

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de agitador de movimiento continuo para el proceso de tableado en
una industria chocolatera

ING2799

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Mike Edgar Tapia Figueroa

Raúl Andrés Alulema Basante

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Quiero dedicar este proyecto a mis padres, que con su apoyo incondicional durante todo este camino he podido cumplir con todas mis metas, mi mayor logro es saber que ellos se sienten orgulloso de mí, estoy eternamente agradecido por tenerlos en mi vida.

Raúl Alulema

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado para Dios, sea la gloria siempre para Él. De igual manera, la dedicatoria se extiende con profundo amor a mis padres: Francisco Edgar Tapia Falcones y Mercy Griselda Figueroa León.

.

Mike Edgar Tapia Figueroa

Agradecimientos

Agradezco a mi padre Raúl, por ser un ejemplo a seguir para mí, darme su apoyo siempre y guiarme a ser una persona de bien, a mi madre Guadalupe que durante todos estos años ha estado presente para mí, doy gracias a Dios por darme una madre como ella y sin su apoyo incondicional nada de esto hubiera sido posible, a mis hermanas Johanna y Andrea por su apoyo en todo este camino, a mi hermano Nicolas por todas las risas y buenos momentos que hemos compartido, a Katty por tenerme paciencia y siempre estar para mí cuando más lo he necesitado y para finalizar agradezco a los ingenieros Jaime Salcedo, Edwin Sánchez, Alex Bello y Estephany Adrian, por haber confiado en mí y darme la oportunidad de aprender con ellos, estaré eternamente agradecido con todos.

Raúl Alulema

Agradecimientos

Agradezco a Dios padre por acompañarme a lo largo de toda esta travesía; a Dios hijo por la fortaleza en tiempos de angustia; y al Espíritu Santo por ser la fuente de mi inteligencia, inspiración y disciplina. Agradezco a mis amados padres, a mis tres hermanos, a mis abuelos, tíos, tías, primos, quienes han aportado con su granito de arena; sin su apoyo y cariño esto no sería posible. Agradezco a todo aquel que puedo darme el lujo de llamar amigo: a los de toda la vida (Invesciencias), a las más entrañables (Gauss), a los que la pandemia me obsequió (Galveston), a mi familia temporal (Wisconsin), a mis compitas de Margarita (Osage), a mis interlocutores de tantas historias (carpool), a mis “amigos” y ahora colegas (Espol); gracias por ser esa luz, esa risa y ese aliento.

Finalmente, agradezco a todos quienes se han mantenido junto a mí, pero también a aquellos que, aunque ya no estén, creyeron en mí desde un inicio; para ustedes fue todo mi amor y el amor no muere.

Mike Edgar Tapia Figueroa

Declaración Expresa

Nosotros Mike Edgar Tapia Figueroa -Raúl Andrés Alulema Basante acuerdo/acordamos y reconoczo/reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, viernes 11 de Octubre del 2024.



Mike Edgar Tapia

Figueroa



Raúl Andrés Alulema

Basante

Evaluadores

José Alberto Macias Zambrano

Profesor de Materia

Ernesto Rolando Martínez Lozano

Tutor de proyecto

Resumen

El chocolate en el contexto local a aumentado 50% en ventas locales, esto y sumado a que se promedia un total de 31 empresas dedicadas a esta actividad representan un gran valor dentro de la economía ecuatoriana. El propósito principal de este proyecto es la elaboración de un agitador que mantenga la fluidez y calidad dentro de una tolva, siendo así que se deje de depender de mano de obra operativa, además de mantener la inocuidad del producto.

Para el diseño desarrollamos dos piezas en chapa metálica, una tapa base para poder empéñala a los laterales de la tolva y un soporte superior para poder colocar el motor, el elemento principal es un tornillo sinfín el cual se encarga de agitar el fluido y llevarlo a la parte superior de la tolva, para unir ciertas piezas metálicas se utilizó soldadura TIG y las costuras serán pulidas bajo normas de la FDA, asegurando la inocuidad del diseño.

Los resultados nos indicaron la necesidad de un motor con una potencia baja debido al bajo esfuerzo necesario para mover el chocolate, por otro lado, se necesita una velocidad de rotación de 100 RPM para poder mover el chocolate al caudal solicitado, por lo cual en el mercado local se escogió un motorreductor de 0.25 HP.

Para terminar, mediante cálculos, simulaciones de elementos finitos, modelos CAD y planos, se logró diseñar el agitador continuo, el cual tiene un precio incluyendo materiales y mano de obra de \$882.11, lo cual hace el proyecto una opción rentable en comparación a otras alternativas del mercado nacional

Palabras Clave: Tornillo sinfín, agitador, elementos finitos, inocuidad.

Abstract

Chocolate sales in the local market have increased by 50%. Combined with an average of 31 companies dedicated to this industry, this represents a significant contribution to the Ecuadorian economy. The main objective of this project is to develop an agitator that maintains fluidity and quality within a hopper, eliminating the reliance on manual labor while ensuring product harmlessness.

For the design, we developed two metal sheet components: a base cover to be bolted to the sides of the hopper and an upper support to hold the motor. The key element is an auger screw responsible for stirring the fluid and transporting it to the upper part of the hopper. To join certain metal components, TIG welding was used, and all seams were polished following FDA standards to ensure product safety.

The results indicated the need for a low-power motor due to the minimal effort required to move the chocolate. Additionally, a rotational speed of 100 RPM is necessary to achieve the required flow rate. Based on this, a 0.25 HP gear motor available in the local market was selected.

Finally, through calculations, finite element simulations, CAD models, and technical drawings, a continuous agitator was successfully designed. The total cost, including materials and labor, amounts to \$882.11, making this project a cost-effective alternative compared to other options in the national market.

Keywords: Screw conveyor, stirring, finite elements, harmlessness

Índice general

Resumen	I
Abstract.....	II
Índice general	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XII
Índice de planos	XIII
Capítulo 1	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Descripción del Problema.....	2
1.3. Justificación del Problema.....	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Marco teórico.....	4
1.5.1. La historia del cacao en Ecuador.....	4
1.5.2. Procesamiento del cacao.....	5
1.5.3. Procesamiento del chocolate	6
1.5.3.1. Recepción de materia prima	6
1.5.3.2. Mezclado	6
1.5.3.3. Refinado	6
1.5.3.4. Almacenamiento.....	6
1.5.3.5. Temperado	7
1.5.3.6. Dosificación.....	7
1.5.3.7. Enfriamiento	7
1.5.4. Tipos de agitadores.....	7
1.5.5. Tipos de tolvas.....	9
1.5.6. Reología del chocolate.....	11

1.5.7.	Propiedades físicas del chocolate como fluido.....	12
1.5.8.	Método de Elementos Finitos (Finite Element Analysis).....	13
1.5.9.	Cultura de inocuidad.....	14
1.5.10.	Diseño higiénico.....	14
Capítulo 2		16
2.1	Metodología.....	17
2.2	Proceso de diseño	17
2.3	Requerimiento de diseño	18
2.4	Especificaciones de diseño	19
2.5	Normas y estándares.....	19
2.6	Análisis de alternativas.....	19
2.7	Selección de alternativas de Diseño	21
2.7.1	Criterios de selección.....	21
2.7.2	Ponderación de los criterios de selección.....	22
2.7.3	Matriz de decisión	24
2.8	Diseño de forma	24
2.8.1	Dimensionamiento del paso.....	25
2.8.2	Selección del sistema de transmisión	26
2.8.3	Selección de materiales de construcción	26
2.9	Simulación.....	26
2.10	Planos de construcción	27
2.11	Ecuaciones a utilizar.....	27
2.12	Esfuerzos combinados: círculo de Mohr (2 D).....	37
2.13	Teoría del esfuerzo cortante máximo.....	38
2.14	Análisis de malla	39
Capítulo 3		41
3.1	Resultados y análisis.....	42
3.2	Dimensionamiento.....	49
3.3	Selección de motor y sistema de transmisión.....	50
3.4	Simulación y análisis de malla	50
3.5	Presupuesto.....	55

Capítulo 4	58
4.1 Conclusiones.....	59
4.2 Recomendaciones	60
Apéndice A	63
Apéndice B	82

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FDA	Food and Drugs Administration
DCL	Diagrama de Cuerpo Libre
TIG	Tungsten Inert Gas
BPM	Buenas Prácticas de Manufactura
ISO	International Organization for Standardization

Simbología

B	Ancho de viga
θ_p	Ángulo de máximo estrés.
A	Área
C	Capacidad
q	Carga
Q	Caudal
C_d	Coefficiente de arrastre
C_f	Coefficiente de pérdidas de fricción
ρ	Densidad
W	Densidad en unidades inglesas
d	Diámetro del eje
D	Diámetro del helicoidal
C	Distancia desde el eje neutro hasta la fibra más externa
Q	Distancia desde el eje neutro hasta la fibra más externa
e	Eficiencia de la transmisión
$N_{\text{Hidráulica}}$	Eficiencia hidráulica
τ_1	Esfuerzo cortante 1.

τ_2	Esfuerzo cortante 2.
τ	Esfuerzo cortante del fluido
τ_{xy}	Esfuerzo cortante para eje xy
τ_{xy}	Esfuerzo cortante por carga de tensión
σ^{\wedge}	Esfuerzo de Von Mises.
σ_x	Esfuerzo normal en eje x
σ_y	Esfuerzo normal en eje y.
σ_y	Esfuerzo normal por flexión
τ_{sc}	Esfuerzo por torsión
σ_1	Esfuerzo principal primario para la tapa principal
σ_2	Esfuerzo principal secundario para la tapa principal
t	Espesor de las hélices del transportador
f	Factor de fricción
F_s	Factor de seguridad
F_o	Factor de sobrecarga
F_b	Factor del buje para colgante
F_{dt}	Factor del diámetro del transportador
F_f	Factor del helicoidal

F_m	Factor del material
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Flexi3n por carga normal
V	Fuerza cortante máxima
F_d	Fuerza de arrastre
F_t	Fuerza de empuje
g	Gravedad
I	Inercia
Kg	Kilogramos
σ	Límite de elasticidad
S_n	Límite de fatiga modificado
S_y	Limite elástico
Lt	Litros
L	Longitud de las hélices
Mpa	Megapascales
m	Metro
mm	Milímetro
$M_{m\acute{a}x}$	Momento flector máximo
J	Momento polar de inercia

R_e	Número de Reynolds
Pa	Pascales
P	Paso
P_{total}	Peso total
H_{pf}	Potencia de accionamiento del tornillo en vacío
P_m	Potencia de motor
H_{pm}	Potencia para mover el material
H_{ptotal}	Potencia total del transportador
σ_{prom}	Promedio de esfuerzo principal.
R	Radio del círculo de Mohr.
R_x	Reacción de rodamiento en eje x
R_y	Reacción de rodamiento en eje y
s	Segundos
T	Torque aplicado
v	Velocidad
ω	Velocidad angular
N	Velocidad de rotación
V_d	Volumen del fluido desplazado

Índice de figuras

Figura 1.1 Flujograma del cacao y sus derivados.....	5
Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de diseño del agitador	18
Figura 2.2 Alternativa agitadora con hélices	20
Figura 2.3 Alternativa de agitador con paletas	20
Figura 2.4 Agitador de tornillo sinfin vertical	21
Figura 2.5 Tornillo de Arquímedes.....	25
Figura 2.6 Ilustración de secciones y cotas de una viga rectangular	30
Figura 2.7 Representación geometría de las coordenadas de interés en el círculo de Mohr	38
Figura 3.1 Diagrama de cuerpo libre para el transportador helicoidal	42
Figura 3.2 Diagrama de cuerpo libre para la tapa principal	43
Figura 3.3 Diagrama de cuerpo libre para el soporte superior	44
Figura 3.4 Análisis de tensión proporcionado por el software Inventor.....	51
Figura 3.5 Análisis de tensión proporcionado por el software Inventor.....	52
Figura 3.6 Análisis de tensión proporcionado por el software Inventor.....	52
Figura 3.7 Simulación de fluido del chocolate amargo a 100 RPM.....	54
Figura 3.8 Simulación de fluido del chocolate sucedáneo A 100 RPM	54
Figura 3.9 Simulación de fluido del chocolate blanco a 100RPM	55
Figura A.1 Representación de tapa principal como viga doblemente soportada en sus extremos	68
Figura A.2 Diagrama de longitud versus fuerza cortante para la tapa principal	68
Figura A.3 Diagrama de longitud versus momento flector para tapa principal.....	69
Figura A.4 Representación del soporte superior como viga doblemente soportada en sus extremos	70
Figura A.5 Diagrama de longitud versus fuerza cortante para el soporte superior	70
Figura A.6 Diagrama de longitud versus fuerza cortante para el soporte superior	71
Figura A.7 Círculo de Mohr para tapa principal.....	72
Figura A.8 Círculo de Mohr para el soporte superior.	73

Índice de tablas

Tabla 1.1 Tipos de agitadores	8
Tabla 1.2 Tipos de tolvas	9
Tabla 1.3 Ventajas y desventajas de marmitas de calor directo y calor indirecto.....	10
Tabla 1.4 Propiedades físicas del chocolate utilizado	13
Tabla 1.5 Niveles de pulido	15
Tabla 2.1 Requerimientos de diseño del agitador de chocolate.....	18
Tabla 2.2 Escala de juicio de Saaty	22
Tabla 2.3 Pesos de los criterios de selección	23
Tabla 2.4 Matriz de decisión del agitador.....	24
Tabla 2.5 Tipos de paso para transportadores helicodales.....	25
Tabla 2.6 Descripción de configuración de mallas.....	40
Tabla 3.1 Variables de interés para el cálculo de fuerzas del transportador helicoidal	43
Tabla 3.2 Variables de interés para el cálculo de fuerzas de la tapa principal.....	44
Tabla 3.3 Variables de interés para el cálculo de fuerzas del soporte superior.....	44
Tabla 3.4 Variables de interés para el cálculo de esfuerzos en tornillo helicoidal.....	45
Tabla 3.5 Variables de interés para el cálculo de esfuerzos de la tapa principal	46
Tabla 3.6 Variables de interés para el cálculo de esfuerzos del soporte superior	47
Tabla 3.7 Variables de interés para el cálculo del esfuerzo de Von Mises.....	48
Tabla 3.8 Factores de seguridad para cada elemento.....	48
Tabla 3.9 Variables de interés geometría de tornillo helicoidal y tubo.....	49
Tabla 3.10 Análisis de malla de los elementos diseñados	50
Tabla 3.11 Tabla de velocidad del chocolate a 100 RPM utilizando el software de SolidWorks	53
Tabla 3.12 Costos de materiales	55
Tabla 3.13 Costo de fabricación	56
Tabla A.1 Elementos del diseño con sus características físicas.....	64
Tabla A.2 Constante utilizas para el cálculo de potencia según manual de Martins	81

Índice de planos

PLANO 1 Tapa cubierta para tolva

PLANO 2 Soporte superior para motor

PLANO 3 Tornillo Sinfin

PLANO 4 Canal

PLANO 5 Cuña

PLANO 6 Perno M6

PLANO 7 Tuerca M6

PLANO 8 Arandela

Capítulo 1

1.1. Introducción

El chocolate es un derivado del cacao, el cual es un fruto de un árbol americano de origen amazónico, este necesita de climas húmedos y calurosos, este árbol empieza a dar frutos a partir del cuarto año a partir de su sembrío y su fruto puede llegar a pesar aproximadamente 450 gramos, por lo general se dan dos cosechas al año con una diferencia de seis meses entre las dos. (Equipo editorial, Etecé, 2021).

En el país existen 31 empresas e industrias que se dedican a la elaboración de chocolate. Pese que se reporta un crecimiento relativamente bajo, alrededor de 1 % en el 2023, existe un creciente interés en el mercado internacional, como –por ejemplo- la Unión Europea y de manera nacional se registró un aumento del 50 % en la venta de derivados de chocolate (Abril, 2023b). Ante esta tendencia, las industrias ecuatorianas deben estar en una constante mejora continua de sus procesos para cumplir con la demanda actual y futura, emigrando, en la medida de lo posible, a maquinarias vanguardistas propias de la Industria 4.0, así como también seguir con la progresiva automatización de sus equipos para asegurar una mayor eficiencia.

Dentro de esos cambios y adaptaciones requeridos por la industria, se encuentra nuestra propuesta de diseño, la cual está enfocada en suprimir el trabajo manual de una persona para ser realizada de forma automática por un sistema electromecánico.

1.2. Descripción del Problema

En una empresa dedicada a la elaboración de coberturas y chocolates se encuentra una máquina en donde se dosifica chocolate para moldear tabletas. Este equipo posee una tolva en donde se descarga el producto. El actual diseño de esta tolva y el sistema de bombeo para la dosificación no es el más eficiente, pues el producto se acumula en la tolva, lo que provoca que

se formen capas de este y reduzca su fluidez, justamente para evitar esto se designa a un operario para que revuelva la masa a través de un cucharón.

El operario se mantiene de pie hasta un máximo de siete de sus doce horas laborables, lo cual no resulta ergonómico y resta la productividad a la empresa al tener fijo a un operario únicamente para esta actividad. Conociendo esa realidad, se desea implementar un mecanismo que permita el movimiento del chocolate y prescindir del operario o, al menos, que su función sea reducida a un monitoreo periódico, dándole una mayor flexibilidad para realizar otras actividades.

1.3. Justificación del Problema

Al designar de un operario para realizar esta actividad por largos periodos de tiempo se desencadena una serie de problemas tanto ergonómicos como de seguridad industrial, los cuales se buscan eliminar al implementar un sistema de agitación que permita desligar al operario de realizar dicha actividad y así aumentar la productividad de la empresa.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de agitación que permita la fluidez del producto al mantenerlo en constante movimiento dentro de la tolva, asegurando su posterior dosificación

1.4.2. Objetivos específicos

- Desarrollar el diseño conceptual de un sistema de agitación y sus respectivos elementos.
- Realizar el análisis dinámico y el cálculo de esfuerzos de los principales elementos mecánicos.

- Elaborar planos de fabricación y ensamble utilizando software CAD.
- Simular el comportamiento de los elementos mecánicos del diseño bajo el método de elementos finitos (FEA).

1.5. Marco teórico

1.5.1. La historia del cacao en Ecuador

El cacao es un producto destacado y reconocido a nivel mundial, desde su descubrimiento por parte de culturas milenarias en México hasta la actualidad, su procesamiento ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, obteniéndose de él una variedad de derivados, siendo este el principal ingrediente para la elaboración de uno de los productos más codiciados y consumidos en el mundo: el chocolate.

En Ecuador, este grano obtiene mayor importancia en el denominado “Boom cacaotero”, periodo comprendido desde el año 1894 hasta 1930, época en la cual nuestro país se convirtió en uno de los mayores exportadores de cacao (Mendoza, Cervantes & Zamora,2022), consolidándose desde entonces como uno de los principales ingresos al país.

La exportación de cacao se hacía únicamente en pepa, para ser utilizados como materia para la elaboración de los más finos a chocolates a nivel internacional, siendo reconocido nacionalmente como “La pepa de oro”.

En la actualidad, el Ecuador se ubica en el segundo puesto como exportador de cacao y en el tercer puesto como productor (con sus tipos: el Nacional y el clon CCN 51), representando el 12 % de las ventas de este producto a nivel mundial (Saltos, 2024). Estas cifras no son más que el reflejo de la historia que tiene este producto con la ecuatoriana y el compromiso en

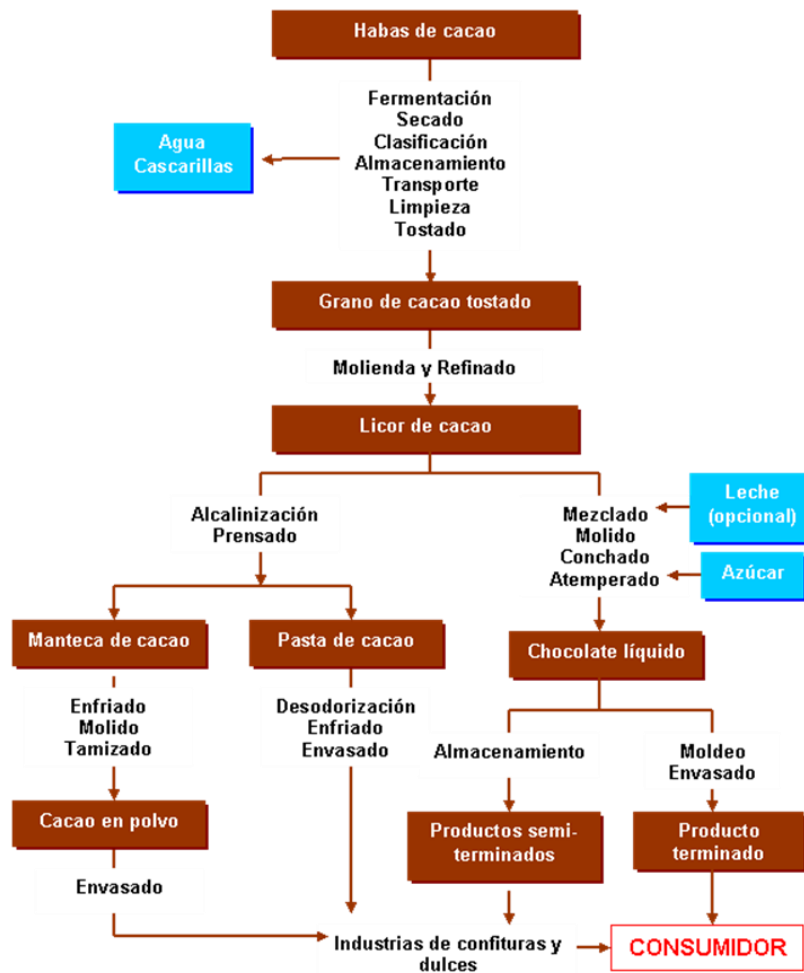
conjunto de cada uno de los ecuatorianos que han promovido el fortalecimiento de industria cacaotera.

1.5.2. Procesamiento del cacao

A continuación, se detalla en el flujograma cada una de las etapas del proceso de cacao, desde el cacao como tal hasta la elaboración de los semielaborados, tales como licor de cacao, polvo de cacao, manteca de cacao y como, producto final, el chocolate.

Figura 1.1

Flujograma del cacao y sus derivados. (PROCESO DEL CACAO, s. f.)



1.5.3. Procesamiento del chocolate

A continuación, se enlistan de manera general el orden de las etapas para la elaboración del chocolate.

1.5.3.1. Recepción de materia prima

Siendo el producto estrella del cacao (ya sea en manteca, polvo o licor), este ofrece una versatilidad para mezclarse con otros productos, entre los cuales se puede mencionar la leche, el maní, la avena, asimismo con diferentes saborizantes y, por supuesto, diversos tipos de azúcar.

1.5.3.2. Mezclado

A nivel industrial, este proceso se realiza en grandes tanques en donde, a través de un mezclador se trituran los ingredientes de cada receta. Esta acción es complementada con un agitador, el cual mantiene en constante movimiento, logrando así su homogeneidad.

1.5.3.3. Refinado

Este proceso es esencial, ya que, dentro de la mezcla, la masa a simple vista puede resultar homogénea, sin embargo, el chocolate comercial debe alcanzar un promedio 25 micras de consistencia. De esta forma, se asegura que sea degustable para el gusto y se eliminan cualquier partícula granulada o grumosa dentro de su composición.

1.5.3.4. Almacenamiento

Una vez que se realiza la medición de micraje y este es el deseado, se procede a traspasar la masa a grandes tanques de almacenamiento, los cuales son tipo marmita, es decir, poseen una camisa de agua que permite tener el producto a una temperatura estable (aprox. 40 °C).

Idealmente, se reserva cada tanque para cada producto distinto.

1.5.3.5. Temperado

Este proceso es exclusivo para chocolates, no para sucedáneos. Básicamente, en términos simples, a través de una baja y subida de temperatura se rompen las estructuras cristalinas dentro para nuevamente formarlas.

1.5.3.6. Dosificación

Dependiendo de la presentación, el sistema para dosificación puede variar. En muchos de esos sistemas, se utilizan moldes que permiten dar forma al chocolate que se vierte en la tolva.

1.5.3.7. Enfriamiento

Con la ayuda de túneles de frío, el chocolate dosificado y moldeado se solidifica para su presentación como producto final, para su posterior empaquetado y sellado.

1.5.4. Tipos de agitadores

Un agitador es un dispositivo mecánico diseñado para generar movimiento en un fluido con el objetivo de mezclar, homogeneizar, mantener partículas en suspensión o mejorar la transferencia de calor y masa en sistemas líquidos, semisólidos o incluso gaseosos. Se utiliza ampliamente en procesos industriales en sectores como la química, la alimentación, la farmacéutica y el tratamiento de aguas.




El agitador funciona mediante un elemento rotativo, como hélices, paletas o turbinas, que convierte la energía mecánica en energía cinética dentro del fluido. Esto genera patrones de flujo que pueden ser laminares o turbulentos, dependiendo de variables como la geometría del agitador, la viscosidad del fluido, la velocidad de rotación y las condiciones de operación. Su diseño y elección se basan en los objetivos específicos del proceso, como la mezcla eficiente de


componentes, la reducción de gradientes de concentración o temperatura, o la suspensión de partículas sólidas.

Los agitadores se clasifican según su orientación (vertical, horizontal) y su propósito (mezcla de sólidos y líquidos, emulsificación, dispersión). (McCabe, Smith, & Harriott, 2001)

Tabla 1.1

Tipos de agitadores (Alberto, 2021)

Tipo	Características	Imagen
Agitador de paletas	<p data-bbox="613 730 932 762">Funciona a baja velocidad.</p> <p data-bbox="613 821 927 919">Resultado una mezcla con suspensión de partículas.</p>	
Agitador de turbinas	<p data-bbox="613 1066 927 1098">Funciona a alta velocidad.</p> <p data-bbox="613 1157 878 1255">Resultado una mezcla homogénea.</p>	
Agitador de hélice	<p data-bbox="613 1318 927 1350">Funciona a alta velocidad.</p> <p data-bbox="613 1398 954 1497">Función en doble dimensión (horizontal y vertical).</p> <p data-bbox="613 1556 889 1654">Ideal para la mezcla de materiales fibrosos.</p>	

Agitador de marco y ancla	Funciona a baja velocidad.	
	Ideal para la mezcla de fluidos viscosos.	


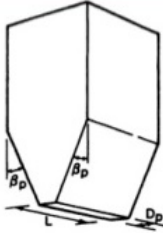
Nota. Estos agitadores no son los únicos, pues también existen otras geometrías o variaciones que realizan la misma función de mezclar dos o más elementos.

1.5.5. Tipos de tolvas

Este método se basa en la continuación, se detalla en el flujograma cada una de las etapas del proceso de cacao, desde el cacao como tal hasta la elaboración de los semielaborados, tales como licor de cacao, polvo de cacao, manteca de cacao y como, producto final, el chocolate.

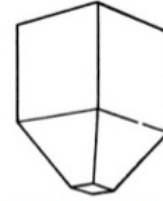
Tabla 1.2

Tipos de tolvas (Guerra, 2017)

Tipo	Características	Imagen
Tolva cónica	La más común de todas, su geometría permite la descarga uniforme a lo largo de sus paredes.	
Tolva biselada	Con pendientes más pronunciadas que permiten la descarga del producto de manera rápida.	

Tolva piramidal

Con pendientes similares a la anterior, pero con una reducción a la descarga para controlar el flujo de masa.



Los tipos mencionados no son los únicos, pues las tolvas poseen un sinnúmero de otras geometrías, las cuales varían de acuerdo con su aplicación o también como respuesta a restricciones físicas, materiales y económicas.

De igual manera, para muchas aplicaciones en las que se requiere añadir calor para el tránsito del producto, por ejemplo, para el chocolate u otros productos viscosos, existen marmitas de calor directo y calor indirecto, también conocidas como enchaquetadas.

Tabla 1.3

Ventajas y desventajas de marmitas de calor directo y calor indirecto (Coolvi, 2022)

Tipos	Ventajas	Desventajas
Calor directo	Alcanza temperaturas altas. Máxima transferencia de calor.	Temperatura no uniforme.
Calor indirecto	Temperatura uniforme a lo largo de la superficie.	Mantenimiento continuo. Acumulación de sedimentos si el agua no es tratada.

1.5.6. Reología del chocolate

La reología del chocolate es la ciencia que estudia tanto comportamiento como propiedades del fluido bajo aplicación de fuerzas externas, con el fin de garantizar calidad y consistencia del producto en la industria alimentaria. Este análisis permite entender el comportamiento del chocolate durante su mezclado, templado, moldeo y recubrimiento.

El chocolate es una mezcla compleja en la que sólidos como las partículas de cacao, azúcar y leche están dispersos en una fase continua de manteca de cacao. Su flujo y viscosidad dependen de diversos factores, como su composición, la distribución y el tamaño de las partículas, la cantidad de grasa, la temperatura y las condiciones de procesamiento. Desde el punto de vista reológico, el chocolate no sigue un comportamiento newtoniano, sino que se comporta como un material plástico de Bingham, lo que implica que necesita una fuerza mínima, denominada esfuerzo de fluencia, para comenzar a moverse.

La viscosidad es un factor fundamental en el estudio reológico del chocolate, ya que influye directamente en su procesamiento. Un nivel adecuado de viscosidad permite un recubrimiento uniforme y un llenado eficiente de los moldes, mientras que valores demasiado elevados pueden dificultar estas operaciones. Además, la tixotropía juega un papel importante, ya que esta propiedad permite que la viscosidad del chocolate disminuya con la agitación constante y se recupere cuando está en reposo, lo que afecta tanto a su manipulación como a la textura y sensación en boca del producto final.

Por otro lado, el temperado del chocolate, un proceso de cristalización controlada de la manteca de cacao tiene un impacto directo en sus propiedades reológicas. Un temperado adecuado favorece la formación de una estructura cristalina estable, lo que mejora el brillo, la

dureza y la resistencia al calor del chocolate. Por el contrario, un temperado inadecuado puede generar defectos como el blooming, que se manifiesta en la aparición de superficies blanquecinas, afectando tanto la apariencia como la calidad del producto.

Estudiar la reología del chocolate es fundamental para diseñar procesos más eficientes y productos de mayor calidad, adaptados a las demandas del consumidor. Herramientas como el reómetro ayudan a caracterizar estos parámetros, optimizando formulaciones y condiciones de procesamiento. (Afoakwa, 2010)

1.5.7. Propiedades físicas del chocolate como fluido

Las propiedades físicas del chocolate como fluido son fundamentales para optimizar los procesos industriales en la fabricación de productos alimenticios, especialmente en operaciones como el transporte, el moldeado y el recubrimiento. Desde el enfoque de la ingeniería mecánica, su comportamiento fluido puede ser modelado y analizado para desarrollar equipos y procesos más eficientes.

Otro aspecto clave es la densidad del chocolate, que generalmente oscila entre 1200 y 1300 kg/m³, influyendo en el diseño de tanques, moldes y sistemas de pesaje. Además, la conductividad térmica y el calor específico son parámetros esenciales en etapas como el templado y el enfriamiento, donde una transferencia de calor eficiente es crucial para lograr una cristalización óptima de la manteca de cacao. Estas propiedades térmicas también son determinantes en el diseño de intercambiadores de calor y sistemas de control de temperatura, garantizando la calidad final del producto.

Desde una perspectiva mecánica, la modelación y análisis de estas propiedades permiten optimizar el diseño de equipos como extrusoras, mezcladoras y moldes, reduciendo costos operativos y mejorando la calidad del producto final. (Beckett, 2009)

Tabla 1.4

Propiedades físicas del chocolate utilizado

Tipo de chocolate	Densidad [kg/m³]	Viscosidad [Pa*s]
Amargo	1325	4,6
Sucedáneo	1279	3,4
Blanco	1226	2,3

1.5.8. Método de Elementos Finitos (Finite Element Analysis)

El Método de Elementos Finitos (MEF) es una técnica numérica utilizada para resolver problemas complejos de ingeniería y física que involucran ecuaciones diferenciales parciales. Divide un dominio continuo en subdominios más pequeños, llamados elementos finitos, conectados entre sí mediante nodos. En cada elemento, las ecuaciones se aproximan mediante funciones matemáticas simples, lo que permite convertir el problema en un sistema de ecuaciones algebraicas que puede resolverse computacionalmente.

El MEF se aplica en diversos campos como análisis estructural, transferencia de calor, dinámica de fluidos y electromagnetismo. Es especialmente útil en problemas con geometrías complejas, condiciones de frontera complicadas o materiales heterogéneos, donde las soluciones analíticas no son viables.

Este método es fundamental para diseñar y optimizar estructuras, dispositivos y sistemas, garantizando precisión y eficiencia en simulaciones computacionales. (Cook, Malkus, Plesha, & Witt, 2001)

1.5.9. Cultura de inocuidad

La inocuidad es una disciplina de carácter científico que tiene como fin evitar que tiene como fin evitar que los alimentos contengan sustancias perjudiciales para los consumidores. La importancia que nuestros alimentos sean inocuos se debe a que solo de esta manera son beneficiosos para nuestra salud, el llamarlo disciplina se debe que no solamente es una responsabilidad de los productores, también requiere cooperación de las demás fases de producción, como en la de transportación, almacenamiento y elaboración. Los alimentos pueden volver no inocuos en cualquiera de las fases de suministros, a través del suelo, agua, aire o por el equipo de producción.

Dentro de los objetivos de desarrollo sostenible la inocuidad de los alimentos es parte fundamental, como se habla en el ODS números dos (Hambre cero) y tres (Salud y bienestar).

1.5.10. Diseño higiénico

El acabado de las superficies metálicas en sectores como la industria alimentaria, farmacéutica y biotecnológica desempeña un papel fundamental en la higiene, ya que previene la acumulación de residuos, microorganismos y contaminantes. Este acabado se clasifica según la rugosidad superficial (Ra), expresada en micrómetros (μm), donde valores más bajos indican una superficie más lisa. En aplicaciones con requisitos sanitarios, se recomienda un Ra entre 0.8 y 0.2 μm , dependiendo del tipo de proceso y las normativas aplicables, como los estándares 3-A Sanitary Standards, EHEDG y FDA.

Los métodos de pulido incluyen procesos mecánicos, electrolíticos y químicos, cada uno con diferentes niveles de acabado. Un pulido de alta calidad facilita la limpieza, disminuye la fricción y reduce el riesgo de corrosión, aspectos esenciales en equipos como tuberías, válvulas, tanques y transportadores helicoidales. A continuación, se presentan los tipos de pulido más utilizados junto con sus características.

Tabla 1.5

Niveles de pulido (EHEDG, 2004)

Tipo de pulido	Descripción	Rugosidad
Pulido mecánico	Proceso abrasivo con discos o lijas	0.8-1.6 um
Pulido espejo	Superficie altamente reflectante con brillo tipo espejo	0.1-0.4 um
Pulido electrolítico	Uso de corriente eléctrica para disolver imperfecciones de la superficie metálica.	0.2-0.8 um
Pulido químico	Aplicación de ácidos para suavizar la superficie.	0.4-1.2 um
Granallado	Acabado rugoso controlado con partículas abrasivas.	1.6-3.2 um

Capítulo 2

2.1 Metodología

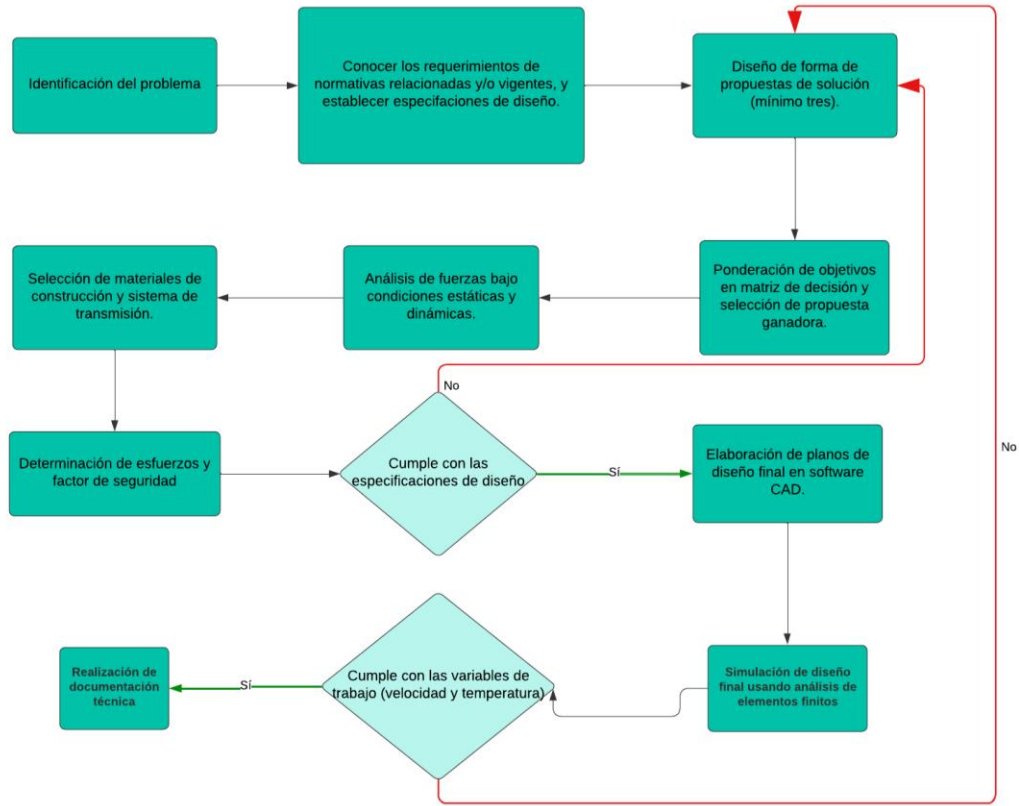
En el capítulo 1 se describió el problema dentro de la industria chocolatera y los elementos involucrados, con los cuales se definieron los objetivos para el presente proyecto. Se analizó como el agitador influye directamente en la calidad del producto final, además de los requerimientos aplicables en el proyecto. Por ende, se procede a describir el proceso de diseño y la metodología aplicada en el mismo.

2.2 Proceso de diseño

Diseñar es formular un plan para satisfacer o resolver un problema, en caso de que resulte en la creación de algo físico, entonces el producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse (Budynas, 2024). Para continuar con el diseño se procedió a realizar un diagrama de flujo, con el cual nos vamos a guiar para identificar los puntos clave que debe tener nuestro diseño.

Figura 2.1

Diagrama de flujo del proceso de diseño del agitador



2.3 Requerimiento de diseño

Tabla 2.1

Requerimientos de diseño del agitador de chocolate

Volumen para desplazar	20 litros por minuto
Materiales	Acero inoxidable 304
Proceso de soldadura	TIG (Inyección interna)
Rediseño de tolva instalada	No
Grasas y aceites	Grado alimenticio
Presupuesto máximo	\$1200

2.4 Especificaciones de diseño

En esta sección se establecen las especificaciones de diseño que son aplicables en el presente proyecto.

- **Aspectos Económico:** Aplica en el proyecto dado que, en la parte final del mismo, se realizará el análisis económico del diseño final.
- **Aspectos Técnicos:** Es aplicable en el proyecto debido a que el diseño debe basarse en normas utilizadas en la fabricación de maquinaria industrial de grado alimenticio, además de la selección de elementos y equipos mecánicos.

2.5 Normas y estándares

Buenas Prácticas de Manufactura (BPM): estas son una serie de reglas y principios que se deben cumplir en cada parte del proceso de producción de productos destinados para consumo humano, de tal forma que se asegure en cada etapa un ambiente sanitario.

ISO9001: a través de esta norma se implementan los denominados Sistemas de Gestión de Calidad, que no buscan más que la mejora continua de los procesos.

ISO 22000: enfocada para las industrias alimenticias, busca promover y asegurar la seguridad alimentaria en cada una de las etapas de producción.

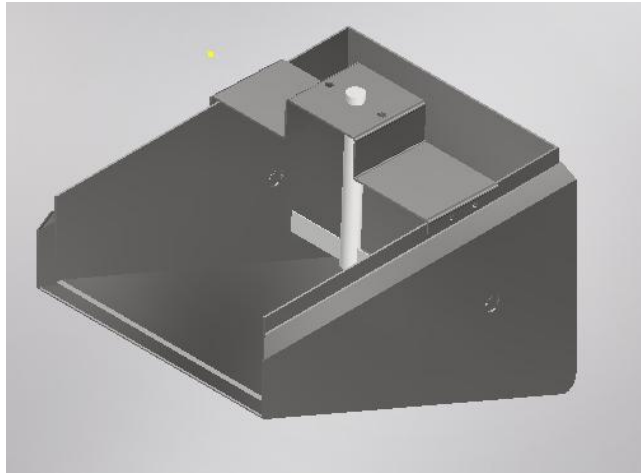
2.6 Análisis de alternativas

Con base a los requerimientos y restricciones, se obtuvieron tres posibles soluciones.

Alternativa 1: Sistema de agitación de hélice en la parte superior, impulsado por un motorreductor y en caso de ser necesario también un sistema de transmisión de cadena.

Figura 2.2

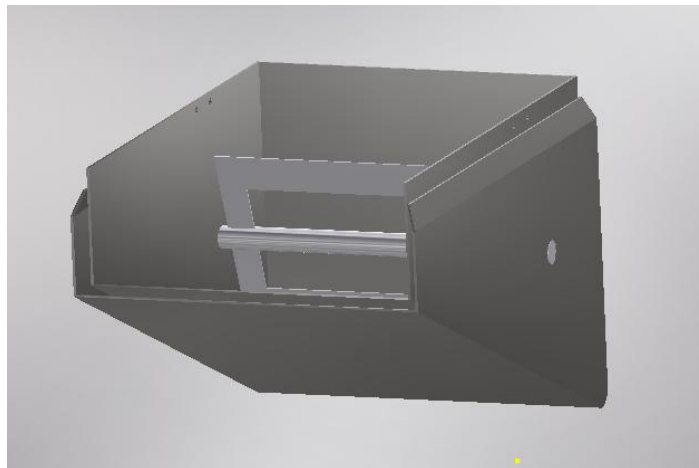
Alternativa agitadora con hélices



Alternativa 2: Agitador en posición horizontal que atraviesa la tolva, impulsado ya sea por un motorreductor o en caso de ser necesario también una transmisión por cadena.

Figura 2.3

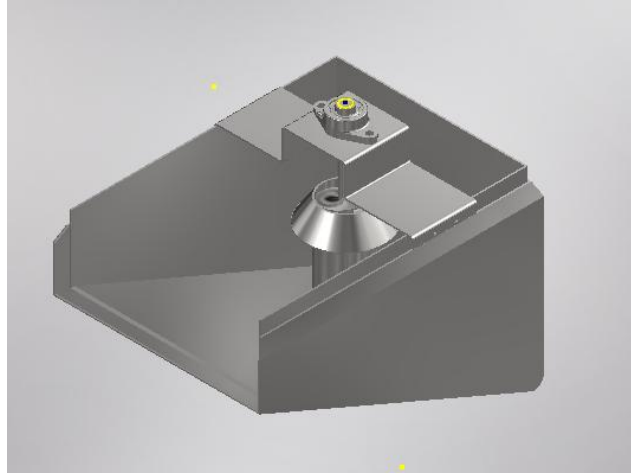
Alternativa de agitador con paletas



Alternativa 3: Agitador de tornillo sin fin en posición vertical, impulsado por un motorreductor, siendo que su velocidad de rotación sería variable con la viscosidad del fluido y la capacidad de transportar materia por la geometría del tornillo sin fin.

Figura 2.4

Agitador de tornillo sinfin vertical



2.7 Selección de alternativas de Diseño

2.7.1 Criterios de selección

Los criterios propuestos para la selección de alternativas que más se adaptan a los requerimientos de diseño del cliente, se detallan a continuación:

- Ergonomía: Facilidad de la maniobrabilidad, de tal forma que el operador no esté condicionado a colocarse en posiciones incómodas durante el uso del equipo, evitando posibles lesiones a largo plazo.
- Mantenimiento: Fácil montaje y desmontaje de accesorios e implementos. Asegurar el uso de materiales resistentes para alargar la vida útil del accesorio, por ende, reducir los periodos de mantenimiento correctivos por deformación o fractura.
- Costo: Precio que se estima de la elaboración del diseño y construcción del equipo para cuantificar si es accesible o no para el presupuesto del cliente.

- Constructibilidad: Factibilidad de la construcción del equipo y la disponibilidad de materiales de construcción y procesos de manufactura.
- Limpieza: Debe poder realizarse de forma fácil y eficiente, para evitar posibles contaminaciones del producto.
- Inocuidad: Asegurar dentro del diseño el fácil acceso para la limpieza y desinfección de toda la superficie y demás elementos que estén en contacto directo con el producto.

2.7.2 Ponderación de los criterios de selección

Una vez se definieron los criterios de selección se procede a ponderar cada uno mediante la escala de juicio de Saaty (tabla 2.3), con lo cual obtuvimos el siguiente orden de importancia de los criterios, en base a los requerimientos del cliente: 1) Inocuidad (INO), 2) Limpieza (LIM), 3) Costo (COS), 4) Ergonomía (ERG), 5) Constructibilidad (CONS), 6) Mantenimiento (MAN).

Tabla 2.2

Escala de juicio de Saaty (Mendoza, Solano, Palencio, & García, 2018)

Escala numérica	Escala verbal	Descripción
1	Igual importancia.	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.

7	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	Un elemento domina fuertemente.
9	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	
Incrementos 0,1	Valores intermedios entre incrementos (utilice esta escala si cree que su valoración necesita un alto grado de precisión)	
Inversos	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar	
$\frac{1}{2} \frac{1}{3} \frac{1}{4} \frac{1}{5} \frac{1}{6} \frac{1}{7} \frac{1}{8} \frac{1}{9}$		

Tabla 2.3

Pesos de los criterios de selección

Criterios	ERG	MAN	COS	CONS	LIM	INO	Total	Peso
ERG	1,00	2,00	3,00	0,50	0,13	0,11	6,74	0,10
MAN	0,50	1,00	0,25	0,50	1,00	0,33	3,58	0,05
COS	0,33	4,00	1,00	5,00	0,33	0,20	10,87	0,16
CONS	2,00	2,00	0,20	1,00	0,50	0,25	5,95	0,09
LIM	8,00	1,00	3,00	2,00	1,00	0,50	15,50	0,23
INO	9,00	3,00	5,00	4,00	2,00	1,00	24,00	0,36
Total							66,64	1

2.7.3 Matriz de decisión

Luego de definir los pesos para cada criterio de selección, se procede a realizar la matriz de decisión, para evaluar las propuestas y poder seleccionar la opción que mejor se adapte a las necesidades del cliente. Se consideraron calificaciones en un rango de 1 – 10 siendo muy bajo y alto respectivamente.

Tabla 2.4

Matriz de decisión del agitador

Criterio	%	Alternativa #1		Alternativa #2		Alternativa #3	
		Valoración	Puntaje	Valoración	Puntaje	Valoración	Puntaje
Ergonomía	0,1	8	0,8	10	1	10	1
Mantenimiento	0,05	7	0,35	5	0,25	7	0,35
Costo	0,16	6	0,96	4	0,64	5	0,8
Constructibilidad	0,09	6	0,54	6	0,54	7	0,63
Limpieza	0,23	7	1,61	5	1,15	7	1,61
Inocuidad	0,36	6	2,16	5	1,8	7	2,52
Total	1	40	6,42	35	5,38	43	6,91

2.8 Diseño de forma

Existen varios tipos de transportadores helicoidales, el que se usará será el tornillo de Arquímedes, el cual es un dispositivo mecánico diseñado para elevar líquidos o materiales granulares, utilizando el principio de un tornillo giratorio dentro de un tubo o una estructura cilíndrica. Se atribuye su invención al matemático e ingeniero griego Arquímedes en el siglo III A.C.

Figura 2.5

Tornillo de Arquímedes



2.8.1 Dimensionamiento del paso

Uno de los valores que fueron establecidos por el diseñador fue el paso del helicoidal, el cual es la distancia entre dos vueltas consecutivas de la hélice medida a lo largo del eje e influye directamente en cómo se transporta el material a lo largo del equipo, existen tres tipos de paso:

Tabla 2.5

Tipos de paso para transportadores helicoidales (Manual de martins)

Paso	Descripción
Estándar	Paso = Diámetro del helicoidal
Corto	Paso = $2/3$ Diámetro del helicoidal
Medio	Paso = $1/2$ Diámetro del helicoidal
Largo	Paso = $1\ 1/2$ Diámetro del helicoidal

2.8.2 Selección del sistema de transmisión

Una de las variables de mayor interés es la velocidad en la que rotará el sinfín, esta es la que será requerida de parte del motor para cumplir con su objetivo, además uno de los parámetros de control. Adicionalmente, el torque que debe ejercer para romper la inercia de las capas de chocolate será otro factor esencial para determinar la potencia del motor eléctrico.

2.8.3 Selección de materiales de construcción

El material que se utilizó en todos los elementos definidos en el presente documento fue el acero inoxidable 304, principalmente porque el chocolate no es corrosivo y tampoco se lo expone a altas concentraciones de cloruros lo cual si afectase al material, además tanto el acero inoxidable 304 y 316 son higiénicos, resisten altas temperaturas por debido lo cual al primer punto nos inclinamos por la opción de usar acero inoxidable 304 en los siguientes elementos: eje, hélices, tubo y soporte del motor.

2.9 Simulación

Para simplificar la simulación, se decidió simular solo la salida del material en el helicoidal, para poder ver el comportamiento del fluido y cual sería una trayectoria esperada del fluido, se utilizó el software de SOLIDWORKS utilizando la herramienta de simulación de fluidos se detalló para cada tipo de chocolate su densidad y viscosidad, además de efectos gravitatorios para asemejar a la realidad los resultados, para otros elementos como el soporte del motor también se hizo un estudio de deformaciones según el peso del motor y el toque el cual se está aplicando a través del motor, esto fue realizado con el software de Autodesk Inventor y su herramienta de análisis de tensiones, que nos deja aplicar fuerzas y torques en lugares específicos y dar como resultados los esfuerzo y las deformaciones.

El software requiere datos específicos como entrada, para la simulación como: geometría, espesores y tipo de material, esta información se la extrajo del capítulo tres.

2.10 Planos de construcción

Para crear los planos de construcción del transportador helicoidal, se empleó el uso del software Autodesk Inventor, con el cual se procedió a realizar la tolva que es material de estudio y consiguiente se diseñaron las piezas correspondientes con los espesores estipulados. Todos los planos se adjuntan en el Apéndice A.

2.11 Ecuaciones por utilizar

Se requirió la definición de las siguientes fuerzas.

a) Peso

$$W = m \cdot g \quad 2.1)$$

Donde:

m: masa del cuerpo [Kg]

g: aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

b) Fuerza de empuje

$$F_t = \rho \cdot g \cdot V_d \quad 2.2)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido

g: aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

V_d : volumen del fluido desplazado.

c) Volumen desplazado

$$V_d = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot P \quad 2.3)$$

Donde:

D: diámetro de la helicoidal [m]

d: diámetro del eje [m]

P: paso del tornillo helicoidal [m]

d) Fuerza de arrastre

$$F_D = \frac{C_D \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A}{2} \quad 2.4)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

v : velocidad de desplazamiento $\left[\frac{m}{s}\right]$

A : área proyectada

C_D : coeficiente de arrastre.

e) Coeficiente de arrastre

De la ecuación de momento de Cauchy se determina esta ecuación.

$$C_D = \frac{2 \cdot \tau}{\rho \cdot v^2} \quad 2.5)$$

Donde:

τ : esfuerzo cortante del fluido [Pa]

f) Potencia de un motor

$$P_m = T \cdot \omega \quad 2.6)$$

Donde:

P_m : Potencia de motor [W]

T: torque aplicado [N]

ω : velocidad angular [rad/s]

g) Esfuerzo por torsión

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad 2.7)$$

Donde

T: torque aplicado [$N \cdot m$]

r: radio [m]

J: momento polar de inercia [m^4]

h) Momento polar de inercia para eje sólido

$$J = \frac{\pi \cdot d_{eje}^4}{32} \quad 2.8)$$

i) Flexión por carga normal

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M \cdot c}{I} \quad 2.9)$$

Donde

M: momento flector máximo [$N \cdot m$]

c: distancia desde el eje neutro hasta la fibra más externa [m]

I: inercia de la viga [m^4]

j) Esfuerzo cortante por carga de tensión

$$\tau_{xy} = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} \quad 2.10)$$

Donde

V: fuerza cortante máxima [N]

Q: distancia desde el eje neutro hasta la fibra más externa [m]

I: inercia de la viga [m^4]

b: ancho de la viga [m]

Si la viga es rectangular, con ancho b y profundidad h, tal como indica la figura.

Figura 2.6

Ilustración de secciones y cotas de una viga rectangular



Suponiendo que $dA = b \cdot dy$ y $c = \frac{h}{2}$, es posible escribir

$$Q = \int_{y_1}^c y * dA = b * \int_{y_1}^c y * dy = \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - y_1^2 \right)$$

En consecuencia, reemplazando Q en la ecuación 2.10 tenemos la nueva ecuación.

$$\tau_{xy} = \frac{V}{2 \cdot I} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) \quad \mathbf{2.11)}$$

k) Factor de seguridad

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad \mathbf{2.12)}$$

Donde:

S_y : Esfuerzo de cedencia del material [Pa]

σ' : Esfuerzo de Von Mises [Pa]

l) Caudal del transportador

Para esta aplicación utilizamos otra definición de caudal, en la cual está involucrado tanto el flujo masico como la densidad, por lo cual tenemos la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times P \times N \quad \mathbf{2.13)}$$

Donde:

Q : Caudal $\left[\frac{m^3}{min} \right]$

N : Revoluciones por minuto [RPM]

P : Paso [m]

D : Diámetro [m]

m) Velocidad del transportador helicoidal

Con estos valores procedimos a encontrar las revoluciones necesarias de nuestro transportador con la siguiente formula:

$$v = \frac{p \cdot n}{60} \quad 2.14)$$

Donde:

v: velocidad lineal [m/s]

p: paso del tornillo [m]

N: velocidad de rotación del sinfín [RPM]

n) Eficiencia hidráulica

Para considerar los efectos de la fricción debido a la densidad y viscosidad se procedió a calcular una eficiencia, la cual nos sirvió para corregir el valor real de revoluciones que vamos a tener.

$$n_{hidraulica} = 1 - C_f \quad 2.15)$$

Donde:

$n_{hidraulica}$: Eficiencia hidraulica

o) Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que indica el régimen de flujo (laminar o turbulento) en fluidos según velocidad y viscosidad.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad 2.16)$$

ρ : Densidad [Kg/m³]

v : Velocidad [m/s]

D : Diámetro [m]

μ : Viscosidad dinámica [Pa*s]

p) Fricción para flujos laminares

La ecuación de la fricción para flujos laminar nos ayudo a calcular las perdidas dentro del sistema y hallar así el coeficiente de fricción, esta dada por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{64}{Re} \quad 2.17)$$

q) Coeficiente de fricción

Calculada la fricción se procede a calcular el coeficiente de fricción que es una relación entre las perdidas por fricción y la carga total del sistema, se la expresa con la siguiente ecuación:

$$C_f = \frac{h_f}{H_{total}} \quad 2.18)$$

Donde:

C_f : Coeficiente de perdidas por fricción

h_f : Ecuación de Darcy-Weisbach [m]

H_{total} : Carga total [m]

r) Perdidas por fricción

Para calcular las pérdidas de fricción utilizamos la siguiente ecuación considerando así solo la sección de tubería donde hay espirales en el eje, esta representada por la siguiente ecuación:

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad \mathbf{2.19)}$$

Donde:

L: Longitud de las hélices

v: Velocidad del fluido [m/s]

g: Gravedad [$\frac{m}{s^2}$]

s) Cargas totales

La carga total nos sirvió para poder calcular el coeficiente de fricción, se expresa con la siguiente ecuación:

$$H_{total} = \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \quad \mathbf{2.20)}$$

Donde:

z_1 : Altura

t) Potencia para mover el transportador vacío

Para poder calcular la potencia mecánica que se requiere para el correcto funcionamiento del tornillo sinfin, se debe calcular las necesidades de potencia de cada tipo, que se detallan a continuación y luego sumarlas.

$$Hpf[hp] = \frac{LNFdfb}{1000000} \quad \mathbf{2.21)}$$

Donde:

Hpf : Potencia de accionamiento del tornillo en vacío.

N : Velocidad de rotación [RPM]

L : Longitud de las hélices.

F_D : Factor del diámetro del transportador

f_b : = Factor del buje para colgante

u) Potencia para mover el material

La potencia en el caso de que el tornillo sinfín este inclinado, en donde H es la altura a la cual se inclina el tornillo, en nuestro caso al ser inclinado se detalla la siguiente acotación en la formula.

$$Hpm[hp] = \frac{CLWF_f f_m}{1000000} \quad (2.22)$$

Donde:

C : Capacidad [ft³/H]

W : Densidad [pounds/ft³]

F_f : Factor del helicoidal

f_m : Factor del material

v) Potencia total del transportador

La potencia resultante será la suma de las dos potencias anteriores, siendo así que nos da la siguiente expresión.

$$HP_{total} = \frac{(Hp_f + Hp_m) \times f_o}{e} \quad 2.23)$$

Donde:

f_o : Factor de sobrecarga

e : eficiencia de la transmisión

w) Espesor hélices del transportador

Para poder definir el espesor mínimo de las hélices del transportador se procedió a calcular la carga, la cual fue obtenido con la siguiente formula:

$$q = \rho \times g \times A \quad 2.24)$$

Donde:

q : Carga $\left[\frac{N}{m}\right]$

ρ : Densidad $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

g : Gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$$t = \sqrt{\frac{(FS \times D \times q)}{\sigma}} \quad 2.25)$$

Donde:

t = Espesor de las hélices del transportador

D: Diámetro del helicoidal

FS: Factor de seguridad

σ : Límite de elasticidad [Pa]

2.12 Esfuerzos combinados: círculo de Mohr (2 D)

El círculo de Mohr es una herramienta utilizada tanto en ingeniería mecánica como en ingeniería en materiales, ya que permite identificar de manera visual valores relevantes de los esfuerzos en un material en un punto específico.

En la actualidad, existen diversos softwares que permiten el cálculo de este círculo, pero a continuación se detallan las ecuaciones generales para determinar estos valores.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad 2.26)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad 2.27)$$

$$\tau_1 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad 2.28)$$

$$\tau_2 = -\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad 2.29)$$

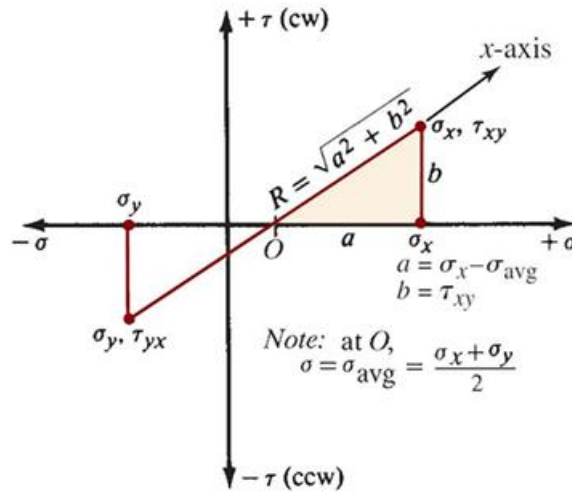
Además de estos valores, también existen puntos de interés en el plano, tales como el esfuerzo promedio, el cual representa el centro del círculo de Mohr.

$$\sigma_{prom} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad 2.30)$$

Cuando se unen las coordenadas (σ_x, τ_{xy}) y (σ_y, τ_{yx}) a través de una línea recta se forma un triángulo, teniendo como vértices σ_{prom} , σ_x y τ_{xy} , tal como lo ilustra la figura.

Figura 2.7

Representación geometría de las coordenadas de interés en el círculo de Mohr



Siguiendo el Teorema de Pitágoras, se halló la hipotenusa que, a su vez, es el radio del círculo $R = \sqrt{a^2 + b^2}$, donde se tiene los lados $a = \sigma_x - \sigma_{prom}$ y $b = \tau_{xy}$.

Asimismo, se tiene la siguiente ecuación para determinar el ángulo.

$$\theta_p = \frac{1}{2} * \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad 2.31)$$

Finalmente, para hallar los esfuerzos principales, tenemos las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_1 = \sigma_{prom} + R \quad 2.32)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{prom} - R \quad 2.33)$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = R \quad 2.34)$$

2.13 Teoría del esfuerzo cortante máximo

Para materiales dúctiles, es decir, aquellos que sufren deformaciones antes de su fractura, se tiene varias teorías aceptadas que permiten el cálculo de estos esfuerzos. Entre las teorías mencionadas tenemos: Esfuerzo cortante máximo, Energía de distorsión y Mohr Coulomb dúctil.

En este caso, nos apoyamos en la teoría de energía de distorsión aplicando la conocida ecuación del Esfuerzo de Von Misses.

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$
$$\sigma' = [\sigma_1^2 - \sigma_1 * \sigma_2 + \sigma_2^2]^{1/2} \quad \text{2.35)}$$

2.14 Análisis de malla

El método de elementos finitos es una técnica muy conocida usada principalmente para el análisis de sólidos, esta consiste en dividir toda la superficie del cuerpo u objeto de interés en un número determinado de elementos, los cuales están interconectados a través de uniones o puntos llamados nodos. Estos, a través del uso de ecuaciones diferenciales parciales, proveen la información necesaria para predecir el comportamiento del bajo ciertas condiciones iniciales (fuerzas, torques).

Tal como se revisó en matemática superior, mientras se disponga de un mayor número de ecuaciones o, en este caso, de elementos y nodos, mayor será la aproximación de los resultados. Conociendo eso, es de interés saber cómo se debe mejorar la malla para alcanzar valores más precisos.

Inventor ofrece dentro de sus herramientas el análisis de tensión, este provee de un mallado por defecto, el cual se adapta grosso modo al objeto por analizar. Esta malla si bien

puede muy buenas aproximaciones en primera instancia, no siempre cumple con esto, por eso se debe recurrir a técnicas un poco más especializadas para ese fin.

Tabla 2.6

Descripción de configuración de mallas

Herramienta	Descripción
Configuración de malla	Permite modificar parámetros generales relacionados al tamaño de los elementos, pudiendo variar ya sea el tamaño mínimo o el promedio.
Control de malla local	Tal como indica su nombre, permite la modificación de la malla, no en su total, sino a una región en específico. Esta herramienta es usada para juntas, perforaciones y puntos de interés, en donde se desee mayor una mayor precisión en los resultados.
Configuración de convergencia	Permite realizar un determinado número de ejecuciones en donde se refina el mallado general hasta llegar a una diferencia porcentual predeterminada entre la penúltima y última iteración.

Capítulo 3

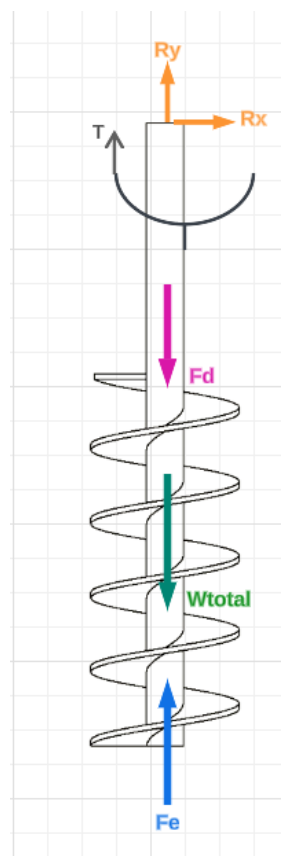
3.1 Resultados y análisis

Se realizó el análisis de fuerzas para los dos principales elementos a diseñar: el transportador helicoidal y la tapa, puesto que el resto de los elementos del sistema ya definidos y disponibles en el mercado tal es el caso de la chumacera, el motorreductor, etc.

Para un adecuado análisis de fuerzas se hace el uso de un diagrama de cuerpo libre para identificar las principales fuerzas en cada elemento, entre las que resaltan las reacciones del rodamiento, la fuerza de arrastre, la fuerza de empuje, el torque transmitido por el motor.

Figura 3.1

Diagrama de cuerpo libre para el transportador helicoidal



Mediante las ecuaciones revisadas en el capítulo 2, se obtuvieron determinaron el valor de las variables desconocidas (ver apéndice A).

Tabla 3.1

Variables de interés para el cálculo de fuerzas del transportador helicoidal

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Volumen desplazado	V_D	0,00019	m^3
Fuerza de empuje	F_T	2.54	N
Fuerza de arrastre	F_D	0.02	N
Velocidad del chocolate	v	0,065	m/s
Reacción de rodamiento en eje x	R_x	0	N
Reacción de rodamiento en eje y	R_y	22.36	N

De igual manera, se realizó el mismo análisis para la tapa, la cual tendrá la siguiente forma, en donde se observa las reacciones de rodamiento, el peso del motor y la normal.

Figura 3.2

Diagrama de cuerpo libre para la tapa principal

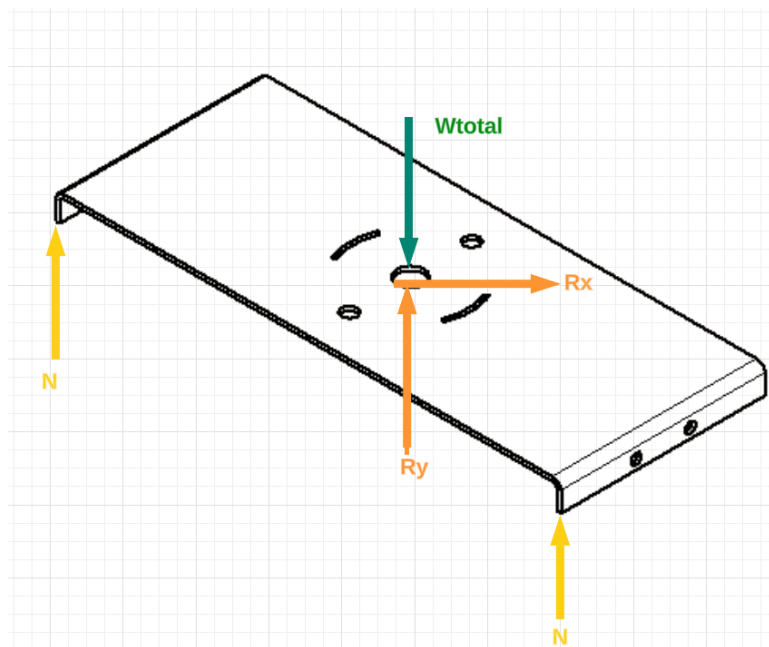
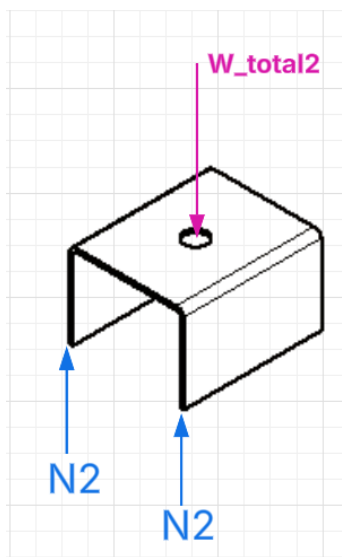


Tabla 3.2*Variables de interés para el cálculo de fuerzas de la tapa principal*

Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Normal de tapa	N	192.96	N
Peso total 1	W_total1	366.54	N

Figura 3.3*Diagrama de cuerpo libre para el soporte superior***Tabla 3.3***Variables de interés para el cálculo de fuerzas del soporte superior*

Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Normal de soporte	N2	172.59	N
Peso total 2	W_total2	345.17	N

Los principales esfuerzos que existen son el esfuerzo por torsión en el tornillo helicoidal y la flexión en la tapa. El esfuerzo por deformación está dado por el torque es transmitido por el motor. Asumiendo un sistema ideal y considerando que las pérdidas por generación de calor y

fricción son menospreciables, la potencia del motor debe ser exactamente igual a la potencia del tornillo helicoidal.

Tabla 3.4

VARIABLES DE INTERÉS PARA EL CÁLCULO DE ESFUERZOS EN TORNILLO HELICOIDAL

Variable	Símbolo	Descripción	Valor	Unidades
Potencia motor	P_m	Dado por el fabricante	0.250	HP
Velocidad motor	ω_m	Dado por el fabricante	1800	RPM
Torque motor	T_m	Dado por el fabricante	0.99	N*m
Potencia transportador helicoidal	P_s	Asumiendo sistema ideal	0.250	HP
Velocidad angular transportador helicoidal	P_s	Dado por el fabricante	117	RPM
Torque transmitido	T_{sc}	Definición	15.22	N*m
Radio eje tornillo helicoidal	r_{sc}	Dado por diseñadores	0.010	m
Momento polar de inercia	J	Dado por Inventor	15707.96	mm^4
Esfuerzo por torsión	τ_{sc}	τ_{sc} Ecuación 2.7	9.69	MPa

La flexión, por su parte, está dada por todas las cargas que se asientan sobre la tapa, siendo las más relevantes el peso del motor reductor y el peso de la tapa misma. Para asegurar que esta carga no ocasione un desplazamiento no deseado, fue necesario un análisis de deformación.

Para términos prácticos y tomando las siguientes asunciones:

1. Material homogéneo a lo largo de su cuerpo.

2. Reposa de manera horizontal.
3. Apoyado sobre soportes.
4. Soporta cargas axiales.

Cumpliendo esas asunciones, se realizó un análisis de momento cortante a través de las funciones de singularidad para determinar el máximo momento, valor requerido en la ecuación para hallar la deformación por flexión.

Siendo así, se tendrá una carga puntual, la cual es el compendio o suma de todas las demás cargas, básicamente los pesos, de cada de uno de los elementos superiores. Para la tapa principal, el peso total es igual a 363.56 [N], pero esta no es la carga resultante, pues la resultante es 388.9 [N] (Apéndice A). Esta carga se ubicará en el centro de la viga, siendo este su centro de gravedad. Los apoyos de esta tapa, los cuales está en los dos extremos serán considerados como soportes fijos, porque estarán emperrados a la tolva, reduciendo sus grados de libertad tanto en el eje x y z.

Tabla 3.5

Variables de interés para el cálculo de esfuerzos de la tapa principal

Variable de tapa	Símbolo	Descripción	Valor	Unidades
Peso total 1	P_{total1}	Suma del peso de todos los elementos	363.56	N
Momento cortante máximo	M_{tapa}	Obtenido por Skyciv	36	N*m
Fibra externa	c	Tomada desde el eje neutro de la plancha	1.5	mm
Inercia de tapa	I_{tapa}	Obtenida por Inventor	7743644.97	mm^4
Esfuerzo normal por flexión	σ_{tapa}	Ecuación 2.9	6973.46	Pa

Fuerza cortante máxima	V_{tapa}	Obtenido por Skyciv	195	N
Grosor de la plancha	H	Dado por diseñadores	3	mm
Esfuerzo cortante por flexion	τ_{tapa}	Ecuación 2.11	28.33	Pa

Mismo análisis fue realizado para el soporte superior, siendo este un elemento que cumple también con las condiciones anteriormente mencionadas. En este caso, se usará la misma placa del mismo material con el mismo grosor (3 mm).

Tabla 3.6

Variables de interés para el cálculo de esfuerzos del soporte superior

Variable del soporte	Símbolo	Descripción	Valor	Unidades
Peso total 2	P_{total2}	Suma del peso de todos los elementos, excepto chumacera y tapa principal.	345.17	N
Momento cortante máximo	$M_{soporte}$	Obtenido por Skyciv	36	N*m
Inercia de tapa	$I_{soporte}$	Obtenida por Inventor	1700335.67	mm^4
Esfuerzo normal por flexion	$\sigma_{soporte}$	Ecuación 2.9	7939.61	Pa
Fuerza cortante máxima	$V_{soporte}$	Obtenido por Skyciv	172	N
Esfuerzo cortante por flexion	$\tau_{soporte}$	Ecuación 2.11	113.80	Pa

En ambos casos, se observó que la deflexión generó dos tipos de esfuerzos: normal y cortante. En ese caso, para determinar de manera correcta el factor de seguridad, no se requieren los esfuerzos aplicados, sino los esfuerzos principales.

Con la ayuda del círculo de Mohr (Apéndice A) se obtuvo el valor de los esfuerzos principales, esto fue también corroborado a través de las ecuaciones dadas en el Capítulo 2.

Tabla 3.7

Variables de interés para el cálculo del esfuerzo de Von Mises

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Esfuerzo principal primario tapa	σ_1	6973.58	Pa
Esfuerzo principal secundario tapa	σ_2	-0.11	Pa
Esfuerzo de Von Mises tapa	σ'_{tapa}	24.31	MPa
Esfuerzo principal primario soporte	σ_3	7941.24	Pa
Esfuerzo principal secundario soporte	σ_4	-1.63	Pa
Esfuerzo de Von Mises soporte	$\sigma'_{soporte}$	31.54	MPa

Una vez obtenido este esfuerzo, se procedió al cálculo del factor de seguridad para elemento, siendo este un parámetro determinante al momento de diseñar cualquier objeto y asegurar que este no falle bajo determinadas fuerzas.

Tabla 3.8

Factores de seguridad para cada elemento

Factor de seguridad	Valor
Tornillo helicoidal	25.80

Tapa principal	10.28
Soporte superior	7.92

Finalmente, en los tres elementos, el factor de seguridad no solamente es mayor a uno, sino que también es un valor considerablemente alto, ofreciendo la seguridad que, bajo las cargas establecidas, la tapa no presentará mayor deformación que desencadene en algún fallo del material o, peor aún, convertirse en fuente de peligro para el operario.

3.2 Dimensionamiento

Siguiendo las dimensiones de la tolva (ver anexos), se seleccionó las dimensiones de los elementos: tornillo helicoidal, tubo; para todos estos elementos se escogió el acero inoxidable 304 como su material. Para el tubo se seleccionó uno con un diámetro nominal de 3” y con cédula de 10.

Tabla 3.9

Variables de interés geometría de tornillo helicoidal y tubo

Variable	Valor
Diámetro Externo [m]	0.0889
Diámetro Interno [m]	0.0828
Área de relleno [m²]	0.0016
Paso [m]	0.0414
Velocidad [m/s]	0.0659
Revoluciones [RPM]	117
Potencia [hp]	0.088
Torque [Nm]	6.88

3.3 Selección de motor y sistema de transmisión

Se optó por un motor eléctrico trifásico a 220 V con una potencia muy baja, de tal forma que provea la suficiente para romper la inercia del sistema, pero sin que este llegue a ser sobredimensionado para el sistema.

En todo caso, se contempló el uso de un reductor para alcanzar los 117 RPM que será la velocidad angular del tornillo helicoidal seleccionada para este diseño.

3.4 Simulación y análisis de malla

Para la simulación, usamos el mismo software CAD en donde fueron diseñados los elementos en este caso, Inventor. Este es uno de los programas más aceptados dentro del campo ingenieril, además permite no solo el diseño, sino también la simulación a través del método de elementos finitos. En este caso, por la poca complejidad de los diseños, este software nos sirvió para realizar el análisis de tensión.

Para una mejor aproximación, nos apoyamos en tres criterios para un adecuado refinado de malla, los cuales repasamos en el capítulo 2, de esta forma a través de este método de convergencia se notó la variación de las aproximaciones del esfuerzo, según cada iteración.

Tabla 3.10

Análisis de malla de los elementos diseñados

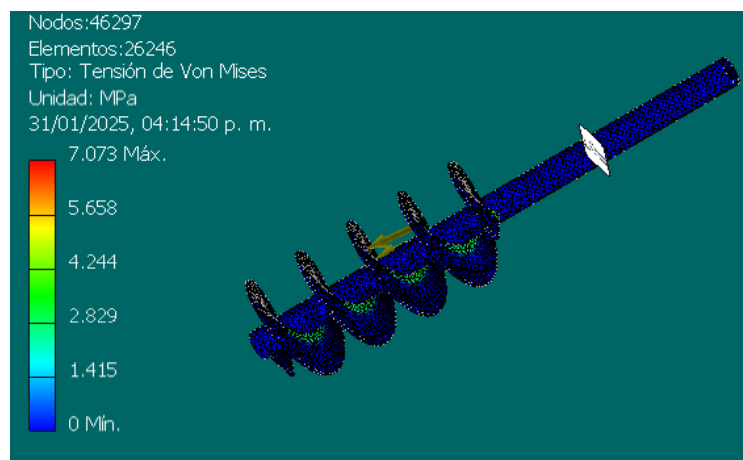
Elemento	Tamaño medio	Número de nodos	Convergencia	Esfuerzo máximo [Mpa]
	0.1	4824	10.51%	114.4
Tapa	0.05	10043	10.53%	117.1

	0.025	31503	6.59%	115
Hélices	0.1	2698	85.74%	5.82
	0.05	5296	76.01%	3.62
	0.025	13985	41.72%	5.12
	0.0125	46297	22.01%	7.07
Soporte	0.1	6849	7.71%	57.7
superior	0.5	20525	1.28%	57.41
	0.025	116723	0.848%	56.22

Para realizar el análisis de malla fuimos reduciendo el tamaño medio de elemento por cada simulación se disminuyó a la mitad cada vez haciendo la malla más pequeña, con este proceso logramos una malla mejor definida la cual nos da valores de esfuerzos más cercanos a los reales, este proceso depende de la capacidad computacional, siendo así que por pieza se refino la malla un máximo de cuatro veces hasta obtener un resultado aceptable, según la convergencia teniendo un porcentaje de menos el 12%.

Figura 3.4

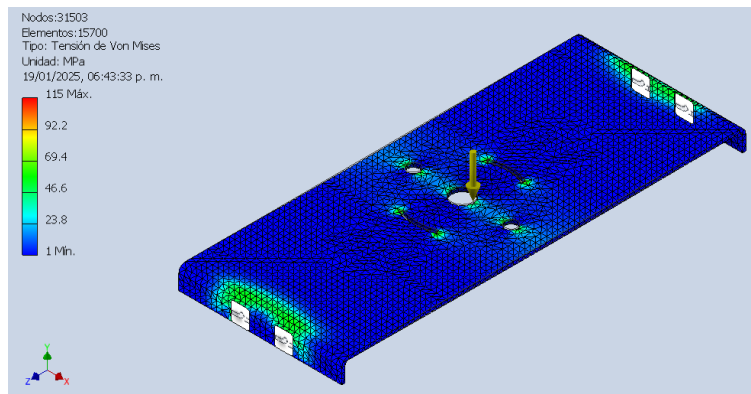
Análisis de tensión proporcionado por el software Inventor



Siendo el material escogido para el eje acero inoxidable 304, con un límite elástico de 250 Mpa, los esfuerzos simulando el peso máximo de material que transporta el helicoidal, tenemos como un máximo de esfuerzo en la unión del eje con las hélices de 7.07Mpa, lo cual nos indica que el material va a soportar el peso del producto y el trabajo a realizar.

Figura 3.5

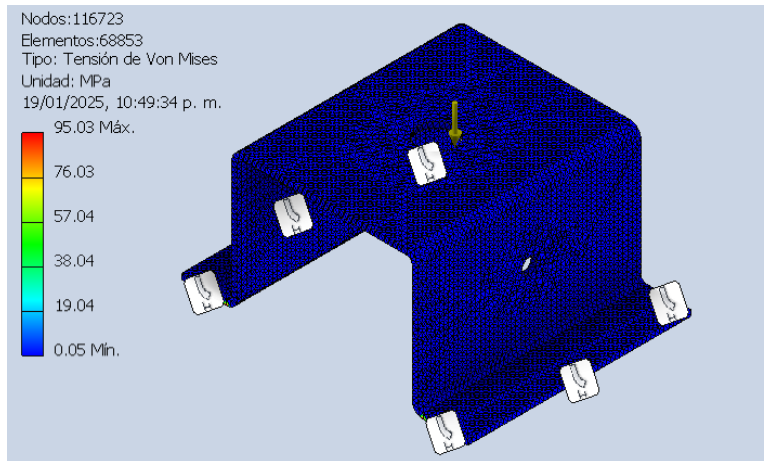
Análisis de tensión proporcionado por el software Inventor



Para la tapa soporte se simuló el peso del motor el cual va a dar la acción de rotación al eje a lo largo del transportador, como restricciones los orificios donde irá empuñada la pieza, siendo que tenemos un esfuerzo máximo de 115Mpa, lo cual nos indica que la pieza va a resistir y no tiene un desplazamiento muy elevado.

Figura 3.6

Análisis de tensión proporcionado por el software Inventor



Para el soporte superior el cual va a brindar un mantenimiento más fácil del equipo, se simula el peso del motor de la parte superior, además de la gravedad, esta pieza en principio ira soldada sobre la tapa, de igual forma está fabricada con acero inoxidable 304 y nos dio un esfuerzo por debajo de su límite elástico, por lo cual lo hace ideal para la función de soportar el peso del motor y tener fácil acceso a retirar el eje y poder cambiar la chumacera cuando sea necesario.

Simulación de fluidos

Tabla 3.11

Tabla de velocidad del chocolate a 100 RPM utilizando el software de SolidWorks

Tipo de chocolate	Velocidad [m/s]
Amargo	0.04-0.08
Sucedáneo	0.047-0.094
Blanco	0.047-0.094

Debido a que el cálculo de la velocidad en todos los casos fue realizado para tener un caudal siempre constante en todos los casos, los rangos a los cuales se tiene la velocidad del

fluido son semejantes, la velocidad aproximada realizando los cálculos debería ser 0.069 m/s por lo cual podemos ver que en los tres casos están dentro del rango aceptable siendo en el centro del agitador se tiene una velocidad un poco menor con respecto a los laterales, esto se puede explicar debido al gradiente de velocidad en rotación, sin embargo, esto no influye a un caudal promedio de todo el fluido agitado a lo largo del equipo, por otro lado compensa que en los extremos el fluido tenga una velocidad mayor, cumpliendo así con el objetivo de trasladar el fluido.

Figura 3.7

Simulación de fluido del chocolate amargo a 100 RPM

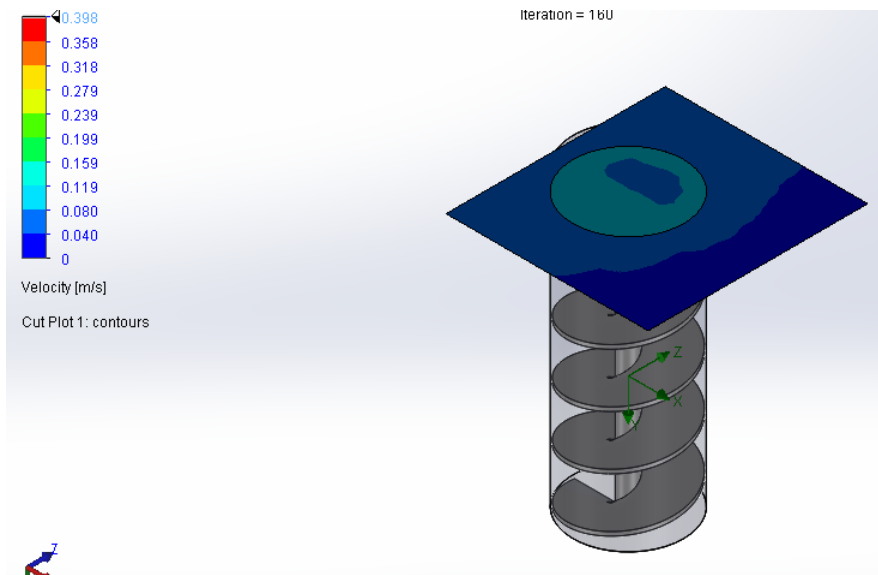


Figura 3.8

Simulación de fluido del chocolate sucedáneo A 100 RPM

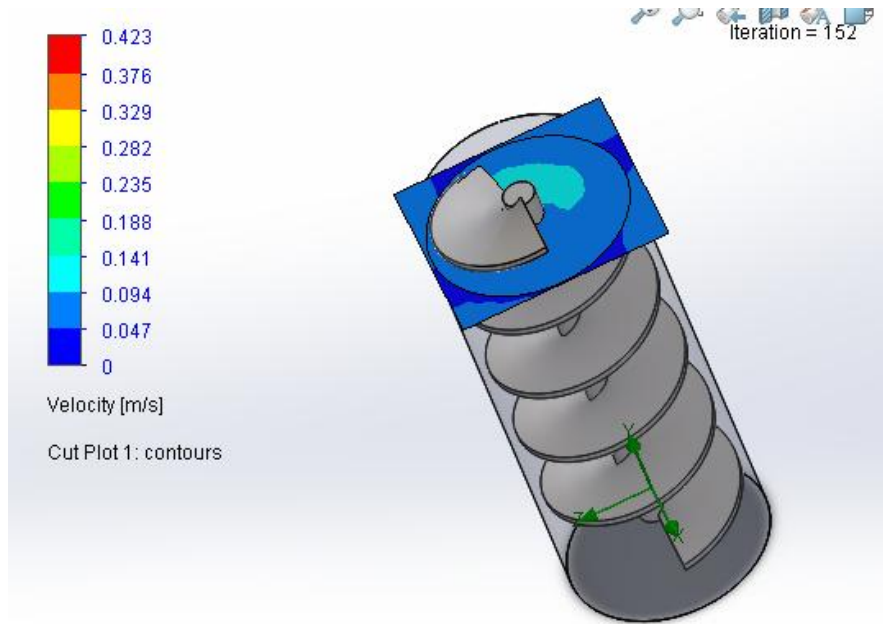
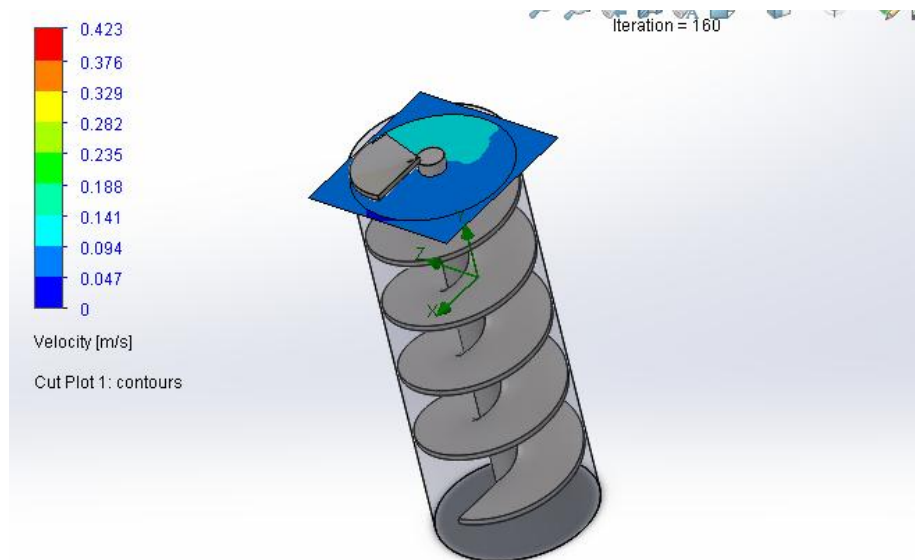


Figura 3.9

Simulación de fluido del chocolate blanco a 100RPM



3.5 Presupuesto

Tabla 3.12

Costos de materiales [Elaboración propia]

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Total
Tubo inox. 304 sanitario 3" x 1.5 mm	1	\$113.06	\$113.06
Material A/Inox Mate 304 PVC 2B 3.0 mm	1	\$75.00	\$75.00
Motorreductor 0.25 hp 100RPM	1	\$357.65	\$323.73
Pernos Inoxidables M6	4	\$ 1.25	\$5.00
Arandela Inoxidables	8	\$0.40	\$3.20
Tuerca Inoxidables	4	\$0.80	\$3.20
Total			\$677.11

Tabla 3.13

Costo de fabricación

Descripción	Cantidad	Costo unitario	Total
Soldador TIG por día	2	\$80.00	\$160.00
Servicio de corte laser	1	\$65.00	\$65.00
Total			\$225.00

Para la realización del diseño se contó con un presupuesto máximo de \$1200 dólares, considerando que la estructura principal de la tolva no va a ser elaborada, la mayor inversión sería el juego de motor y reductor, el cual se lo consiguió localmente con las especificaciones que cumplieran con el mínimo establecido por los cálculos realizados, tanto en torque como en revoluciones, por otro lado los materiales en chapa metálica aunque los distribuidores solamente

venden la plancha completa, también hay talleres que ofrecen el servicio por piezas, cobrando por separado el material con la mano de obra, incluyendo el corte y el doblado para las piezas que se necesitan de estas operaciones, aunque dentro de la empresa se tiene un soldador TIG, también se lo incluye como mano de obra tomando referencias de varios técnicos que se dedican a esta labor, tomando en consideración también el espesor de la plancha, debido a que una plancha más fina requiere de un soldador con más habilidad.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones

De acuerdo con la simulación, el producto es transportado desde abajo hacia arriba, permitiendo su recirculación dentro de los parámetros de operación adecuados (velocidad y temperatura).

Las fuerzas existentes no generan deformaciones considerables en los elementos principales del sistema de agitación, por ende, las dimensiones seleccionadas dentro del diseño son las correctas.

Muchas de las ecuaciones tomadas en consideración fueron son a partir de asunciones en dos dimensiones, sin embargo, softwares mucho más especializados trabajan en las tres dimensiones, razón por la cual pueden existir divergencia entre ciertos valores.

Al ser dentro de la industria alimenticia, los materiales se limitan a aquellos que cumplan con características sanitarias, en tal caso, el acero inoxidable AISI 304 es una excelente elección, sin embargo, dentro de sus desventajas está su alto valor comercial y, además, para las cargas existentes este material resulta muy resistente, lo cual se ve reflejado en el excesivo valor de factor de seguridad.

Se logro realizar un diseño utilizando métodos de manufactura posibles dentro de la industria local, para facilitar su elaboración, por lo cual se usaron geometrías poco complejas y la cantidad de elementos adicionales es baja.

Se pudo comprobar tanto con teoría y con simulaciones que es un método que no solo sirve para un tipo de chocolate, sino que puede ser aprovechado para los tres tipos de chocolate que se utilizan dentro de los procesos de la planta.

4.2 Recomendaciones

Para futuras aplicaciones, se recomienda el reemplazo de la tolva por una que cumpla con un diseño higiénico, de tal forma que sea mucho más fácil no solo la dosificación, sino también la implementación de otro tipo de agitadores.

Es posible la optimización de material y, en consecuencia, costos de elaboración si se contempla la selección de otros materiales sanitarios, tales como acetal y, además, que ofrezcan una resistencia menor que el acero inoxidable para reducir el factor de seguridad que se encontró.

Para poder aprovechar completamente el equipo se podría añadir un variador de frecuencia al motor, para así poder ajustar los RPM en caso de que en un futuro se decida utilizar un fluido diferente fuera de las aplicaciones que hemos descrito.

Para salvaguardar la inocuidad del producto que se va a utilizar se en las uniones soldadas tanto de la tapa base, las hélices del tornillo y el tubo, para lo cual el cordón de soldadura va a tener que ser pulidas para evitar porosidades en las juntas y así no haya riesgo de que existan estancamiento de producto difícil de limpiar

Referencias

Equipo editorial, Etecé. (2021, 5 agosto).

Cacao Concepto, origen, historia y propiedades. Concepto. <https://concepto.de/cacao/>

Cacao: principales productores por valor a nivel mundial en 2022

Statista. (2024, 24 abril). Statista. <https://es.statista.com/estadisticas/636071/cacao-principales-productores-del-mundo-por-valor/>

Abril, L. (2023b, septiembre 13). La industria del chocolate mueve 114 millones de dólares anuales en Ecuador.

Teleamazonas. <https://www.teleamazonas.com/industria-chocolate-mueve-millones-anuales-ecuador/>

Saltos, M. M. (2024, 8 septiembre).

El cacao sube la vara y espera romper la barrera de los US\$ 3.000 millones en exportaciones. Forbes Ecuador. <https://www.forbes.com.ec/negocios/el-cacao-sube-vara-espera-romper-barrera-us-3000-millones-exportaciones-n59016>

Proceso del cacao. (s. f.).

Historia del chocolate. <https://amoralchocolate.weebly.com/proceso-del-cacao.html>

Alberto. (2021, April 29).

Agitadores industriales: qué son, qué tipos existen y cuál es su propósito. Masterlogística. <https://www.masterlogistica.es/agitadores-industriales-que-son-que-tipos-existen-y-cual-es-su-proposito/>

Coolvi. (2024, 19 febrero).

Tipos de marmitas: la guía necesaria para elegir la tuya. Coolvi. https://www.coolvi.es/tipos-de-marmitas/?srsltid=AfmBOorPqTz8jgBt_i9Aq8ohfOwcWqqaCkZd76oJ-BIj9aUUf4Pa7LqM

Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2001).

Concepts and Applications of Finite Element Analysis. John Wiley & Sons.

Afoakwa, E. O. (2010).

Chocolate Science and Technology. Wiley-Blackwell.

Beckett, S. T. (2009).

Industrial Chocolate Manufacture and Use (4th ed.). Wiley-Blackwell.

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2001).

Unit Operations of Chemical Engineering (7th ed.). McGraw-Hill.

General, P. (s/f). MANEJO DE MATERIALES. Martinsprocket.com. Recuperado el 11 de febrero de 2025, de

https://es.martinsprocket.com/docs/catalogs/material%20handling/1_manejo%20de%20material%20es/seccion%20h.pdf

EHEDG. (2004).

Criterios para el diseño higiénico de equipos. European Hygienic Engineering & Design Group.

Apéndice A

A.1 Análisis de fuerzas

Usando la ecuación 2.1 y los datos del peso que nos proporciona Inventor por cada material se determinó el peso, en Newton, de cada uno.

Tabla A.1

Elementos del diseño con sus características físicas

Elemento	Peso [kg]	Fuerza [N]
Motorreductor	30	294.30
Tornillo helicoidal (incluido el peso del chocolate)	2.54	24.88
Tapa principal	1.42	13.97
Soporte superior	1.11	10.89
Chumacera	0.45	4.41
Tubo	1.54	15.11

Para el diagrama de cuerpo libre del tornillo helicoidal tenemos las siguientes fuerzas:

a) Fuerza de empuje

Reemplazando los valores conocidos en la ecuación 2.3, se conoce que el volumen desplazado es igual $1.9 \cdot 10^{-4} [m^3]$.

$$F_T = 1300 \cdot 9.81 \cdot 1.9 \cdot 10^{-4}$$

$$F_T = 2.54[N]$$

b) Fuerza de arrastre

Reemplazando la ecuación 2.4 en 2.3

$$F_D = \left(\frac{2 * \tau}{\rho * v^2} \right) * \frac{\rho * v^2 * A}{2}$$

Reduciendo la ecuación, tenemos

$$F_D = \tau * A$$

Se conoce que es para el chocolate con leche es, en promedio, 2.95 Pa (dato experimental), mientras que el área proyectada será la de un círculo.

$$F_D = \tau * \pi * r_{\text{tornillo}}^2$$

$$F_D = 2.95 * \pi * (0.0404)^2$$

$$F_D = 0.02 \text{ [N]}$$

c) **Peso total**

Este no es más que la suma del peso del tornillo helicoidal y del chocolate que se espera que fluya por él, siendo igual a 24.88 N.

Ya con todos estos valores, se determinan las fuerzas desconocidas, que corresponden a las reacciones del rodamiento.

Para el eje x:

$$\sum F_x = 0$$

$$R_x = 0$$

Para el eje y:

$$\sum F_y = 0$$

$$F_T - W_{\text{total}} - F_D + R_y = 0$$

$$R_y = -F_T + W_{total} + F_D$$

$$R_y = -2.54 + 24.88 + 0.02$$

$$R_y = 22.36 [N]$$

Finalmente, la fuerza resultante en el eje y es igual a 2.52 [N].

De igual manera, se realizó el análisis de fuerzas con el D.C.L de la tapa principal, siendo las reacciones del rodamiento las variables conocidas, el peso total como la normal ejercida por la tolva fueron las nuevas variables a determinar.

El peso total que es ejercido a este elemento no es más que la suma del peso del soporte superior, de la chumacera y del motorreductor, además, del peso del tornillo helicoidal y del tubo; este valor es igual a 366.54 [N].

Para la normal, se realizó la sumatoria de fuerzas en el eje y:

$$\sum F_y = 0$$

$$2N - W_{total1} - R_y = 0$$

$$N = \frac{W_{total1} + R_y}{2}$$

$$N = \frac{366.54 + 22.36}{2}$$

$$N = 192.96 [N]$$

Finalmente, en el eje y tenemos una fuerza resultante igual a 388.9 [N].

Por último, para el soporte superior se realizó el mismo procedimiento.

$$\sum F_y = 0$$

$$2N_2 - W_{total2} = 0$$

$$N_2 = \frac{W_{total2}}{2} = \frac{345.17}{2}$$

$$N_2 = 172.59 [N]$$

A.2 Análisis de esfuerzos

El tornillo helicoidal, en especial, su eje está expuesto a un esfuerzo como cortante, debido al torque que recibe, para el cálculo de esta variable, despejamos la ecuación 2.7 y reemplazamos los valores conocidos como potencia del motor eléctrico y velocidad angular de salida del reductor.

$$T = \frac{0.25 [hp]}{117 [RPM]} = \frac{186.4 [W]}{12.25 \left[\frac{rad}{s} \right]}$$

$$T = 15.22 [N * m]$$

Usando la ecuación 2.8 se halló el momento polar inercia, J, igual a $1.6 * 10^{-8} [m^4]$, teniendo los valores anteriores es posible determinar el esfuerzo por torsión (ecuación 2.7).

$$\sigma_s = \frac{T * r_{eje}}{J}$$

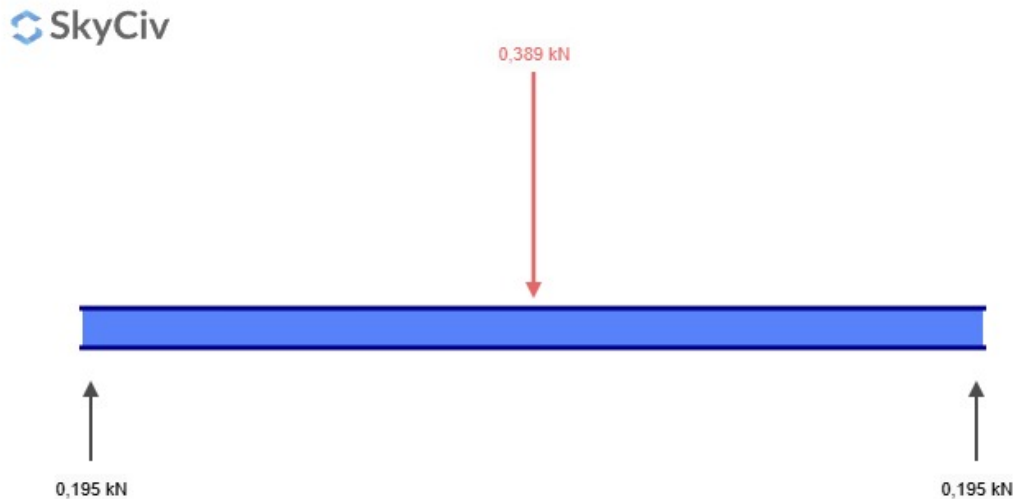
$$\sigma_s = \frac{15.22 * 0.01}{1.6 * 10^{-8}}$$

$$\sigma_s = 9.69 [MPa]$$

Tal como se mencionó en el capítulo tres, se asumieron tanto a la tapa base como soporte superior como vigas. Siendo así, con la ayuda del software Skyciv.com se determinó los diagramas de fuerza cortante y momento flector.

Figura A.1

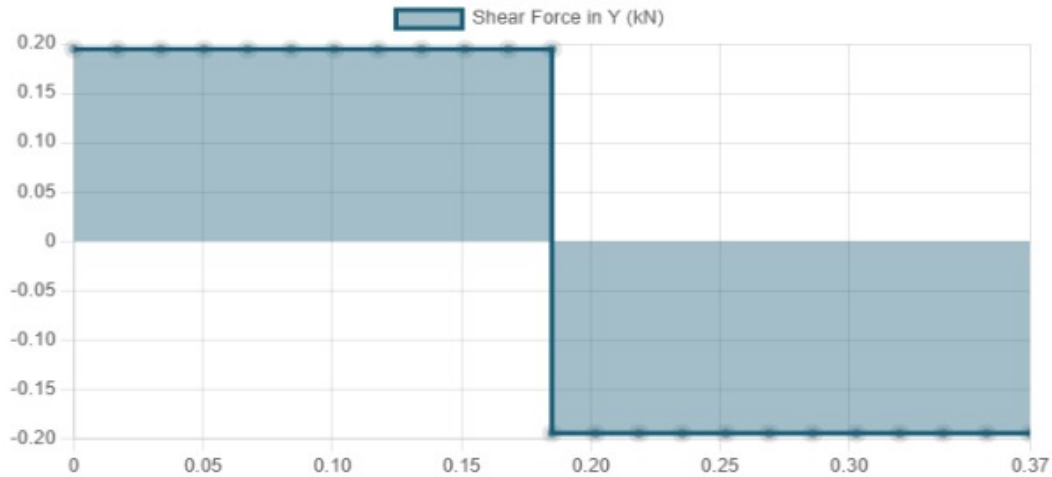
Representación de tapa principal como viga doblemente soportada en sus extremos (provista por Skyciv.com)



Como era de esperarse, las dos fuerzas normales corresponderían a la mitad del peso de la carga total, esto para mantener el equilibrio, corroborado también a través de las ecuaciones de estática.

Figura A.2

Diagrama de longitud versus fuerza cortante para la tapa principal



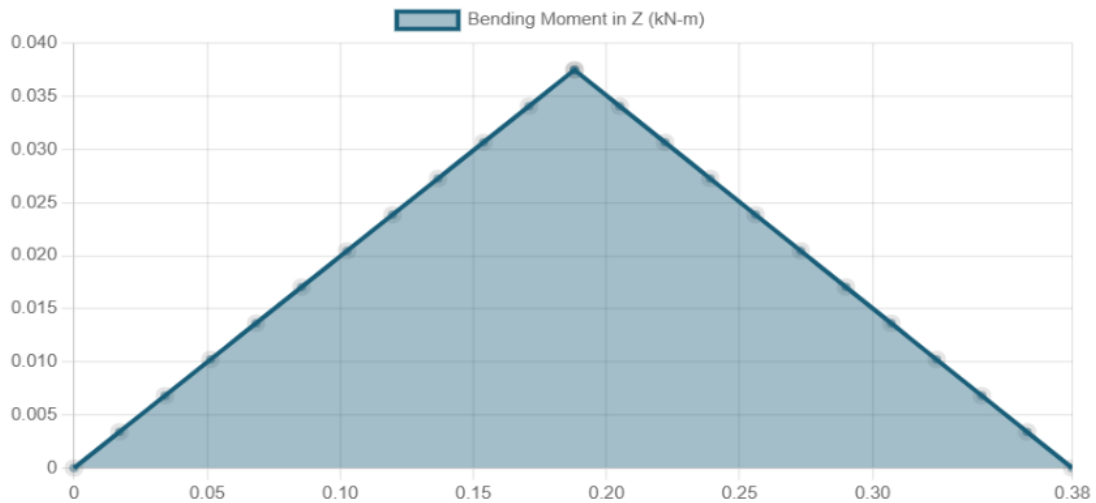
De acuerdo con la gráfica, se tiene una fuerza cortante máximo justamente a la mitad de la viga, siendo sus coordenadas (0.18,0.195), este último valor de la ordenada será el valor usado en la ecuación 2.10

$$\tau_{xy} = \frac{195}{2 * 7.74 * 10^{-6}} \cdot \left(\frac{0.003^2}{4} - 0^2 \right)$$

$$\tau_{xy} = 28.33 [Pa]$$

Figura A.3

Diagrama de longitud versus momento flector para tapa principal



De igual forma, se tiene un momento flector máximo justamente a la mitad de la viga, siendo sus coordenadas (0.18,0.036), este último valor de la ordenada será el valor usado en la ecuación 2.9

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{36 \cdot 0.0015}{7.74 \cdot 10^{-6}}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 6973.46 \text{ [Pa]}$$

Se realiza el mismo análisis para el soporte superior, el cual comparte casi que las mismas cargas que la tapa principal, exceptuando el peso propio de esta última y de la chumacera; siendo entonces la carga aplicada igual a 345.17 N.

Figura A.4

Representación del soporte superior como viga doblemente soportada en sus extremos (provista por Skyciv.com)

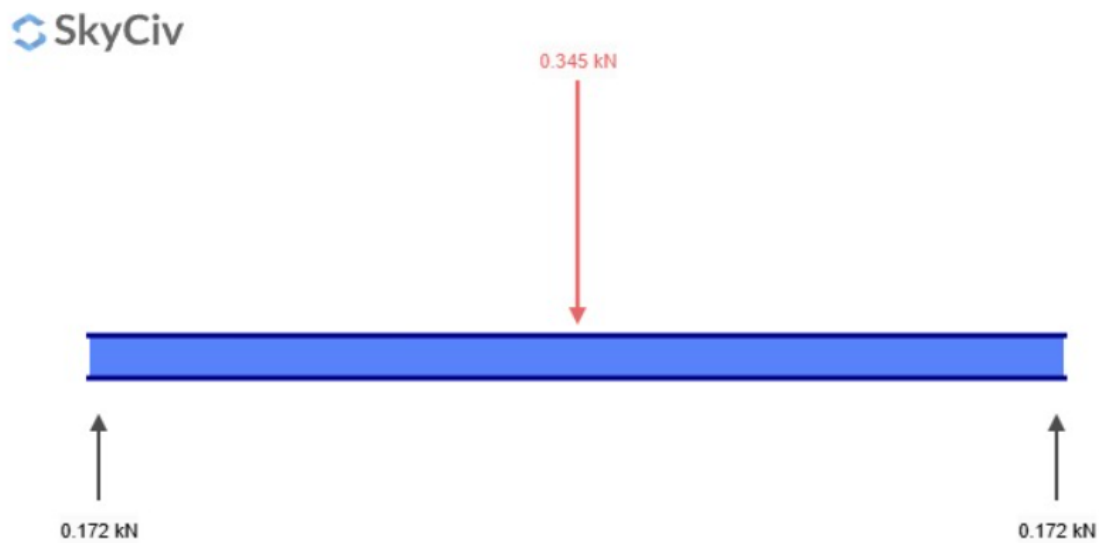
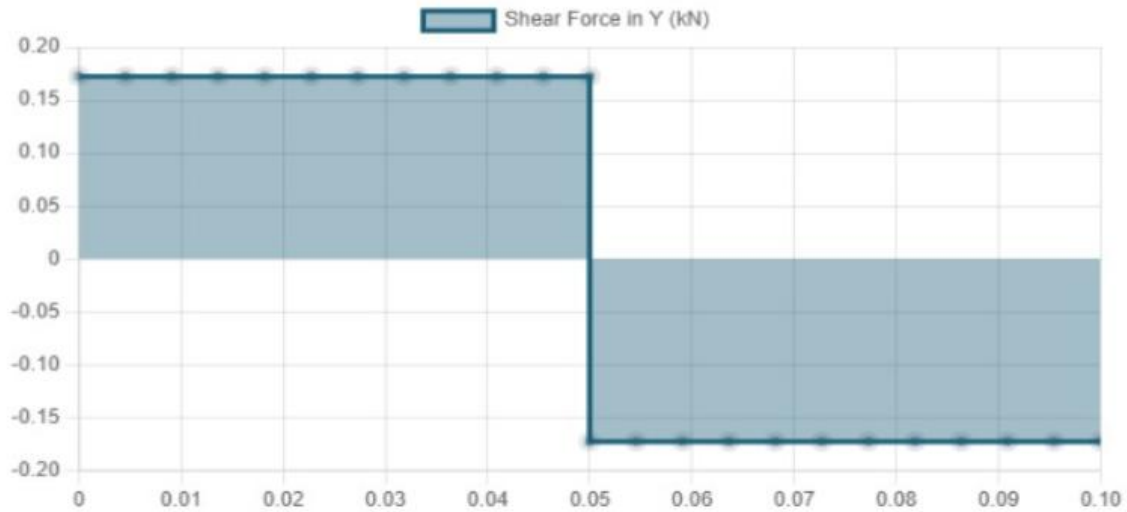


Figura A.5

Diagrama de longitud versus fuerza cortante para el soporte superior (provista por Skyviv.com)



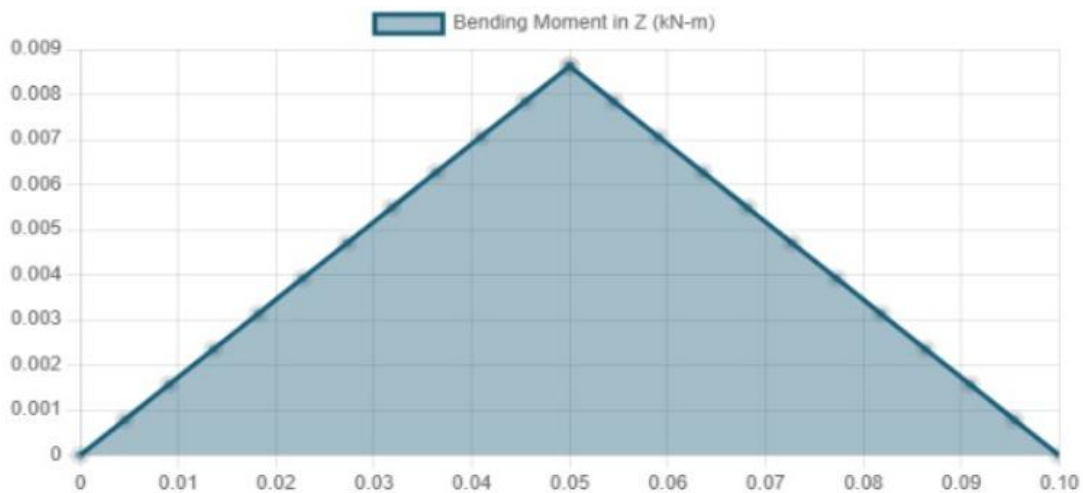
De acuerdo con la gráfica, se tiene una fuerza cortante máximo justamente a la mitad de la viga, siendo sus coordenadas (0.05,0.172), este último valor de la ordenada será el valor usado en la ecuación 2.10

$$\tau_{xy} = \frac{172}{2 \cdot 1.7 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{0.003^2}{4} - 0^2 \right)$$

$$\tau_{xy} = 113.80 [Pa]$$

Figura A.6

Diagrama de longitud versus fuerza cortante para el soporte superior



De acuerdo con la gráfica, se tiene una fuerza cortante máximo justamente a la mitad de la viga, siendo sus coordenadas (0.05,0.009), este último valor de la ordenada será el valor usado en la ecuación 2.9

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{9 \cdot 0.0015}{1.7 * 10^{-6}}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 7939.61 [Pa]$$

Al existir tanto esfuerzos cortantes como esfuerzos normales, se requiere determinar los esfuerzos principales, usando las ecuaciones 2.21 y 2.22.

a) Esfuerzos principales para tapa principal

$$\sigma_1 = \frac{6973.46 + 0}{2} + \sqrt{\left(\frac{6973.46 - 0}{2}\right)^2 + 28.33^2}$$

$$\sigma_1 = 6973.58 [Pa]$$

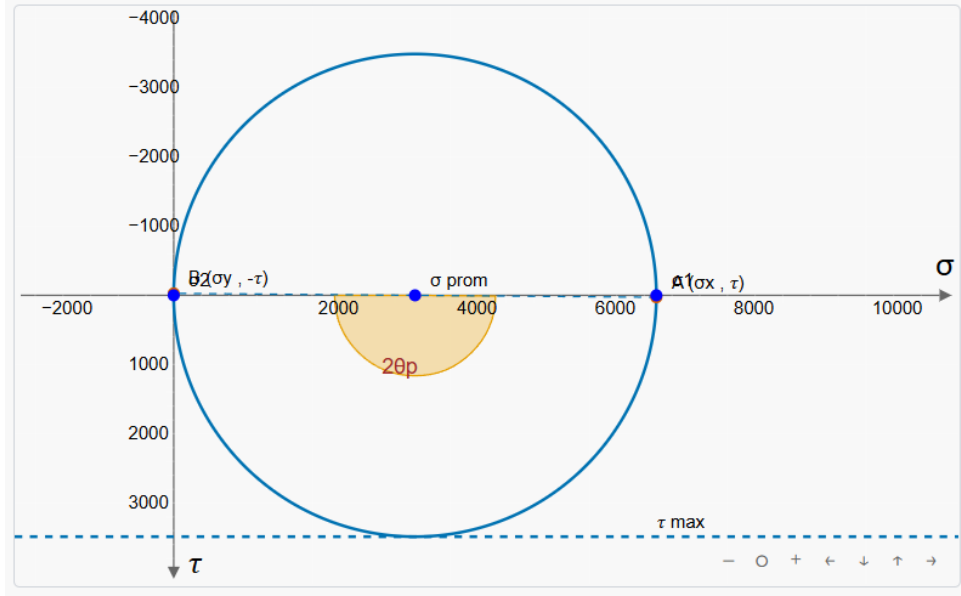
$$\sigma_2 = \frac{6973.46 + 0}{2} - \sqrt{\left(\frac{6973.46 - 0}{2}\right)^2 + 28.33^2}$$

$$\sigma_2 = -0.11 [Pa]$$

De igual forma, a través de la página Ingeniería Elemental podemos visualizar estos efectos.

Figura A.7

Círculo de Mohr para tapa principal. Tomado de www.ingenieriaelemental.com.



b) Esfuerzos principales para soporte superior

$$\sigma_3 = \frac{7939.61 + 0}{2} + \sqrt{\left(\frac{7939.61 - 0}{2}\right)^2 + 113.80^2}$$

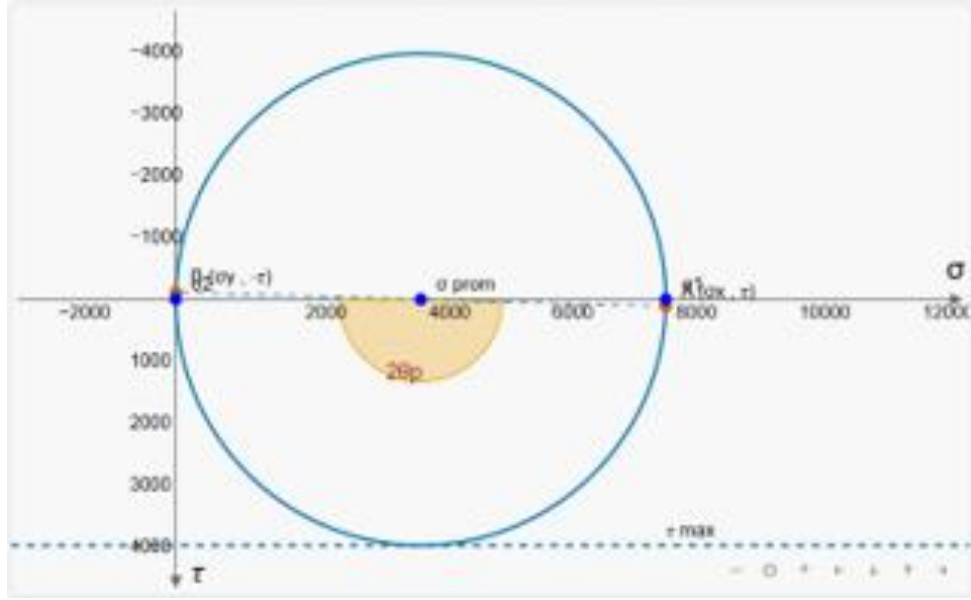
$$\sigma_3 = 7941.24 \text{ [Pa]}$$

$$\sigma_4 = \frac{7939.61 + 0}{2} - \sqrt{\left(\frac{7939.61 - 0}{2}\right)^2 + 113.80^2}$$

$$\sigma_4 = -1.63 \text{ [Pa]}$$

Figura A.8

Círculo de Mohr para el soporte superior. Tomado de www.ingenieriaelemental.com



c) Esfuerzo de Von Mises para tapa principal

$$\sigma'_{tapa} = \sqrt{(6973.58)^2 - (6973.58) * (-0.11) + (-0.11)^2}$$

$$\sigma'_{tapa} = 24.32 [MPa]$$

d) Esfuerzo de Von Mises para soporte superior

$$\sigma'_{soporte} = \sqrt{(7941.24)^2 - (7941.24)(-1.63) + (-1.63)^2}$$

$$\sigma'_{tapa} = 31.54 [MPa]$$

A.3 Cálculo de la velocidad de rotación necesaria

Tomando la ecuación 2.14 que describe el caudal en función del flujo masico y la densidad, podemos igualarlo a la ecuación 2.15 de caudal común en fluidos, de la siguiente manera:

$$\frac{\dot{m}}{\rho} = A \times v$$

Con esta relación podemos partir a una igualdad que de como resultado las revoluciones necesarias para poder mover el chocolate a la velocidad que se necesite, usando la ecuación 2.16, dejamos todo en función a las revoluciones:

$$\frac{\dot{m}}{\rho} = A \times \frac{Pn}{60}$$

$$n = \frac{\dot{m} \times 60}{\rho \times A \times P}$$

Remplazamos los valores en la igualdad obtenemos:

$$n = \frac{0.11[Kg/s] \times 60}{\rho[Kg/m^3] \times (3.84 \times 10^{-3}[m^2]) \times (0.0404[m^2])}$$

$$n = 33.56 \text{ RPM}$$

Este proceso se realizó para los tres tipos de chocolate de los cuales se tiene datos.

A.4 Cálculo del diámetro del eje

Para realizar la estimación del diámetro mínimo necesario del eje, procedimos a utilizar la fórmula que nos proporciona el libro de Diseño de Ingeniería mecánica de Shigley, que describe la siguiente fórmula:

$$D = \left[\frac{32FS}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S'_n}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

FS: Factor de seguridad

K_t : Factor de concentración de esfuerzos

M: Momento flector [Nm]

T: Torque [Nm]

S'_n : Limite de fatiga modificado [Mpa]

S_y : Limite elástico [Mpa]

$$S'_n = S_n \times C_r \times C_s$$

Donde:

S_n : Limite de fatiga

C_r : Factor de confiabilidad

C_s : Factor de forma

$$S'_n = 500[Mpa] \times 0.75 \times 0.75$$

$$S'_n = 281.25 [Mpa]$$

$$S_y = 250 [Mpa]$$

$$K_t = 1.6$$

$$M = 4.11 Nm$$

$$T = 25Nm$$

$$N = 2$$

$$D \approx 1.22 mm$$

A.5 Cálculo de RPM necesarios

Para obtener el valor necesario de velocidad de rotación del tornillo sinfin, se utilizó la fórmula para caudales para transportadores helicoidales, de esta forma obtenemos el valor necesario y procedemos a verificar la velocidad de salida del fluido.

$$Q = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times P \times N$$

Donde:

Q: Caudal [$\frac{m^3}{s}$]

D: Diámetro [m]

P: Paso [m]

N: Revoluciones [RPS]

$$0.02 \left[\frac{m^3}{min} \right] = \frac{\pi}{4} \times (0.0808^2 - 0.02^2) \times 0.0404 \times N$$

$$3.33 \times 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{\pi}{4} \times (0.0808^2 - 0.02^2) \times 0.0404 \times N$$

$$N = 1.71 \text{ RPS}$$

$$N = 102.74 \text{ RPM}$$

Con la velocidad promedio del fluido, podemos comparar los valores obtenidos en la simulación, para corroborar la veracidad de los resultados.

$$v = \frac{p \cdot n}{60}$$

$$v = \frac{0.0404 \times 102.74}{60}$$

$$v = 0.069 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Para obtener resultados más cercanos a la realidad se procedió a calcular un valor de eficiencia hidráulica donde consideramos los valores de densidad y de viscosidad para cada uno de los chocolates de estudio.

$$Q_{\text{corregida}} = Q \times n_{\text{hidraulica}}$$

$n_{hidraulica}$: Eficiencia hidráulica

$$n_{hidraulica} = 1 - C_f$$

El número de Reynolds nos ayudara a conocer a que región pertenece, para así poder calcular la fricción a la cual esta sometido el fluido.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

ρ : Densidad [Kg/m³]

v : Velocidad [m/s]

D : Diámetro [m]

μ : Viscosidad dinámica [Pa*s]

$$Re = \frac{1279 \times 0.069 \times 0.0808}{3.4}$$

$$Re = 2.09$$

Conociendo que es un flujo laminar, podemos aplicar la ecuación de fricción para flujos laminares.

$$f = \frac{64}{Re}$$

$$f = \frac{64}{2.09}$$

$$f = 30.62$$

$$C_f = \frac{h_f}{H_{total}}$$

Donde:

C_f : Coeficiente de pérdidas por fricción

h_f : Ecuación de Darcy-Weisbach [m]

H_{total} : Carga total [m]

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

$$h_f = 30.62 \times \frac{0.2}{0.0808} \times \frac{0.069^2}{2 \times 9.8}$$

$$h_f = 0.018m$$

$$H_{total} = \frac{v_1^2}{2g} + z_1$$

$$H_{total} = \frac{0.069 \left[\frac{m}{s} \right]^2}{2 \times 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right]} + 0.2[m]$$

$$H_{total} = 0.24 [m]$$

$$C_f = \frac{0.018}{0.24}$$

$$C_f = 0.076$$

$$n_{hidraulica} = 1 - 0.076$$

$$n_{hidraulica} = 0.924$$

$$Q_{\text{corregida}} = Q/n_{\text{hidraulica}}$$

$$Q_{\text{corregida}} = 3.33 \times 10^{-4} / 0.924$$

$$\frac{\pi}{4} \times D^2 \times P \times N = 3.70 \times 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$N = 1.90 \text{ RPS}$$

$$N = 114.30 \text{ RPM}$$

$$v = \frac{p \cdot n}{60}$$

$$v = \frac{0.0404 \cdot 114.30}{60}$$

$$v = 0.076 \text{ m/s}$$

Este mismo procedimiento se lo realizo para los otros dos tipos de chocolate, para posteriormente poder compararlo con los valores obtenidos mediante la simulación.

A.6 Cálculo de potencia del motor

Para el calculo de la potencia nos vamos a guiar con la teoría descrita dentro del manual de Martin Sprocket, por lo cual se detallan las siguientes ecuaciones:

$$Hpf[hp] = \frac{LNFDb}{1000000}$$

$$Hpf[hp] = \frac{0.636 \times 114 \times 12 \times 1}{1000000}$$

$$Hpf[hp] = 0.00087 \text{ hp}$$

$$H_{pm}[hp] = \frac{CLWF_f f_m}{1000000}$$

$$H_{pm}[hp] = \frac{42.36 \times 0.636 \times 81.15 \times 1 \times 1.3 \times 1}{1000000}$$

$$H_{pm}[hp] = 0.0284$$

$$HP_{total} = \frac{(H_{pf} + H_{pm}) \times f_o}{e}$$

$$HP_{total} = \frac{(0.00087 + 0.0284) \times 2.5}{0.9}$$

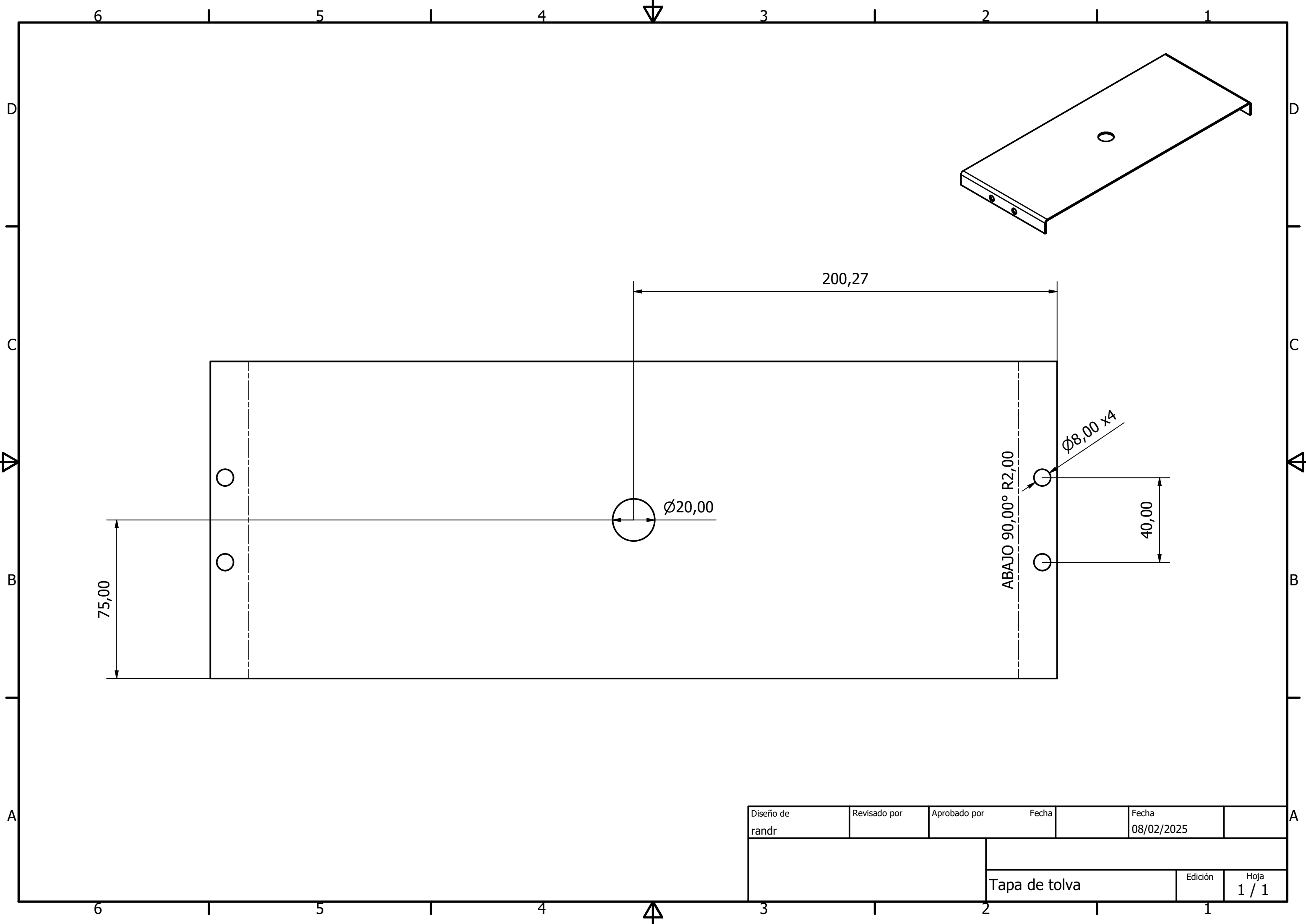
Tabla A.2

Constante utilizadas para el cálculo de potencia según manual de Martins

Variables	Valores
Fd	12
Fb	1
Ff	1
Fm	1.3
Fp	1
Fo	2.5
e	0.9

Apéndice B

Planos de construcción



75,00

Ø20,00

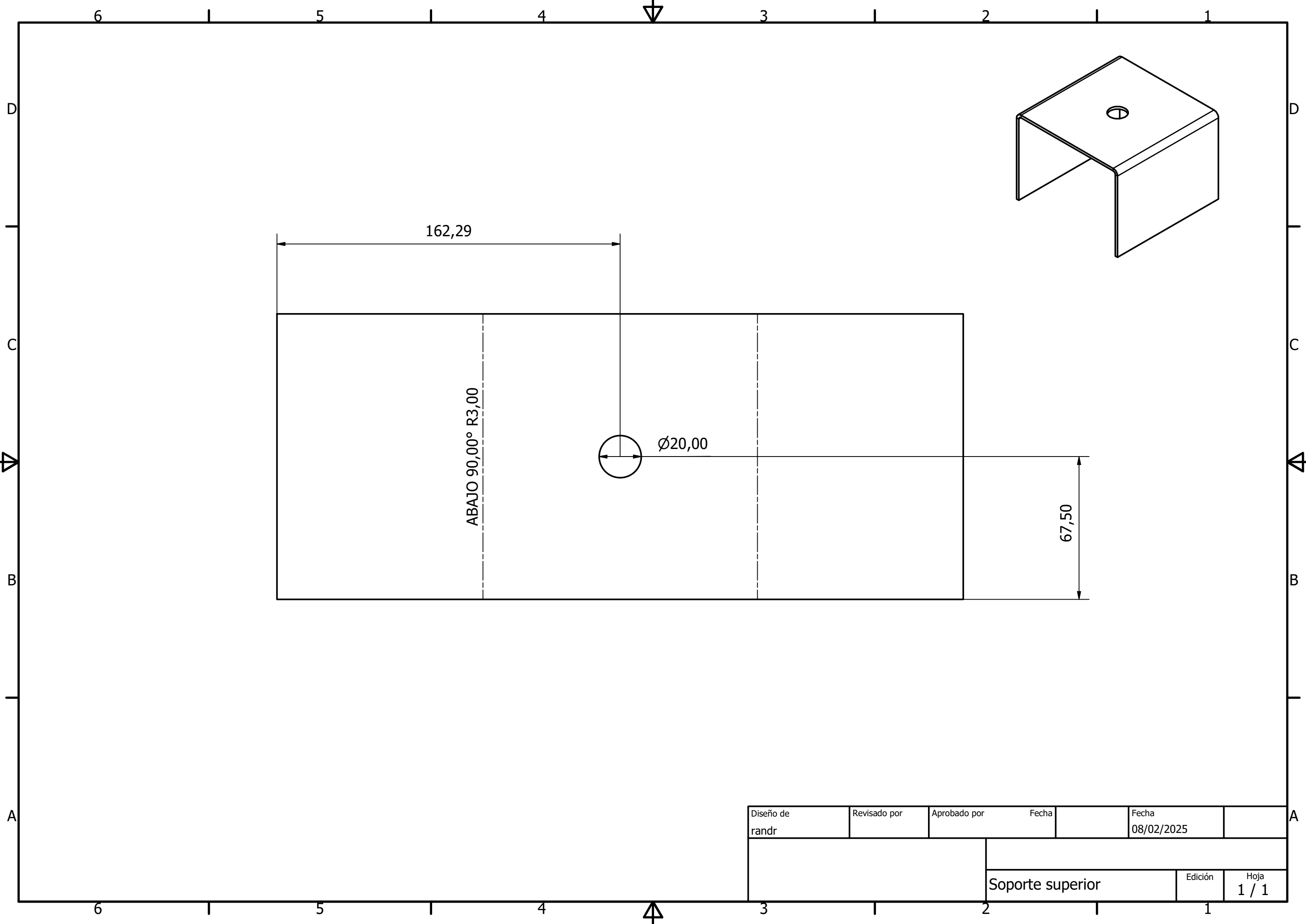
200,27

40,00

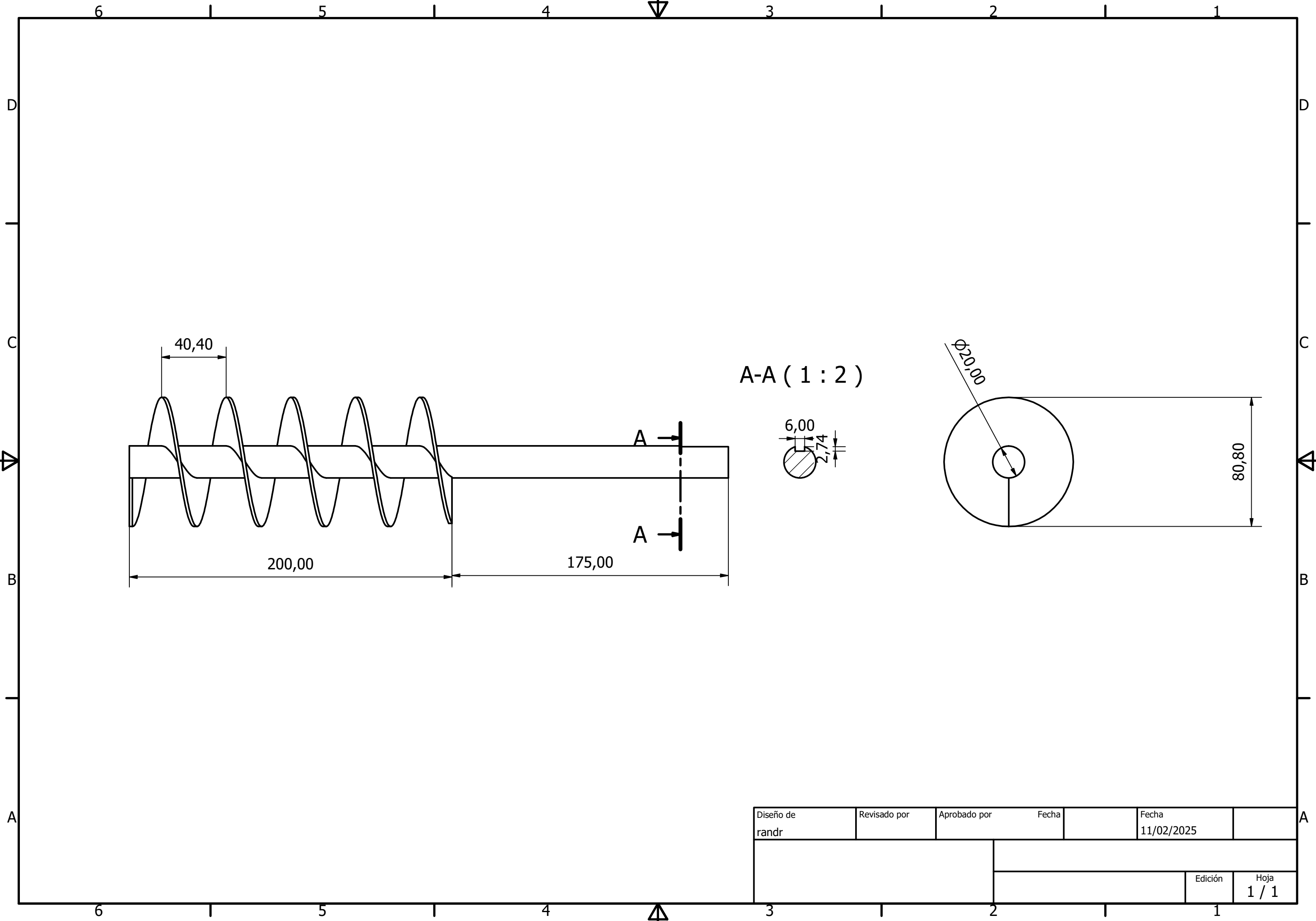
ABAJO 90,00° R2,00

Ø8,00 x4

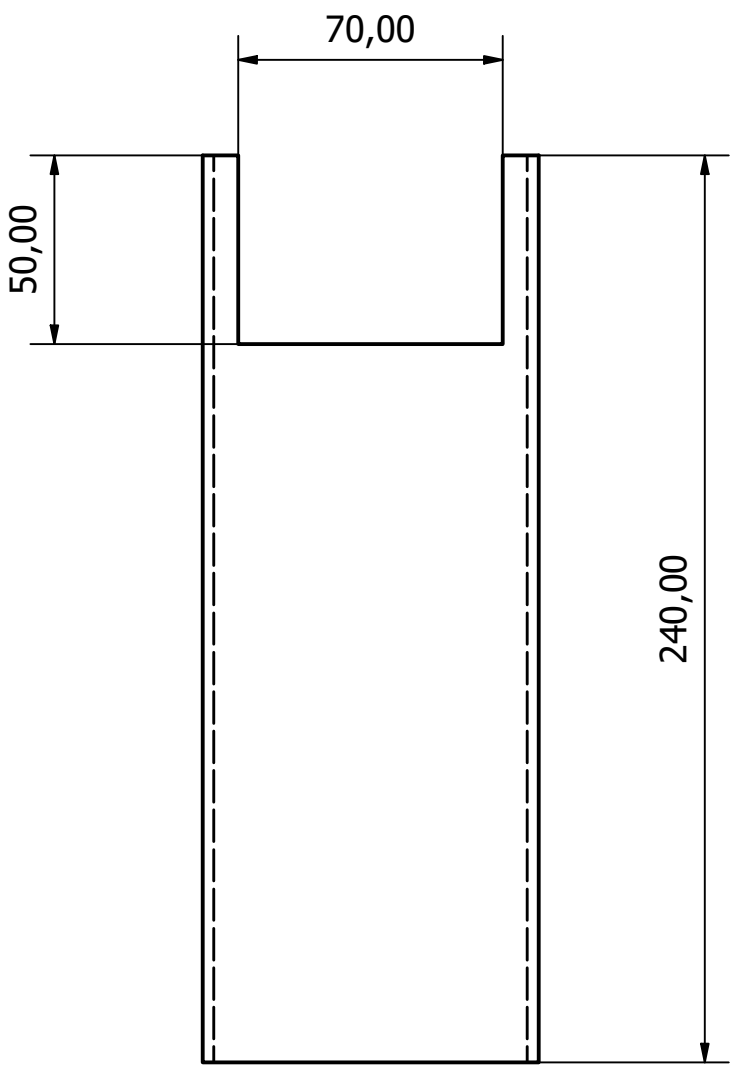
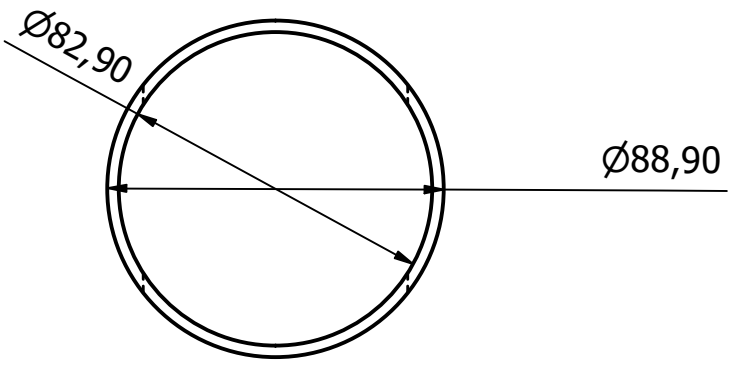
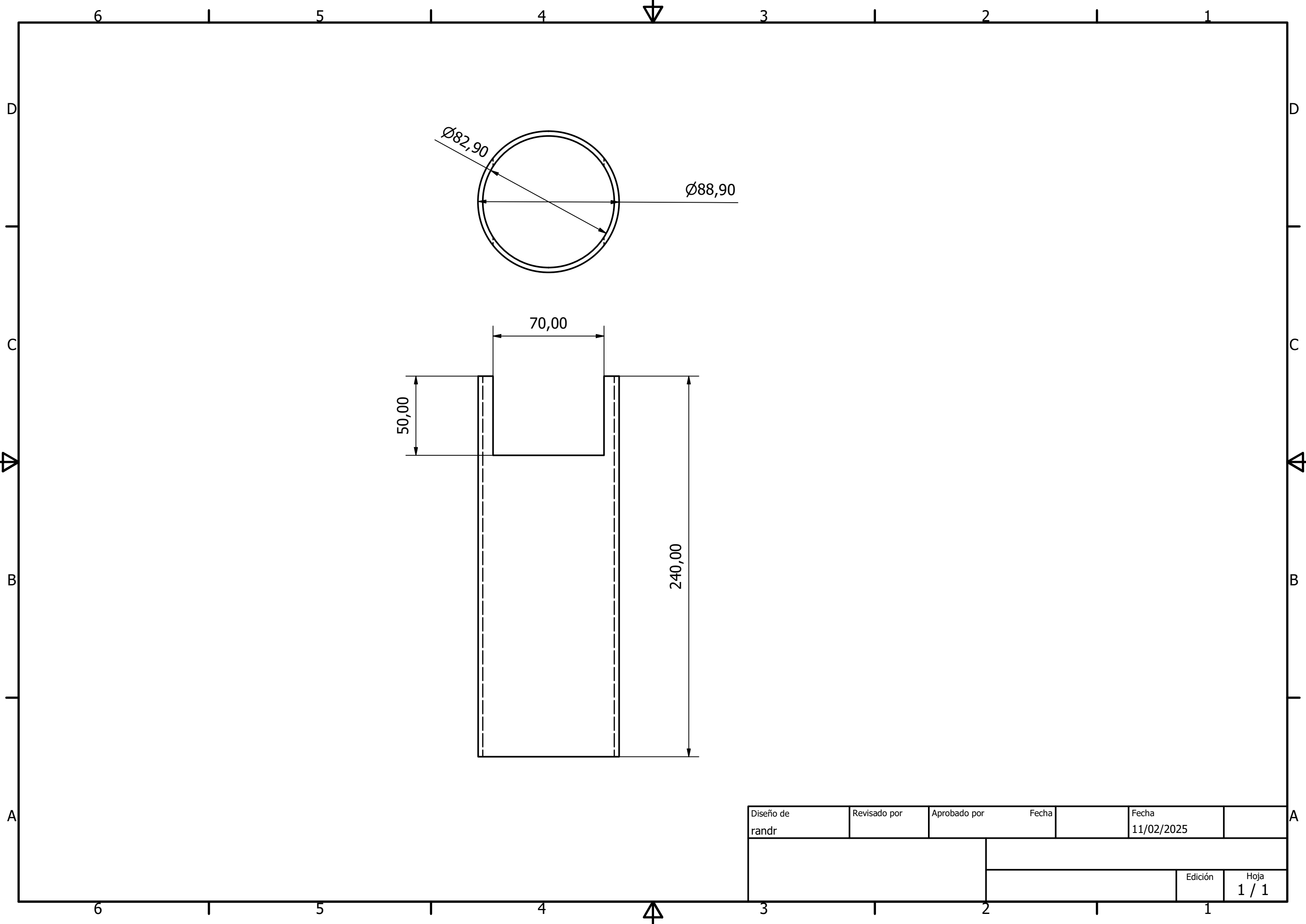
Diseño de randr	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 08/02/2025
Tapa de tolva			Edición	Hoja 1 / 1



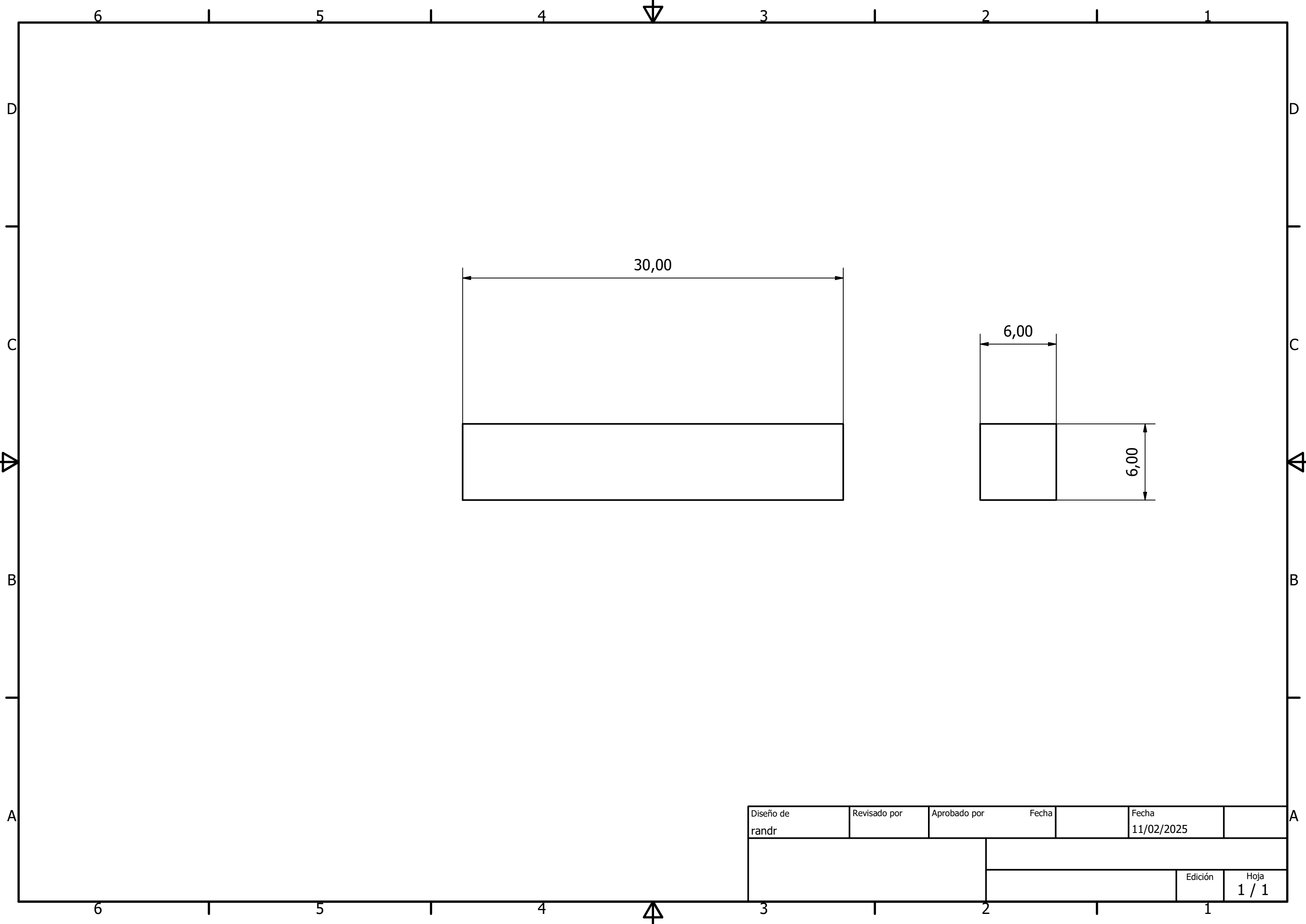
Diseño de randr	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 08/02/2025
			Soporte superior	
			Edición	Hoja 1 / 1



Diseño de randr	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2025	
			Edición	Hoja 1 / 1	



Diseño de randr	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2025
			Edición	Hoja 1 / 1

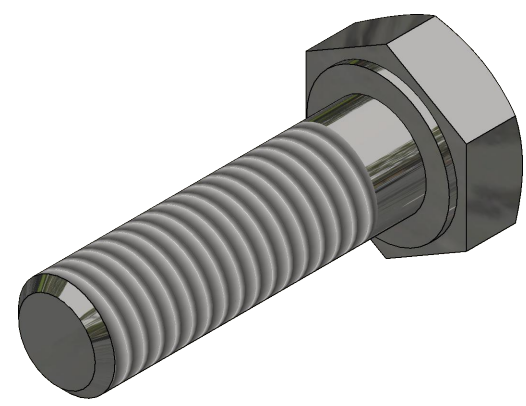


Diseño de randr	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 11/02/2025	
			Edición	Hoja 1 / 1	

6 5 4 3 2 1

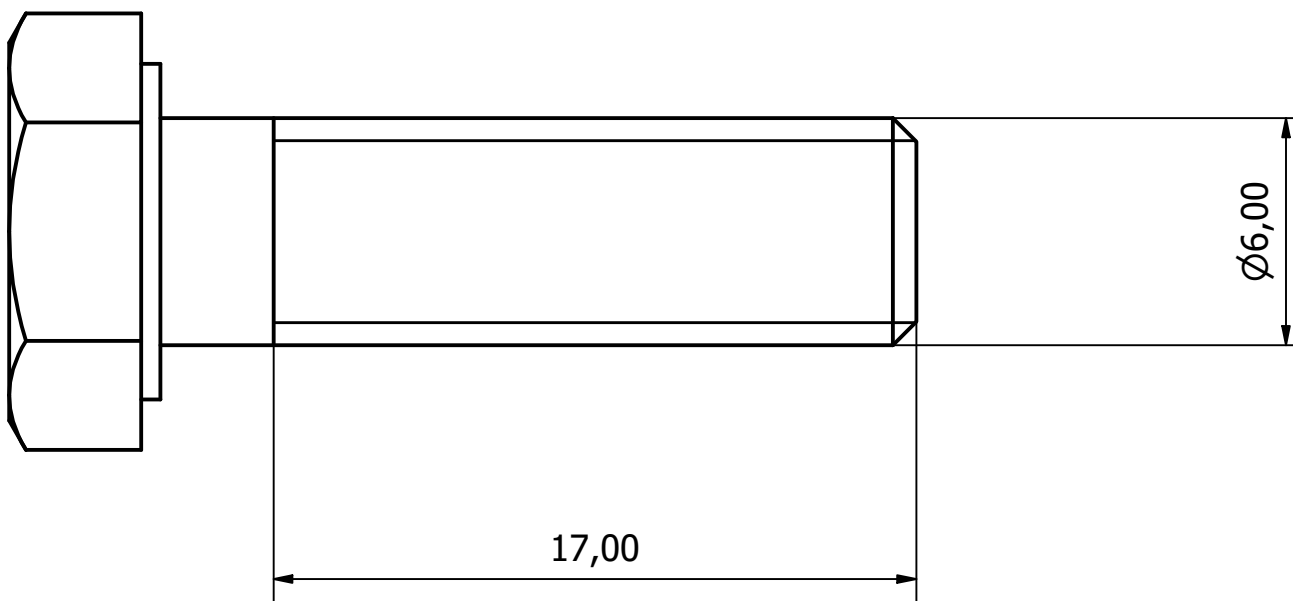
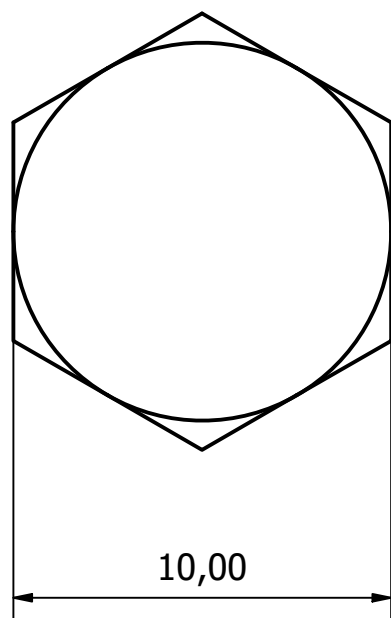
D

D



C

C



B

B

A

A

Diseño de randr	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 18/02/2025
			Edición	Hoja 1 / 1

6 5 4 3 2 1



6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

D

D

C

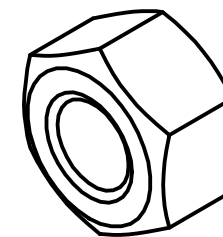
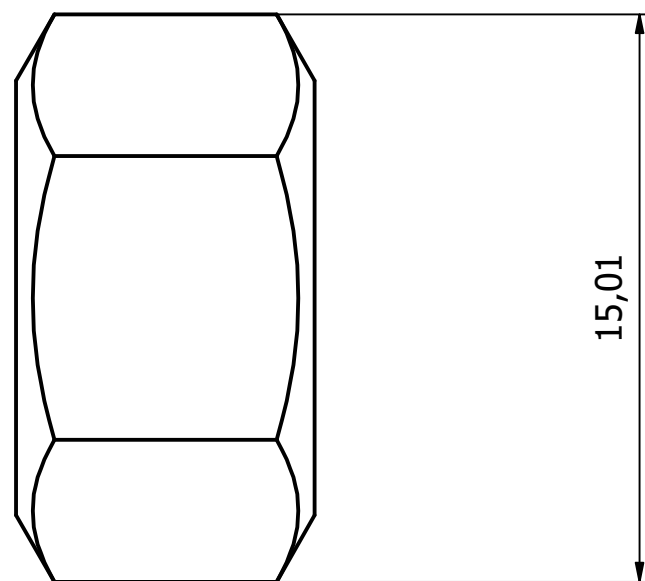
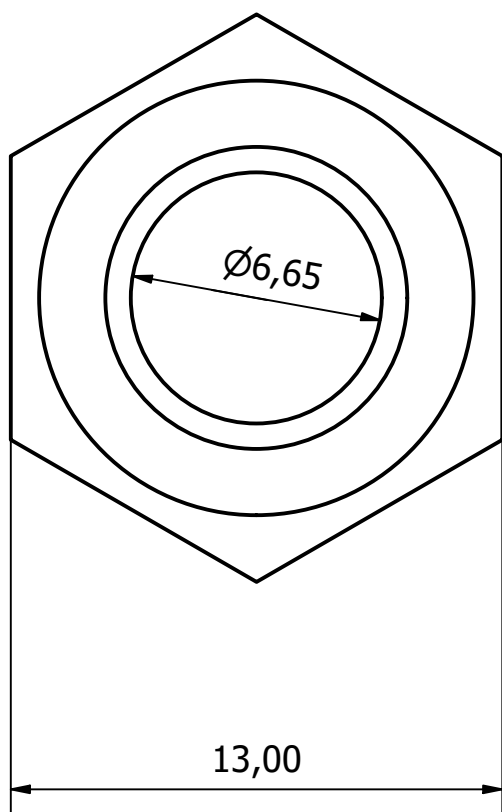
C

B

B

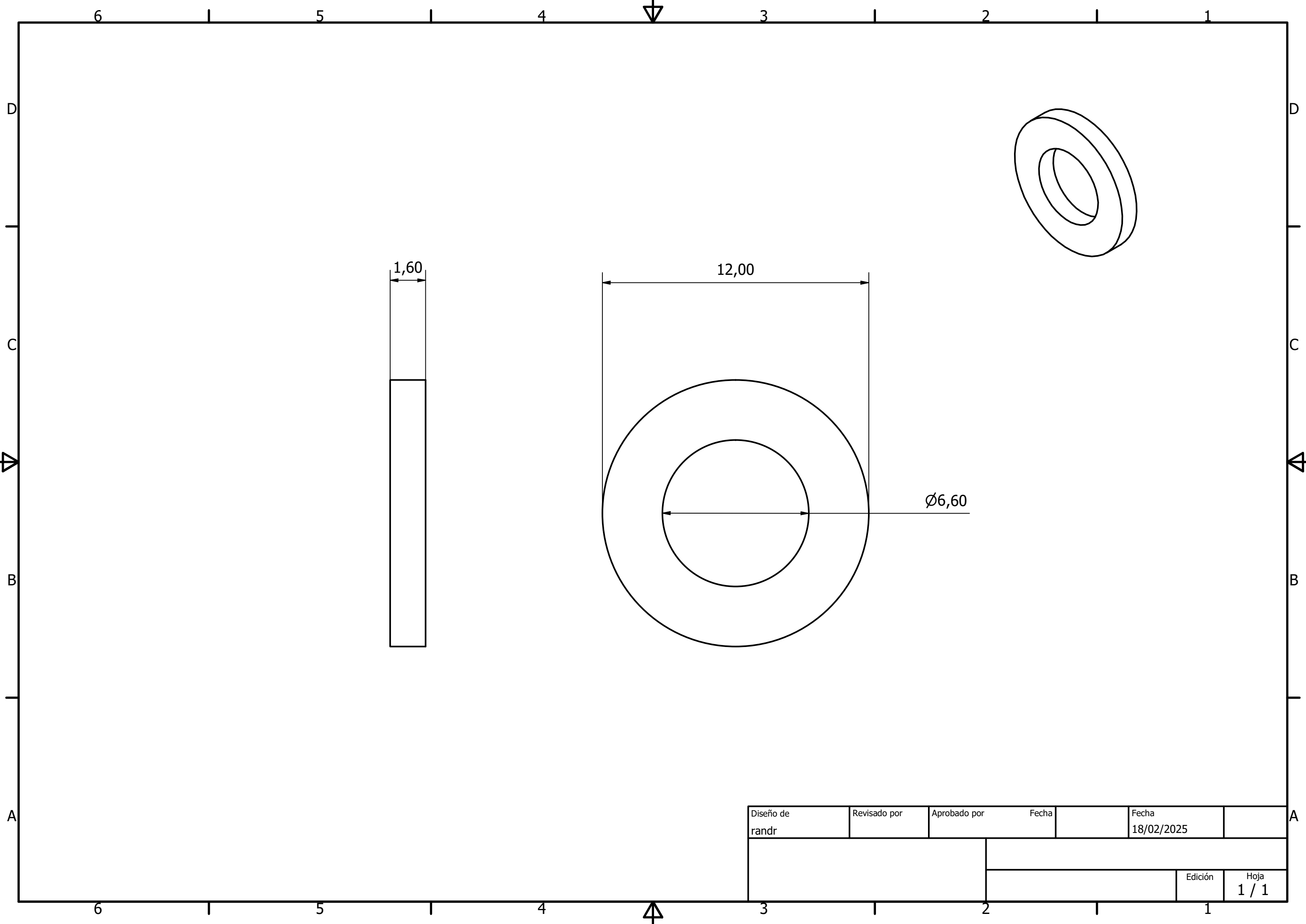
A

A



Diseño de randr	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 18/02/2025
		Edición		
		Hoja 1 / 1		

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1



6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

D

D

C

C

B

B

A

A

1,60

12,00

Ø6,60

Diseño de randr	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 18/02/2025
			Edición	Hoja 1 / 1

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1