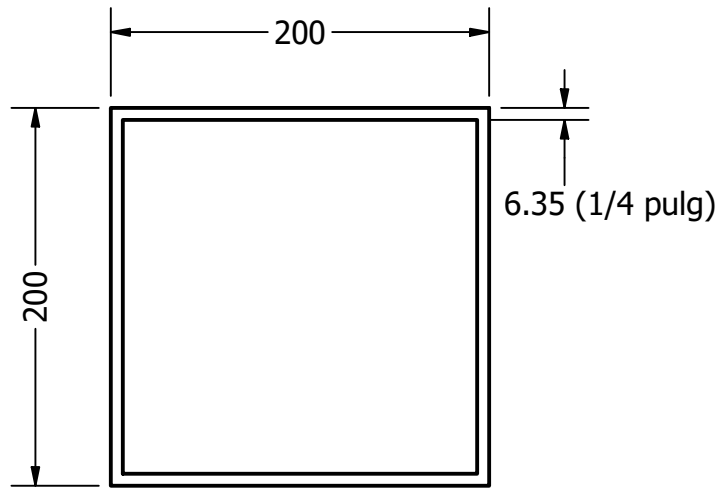
TÍTULO:		Componentes Comprados	
NÚMERO DE DIBUJO: 9			
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES: mm	
A4		PÁGINA 2 DE 10	REV



Módulo de tornillo sinfín para extracción provisto por  
SINFIMASA  
Escala 1:15

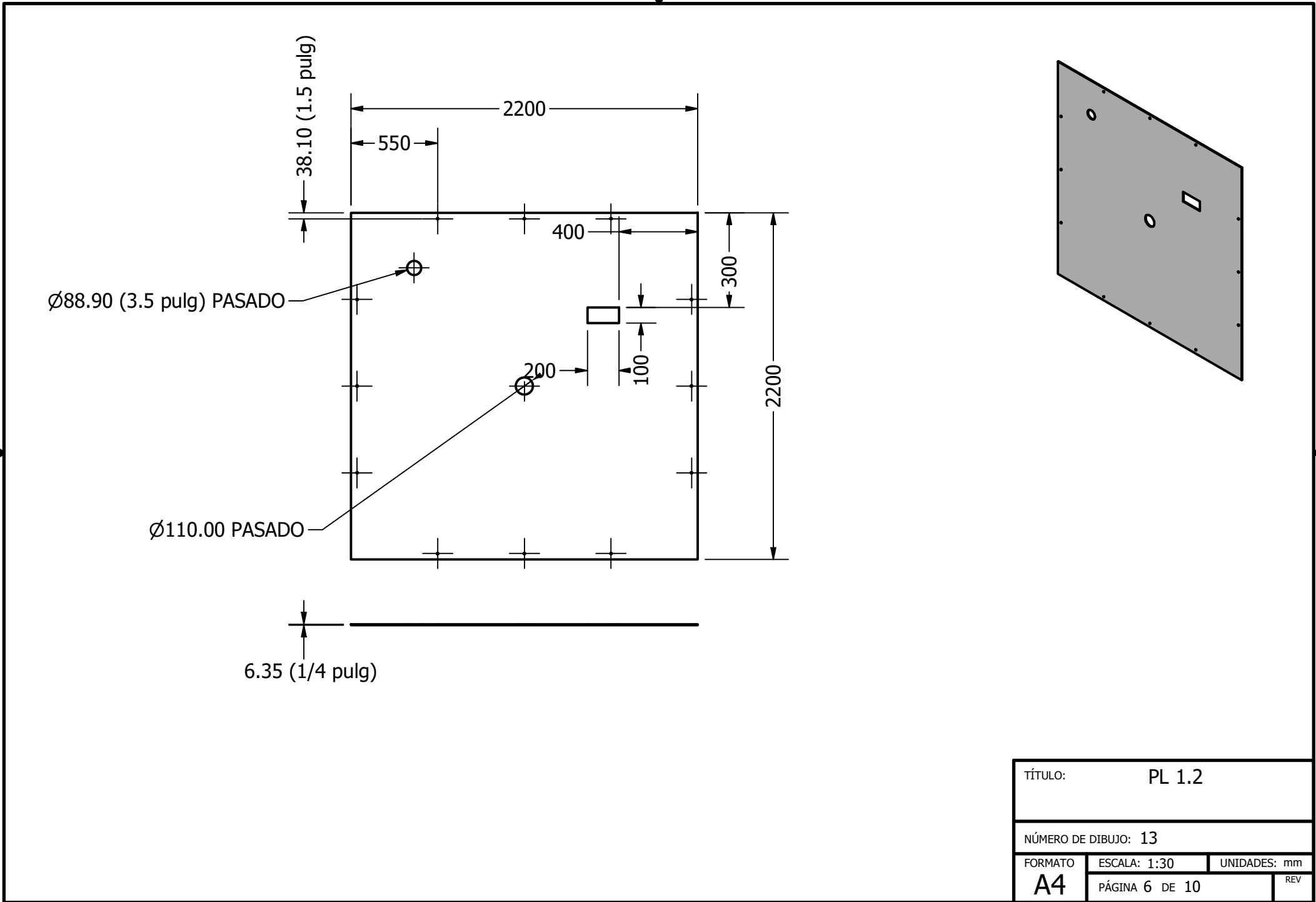
TÍTULO:		Componentes Comprados	
NÚMERO DE DIBUJO: 10			
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES: mm	
A4		PÁGINA 3 DE 10	REV



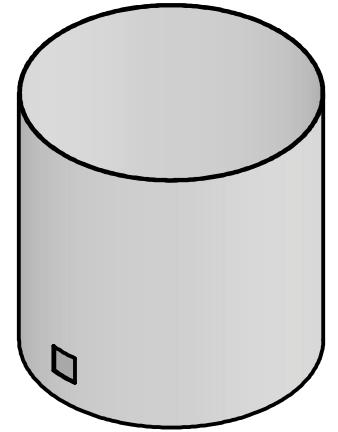
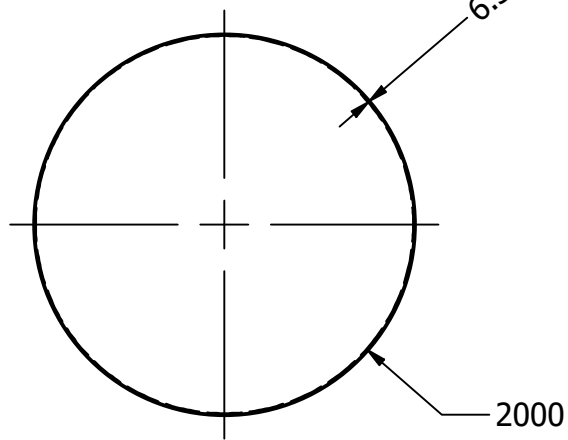
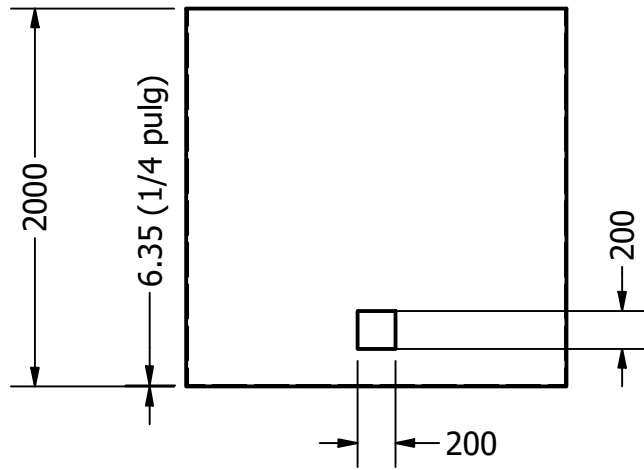


Nota:  
Se compraron y soldaron planchas de acero  
de 1/4 pulgada de espesor

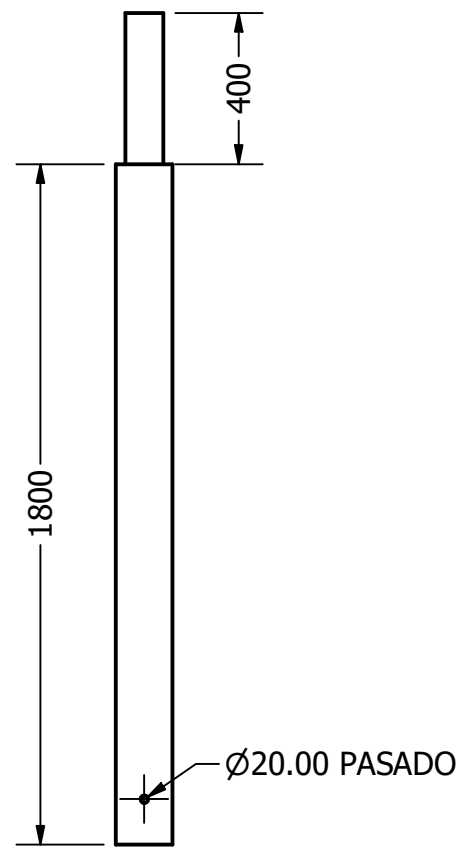
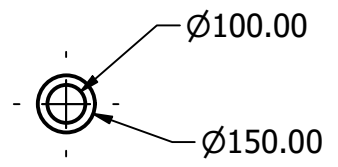
TÍTULO:		AC1.1	
NÚMERO DE DIBUJO: 12			
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm	REV
A4	PÁGINA 5 DE 10		



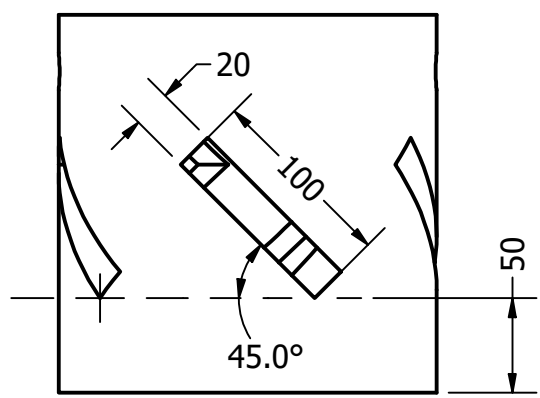
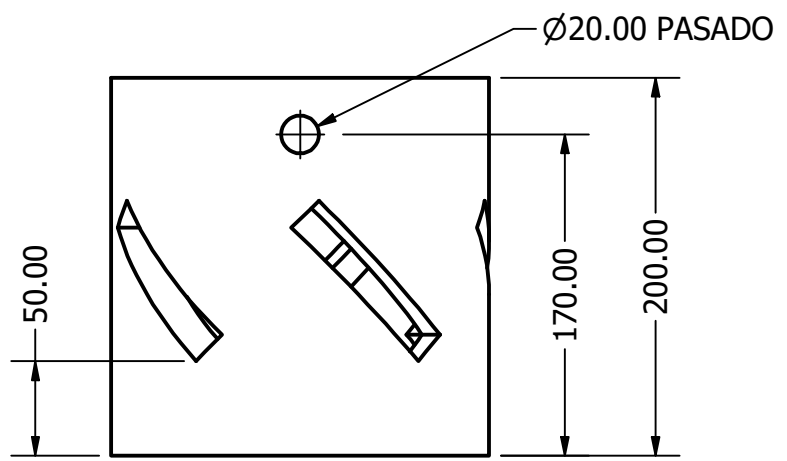
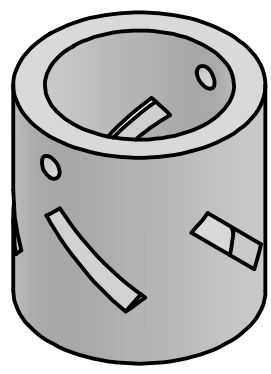
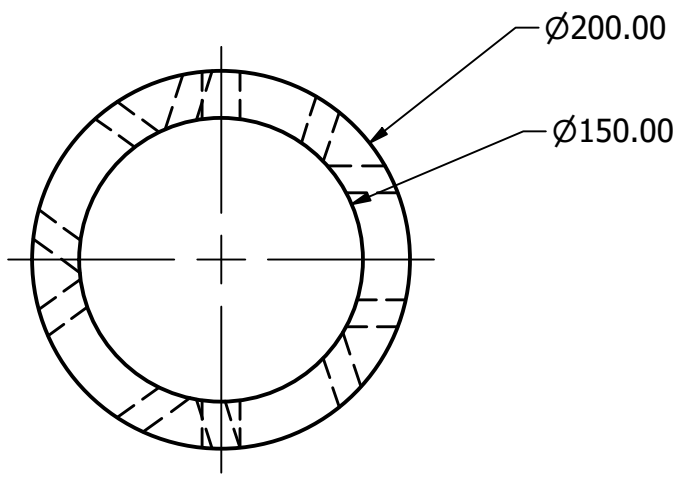
TÍTULO:		PL 1.2	
NÚMERO DE DIBUJO: 13			
FORMATO	ESCALA: 1:30	UNIDADES: mm	
A4	PÁGINA 6 DE 10		REV



TÍTULO:		TCA	
NÚMERO DE DIBUJO: 14			
FORMATO	ESCALA: 1/40	UNIDADES: mm	REV
A4	PÁGINA 7 DE 10		

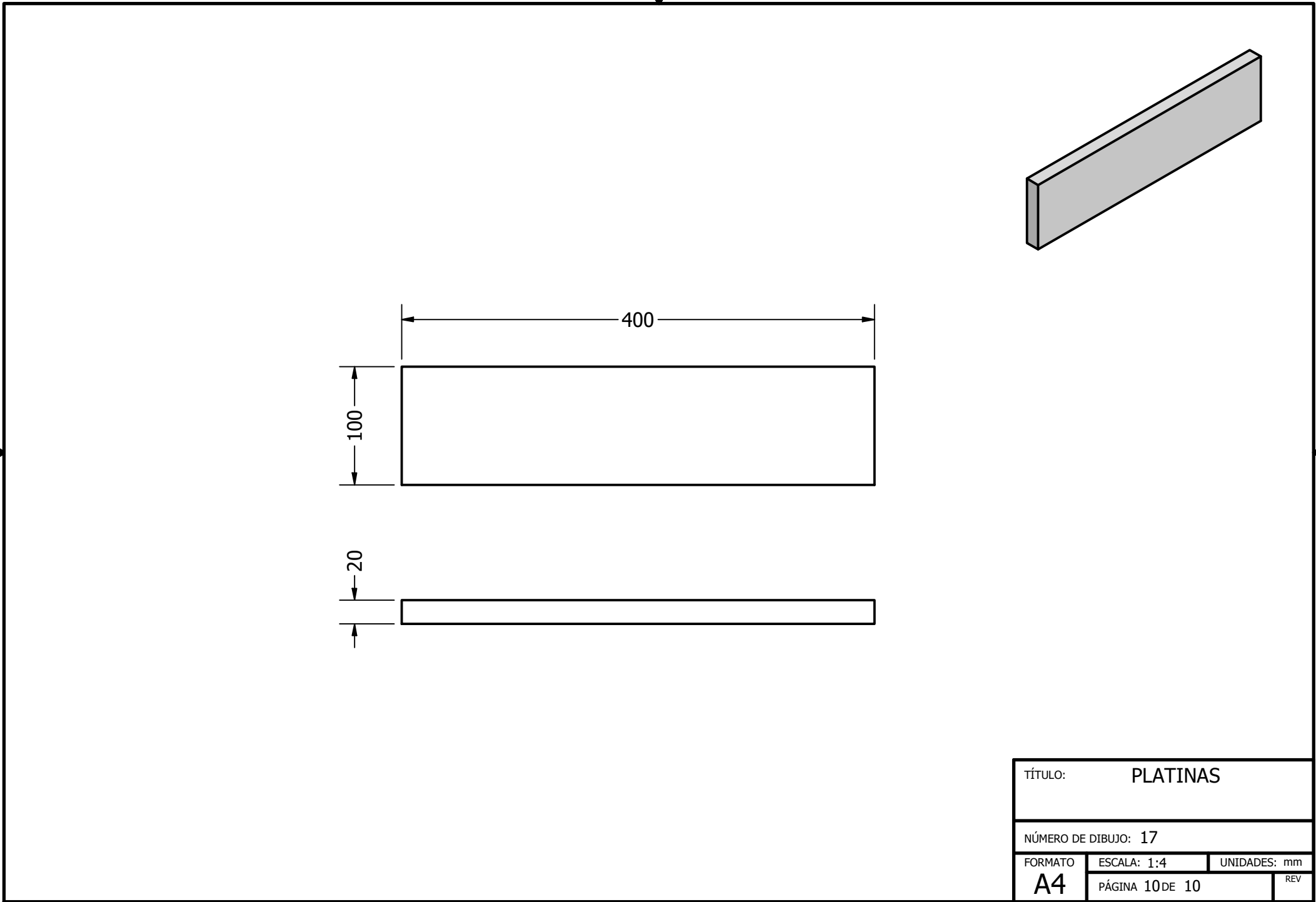


TÍTULO:		ECA	
NÚMERO DE DIBUJO: 15			
FORMATO	ESCALA: 1:20	UNIDADES: mm	
<b>A4</b>	PÁGINA 8 DE 10		REV



Nota:  
Las ranuras realizadas tienen medida de 20 X 100,  
anguladas a 45 grados

TÍTULO:		AC 1.2	
NÚMERO DE DIBUJO: 16			
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: mm	REV
A4	PÁGINA 9 DE 10		



TÍTULO: PLATINAS	
NÚMERO DE DIBUJO: 17	
FORMATO <b>A4</b>	ESCALA: 1:4
UNIDADES: mm	
PÁGINA 10 DE 10	
REV	