

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Construcción de una conchadora de chocolate para productores cacaoteros en la
provincia del Guayas

INGE-2950

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero mecánico

Presentado por:

Benjamín David Guerrero Ulloa

Nicolas Fernando Escandón Zambrano

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi madre, mi padre, mi hermano y mi hermana que fueron fuerza y apoyo incondicional a lo largo de la carrera, a los profesores que se esforzaron en dar una visión más allá de un aula de clase y ver la importancia de cada tema. A mis amigos que fueron parte de mi crecimiento personal y crecimiento profesional. Dedico este esfuerzo a mis abuelos/as, tíos/as, primos/as y sobrino, por ser un ejemplo que seguir a futuras generaciones, fue un trayecto difícil, pero gracias a todo su apoyo se logró concluir.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme vivir, agradezco a mis padres por apoyarme y permitirme ser parte de una prestigiosa universidad en Ecuador, a la ESPOL y todos los profesores que compartieron su valioso tiempo y conocimiento, mi más sincero agradecimiento al Ing. Xavier Ladines y el Dr. Juan Peralta que nos apoyaron y supervisaron a lo largo de todo el desarrollo de este proyecto.

Declaración Expresa

Nosotros Nicolás Fernando Escandón Zambrano y Benjamin David Guerrero Ulloa acordamos y 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, 26 de mayo del 2025.



Nicolas Fernando
Escandon Zambrano



Benjamin David Guerrero
Ulloa

Evaluadores

Miguel Ángel Quilambaqui Jara, PhD

Profesor de Materia

Juan Manuel Peralta Jaramillo, PhD

Tutor de proyecto

Resumen

El proyecto plantea el diseño y construcción de una conchadora de chocolate orientada a pequeños productores cacaoteros del Guayas, quienes enfrentan barreras tecnológicas y económicas para transformar su cacao localmente. Bajo esas consideraciones el cliente mediante entrevista establece una capacidad de procesamiento de 50kg de chocolate en menos de 48 horas como requerimientos. Se empleó una metodología experimental de diseño mecánico propuesto por Budynas y Nisbett, usando los criterios de Von Mises y Goodman modificado para analizar las fallas mecánicas de los elementos, simulaciones estructurales y validación de un prototipo funcional. Se evaluaron tres alternativas tecnológicas mediante una matriz de decisión, seleccionando una conchadora de rodillos de granito por su eficiencia, durabilidad y facilidad de operación. El diseño final incluye elementos fabricados en materiales de grado alimenticio, tanque y ejes en acero inoxidable, además de rodillos de granito de grado alimentario. Las simulaciones confirmaron una deflexión máxima de 3 mm en las bases y los cálculos una vida útil estimada de bandas superior a 28.000. La conchadora desarrollada procesó 50 kg de cacao en 44 horas, con un consumo energético de 36,5 kWh por lote a una temperatura inferior a los 46 grados Celsius. Se concluye que el equipo es técnicamente viable, económicamente rentable con una inversión inicial de \$2.999,83, un costo operativo que depende un 95% del costo de la materia prima de \$586,52 y un retorno de la inversión inicial estimado en 10 semanas planteando un escenario pesimista.

Palabras clave: conchadora, cacao, chocolate, diseño mecánico, materiales de grado alimenticio, normativa técnica, inversión inicial, costo operativo.

Abstract

The project proposes the design and construction of a chocolate concher for small cocoa producers in Guayas, who face technological and economic barriers to processing their cocoa locally. Based on these considerations, the client, through an interview, established a processing capacity of 50 kg of chocolate in less than 48 hours as a requirement. An experimental mechanical design methodology proposed by Budynas and Nisbett was used, using the Von Mises and modified Goodman criteria to analyze the mechanical failures of the elements, structural simulations, and validation of a functional prototype. Three technological alternatives were evaluated using a decision matrix, selecting a granite roller concher for its efficiency, durability, and ease of operation. The final design includes elements manufactured from food-grade materials, stainless steel tank and shafts, and food-grade granite rollers. Simulations confirmed a maximum deflection of 3 mm at the bases, and calculations indicated an estimated belt life of more than 28,000 millimeters. The developed conching machine processed 50 kg of cocoa in 44 hours, with an energy consumption of 36.5 kWh per batch at a temperature below 46 degrees Celsius. The equipment is concluded to be technically viable and economically viable, with an initial investment of \$2,999.83, an operating cost that depends 95% on the raw material cost of \$586.52, and an estimated return on the initial investment of 10 weeks, assuming a pessimistic scenario.

Keywords: *Conching machine, cocoa, chocolate, mechanical design, food-grade materials, technical regulations, initial investment, operating cost.*

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	VI
<i>Abstract</i>	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
Abreviaturas.....	XII
Simbología.....	XIII
Índice de figuras.....	XVI
Índice de tablas	XVII
ÍNDICE DE PLANOS	XVIII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema	3
1.3 Justificación de proyecto.....	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general:.....	5
1.4.2 Objetivos específicos:	5
1.5 Antecedentes	6
1.5.1 Desarrollo histórico del procesamiento del cacao	6
1.5.2 Desarrollo industrial para el procesamiento del cacao	6
1.6 Marco teórico	7
1.6.1 El cultivo de cacao en Ecuador	7
1.6.2 Aporte del cacao a la economía nacional.....	8
1.6.3 Procesamiento del cacao: del grano al chocolate.....	8
1.6.4 Valor agregado en la cadena del cacao	9
1.6.5 La conchadora de chocolate.....	9

1.6.6	Criterios de falla mecánica en elementos estructurales	10
1.6.7	Fatiga en materiales sometidos a cargas cíclicas	11
1.6.8	Transmisión de potencia mecánica	11
1.6.9	Criterios de selección de materiales para equipos alimentarios.....	12
Capítulo 2.....		14
Capítulo 2.....		15
2. Metodología		15
2.1 Metodología de la investigación		15
2.2 Diseño conceptual.....		15
2.2.1 Especificaciones y requerimientos del diseño		16
2.2.2 Metodología del diseño.....		16
2.2.3 Diagrama de flujo del proyecto.....		16
2.3 Alternativas de diseño.....		18
2.3.1 Alternativa 1: Conchadora de cuchillas de piedra		18
2.3.2 Alternativa 2: Conchadora de rodillos de granito		18
2.3.3 Alternativa 3: Conchadora de molino de bolas.....		19
2.3.4 Matriz de selección		20
2.4 Selección de la mejor alternativa		21
2.5 Diseño detallado.....		22
2.5.1 Memoria de cálculos		23
2.5.2 Selección de motor.....		24
2.5.3 Selección de poleas y bandas		24
2.5.4 Diseño de árbol de transmisión.....		26
2.5.5 Selección de rodamientos y chumaceras.....		31
2.5.6 Diseño de estructura metálica		33

2.5.7 Selección de electrodo de soldadura y espesor en filete de soldadura.....	34
2.6 Especificaciones técnicas.....	37
Capítulo 3.....	38
3. Resultados y análisis.....	39
3.1 Resultados teóricos	39
3.1.1 Transmisión y par disponible.....	39
3.1.2 Selección de bandas y vida estimada	40
3.1.3 Árbol de transmisión (dimensionamiento por fatiga)	40
3.1.4 Rodamientos y cargas	40
3.1.5 Estructura metálica (FEA)	40
3.1.6 Unión soldada (árbol–disco).....	41
3.1.7 Especificaciones técnicas finales	41
3.2 Resultados experimentales.....	41
3.2.1 Plan de ensayos y criterios de aceptación	41
3.2.2 Procedimientos de ensayo.....	42
3.2.3 Valores experimentales.....	43
3.3 Análisis del costo y retorno de inversión.....	44
3.3.1 CAPEX (Inversión inicial).....	44
3.3.2 Parámetros económicos	48
3.3.3 OPEX (Costo operativo).....	50
3.3.4 Indicadores.....	51
Capítulo 4.....	54
Capítulo 4.....	55
4. Conclusiones y recomendaciones	55
4.1 Conclusiones.....	55

4.2 Recomendaciones	56
Referencias.....	57
Apéndices.....	61

Abreviaturas

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAPEX	Capital Expenditures
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sostenible
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FEA	Finite Element Analysis
NTE INEN	Norma Técnica Ecuatoriana – Instituto Ecuatoriano de Normalización
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OPEX	Operating Expenses
SENESCYT	Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación
TRL	Technology Readiness Levels
USD	United States Dollars

Simbología

A_y	Reacción vertical en el apoyo A
b	Exponente en la ecuación de fatiga
B	Ancho de chumacera
C	Capacidad dinámica o constante
C_o	Capacidad de carga estática
d	Diámetro de polea conductora
D	Diámetro de polea conducida
f	Coefficiente de fricción
$F1$	Tensión en ramal tenso
$F2$	Tensión en ramal flojo
F_b	Tensión por curvatura
F_c	Tensión centrífuga
g	Aceleración de la gravedad
h	Altura
H_d	Potencia de diseño
H_{nom}	Potencia nominal
hp	Caballo de potencia
H_{tab}	Potencia tabulada
J	Momento polar/inercia

K	Constante o coeficiente
kg	Kilogramo
K_t	Factor de concentración de esfuerzos
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
L_p	Longitud de paso de la banda
L	Litro
mL	Mililitro
m	Masa
m	Metro
m ²	Metro Cuadrado
mm	Milímetro
M	Momento flector
M_A	Momento en el apoyo A
n	Velocidad de giro
N	Newton
N_{motor}	Velocidad de salida del motor
N_b	Número de bandas
N_p	Número de pasadas/ciclos

$N_{reductor}$	Velocidad de salida del reductor
P	Potencia
r	Radio
s	Segundo
S'_n	Límite de fatiga modificado
S_n	Límite de fatiga
S_{ut}	Resistencia última
S_y	Límite de fluencia
t	Espesor de garganta de filete
T	Torque
V	Velocidad periférica de banda
V_c	Fuerza cortante
ΔF	Diferencia de tensiones en la banda
η	Eficiencia
π	Constante pi
σ	Esfuerzo normal
τ	Esfuerzo cortante
φ	Ángulo de contacto
$\$$	Dólar estadounidense

Índice de figuras

Figura 1	Diagrama esquemático de los procesos de fabricación del chocolate.....	7
Figura 2	Diagrama esquemático de los procesos de fabricación de conchadora de chocolate....	17
Figura 3	Conchadora de cuchillas (imagen referencial).	18
Figura 4	Conchadora con rodillos de granito.....	19
Figura 5	Conchadora de molino con bolas.	20
Figura 6	Diseño detallado de la conchadora de chocolate.....	23
Figura 7	Diagrama de la conchadora	27
Figura 8	Diagrama de cuerpo libre de la conchadora	28
Figura 9	Diagrama de cuerpo libre del eje acoplado en la chumacera	28
Figura 10	Diagrama de cuerpo libre fuerza cortante	29
Figura 11	Diagrama de cuerpo libre de árbol de transmisión de potencia	30
Figura 12	Nodos estructurales y apoyos en la estructura base del proyecto.....	33
Figura 13	Simulación de estructura base del proyecto.	34
Figura 14	Diagrama del disco y árbol soldado con filete de espesor t.	35
Figura 15	Imagen ilustrativa de la conchadora desarrollada.	39
Figura 16	Gráfico circular de porcentajes de costes operativos correspondientes.	51
Figura 17	Gráfico de barras del número de lotes para el retorno de inversión del proyecto.	53
Figura 18	Gráfico de barras del número de semanas para el retorno de inversión del proyecto.	53

Índice de tablas

Tabla 1 Tabla de ponderaciones.....	21
Tabla 2 Matriz de selección	21
Tabla 3 Desempeño por lote	43
Tabla 4 Operación y confiabilidad.....	43
Tabla 5 Higiene y limpieza	44
Tabla 6 Costos en materiales de partes.	44
Tabla 7 Costos de mano de obra y consumibles.	47
Tabla 8 Costos operacionales.....	50

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1	Conchadora de chocolate para productores cacaoteros de la provincia del Guayas	62
Plano 2	Vista explotada y lista de partes de la conchadora de chocolate.....	62
Plano 3	Recipiente de acero inoxidable	63
Plano 4	Estructura base/bastidor	64
Plano 5	Base superior	65
Plano 6	Plancha de granito	66
Plano 7	Soporte-Eje del recipiente	67
Plano 8	Rodillo de granito.....	68
Plano 9	Bocín de teflón	69
Plano 10	Eje de rodillo	70
Plano 11	Perfil Omega para tapa.....	71
Plano 12	Eje soporte de estructura de recipiente.....	72
Plano 13	Placa soporte	73
Plano 14	varilla roscada	74
Plano 15	Sistema de poleas	75
Plano 16	Soporte de caja reductora	76
Plano 17	Estructura porta rodillos.....	77
Plano 18	Soporte chumaceras	78
Plano 19	Paletas mezcladoras de chocolate	79
Plano 20	Tapa lateral.....	80
Plano 21	Distancia de piezas en la estructura	81

Capítulo 1

1.1 Introducción

El Ecuador se sitúa como tercer exportador de cacao en grano a nivel mundial con una participación del 12% (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2023), también es reconocido internacionalmente por la calidad de su cacao fino de aroma, considerado entre los mejores del mundo por su perfil organoléptico único (Alwang et al., 2019). Además de esta variedad, el país también produce cacao nacional y CCN-51, siendo este último de mayor rendimiento y preferido para cultivos comerciales por su resistencia y productividad. No obstante, la participación en el mercado de exportaciones está dominada por grandes empresas, que en su mayoría comercializan el grano en estado bruto, sin procesarlo. Solo el 12% de la producción cacaotera es transformado en productos elaborados, como manteca de cacao, pasta de cacao, cacao en polvo, cosméticos, abono y chocolate que son procesados por la industria. Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, más del 86,4% del cacao ecuatoriano se exporta sin valor agregado (INEC, 2023), lo que impide a los agricultores rurales beneficiarse de las oportunidades económicas que ofrece la producción de derivados del cacao. Esta situación no solo reduce sus ingresos, sino que también perpetúa su dependencia del comercio de materias primas, cuyos precios son inestables y afectan directamente su estabilidad económica (FAO, 2020).

Ante esta problemática, este proyecto integrador propone el diseño y construcción de una conchadora de chocolate, para los productores cacaoteros de la zona del Guayas. Esta máquina tendrá una capacidad estimada para procesar medio quintal de cacao seco de grado 1 en conformidad con la normativa NTE INEN 176 (Sexta revisión, 2021), deben cumplir con un contenido de humedad máxima de 7 % y libre de impurezas en menos de 48 horas, respetando las condiciones óptimas del conchado, garantizando un producto final homogéneo y de calidad. Para

ello, se desarrolló un equipo funcional, fabricado con materiales de bajo costo y de fácil adquisición local, con un diseño técnico eficiente, sanitario y escalable.

Los resultados de este proyecto no solo contribuirán a la mejora tecnológica de los pequeños y medianos productores, sino que también promoverán su inserción en mercados con mayor rentabilidad. Así, se busca fomentar la soberanía productiva, reducir la brecha con la industria del chocolate y fortalecer el desarrollo sostenible del sector cacaotero ecuatoriano. Así, se busca fortalecer la soberanía productiva, reducir la desigualdad en el acceso al valor agregado de la industria del chocolate y promover el desarrollo sostenible del sector cacaotero ecuatoriano, en línea con estrategias que impulsan la capacidad productiva local y la equidad en la cadena de valor (Squicciarini et al., 2021).

1.2 Descripción del problema

La falta de tecnologías adecuadas a la escala productiva y capacidad económica de las comunidades cacaoteras en Ecuador limita su participación en las fases de transformación del cacao, etapa dominada por medianas y grandes industrias con acceso a infraestructura y mercados. Esta situación concentra las ganancias en los países industrializados, que adquieren el grano de cacao a bajo costo y lo procesan en productos con alto valor agregado, como chocolates gourmet. Como resultado, los pequeños productores dependen casi exclusivamente del comercio de materia prima, lo que los expone a precios volátiles e ingresos reducidos, afectando su estabilidad económica y obstaculizando su desarrollo dentro de la cadena productiva (Villacis, 2022).

Ante este contexto, el proyecto ha desarrollado una conchadora de cacao de bajo costo, orientada a pequeños productores que carecen de esta tecnología, lo cual es relevante ya que su implementación permitirá dejar de exportar y vender el procesar el grano localmente en menos de

48 horas, obteniendo una excelente calidad del producto final, generar ingresos adicionales, fomentar la autonomía productiva y fortalecer la economía rural.

1.3 Justificación de proyecto

Ecuador, reconocido mundialmente como el principal exportador de cacao fino de aroma, cosechó en promedio 375.719 toneladas de cacao al año según los últimos datos (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2023), de esta producción aproximadamente el 88% se exporta como cacao crudo, mientras que solo el 12% se transforma localmente en productos como licor, pasta o chocolate para exportación y solo el 2% es transformado a chocolate, esta transformación es llevada a cabo por grandes industrias procesadoras (Ecuacoffee, Cafiesa Triari, Cofina, Nestlé, Transmar), que concentran el 94,3% de la producción nacional de derivados del cacao. En consecuencia, la industria mediana, pequeña y no afiliada representa apenas el 5,7% del total (Ministerio de Industrias y Productividad, 2025. Visión agroindustrial), lo que evidencia una concentración del valor agregado en pocas manos y una exclusión sistemática de los pequeños productores de cacao en el país.

Esta realidad limita severamente el desarrollo de la economía rural, reduce los márgenes de rentabilidad de los agricultores y perpetúa su dependencia de los mercados internacionales de materias primas, donde los precios son volátiles y bajos en comparación con los productos transformados. En contraste, el chocolate orgánico al 70% de cacao puede alcanzar precios de venta al público de USD 4,56 por 50 g (Supermaxi, 2025) lo que significa que el precio del chocolate sería de USD 91,6 por kg, en comparación con los USD 7.400 por tonelada del cacao crudo que cuesta el cacao crudo (ICCO, 2025) esto nos da un precio de USD 7,4 por kg de cacao,

lo que representa una brecha significativa en el potencial de ingreso para el productor de hasta 12 veces el precio de venta del cacao sin procesar.

De esta forma, el desarrollo del proyecto contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 8: Trabajo decente y crecimiento económico y 9: Industria, innovación e infraestructura (Naciones Unidas, 2024), al impulsar la innovación agroindustrial, mejorar el empleo en zonas rurales y fomentar la producción con valor agregado, fortaleciendo el tejido productivo nacional desde la base

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general:

Desarrollar una conchadora de chocolate que permita agregar valor a la producción de cacao a nivel de rural.

1.4.2 Objetivos específicos:

- Diseñar el mecanismo de la conchadora y el sistema de transmisión de potencia, que permita su funcionalidad.
- Seleccionar materiales accesibles considerando criterios de sanitarios y eficiencia mecánica.
- Desarrollar un prototipo operativo de la conchadora para realizar pruebas en condiciones reales de uso.
- Evaluar el costo de fabricación del equipo y su viabilidad comercial para su implementación en comunidades cacaoteras del país.
- Elaborar un manual del equipo que permita su funcionamiento y operación.

1.5 Antecedentes

1.5.1 Desarrollo histórico del procesamiento del cacao

El uso del cacao se remonta a más de 5.000 años, con evidencia arqueológica que indica su domesticación temprana en las regiones amazónicas de América del Sur, especialmente en lo que hoy es el sur de Ecuador (Zamora Chinchipe). Sin embargo, fueron las culturas mesoamericanas como los Toltecas, Mayas y Aztecas quienes lo popularizaron como una bebida amarga utilizada en rituales religiosos y ceremonias. Durante el cuarto viaje de Cristóbal Colón, los europeos tuvieron el primer contacto documentado con granos de cacao, aunque no fue hasta la expedición de Hernán Cortés en 1519 que el cacao fue realmente comprendido y valorado por los colonizadores. En la corte del emperador Moctezuma II, Cortés observó cómo se preparaba el “xocolat”, una bebida espumosa de cacao mezclada con agua y especias, la cual era altamente apreciada por la nobleza. Debido a su sabor amargo, el cacao tardó casi un siglo en ser aceptado en Europa, donde eventualmente se endulzó con azúcar y canela, transformándose en una bebida popular entre las élites. Además de su valor alimenticio, el cacao también fue utilizado como moneda de cambio en las culturas precolombinas. (Lanaud, Loor Solórzano, Zarrillo, & Valdez, 2016).

1.5.2 Desarrollo industrial para el procesamiento del cacao

Mediante la revolución industrial en los siglos XVII – XIX el cacao ha ido adquiriendo distintas formas de procesamiento, tanto que hoy en día se lo puede encontrar mezclado con leche y azúcares, teniendo una trazabilidad desde la siembra hasta el producto final, como se muestra el diagrama esquemático de los procesos de fabricación del chocolate basados por el autor Stephen T. Beckett en el libro “La ciencia del chocolate”.

Figura 1 Diagrama esquemático de los procesos de fabricación del chocolate



Fuente. (Beckett, 2000)

En la industria del cacao existe una máquina para cada proceso de la fabricación de la pasta de cacao. Para este proyecto se realizará a detalle el proceso de conchado del cacao para su refinación.

1.6 Marco teórico

1.6.1 El cultivo de cacao en Ecuador

De acuerdo con el INEC (2023), en su informe estadístico, el Ecuador es reconocido por su tradición cacaotera y sus condiciones geográficas favorables para el cultivo de cacao, siendo productor tanto de cacao fino de aroma, el trinitario y del tipo CCN-51,

este último de mayor rendimiento y uso comercial. El país es uno de los principales exportadores de cacao a nivel mundial, con una producción que supera las 375 mil toneladas anuales (World Population Review, 2025).

1.6.2 Aporte del cacao a la economía nacional

La cadena productiva del cacao tiene una importancia económica y social significativa para el Ecuador, no solo por su papel como rubro estratégico de exportación, sino también por su incidencia directa en la liquidez, rentabilidad y sostenibilidad de las empresas dedicadas a su comercialización. (Erazo Portilla, Robles Quiñonez, Cifuentes Quiñonez, & Saquisari Armijos, 2021). Además, en el año 2022 el cacao representó aproximadamente el 4,5% de las exportaciones no petroleras del país (Banco Central del Ecuador, 2023). A pesar de su relevancia económica, los productores cacaoteros enfrentan amplios desafíos como precios fluctuantes, acceso limitado a tecnología de procesamiento y baja participación en el mercado de productos con valor agregado.

1.6.3 Procesamiento del cacao: del grano al chocolate

El procesamiento del cacao inicia con la fermentación y secado de los granos, procesos esenciales para el desarrollo del aroma y sabor del chocolate. Posteriormente, los granos se tuestan, se descascarillan para obtener hojuelas de cacao, y se muelen para producir licor de cacao. Este licor puede ser prensado para separar la manteca del cacao sólido, que al pulverizarse se convierte en cacao en polvo. Finalmente, la mezcla se refina mediante el proceso de conchado para producir un chocolate homogéneo y de

textura suave. Este conjunto de etapas es fundamental para transformar el grano en productos terminados de alto valor (Agrocalidad, 2021).

1.6.4 Valor agregado en la cadena del cacao

A pesar del reconocimiento mundial del cacao ecuatoriano, más del 90% de su producción se exporta como materia prima, principalmente en forma de grano seco (Agrocalidad, 2021). Esta situación limita las oportunidades de ingresos para los pequeños productores, quienes obtienen beneficios mínimos en comparación con el alto valor de los productos procesados en el extranjero. De acuerdo con un informe financiero de exportación del Banco Mundial en 2023, del total de cacao procesado a nivel internacional, el 53% se destina a la producción de chocolate y el 45% a manteca y cacao en polvo, productos que concentran la mayor parte del valor agregado y la rentabilidad comercial.

1.6.5 La conchadora de chocolate

La conchadora de chocolate es un equipo empleado en la etapa final del proceso de elaboración del chocolate. Su función principal es refinar la mezcla compuesta por licor de cacao, manteca de cacao, azúcar y, en algunos casos, otros ingredientes como leche en polvo o lecitina. El proceso que realiza es denominado conchado, que implica la agitación continua de la mezcla a temperaturas controladas durante un periodo prolongado (usualmente entre 12 y 72 horas), permitiendo la evaporación de compuestos volátiles indeseables, la reducción de la humedad y la mejora en la textura y homogeneidad del producto final. Este proceso contribuye significativamente al

desarrollo del perfil sensorial del chocolate, mejorando su fluidez, brillo y sabor final. (Afoakwa et al., 2013)

Existen diversos tipos de conchadoras utilizadas en la industria chocolatera, cuya elección depende del volumen de producción y el nivel de automatización requerido. Las conchadoras longitudinales, desarrolladas originalmente por Rodolphe Lindt en 1879, son reconocidas por ser las pioneras del proceso moderno de conchado, y se utilizan actualmente en producciones artesanales por su control detallado del perfil sensorial del chocolate. Las conchadoras de cuba rotatoria son comunes en operaciones medianas, mientras que las conchadoras de eje vertical o de bolas han ganado popularidad en la industria moderna debido a su mayor eficiencia energética y menores tiempos de operación, facilitando procesos continuos y automatizados con altos volúmenes de producción (Beckett, 2009)

1.6.6 Criterios de falla mecánica en elementos estructurales

Cuando los elementos de una estructura están sometidos a cargas críticas o cíclicas, es fundamental realizar un análisis detallado de los posibles modos de falla, ya que en la conchadora de cacao algunos componentes estarán expuestos a condiciones de fatiga, fluencia, fractura y pandeo. Por ello, es necesario aplicar criterios de falla mecánica apropiados para garantizar la seguridad y durabilidad del equipo. (Norton, 2011)

Criterio de Von Mises: De acuerdo con el criterio, se puede predecir la falla por fluencia en materiales dúctiles sometidos a un estado de esfuerzos multiaxial. Entonces se establece que si el esfuerzo equivalente de Von Mises supera el límite de fluencia del material, se considera que ocurre una falla plástica. (Norton, 2011).

Nota: Para el proyecto, este criterio de Von Mises se utiliza para el diseño de los árboles de transmisión y engranajes, que estarán sometidos a esfuerzos combinados de tracción, torsión y flexión.

1.6.7 Fatiga en materiales sometidos a cargas cíclicas

Este criterio es aplicado para elementos sometido a movimientos repetitivos o rotativos, este apartado puede generar factores de seguridad y vida útil de los materiales y componentes del proyecto considerando número de ciclos y esfuerzos alternantes. (Robert L. Mott, 2013)

Criterio de Goodman modificado: Evalúa la resistencia a la fatiga de los materiales bajo cargas cíclicas, especialmente cuando existe un esfuerzo medio diferente de cero. Este criterio combina los efectos del esfuerzo medio y el alternante para predecir la vida útil del componente. (Robert L. Mott, 2013)

Nota: En el proyecto se emplea en el diseño del sistema de transmisión, considerándolas vibraciones y cargas repetitivas que se generan durante el funcionamiento continuo de la conchadora.

1.6.8 Transmisión de potencia mecánica

La transmisión de potencia mecánica abarca todos los elementos responsables de transferir energía desde el motor hasta los componentes que realizan el trabajo útil. Es un pilar fundamental para el funcionamiento eficiente de la máquina. Entre estos elementos se encuentran los árboles de transmisión, engranes, poleas, correas, cojinetes, entre otros (Budynas, 2016)

En el presente proyecto, es importante diseñar y seleccionar adecuadamente, preferiblemente de forma comercial, cada uno de los componentes del sistema de transmisión, asegurando su compatibilidad, resistencia y eficiencia dentro del conjunto de la conchadora de cacao.

1.6.9 Criterios de selección de materiales para equipos alimentarios

Dado que la construcción de la conchadora de chocolate implica el contacto directo entre los materiales del equipo y la materia prima que posteriormente será consumida por el cliente final, es fundamental garantizar la inocuidad alimentaria definido por el Instituto Ecuatoriano de Normalización. Por esta razón, el diseño debe cumplir con los lineamientos y requisitos establecidos en la norma “NTE INEN 1672-2: Maquinaria para el procesado de alimentos – Conceptos básicos. Requisitos de higiene”, la cual es clave para asegurar condiciones higiénicas adecuadas en la operación y en la correcta selección de los materiales utilizados en el presente proyecto.

1.6.10 Technology readiness levels (TRL)

El concepto de Technology Readiness Levels (TRL), desarrollado originalmente por la NASA, constituye una metodología sistemática para evaluar el grado de madurez de una tecnología. Su objetivo es establecer un marco uniforme que permita comparar tecnologías en diferentes fases de desarrollo y reducir la incertidumbre en proyectos de innovación (Mankins, 2004).

La escala TRL permite identificar el grado de desarrollo alcanzado, gestionar riesgos y orientar la toma de decisiones en procesos de innovación y transferencia tecnológica (Engel, Dalton, Anderson, Sivaramakrishnan, & Lansing, 2012).

Escala de TRL:

- **TRL 1:** Principios científicos básicos observados y reportados.
- **TRL 2:** Formulación del concepto o aplicación tecnológica.
- **TRL 3:** Validación analítica y experimental de la prueba de concepto.
- **TRL 4:** Validación de componentes en un entorno de laboratorio.
- **TRL 5:** Validación de componentes en un entorno relevante (piloto inicial).
- **TRL 6:** Demostración de un prototipo a escala piloto en un entorno relevante.
- **TRL 7:** Prototipo de sistema probado en un entorno operativo.
- **TRL 8:** Demostración comercial a escala completa en condiciones reales.
- **TRL 9:** Operación comercial consolidada en el entorno final.

Para el presente proyecto se espera obtener un mínimo de escala de TRL 7 a medida que se realizaran las pruebas experimentales del funcionamiento de la máquina.

1.6.11 Análisis económico

El análisis económico se centra en tres indicadores clave: CAPEX (Inversión de capital), que cubre los costos iniciales de adquisición e instalación del equipo; OPEX (Gastos operativos), que incluye costos recurrentes como energía, insumos y mantenimiento; y periodo de retorno (payback period), que mide el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial mediante los ingresos generados. Estos indicadores proporcionan una base objetiva para evaluar la viabilidad financiera del proyecto, comparar alternativas y tomar decisiones informadas en el diseño mecánico (Newnan, Eschenbach & Lavelle, 2012).

Capítulo 2

Capítulo 2

2. Metodología

2.1 Metodología de la investigación

La metodología utilizada, se basa en el proceso de diseño mecánico establecido por Budynas, & Nisbett, J. K. (2016) y orientada a resolver un problema práctica mediante el diseño, construcción y validación de un prototipo funcional. El enfoque es cuantitativo, ya que se utilizarán mediciones técnicas, simulaciones y seguimiento para verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño. A su vez, es de carácter experimental porque contempla la evaluación del comportamiento del equipo bajo condiciones reales de operación.

Esta metodología es comúnmente empleada en ingeniería para el desarrollo de soluciones tecnológicas viables, donde el objeto de estudio es un sistema físico para cumplir una función específica. Se basa en la aplicación de conocimientos científicos y técnicos para generar productos funcionales que respondan a necesidades concretas del entorno socio-productivo (Hernández Sampieri et al., 2014).

2.2 Diseño conceptual

Para el diseño de la conchadora de chocolate se establece que el sistema de refinamiento debe ser adecuado para tratar productos semilíquidos derivados del cacao, particularmente el licor de cacao previamente triturado. Este sistema tiene como función principal reducir el tamaño de partícula con el fin de tener una textura homogénea y suave, así como permitir la eliminación de impurezas físicas y compuestos no deseados. Durante el proceso de conchado, se facilita la evaporación de compuestos volátiles como ácido acético, ácido butírico, aldehídos, alcoholes y restos de humedad, que afectan negativamente el aroma y sabor del chocolate si no son removidos (Beckett, 2008). Además, este proceso ayuda a regular la proporción de manteca de cacao y a

promover las reacciones químicas que mejoran el desarrollo de compuestos aromáticos deseables. El diseño de la máquina debe, adicionalmente, considerar criterios de limpieza, mantenimiento sencillo y operación segura, en conformidad con normativas alimentarias y de seguridad establecida en la norma NTE INEN 1672-2.

2.2.1 Especificaciones y requerimientos del diseño

- Producción esperada de 50kg de chocolate en menos de 48 horas.
- Construcción con materiales de grado alimenticio.
- Costo de fabricación accesible.
- Facilidad de limpieza y mantenimiento.
- Seguridad operativa.

2.2.2 Metodología del diseño

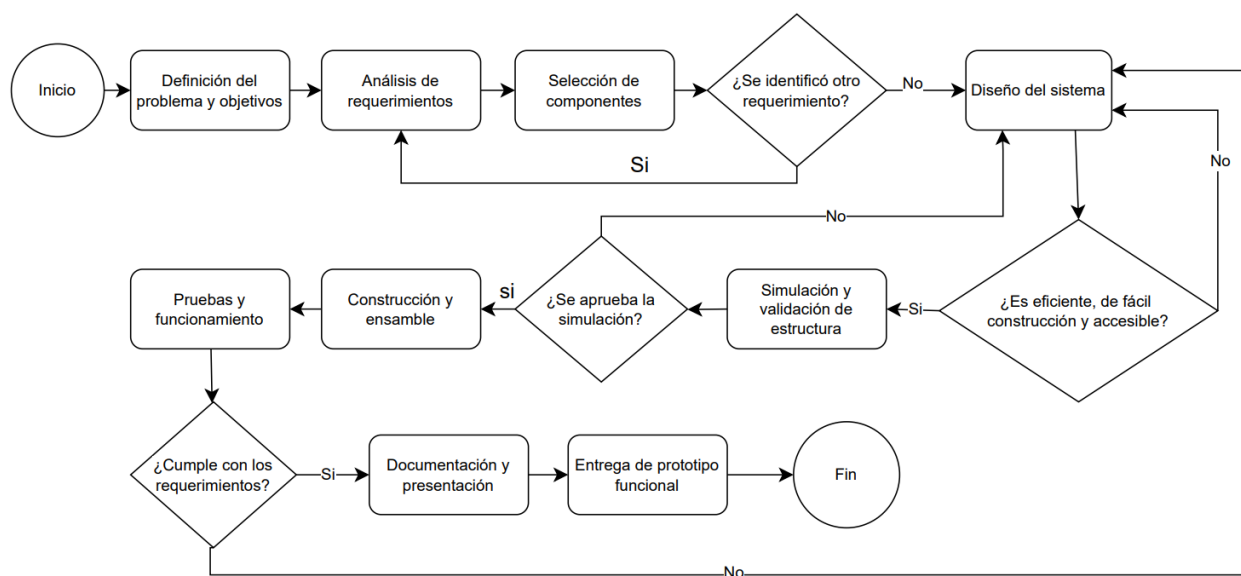
El diseño mecánico se desarrollará siguiendo las etapas fundamentales propuestas por Budynas y Nisbett (2016): definición precisa del problema, identificación de requerimientos técnicos y funcionales, generación de soluciones conceptuales, evaluación de alternativas mediante matrices comparativas, y elaboración del diseño detallado.

2.2.3 Diagrama de flujo del proyecto

El diagrama de flujo es una forma gráfica de mostrar la secuencia de actividades de un proceso, procedimiento o sistema, empleando símbolos estandarizados para ilustrar cómo fluye la información, así como las operaciones, decisiones, entradas y salidas involucradas. (ISO 5807:1985)

Como se presenta en la figura 2, nuestro flujo inicia con el título del proyecto conchadora de chocolate que deriva lo que es la problemática y justificación del proyecto, seguido por un análisis de requerimientos para definir lo que se necesita. Luego se seleccionan los componentes y se verifica si aparece otro requerimiento adicional. Si surge uno nuevo, se regresa al análisis de requerimientos; si no, se pasa al diseño del sistema. Posteriormente, se valida si el diseño es eficiente, accesible y fácil de mantener: de ser así, se continúa con la simulación y validación; de lo contrario, se retorna al diseño del sistema. Una vez realizada la simulación estructural y validada la propuesta, se evalúa si la simulación es aprobada: si no lo es, se regresa al diseño del sistema; si la aprueba, se procede con la construcción y ensamble del prototipo. Luego se realizan pruebas de funcionamiento y se comprueba si cumple los requerimientos; si no los cumple, se vuelve al análisis de requerimientos para reajustar. Finalmente, si todo está conforme, se documenta, se presenta, y se entrega el prototipo funcional, concluyendo el proceso.

Figura 2 Diagrama esquemático de los procesos de fabricación de conchadora de chocolate



Fuente: Diseño de autor

2.3 Alternativas de diseño

2.3.1 Alternativa 1: Conchadora de cuchillas de piedra

Su mecanismo presentado en la figura 3 se basa en cuchillas rotativas que presionan contra las barras de revestimiento situadas en la parte interna del cilindro de molienda. La caja de engranajes helicoidales está diseñada para optimizar la transferencia de movimiento reduciendo al mínimo el consumo energético. (NJ Machinery, 2020).

Figura 3 Conchadora de cuchillas (imagen referencial).



Fuente: Overmade. (2020)

2.3.2 Alternativa 2: Conchadora de rodillos de granito

El mecanismo mostrado en la figura 4, refina partículas a menos de 20 micras mediante piedras de granito natural, permitiendo un corte eficiente y rápido. Su motor de potencia 2 HP, tiene alta eficiencia está diseñado para operar de forma continua sin sobrecalentarse y puede funcionar a distintas velocidades gracias a un sistema de variador de frecuencia que optimiza el

consumo energético. Además, un controlador de tensión ajusta la presión de las piedras durante la refinación y el conchado, brindando mayor control sobre el proceso (Diamond Custom Machines, 2023).

Figura 4 *Conchadora con rodillos de granito.*



Fuente: Productos Taiwaneses. (2023)

2.3.3 Alternativa 3: Conchadora de molino de bolas

El molino de bolas refina la masa hasta alcanzar partículas de entre 20 y 25 micras; y concha el producto eliminando ácidos acéticos mediante un extractor y agitación interna como lo muestra la figura 5. Además, mantiene el chocolate en estado líquido mediante un sistema térmico con chaqueta calefactora, resistencias, electroválvulas y control de temperatura, e incorpora un sistema de enfriamiento en su base (Delani Trading, s. f.).

Figura 5 Conchadora de molino con bolas.



Fuente: Gondor Machinery. (2024).

2.3.4 Matriz de selección

En la matriz de selección se definen criterios clave (costo, modo de operación, mantenimiento, seguridad, durabilidad, etc) a los que se asigna una ponderación según su importancia. Luego, cada alternativa tecnológica recibe una calificación en cada criterio. Estas calificaciones se multiplican por el peso correspondiente y se suman, obteniendo un puntaje total por alternativa. Finalmente, la opción con mayor puntaje se considera la más adecuada (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007). Para el presente proyecto, la mejor alternativa es la conchadora de rodillos de granito basado en el análisis de la tabla 2 considerando los parámetros de la tabla 1.

Tabla 1 *Tabla de ponderaciones*

Ponderación		
Criterios de selección	Puntuación	Peso
Costo	8	21%
Modo de operación	6	15%
Mantenimiento	8	21%
Seguridad operativa	10	26%
Durabilidad	7	18%

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 2 *Matriz de selección*

Alternativas			
	1	2	3
Criterios	Cuchillas de piedra	Rodillos de granito	Molino de bolas
Costo	2	4	3
Modo de operación	2	4	5
Mantenimiento	2	3	3
Seguridad operativa	2	5	5
Durabilidad	4	5	3
Total	236	281	138

Nota. Fuente: Elaboración propia

2.4 Selección de la mejor alternativa

La evaluación individual de cada alternativa, combinada con las ponderaciones, arrojó los siguientes puntajes globales:

- Rodillos de granito: 281 puntos
- Cuchillas de piedra: 236 puntos
- Molino de bolas: 138 puntos

De acuerdo con estos resultados, la alternativa conchadora de rodillos de granito se posiciona como la opción más adecuada para el desarrollo del prototipo. Esta alternativa combina un buen desempeño en seguridad operativa, mantenimiento y durabilidad, sin elevar excesivamente los costos. Además, se trata de una tecnología ya validada en la industria de pequeña y mediana escala para la producción artesanal de chocolate, lo que refuerza su viabilidad técnica y comercial.

2.5 Diseño detallado

El diseño detallado constituye la etapa del proceso de desarrollo en la que, se define el propósito y la configuración básica del sistema, se especifican rigurosamente los parámetros geométricos, las dimensiones, los materiales y demás características técnicas de cada componente. En esta fase no se busca innovar en cuanto a la concepción del dispositivo, sino optimizar y concretar su definición estructural y funcional, asegurando que cumpla con las exigencias de resistencia, durabilidad y desempeño frente a las condiciones de carga y entorno previstas durante su vida útil. (Robert L. Mott, 2013)

La conchadora de chocolate debe estar equipada con rodillos de piedra, el diseño detallado implica precisar aspectos como la forma y dimensiones de los rodillos, su material (por ejemplo, granito u otras piedras aptas para uso alimentario), la configuración del bastidor, los mecanismos de transmisión y el tipo de motor empleado. Todo ello debe definirse en detalle para garantizar que la máquina soporte las cargas de trabajo, las vibraciones, la fricción y las condiciones ambientales típicas del procesamiento de cacao, sin comprometer la calidad del producto ni la seguridad operativa.

Figura 1 *Diseño detallado de la conchadora de chocolate*



Fuente: Autor

2.5.1 Memoria de cálculos

La memoria de cálculos presenta es la parte técnica del documento que valida el diseño a partir de principios físicos, normativas técnicas que aseguran la eficiencia, seguridad y calidad mientras la maquina se encuentre en servicio. En su totalidad los cálculos y criterios fueron tomados del libro “Diseño de máquinas: Un enfoque integrado” cuarta edición del autor Robert L. Norton.

A continuación, se detalla la memoria de cálculos para el diseño de elementos mecánicos del proyecto.

2.5.2 Selección de motor

Debido a la disponibilidad de motores en el taller del centro de desarrollo tecnológico sostenible se seleccionó un motor monofásico de 2 hp con una velocidad de 1750 rpm y una caja reductora de 1:50. Calculando el par resultante con la ecuación (1) tenemos:

$$P_{motor} = 2hp \cdot 756 \frac{W}{hp} = 1492W = 1.492kW$$

$$N_{motor} = 1750rpm$$

$$N_{reductor} = \frac{1750rpm}{50} = 35 rpm$$

$$T = \frac{9550 \cdot P_{motor} \cdot \eta_{motor}}{N_{reductor}} = 357.6Nm \quad (1)$$

Este par resultante es suficiente para hacer girar el tanque de acero inoxidable con los rodillos y el chocolate cargado.

2.5.3 Selección de poleas y bandas

Para tratar de conservar el centro de gravedad en el centro de la maquina el motor y el reductor se colocan en un mismo plano vertical alineados, esto hace que sea necesario el uso de poleas para poder transmitir la potencia del motor al reductor. Estas poleas tienen que ser del mismo tamaño para conservar la velocidad angular del reductor, se seleccionan poleas en V de 5 pulgadas de diámetro, tenemos una distancia entre ejes de 390 milímetros es decir 15.35 pulgadas, seleccionamos banda en V tipo A y con estos datos calculamos el número de bandas necesarias:

Velocidad periférica

$$V = \frac{\pi dn}{12} = \frac{\pi(5in)(1750rpm)}{12} = 2290 \text{ pies/min}$$

Longitud de paso

$$Lp = 2C + \frac{\pi(D + d)}{2} + \frac{(D - d)^2}{4C} = 2(15.35) + \frac{\pi(5 + 5)}{2} + \frac{(5 - 5)^2}{4(15.35)} = 46.42 \text{ in}$$

Potencia permitida

$$H_a = K_1 K_2 H_{tab} = (0,75)(0.9)(1.815) = 1.22 \text{ hp}$$

Potencia de diseño

$$H_d = H_{nom} K_s n_d = (2)(1)(1) = 2 \text{ hp}$$

Número de bandas

$$N_b \geq \frac{H_d}{H_a} \quad (2)$$

$$N_b \geq 1.64$$

El número de bandas obtenido por la ecuación (2) no se puede usar porque tiene que ser el entero positivo siguiente, por esta razón debemos utilizar dos bandas en V. Para lograr darle un mantenimiento programado calculamos la vida útil de las bandas:

Tensión centrífuga

$$F_c = K_c \left(\frac{V}{1000} \right)^2 = 0.561 \left(\frac{2290}{1000} \right)^2 = 2.95 \text{ lbf}$$

Potencia transmitida

$$\Delta F = F_1 - F_2$$

$$\Delta F = \frac{63025 H_d / N_b}{N \left(\frac{d}{2} \right)} = \frac{63025(2)/2}{1750 \left(\frac{5}{2} \right)} = 14.4 \text{ lbf}$$

Tensión mayor

$$F_1 = F_c + \frac{\Delta F \exp(f\phi)}{\exp(f\phi) - 1} = 52.98 \text{ lbf}$$

Tensión menor

$$F_2 = F_1 - \Delta F = 38.58 \text{ lbf}$$

Tensiones máximas

$$T_1 = F_1 + (F_b)_1 = F_1 + \frac{K_b}{d} = 52.98 + \frac{220}{5} = 96.98 \text{ lbf}$$

$$T_2 = F_1 + (F_b)_2 = F_1 + \frac{K_b}{D}$$

$$T_1 = T_2$$

Número de pasadas

$$N_P = \left[\left(\frac{K}{T_1} \right)^{-b} + \left(\frac{K}{T_2} \right)^{-b} \right]^{-1}$$

$$N_P = \left[\left(\frac{674}{96.98} \right)^{-11.089} + \left(\frac{674}{96.98} \right)^{-11.089} \right]^{-1} = 1.086 \times 10^9 \approx 10^9$$

Horas de vida

$$t > \frac{N_P L_p}{720V} (3)$$

$$t > \frac{10^9 (46.42)}{720 (2290)}$$

$$t > 28154 \text{ horas}$$

La vida útil en horas obtenida de la ecuación (3) teórica de las bandas es mayor a 28154 horas lo que significa que la maquina podrá conchar 585 veces antes de que las bandas fallen. Sin embargo, en la práctica la vida útil de las bandas depende del fabricante y el material que se use.

2.5.4 Diseño de árbol de transmisión

Para el presente proyecto se diseñaron 2 tipos de ejes de transmisión, el primero funciona como un soporte para la estructura donde será ubicado el recipiente cuyo movimiento no será

conectado a ninguna fuente de energía, simplemente actuará una fuerza cortante que le dará movimiento de 0°, 90° y 180°.

Para el árbol de transmisión que será el encargado de mover el recipiente y está conectado a la caja reductora. Su diseño se realizó mediante cálculos de fatiga y fuerza axial. Las figuras 7 y 8 muestran el diagrama de cuerpo libre del eje a diseñar con las reacciones y fuerza cortante

Memoria de cálculos para el diseño del eje soporte.

Diseño de ejes por cortante, dado que son 2 soportes que van a soportar aproximadamente 275 kg, que incluye el peso de la estructura, elementos de maquina y materia prima.

Datos:

Material: AISI 4140

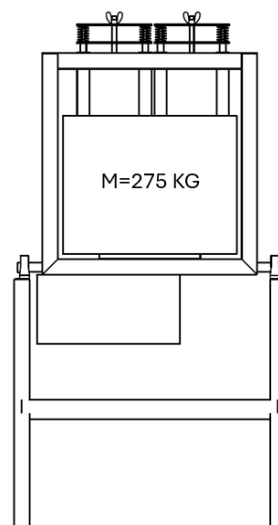
$$S_y = 415 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} = 655 \text{ MPa}$$

$$K_t = 1.5$$

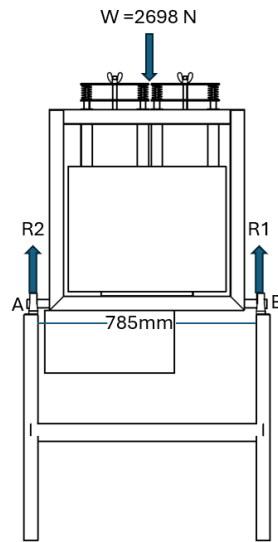
$$N = 2 \text{ (elección del diseñador)}$$

Figura 2 Diagrama de la conchadora



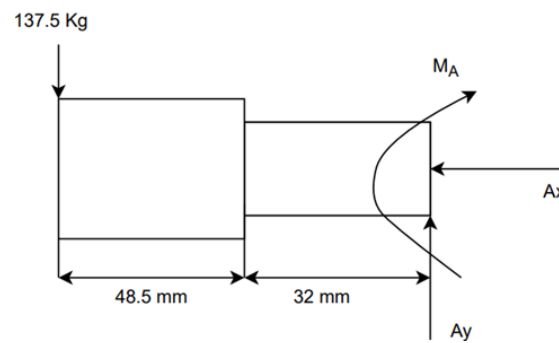
Fuente: Autor

Figura 3 Diagrama de cuerpo libre de la conchadora



Fuente: Autor

Figura 4 Diagrama de cuerpo libre del eje acoplado en la chumacera



Fuente: autor

$$D \geq \sqrt{2.94 * Kt * (V) * \frac{N}{Sn}} (4)$$

$$\sum Fx = 0(2)$$

$$Ay = 0$$

$$\sum Fy = 0(3)$$

$$Ay - (137.5 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) = 0$$

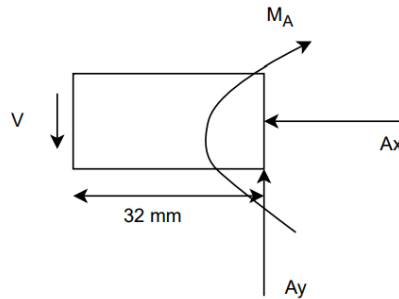
$$A_y = 1348.87 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$M_A - (137.5 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (0.08 \text{ m}) = 0$$

$$M_A = 108.58 \text{ Nm}$$

Figura 5 Diagrama de cuerpo libre fuerza cortante



Fuente: Autor

$$\sum F_y = 0$$

$$V = A_y = 1348.87 \text{ N}$$

$$S_n = 0.57 * S_{ut} = 0.57 * 655 \text{ MPa} = 337.35 \text{ MPa}$$

$$N = \frac{S_n}{\tau_{max}}$$

$$\tau_{max} = \frac{337.35 \text{ MPa}}{2}$$

$$\tau_{max} = 186.75 \text{ MPa}$$

$$D \geq \sqrt{2.94 * 1.5 * (1348.87 \text{ N}) * \frac{2}{337.35 \text{ MPa}}}$$

$$D \geq 4.84 \text{ mm}$$

El diámetro adecuado de acuerdo a la ecuación (4) y un factor de seguridad de 2 es de 4,84mm, pero para el diseño se considera 20 mm por disponibilidad de materiales proporcionados

por el CDTs, se deberá acoplar al diámetro interno chumacera. Los cojinetes (chumaceras) de bolas de 50mm para el eje que soporta el recipiente no están sometido a esfuerzos radiales relevantes, su principal función es conservar la alineación.

Diseño del árbol que transmite potencia de la caja reductora al plato

Usando el mismo material de los ejes que van en los soportes, el AISI 4140 es el acero indicado para la elaboración del proyecto. La figura 9 muestra el diagrama de cuerpo libre (DCL) del árbol a diseñar. Datos para el diseño:

Material: AISI 4140

$$S_y = 415 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} = 655 \text{ MPa}$$

$$S'_n = 276 \text{ MPa}$$

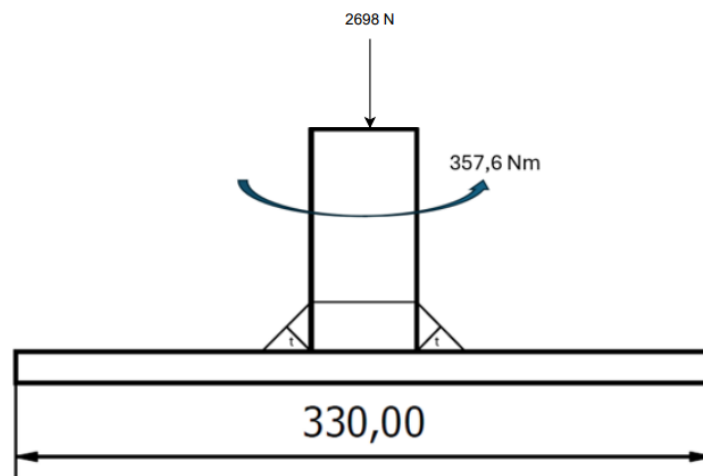
$$N = 2 \text{ a elección de diseñador}$$

$$K_t = 1,5$$

$$n = 35 \text{ rpm}$$

$$\text{Potencia motora: } 2 \text{ hp} = 1491 \text{ W}$$

Figura 6 Diagrama de cuerpo libre de árbol de transmisión de potencia



Fuente: Autor

$$\tau_{adm} = \frac{S_{ut}}{2 \cdot n_s} = \frac{655}{2 \cdot 2} = 163.75 \text{ MPa}$$

La ecuación para determinar el diámetro mínimo requerido para el diseño

$$D \geq \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t M}{S_n'}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{1/3} \quad (5)$$

Se calcula la torsión

$$T = \frac{9550 \cdot P_{[kW]}}{n} = \frac{9550 \cdot 1.491}{35} = 406.83 N \cdot m = 406830 N \cdot mm$$

$$D \geq \left[\frac{32 \cdot 2}{\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{1.5 \cdot 357600}{276}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{406830}{655}\right)^2} \right]^{1/3}$$

$$D \geq 34,5 \text{ mm}$$

El diámetro mínimo obtenido por la ecuación (5) es de 34,5 mm, pero las chumaceras proporcionadas por el CDTs son aptas para un árbol de diámetro de 50mm.

2.5.5 Selección de rodamientos y chumaceras

$$+\uparrow \sum Fy = 0$$

$$R_1 + R_2 - 2698N = 0$$

$$R_1 + R_2 = 2698N$$

$$+\uparrow \sum M_A = 0$$

$$(2698N) \left(\frac{0.785}{2}\right) - R_1(0.785) = 0$$

$$R_1 = \frac{(2698N)(0.785)}{(0.785)(2)} = 1349 N$$

$$R_1 = R_2 = 1349N$$

La figura 7 muestra una vista frontal de la conchadora donde se observa la posición de las chumaceras y la figura 8 muestra las fuerzas cortantes que actúan sobre los ejes. Dado que los cojinetes en esta aplicación están destinados exclusivamente a soportar el peso de la conchadora y permitir la inclinación frontal de la estructura de la conchadora de chocolate, se establece que:

- La acción mecánica no involucra velocidades elevadas ni cargas axiales significativas.
- La carga principal aplicada sobre los rodamientos es radial pura, producto del peso del bastidor y el contenido de la cámara.
- El diseño contempla ejes de 20 mm de diámetro, sobre los cuales se alojarán los rodamientos seleccionados.

Con base en estos criterios, se seleccionó un rodamiento rígido de una hilera de bolas SKF 6204, cuya idoneidad se justifica por lo siguiente:

Especificaciones del rodamiento SKF 6204:

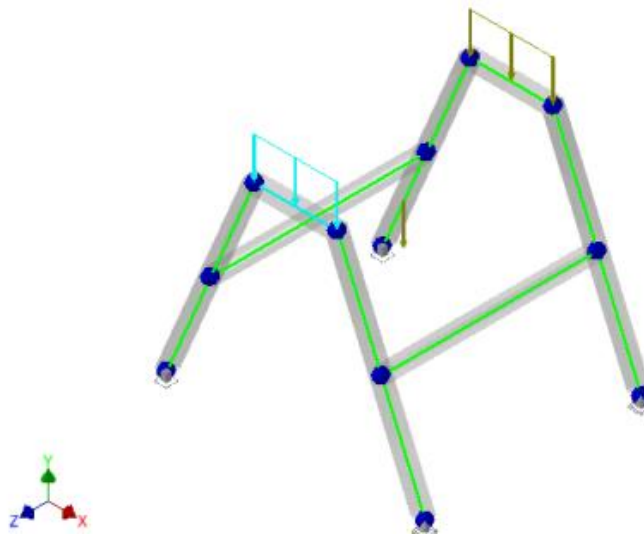
- **Diámetro interior (d):** 20 mm
- **Diámetro exterior (D):** 47 mm
- **Ancho (B):** 14 mm
- **Capacidad de carga dinámica (C):** 13.5 kN
- **Capacidad de carga estática (C₀):** 6.8 kN

Este rodamiento cumple ampliamente con la carga radial estimada de 1349 N, manteniéndose muy por debajo de los límites de fatiga definidos por el fabricante. Además, por tratarse de un rodamiento compacto, económico y de fácil disponibilidad, su implementación resulta adecuada para una máquina de bajo mantenimiento y operación intermitente.

2.5.6 Diseño de estructura metálica

Se realizó la simulación de la estructura de la base que apoyará el sistema construido con una carga de 275 kg que incluyen el peso de la estructura, elementos mecánicos y materia prima, revelando que no genera deflexiones significativas o fallas en los elementos de la estructura como lo explica la figura 12 y 13 donde se colocan las fuerzas, los apoyos y los nodos.

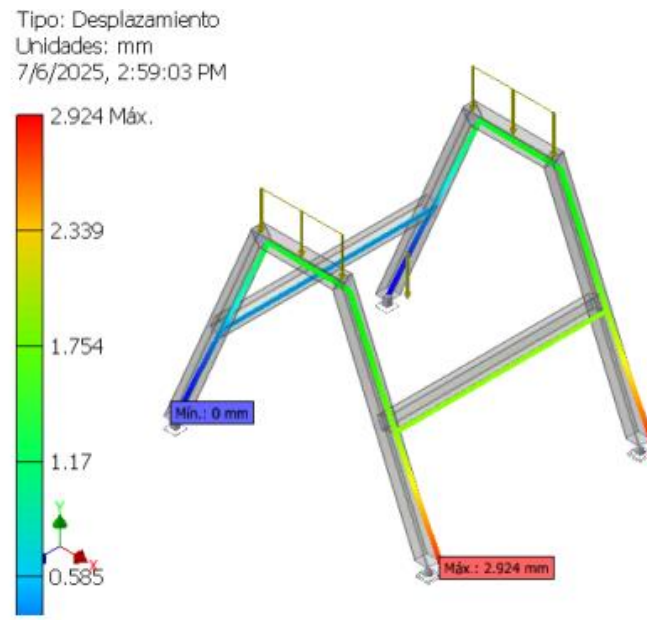
Figura 7 *Nodos estructurales y apoyos en la estructura base del proyecto.*



Fuente: Inventor Nastran versión 2023

Al realizar la simulación de elementos estructurales, la figura 10 muestra que las deflexiones no son significativas para el desarrollo del presente proyecto, aproximadamente 3 mm de deflexión.

Figura 8 Simulación de estructura base del proyecto.



Fuente: Inventor Nastran versión 2023

2.5.7 Selección de electrodo de soldadura y espesor en filete de soldadura

Debido a que los materiales del árbol de transmisión y el disco son AISI 4140 y ASTM A-36 respectivamente usando el diagrama de Schaeffler obtenemos que el electrodo apropiado para soldar estos dos materiales es el siguiente:

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1.5 \cdot \%Si + 0.5 \cdot \%Nb$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0.5 \cdot \%Mn$$

- AISI 4140:

$$Cr_{eq} = 1 + 0.25 + 1.5 (0.3) + 0 = 1.7$$

$$Ni_{eq} = 0 + 30 (0.4) + 0.5 (0.9) = 12.45$$

- A36:

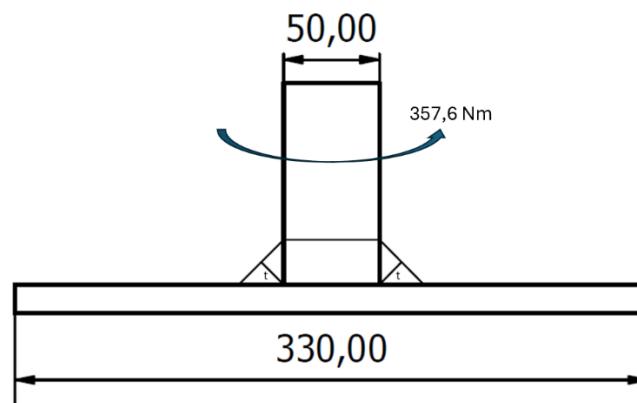
$$Cr_{eq} = 0 + 0 + 1.5 (0.3) + 0 = 0.45$$

$$Ni_{eq} = 0 + 30 (0.25) + 0.5 (0.8) = 7.9$$

Calculando el cromo y níquel equivalente de los materiales a partir de las ecuaciones (6) y (7) obtenemos que este punto cae en la zona martensítica o bainítica, por esto se selecciona un electrodo E309L como material de aporte, ya que está diseñado para uniones disimiles.

Para calcular el espesor del filete de soldadura primero tenemos que saber el torque al que estará sometido el cordón de soldadura alrededor del árbol soldado al disco, obtenemos los resultados de la ecuación (1):

Figura 9 Diagrama del disco y árbol soldado con filete de espesor t .



Fuente: Autor

Para garantizar una unión fuerte entre el eje de inclinación y la base estructural, se diseñó una soldadura perimetral de filete alrededor del eje, la cual estará sometida exclusivamente a un par de torsión. Como muestra la figura 14, el eje tiene un diámetro de 50 mm y está conectado mediante soldadura a un plato de acero estructural. El torque aplicado sobre el eje es de:

$$T = 357.6 \text{ Nm} = 357600 \text{ Nmm}$$

La unión se realiza mediante soldadura perimetral continua, lo que permite considerar una distribución uniforme del esfuerzo cortante en la garganta del filete. El esfuerzo cortante máximo en una soldadura circular puede calcularse como:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot r}{J}$$

$$J = 0.707 \cdot t \cdot 2\pi r^2$$

Despejando el espesor del filete t:

$$t = \frac{T}{0.707 \cdot \tau_{adm} \cdot 2\pi r^2}$$

Donde:

- $r = 25 \text{ mm}$ (radio del eje)
- τ_{adm} : esfuerzo cortante admisible del material de aporte
- Se emplea el electrodo E309L, con resistencia a la tracción de aproximadamente 600 MPa
- Considerando que el esfuerzo cortante admisible es el 35% de la resistencia a la tracción y aplicando un factor de seguridad de 2:

$$\tau_{adm} = \frac{0.35 \cdot 600}{2} = 105 \text{ MPa}$$

Sustituyendo en (8):

$$t = \frac{357600}{0.707 \cdot 105 \cdot 2\pi(25)^2} = 1.23 \text{ mm}$$

El espesor mínimo teórico del filete de soldadura requerido es de 1.23 mm, Sin embargo, por normativa y práctica común en soldadura estructural, no se recomienda utilizar filetes menores a 3 mm, debido a:

- Tolerancias de fabricación
- Requerimientos de penetración
- Seguridad estructural

Por lo tanto, se adopta un espesor de filete de:

$$t = 3 \text{ mm}$$

2.6 Especificaciones técnicas

La máquina conchadora propuesta tendrá una capacidad de procesamiento de 50 kg de cacao, en menos de 48 horas. Estará compuesta por un tanque de acero inoxidable AISI 304 con rodillos de granito grado alimenticio, un sistema de transmisión mediante eje de acero AISI 4140, engranajes y cojinetes, y un motor eléctrico trifásico de 2 HP con reductor helicoidal. La estructura portante será de acero ASTM A36 con acabado epóxico sanitario. Todo el diseño considerará criterios de higiene según la norma NTE INEN 1672-2, resistencia estructural bajo la teoría de Von Misses y el criterio de Goodman modificado, y permitirá su fabricación en talleres locales con materiales normalizados.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

En el siguiente capítulo se presentan los resultados del proyecto desde dos frentes: (i) verificación teórica del diseño (cálculos, simulaciones y especificaciones) y (ii) validación experimental del prototipo construido (TRL 7), concluyendo con el análisis económico (costos, ROI y periodo de recuperación), además de los entregables finales los cuales serán incluidos en la sección de anexos (CAD, planos, manual de operación).

Figura 10 *Imagen ilustrativa de la conchadora desarrollada.*



Fuente: Autor

3.1 Resultados teóricos

3.1.1 Transmisión y par disponible

- Potencia nominal motor: 2 hp ($\approx 1,49$ kW).
- Reducción: 1:50 $\rightarrow$ velocidad de salida ≈ 35 rpm.
- Par disponible teórico: ≈ 358 N·m.

Margen suficiente para vencer la resistencia viscosa de la mezcla y el rozamiento de rodillos/recipiente.

3.1.2 Selección de bandas y vida estimada

- Geometría adoptada: poleas en V de dos canales de diámetro 5" alineadas; distancia entre ejes ≈ 390 mm; sección de banda tipo A.
- Vida estimada de bandas > 28.000 h (criterio de diseño) $\rightarrow \approx 586$ ciclos de conchado de 48 h cada uno antes del reemplazo (bajo condiciones nominales).

Mantenimiento preventivo por condición (vibración, temperatura, tensión) o por horas.

3.1.3 Árbol de transmisión (dimensionamiento por fatiga)

- Criterios: $S_y \approx 415$ MPa, $S_{ut} \approx 655$ MPa, $K_t \approx 1,5$, $n_s = 2$.
- Diámetro mínimo calculado: $D \geq 32$ mm.
- Diámetro adoptado: 50 mm

Otorgando reserva de resistencia y rigidez.

3.1.4 Rodamientos y cargas

- Configuración: carga radial pura, baja velocidad, sin carga axial significativa.
- Reacciones por apoyo estimadas: $R_1 = R_2 \approx 1349$ N.
- Selección: SKF 6204 ($d=20$ mm, $C=13,5$ kN, $C_0=6,8$ kN)

Factor de seguridad elevado frente a la carga radial de diseño.

3.1.5 Estructura metálica (FEA)

- Carga global de cálculo ≈ 275 kg (estructura + componentes + materia prima).
- Deflexión máxima ≈ 3 mm

Conservando rigidez en puntos de anclaje de rodamientos y apoyos del recipiente.

3.1.6 Unión soldada (árbol–disco)

- Solicitud: torque $\approx 357,6 \text{ N}\cdot\text{m}$; unión perimetral sometida a torsión pura.
- Admisible de cálculo (E309L): criterio conservador con FS=2.
- Espesor teórico mínimo de filete $\approx 1,23 \text{ mm}$

Espesor adoptado 3 mm por práctica y norma (tolerancias, penetración, seguridad).

3.1.7 Especificaciones técnicas finales

- Capacidad de proceso objetivo: 50 kg/lote; tiempo objetivo $\leq 48 \text{ h}$.
- Materiales en contacto: AISI 304 (recipiente); rodillos de granito grado alimentario.
- Elementos de transmisión: eje AISI 4140, motor 2 hp, reductor 1:50, bandas/poleas V.
- Criterios higiénicos y de seguridad: alineados a NTE INEN 1672-2.

3.2 Resultados experimentales

3.2.1 Plan de ensayos y criterios de aceptación

a) Desempeño de conchado

- Capacidad por lote (kg): criterio de aceptación $\geq 50 \text{ kg}$.
- Tiempo total de proceso (h): criterio $\leq 48 \text{ h}$.
- Temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$): registrar perfil térmico por zonas y asegurar permanencia en rango seguro para conservar propiedades organolépticas.
- Consumo energético (kWh/lote): medición con pinza para analizar el consumo eléctrico del motor.

b) Operación y confiabilidad

- Vibración y ruido (dB): medición a 1 m
- Integridad de bandas y tensiones: inspección visual tras cada lote.

c) Higiene y mantenimiento

- Limpieza: tiempo total de limpieza (min)

3.2.2 Procedimientos de ensayo.

- 1) Ensayo de capacidad y tiempo: pesar 50 kg de masa de cacao al 7% de humedad, añadir 10 kg cada hora, ejecutar ciclo completo y tiempo total. Tomar mediciones cada hora las primeras 4 horas, luego cada 8 horas.
- 2) Ensayo de textura: tomar muestras cada 4 horas.
- 3) Ensayo energético: loguear potencia activa y energía acumulada para reportar kWh/lote y kWh/kg.
- 4) Ensayo térmico: medir temperatura de chocolate.
- 5) Ensayo de limpieza: medir tiempos, pasos y volumen de agua.

3.2.3 Valores experimentales

Tabla 3 *Desempeño por lote*

Medición	Masa (kg)	Tiempo(h)	Temperatura Promedio (°C)	Energía (kWh)
0	10	0	28	0.0
1	20	1	33	1
2	30	2	37	2.1
3	40	3	41	3.2
4	50	4	44	4.5
5	50	12	46	11
6	50	20	45	17.5
7	50	28	42	24
8	50	36	42	30
9	50	44	41	36.5

Nota. Valores medidos en el proceso de conchado. **Fuente:** Elaboración propia

La masa se estabiliza a la hora 4 en la que dejamos de verter más cacao, se puede observar como la temperatura va aumentando hasta llegar a los 46 grados, a partir de este punto deja de subir y baja hasta una temperatura de 41 grados centígrados, deja de aumentar debido a que la mezcla se vuelve menos viscosa y los rodillos no tienen tanta resistencia ni fricción al pasar por las partículas de cacao.

Tabla 4 *Operación y confiabilidad*

Métrica	Valor promedio	Criterio
Ruido (dB)	62	≤ 70
Temperatura de bandas	54	≤ 80

Nota. Valores medidos en el proceso de conchado. **Fuente:** Elaboración propia

Al inicio del proceso hay mayor ruido debido a que no hay chocolate que amortigüe el golpe de los rodillos contra el granito.

Tabla 5 *Higiene y limpieza*

Paso	Tiempo (min)	Observaciones
Pre-enjuague	10	Se retira el chocolate con agua a 40°C.
Lavado	20	Aplicación de detergente con solución clorada.
Enjuague	10	Agua potable a presión para retirar residuos de cloro.
Secado	15	Paños limpios.
Inspección	5	Verificación visual.

Nota. Proceso de limpieza de la conchadora. **Fuente:** Elaboración propia

En total el ciclo completo toma 60 minutos.

3.3 Análisis del costo y retorno de inversión

3.3.1 CAPEX (Inversión inicial)

Tabla 6 *Costos en materiales de partes.*

Materiales de partes	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Subtotal
Plancha ac. inox. A304 de 3mm	m ²	1,11	\$ 75,11	\$ 83,37
Perfil omega 100x47x1.5mm ac. inox. A304	m	0,6	\$ 35,00	\$ 21,00
Angulo 1 1/2"x1 1/2"x1/8" ac. inox. A304	m	0,46	\$ 5,56	\$ 2,56
Resorte ac. inox. A304 D.28mm L.120mm Calibre 3mm	U	4	\$ 7,50	\$ 30,00
Eje diámetro 1" ac. inox. A304	m	2,85	\$ 22,70	\$ 64,70
Eje diámetro 2" AISI 4140	m	0,42	\$ 89,24	\$ 37,48
Eje diámetro 1 1/2" AISI 4140	m	0,17	\$ 50,76	\$ 8,63

Varilla roscada A304 diámetro 3/8"	m	0,34	\$ 5,90	\$ 2,01
Tubo ac. inox. A304 diámetro 1 1/4" espesor 2mm	m	1,2	\$ 5,85	\$ 7,02
Granito de espesor 2cm	m ²	0,44	\$ 23,67	\$ 10,41
Motor frame 50 2hp 1750 rpm	U	1	\$ 345,00	\$ 345,00
Caja reductora ortogonal 50:1	U	1	\$ 800,00	\$ 800,00
Polea de 2 canales para banda en V diámetro 5"	U	2	\$ 3,34	\$ 6,67
Banda V A44	U	2	\$ 4,00	\$ 8,00
Rueda giratoria de poliuretano 5"	U	2	\$ 15,00	\$ 30,00
Rueda fijas de poliuretano 5"	U	2	\$ 11,29	\$ 22,58
Botonera ON-OFF Camsco 50A	U	1	\$ 4,90	\$ 4,90
Chumacera de bolas soporte de pie diámetro 50mm	U	2	\$ 48,08	\$ 96,16
Chumacera de bolas soporte de pie diámetro 20mm	U	2	\$ 26,83	\$ 53,66
Teflón diámetro 50mm	m	0,22	\$ 90,00	\$ 19,80
Angulo 1 1/2"x1 1/2"x1/8" A36	m	1,23	\$ 1,75	\$ 2,15
Cable 3x12	m	5	\$ 2,12	\$ 10,60
Tubo cuadrado 50mmx50mm espesor 2mm A36	m	12	\$ 3,60	\$ 43,16
Acoplamiento de garras para eje de 2"	U	1	\$ 100,00	\$ 100,00
Placa redonda diámetro 330mm espesor 15mm A36	U	1	\$ 20,00	\$ 20,00
Canal U 250x50x4mm A36	m	0,25	\$ 12,51	\$ 3,13
Acrílico transparente espesor 4mm	m ²	0,5	\$ 25,19	\$ 12,60
Perno galvanizado 1/4"X1"	U	20	\$ 0,07	\$ 1,33
Perno ac. inox. A304 1/4"X3"	U	4	\$ 0,47	\$ 1,88

Perno ac. inox. A304 1/2" x 2 1/2"	U	4	\$ 0,75	\$ 3,00
Perno galvanizado 1/2" x 2 1/2"	U	8	\$ 0,25	\$ 2,00
Arandela plana galvanizadas 1/4"	U	20	\$ 0,10	\$ 2,00
Arandela de presión galvanizadas 1/4"	U	20	\$ 0,01	\$ 0,24
Tuerca galvanizada 1/4"	U	20	\$ 0,02	\$ 0,36
Arandela plana ac. inox. A304 1/4"	U	4	\$ 0,15	\$ 0,60
Arandela de presión ac. inox. A304 1/4"	U	4	\$ 0,02	\$ 0,07
Tuerca ac. inox. A304 1/4"	U	4	\$ 0,05	\$ 0,19
Arandela plana ac. inox. A304 1/2"	U	8	\$ 0,30	\$ 2,40
Arandela de presión ac. inox. A304 1/2"	U	4	\$ 0,15	\$ 0,60
Tuerca ac. inox. A304 1/2"	U	4	\$ 0,20	\$ 0,80
Arandela plana galvanizadas 1/2"	U	8	\$ 0,12	\$ 0,94
Arandela de presión galvanizada 1/2"	U	8	\$ 0,03	\$ 0,26
Tuerca galvanizada 1/2"	U	8	\$ 0,09	\$ 0,72
Remache 1/8"	U	5	\$ 0,01	\$ 0,05
Placa 15cm x 15cmx3mm Ac. Negro	U	4	\$ 1,16	\$ 4,63
Total			\$	1.867,66

Nota. Los precios unitarios son obtenidos de materiales proformados y convertidos a nuestras unidades. **Fuente:** Elaboración propia

Tabla 7 *Costos de mano de obra y consumibles.*

Mano de obra y consumibles	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Subtotal
Pintura aerosol color plata	U	3	\$ 3,02	\$ 9,06
Aceite SAE40	L	1	\$ 5,22	\$ 5,22
Palillo de soldadura SMAW 6011 1/8"	kg	3	\$ 7,06	\$ 21,17
Palillo de soldadura SMAW 7015 1/8"	kg	2	\$ 12,65	\$ 25,30
Disco de corte para amoladora 4 1/2"	U	10	\$ 1,34	\$ 13,37
Disco de desbaste para amoladora 4 1/2"	U	2	\$ 1,34	\$ 2,68
Disco de zirconio para amoladora 4 1/2"	U	1	\$ 1,81	\$ 1,81
Sierra copa 1 1/4"	U	1	\$ 11,00	\$ 11,00
Lija p220 (230x280mm)	U	5	\$ 0,30	\$ 1,50
Silicona grado alimenticio	U	1	\$ 70,00	\$ 70,00
Broca para metal 3/8"	U	1	\$ 5,22	\$ 5,22
Broca para metal 1/4"	U	1	\$ 2,27	\$ 2,27
Broca para metal 1/8"	U	1	\$ 0,98	\$ 0,98
Broca para metal 1/2"	U	1	\$ 9,84	\$ 9,84
Adhesivo epóxico para cerámica o piedra	L	1	\$ 40,00	\$ 40,00
Sierra copa 2" diamantada	U	1	\$ 35,71	\$ 35,71
Disco de corte diamantado para amoladora 9"	U	1	\$ 6,54	\$ 6,54
Mano de obra por torneado de ejes y bocines	U	1	\$ 150,00	\$ 150,00
Mano de obra por perforaciones y cortes	U	1	\$ 80,00	\$ 80,00
Mano de obra por soldadura en acero negro	U	1	\$ 120,00	\$ 120,00
Mano de obra por soldadura en acero inoxidable	U	1	\$ 170,00	\$ 170,00
Mano de obra por elaboración de rodillos y base de granito	U	1	\$ 200,00	\$ 200,00

Mano de obra por pintura de estructuras bases	U	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Mano de obra por ensamble de maquina y puesta en marcha	U	1	\$ 100,00	\$ 100,00
			Total	\$ 1.131,67

Nota. Los precios unitarios son obtenidos de materiales proformados. **Fuente:** Elaboración propia

Sumando los costos de inversión inicial tenemos que la maquina es fabricada con un capital de \$2.999,33.

3.3.2 Parámetros económicos

En la actualidad, el precio del cacao por kilogramo presenta una alta volatilidad debido a que se define en el mercado de valores, experimentando constantes alzas y bajas según la oferta y la demanda. Con el fin de establecer valores de referencia para nuestro análisis económico, se entrevistó a un productor de cacao que elabora chocolate artesanalmente con una conchadora similar a la desarrollada en este proyecto.

De acuerdo con la información recopilada del mercado:

- El costo del quintal de cacao es de \$300.
- Se pierden 40 libras del quintal, al momento de descascarillar y en humedad al momento de secar el grano de cacao.
- En un lote de 120 libras ($\approx 54,4$ kg), se estima una pérdida de 2 libras ($\approx 0,9$ kg) durante la descarga, debido a la adherencia de producto en el tanque y los rodillos.
- La producción neta por lote es entonces de 118 libras ($\approx 53,5$ kg).
- La comercialización puede realizarse bajo dos modalidades:
 1. Venta por kilogramo de chocolate artesanal a 30 USD/kg.

2. Venta en tabletas utilizando moldes, con un rendimiento de 450 tabletas por lote, cada una vendida a 4 USD, lo que representa un ingreso potencial de 1.800 USD por lote en este esquema.

La máquina puede operar hasta 3 lotes por semana, lo que equivale a una producción de aproximadamente 150 kg/semana o bien 1.350 tabletas/semana en caso de optar por la modalidad de moldes.

Estos valores constituyen la base de referencia para el análisis de retorno de la inversión, considerando tanto la venta a granel (kg) como la venta de producto terminado (tabletas). En el comercio agrícola ecuatoriano, el cacao se comercializa en quintales, donde 1 quintal equivale a 100 libras o 45,36 kilogramos de grano en bruto. De acuerdo con la información recabada, de cada quintal de cacao (100 lb) se pierden aproximadamente 40 libras (18,14 kg) entre la eliminación de la cáscara y la reducción de humedad. En consecuencia, de un quintal inicialmente comprado se obtiene únicamente 60 libras (27,22 kg) de cacao seco y útil para ser procesado en la conchadora. Si consideramos que el precio de mercado del quintal de cacao seco es de \$300, el costo real por kilogramo utilizable se incrementa notablemente:

$$\frac{300 \text{ USD}}{27,22 \text{ kg}} \approx 11,02 \text{ USD/kg}$$

Dado que el diseño de la máquina está proyectado para procesar 50 kilogramos de cacao por lote, es necesario adquirir aproximadamente 1,84 quintales de grano en bruto. En la práctica, esto implica comprar 2 quintales, que representan un total de 90,72 kg brutos, de los cuales se obtendrán cerca de 54,44 kg de cacao útil.

3.3.3 OPEX (Costo operativo)

Tabla 8 *Costos operacionales.*

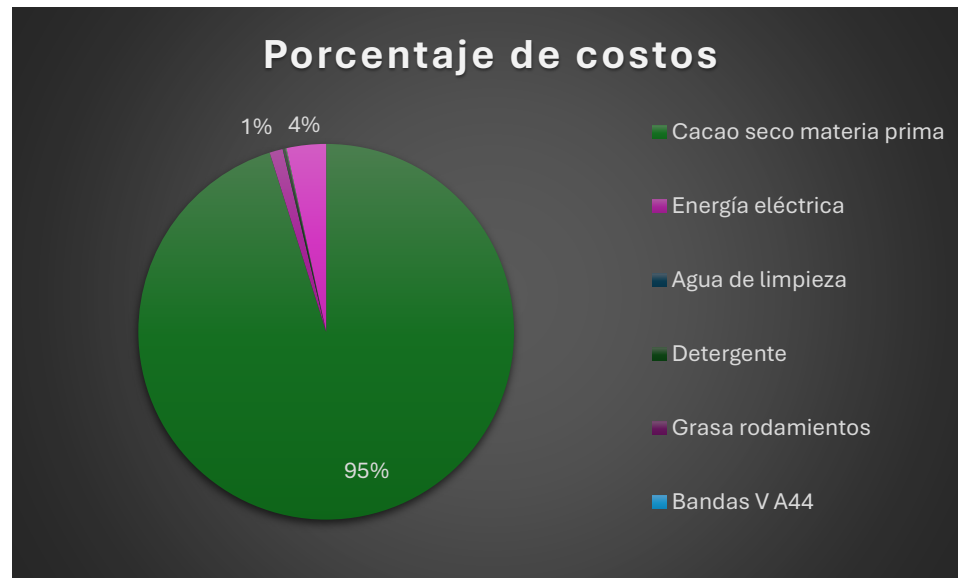
Concepto	Unidad	Consumo por lote	Costo por unidad	Subtotal
Cacao seco materia prima	kg	50,91	\$ 11,02	\$ 561,03
Energía eléctrica	kWh	74,8	\$ 0,09	\$ 6,93
Agua de limpieza	L	60	\$ 0,002	\$ 0,12
Detergente	g	50	\$ 0,02	\$ 1,00
Grasa rodamientos	mL	20	\$ 0,02	\$ 0,40
Bandas V A44	prorratio lote	0,002	\$ 8,00	\$ 0,01
Chumaceras 2" (vida 20000h)	prorratio lote	0,002	\$ 180,00	\$ 0,43
Mano de obra operativa (1 persona por 8 horas efectivas/48h de ciclo)	h	8	\$ 2,50	\$ 20,00
Total				\$ 589,92

Nota. Los consumos fueron medidos experimentalmente y obtenidos con datos de cálculos.

Fuente: Elaboración propia

El costo operativo de la maquina es bajo siendo en total \$28,90 si ignoramos la materia prima de la tabla. Se están obviando costos de procesos como el descascarillado, fermentado, tostado, molienda, logística, lugar de operaciones, empaques de producto y gastos de certificaciones. Podemos obtener un precio equilibrio del chocolate para que el conchado con esta máquina sea redituable, este valor mínimo tiene que ser \$11,73/kg. La figura 16 ilustra los porcentajes del OPEX que corresponden a cada coste operativo.

Figura 11 Gráfico circular de porcentajes de costes operativos correspondientes.



Fuente: Autor

3.3.4 Indicadores

Venta por kilogramo

- Producción neta: 50kg
- Precio de venta: 30 USD/kg
- Ingreso bruto por lote: 1.500 USD
- Margen neto por lote: OPEX – ingreso bruto por lote = 913,49 USD

Indicadores unitarios

- Costo de producción por kg:

$$\frac{\text{Costo operativo OPEX (USD)}}{\text{Chocolate producido (kg)}} = \frac{\$589,93}{50 \text{ kg}} = 11,8 \text{ USD/kg}$$

- Margen unitario:

$$\text{Precio de venta} \left(\frac{\text{USD}}{\text{kg}} \right) - \text{Costo de producción} \left(\frac{\text{USD}}{\text{kg}} \right) = 30 - 11,73 = \$18,2$$

Escalamiento anual

Es posible tener una producción de 2 lotes por semana, usando como referencia días hábiles de lunes a viernes anualmente para la producción de chocolate tendríamos aproximadamente 104 lotes producidos anualmente o 5.200 kg de chocolate producidos anualmente, en base a un supuesto escenario optimista en el que se mantiene el precio por kilogramo de chocolate tenemos los siguientes resultados:

- Ingreso anual:

$$\text{Ingreso anual (USD)} = \text{Chocolate producido (kg)} * \text{Precio de venta} \left(\frac{\text{USD}}{\text{kg}} \right)$$

$$5200 * 30 = \$156.000$$

- Costo anual:

$$\text{Costo anual (USD)} = \text{Lotes anuales} * \text{Costo operativo OPEX (USD)}$$

$$104 * \$589,93 = \$61.352,72$$

- Margen anual:

$$\text{Margen anual (USD)} = \text{Ingreso anual (USD)} - \text{Costo anual (USD)}$$

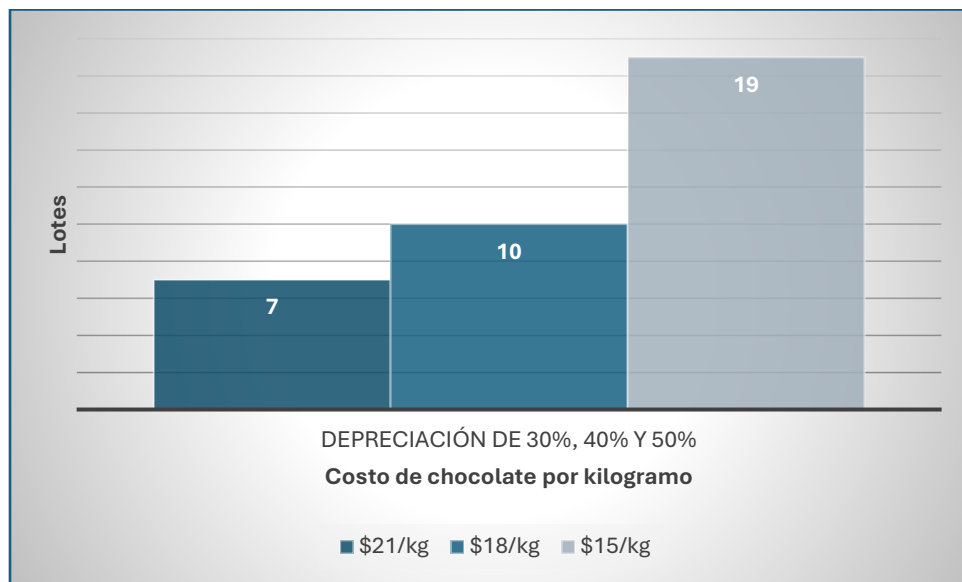
$$\text{Margen anual (USD)} = \$156.000 - \$61.352,72 = \$88.647,28$$

Restando el CAPEX tendríamos un margen de \$88.647,28.¿

Retorno de inversión (Payback)

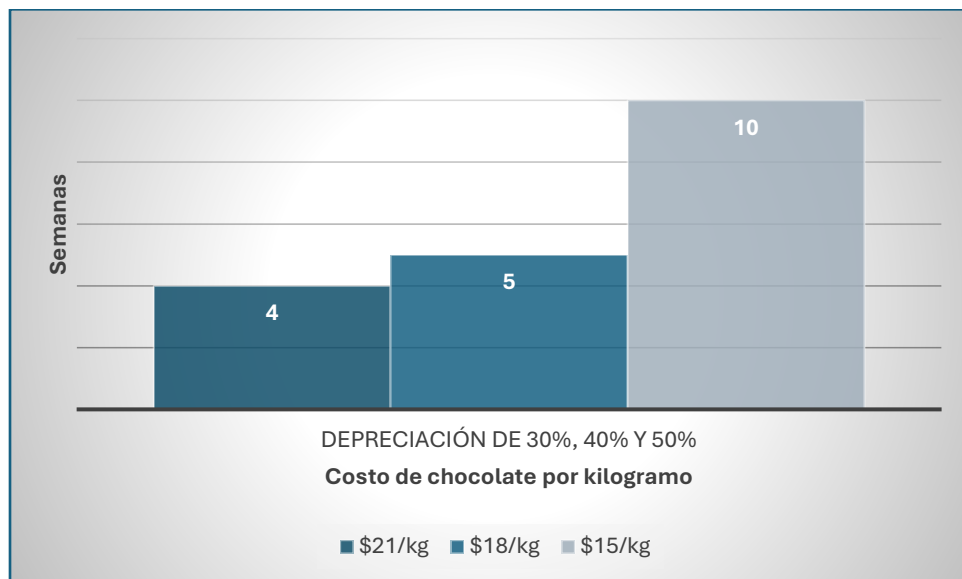
Planteando tres escenarios pesimistas con una reducción del precio de venta del chocolate por kilogramo del 30%, 40% y 50% podemos ilustrar el número de lotes en el que se pagaría la inversión en la figura 15 y el número de semanas la figura 16 suponiendo una producción de 2 lotes por semana.

Figura 12 Gráfico de barras del número de lotes para el retorno de inversión del proyecto.



Fuente: Autor

Figura 13 Gráfico de barras del número de semanas para el retorno de inversión del proyecto.



Fuente: Autor

En el peor de los casos la inversión inicial estaría retornando en 10 semanas y el precio de venta seguiría duplicando al precio de USD 7,4 por kg de venta del cacao en grano, demostrando ser un negocio redituable.

Capítulo 4

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Se logró diseñar y construir una conchadora de chocolate con capacidad de 50 kg netos por lote en un tiempo inferior a 48 horas, con un coste asequible para los productores cacaoteros. El equipo fue fabricado con materiales de grado alimenticio (AISI 304 y granito) y componentes mecánicos de transmisión que cumplen los criterios de resistencia estructural y normativa sanitaria aplicable.

Los cálculos de par transmitido, selección de bandas y poleas, verificación de rodamientos, análisis de soldaduras y simulación de la estructura demostraron que los elementos mecánicos fueron dimensionados con factores de seguridad conservadores. La deflexión estructural máxima (≈ 3 mm) y la vida útil estimada de bandas (> 28.000 h) ratifican la confiabilidad del diseño.

Las pruebas en condiciones reales confirmaron la capacidad nominal de 50 kg, un consumo energético acumulado de 74,8 kWh por ciclo teniendo así, una velocidad angular de 35 rpm durante la operación. El protocolo de higiene permitió completar la limpieza en aproximadamente 60 minutos, garantizando condiciones de inocuidad.

El análisis financiero evidenció un CAPEX de USD 2.999,33 y un OPEX de USD 589,93 por lote, con un costo de producción de 11,73 USD/kg frente a un escenario pesimista con un precio de venta de 15 USD/kg se genera un payback de apenas 19 lotes (~ 10 semanas), lo que demuestra la alta rentabilidad del proyecto incluso con una depreciación del 50% del valor del chocolate.

El prototipo alcanzó un nivel de TRL 7, al ser probado en condiciones relevantes y cumplir con su capacidad operativa. Se encuentra en condiciones de ser escalado a TRL 8–9 mediante

validaciones extendidas en comunidades productoras y la documentación formal de manuales técnicos y de operación.

4.2 Recomendaciones

Incorporar mediciones sistemáticas de granulometría (d90) durante el proceso para garantizar la textura final ($<25\ \mu\text{m}$) y correlacionar el consumo energético con la calidad del producto.

Mantener la temperatura de las bandas por debajo de $70\ ^\circ\text{C}$ y realizar monitoreo de vibración y ruido en rodamientos de forma digital mediante sensores y electrónica de automatización.

Formalizar un manual de limpieza y desinfección bajo certificación NTE INEN 1672-2, con registros de cada lote procesado. Esto asegurará la trazabilidad e inocuidad del producto, requisito indispensable para comercialización en mercados formales.

Utilizar el análisis de venta por kilogramo como escenario base y aplicar el modelo de venta en tabletas como estrategia de diversificación de ingresos, especialmente en ferias y canales gourmet, dado su mayor margen unitario.

Antes de desarrollar versiones de mayor capacidad ($>50\ \text{kg}$), consolidar el desempeño técnico y económico del prototipo actual mediante certificaciones por agencias oficiales encargadas de la construcción de equipos de industria alimentaria. Una vez validado, estandarizar planos, listas de materiales y manuales, de modo que pueda ser replicado por talleres locales.

Referencias

- ANECACAO. (2021). Historia del cacao. Asociación Nacional de Exportadores de Cacao del Ecuador. <https://anecacao.com/cacao-en-el-ecuador/historia-del-cacao/>
- Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., & Ryan, A. (2008). Flavor Formation and Character in Cocoa and Chocolate: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(7), 740–757. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.569725>
- Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario (Agrocalidad). (2021). Informe Técnico de Exportación de Cacao 2021. Agrocalidad. <https://www.agrocalidad.gob.ec/>
- Alwang, J., Barrera, V. H., & Vásquez, E. (2019). Determinants of certified organic cocoa production: Evidence from the province of Guayas, Ecuador. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/331717059>
- Banco Central del Ecuador. (2023). Boletín de comercio exterior – Exportaciones no petroleras por producto. https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Estadisticas/sectorExterno/Comercio/ce_producto.htm
- Beckett, S. T. (2017). *Industrial Chocolate Manufacture and Use* (5th ed.). Wiley-Blackwell.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2016). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (10ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Delani Trading. (s.f.). Molino refinador-conchador Monty 40. Recuperado el 23 de junio de 2025, de <https://delanitrading.com/producto/molino-refinador-conchador-monty-40/>
- Diamond Custom Machines. (s.f.). DCM Melanger 50. Recuperado el 23 de junio de 2025, de <https://www.melangers.com/pages/dcm-melanger-50>
- Engel, D. W., Dalton, A. C., Anderson, K., Sivaramakrishnan, C., & Lansing, C. (2012). Development of technology readiness level (TRL) metrics and risk measures (PNNL-

21737). Pacific Northwest National Laboratory.

<https://www.osti.gov/servlets/purl/1171348>

Erazo Portilla, C. M., Robles Quiñonez, D. G., Cifuentes Quiñonez, L. M., & Saquisari Armijos, D. L. (2021). Auditoría integral en inventarios y costos de ventas en negocios del cacao ecuatoriano. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, 27(Especial 3), 391–403. Universidad del Zulia. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/rcs/article/view/36089>

ESPAC-INEC. Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua. Acceso. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/2023/Principales_resultados_ESPAC_2023.pdf.

FAO. (2020). El mercado del cacao y su impacto en los pequeños agricultores. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/ecuador/noticias/detail-events/en/c/1295417/#:~:text=Este%20tipo%20de%20producci%C3%B3n%20es,geogr%C3%A1ficas%20y%20clim%C3%A1ticas%20del%20pa%C3%ADs>

INEC. (2023). Estadísticas de comercio exterior del cacao ecuatoriano. Instituto Nacional de Estadística y Censos. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2021). NTE INEN 176: Cacao en grano. Requisitos de calidad (Sexta revisión). Quito, Ecuador: INEN.

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2023). Estadísticas de comercio exterior del cacao ecuatoriano. INEC. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>

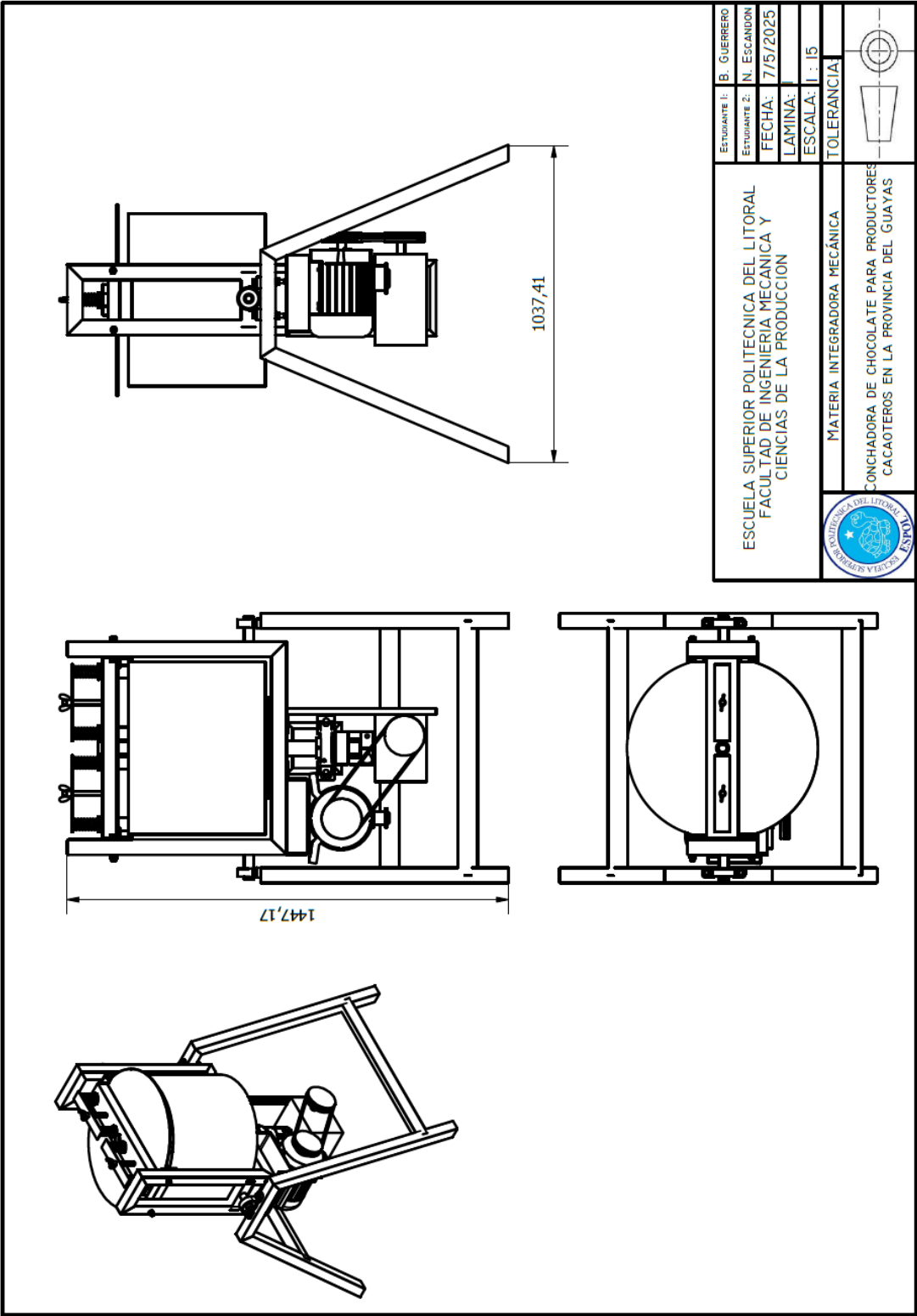
International Cocoa Organization. (2025). *Statistics*. ICCO. Recuperado el 02 de septiembre del 2025, de <https://www.icco.org/statistics>

- International Organization for Standardization. (1985). ISO 5807:1985 Information processing — Documentation symbols and conventions for data, program and system flowcharts, program network charts and system resources charts. Geneva: ISO.
- Lanaud, C., Loor Solórzano, R., Zarrillo, S., & Valdez, F. (2016). Origen de la domesticación del cacao y su uso temprano en Ecuador.
- Mankins, J. C. (2004). Technology Readiness Levels: A White Paper. NASA, Office of Space Access and Technology.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2023). *Estado del cultivo de cacao en el Ecuador 2023* [Boletín situacional]. Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria. Recuperado el 2 de septiembre de 2025, de https://sipa.agricultura.gob.ec/boletines/situacionales/2023/boletin_situacional_cacao_2023.pdf
- Ministerio de Industrias y Productividad del Ecuador. (2025). Visión Agroindustrial 2025: Estrategia de desarrollo para el sector agroindustrial ecuatoriano. Quito, Ecuador. <https://www.produccion.gob.ec>
- Mott, Robert L. (2013). Machine Elements in Mechanical Design (5th ed.). Pearson.
- NJ Machinery. (s. f.). Food Processing Machinery Manufacturer. Recuperado el 23 de junio de 2025, de <https://www.njmachinery.com>
- Naciones Unidas. (2024). Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Newnan, D. G., Eschenbach, T. G., & Lavelle, J. P. (2012). Engineering Economic Analysis (11th ed.). Oxford University Press.
- Norton, R. L. (2011). Diseño de máquinas: un enfoque integrado (4.^a ed.). Pearson Educación.

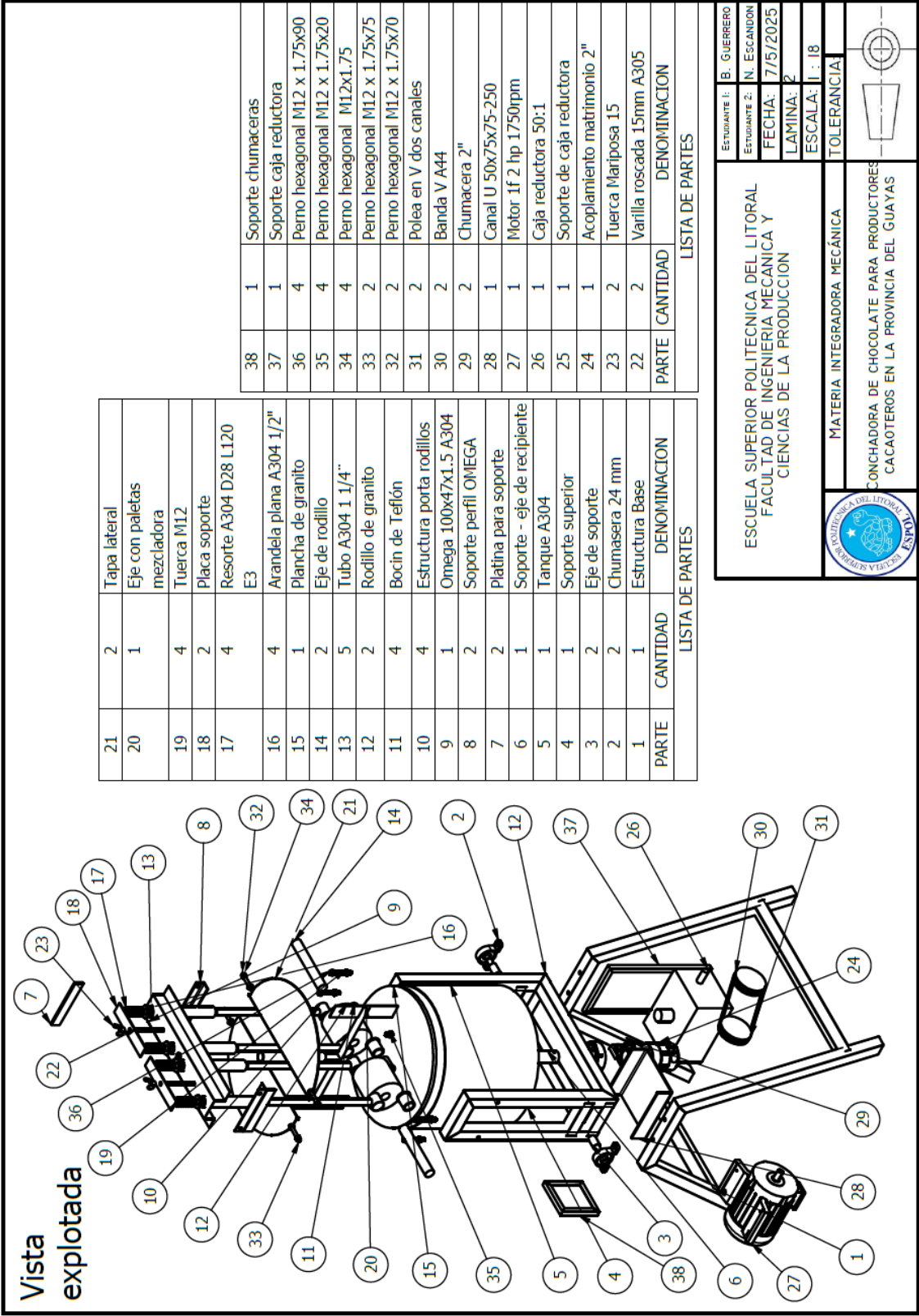
- Overmade. (2020). Refiners [Imagen]. Overmade.
https://www.overmade.it/media/plg_jspeed/cache/images/Refiners_August_2020_49888db3ae6bbd1e176db2a13b61c481b96b6f28_4x.webp
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). Engineering design: A systematic approach (3rd ed.). Springer.
- Productos Taiwanesees. (s. f.). 3 beneficios de refinar cacao con rueda de granito natural. Recuperado el 23 de junio de 2025, de <https://productostaiwaneses.com/3-beneficios-de-refinar-cacao-con-rueda-de-granito-natuWral>
- Squicciarini, M. P., Swinnen, J., & otros. (2021). The social impacts of cocoa production: A systematic review. *Agriculture and Human Values*, 38, 1083–1102.
<https://doi.org/10.1007/s10460-020-10189-2>
- Supermaxi. (s. f.). *Chocolate orgánico raw con maca Pacari tableta 50 g*. Supermaxi. Recuperado el 02 de septiembre del 2025, de <https://www.supermaxi.com/producto/chocolate-organico-raw-con-maca-pacari-tableta>
- Villacis, A., Barrera, V., Alwang, J., Caicedo, C., & Quiroz, J. (2022). Strategies to strengthen Ecuador's high-value cacao value chain (IDB Technical Note No. 2303). Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0004107>
- World Population Review. (2025). Cocoa producing countries 2025. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved May 17, 2025, from <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/cocoa-producing-countries>

Apéndices

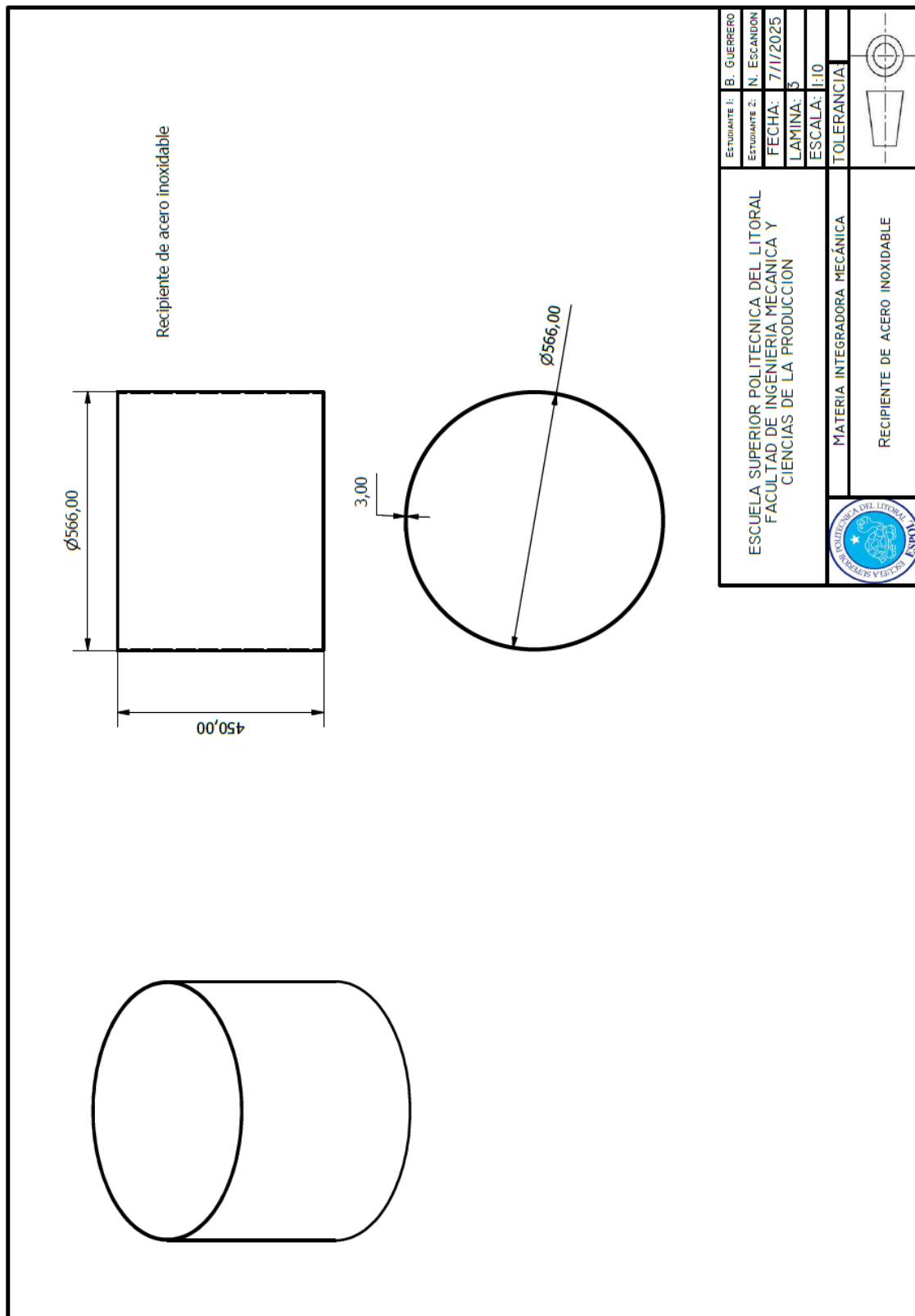
Plano 1 Conchadora de chocolate para productores cacaoteros de la provincia del Guayas



Plano 2 Vista explotada y lista de partes de la conchadora de chocolate

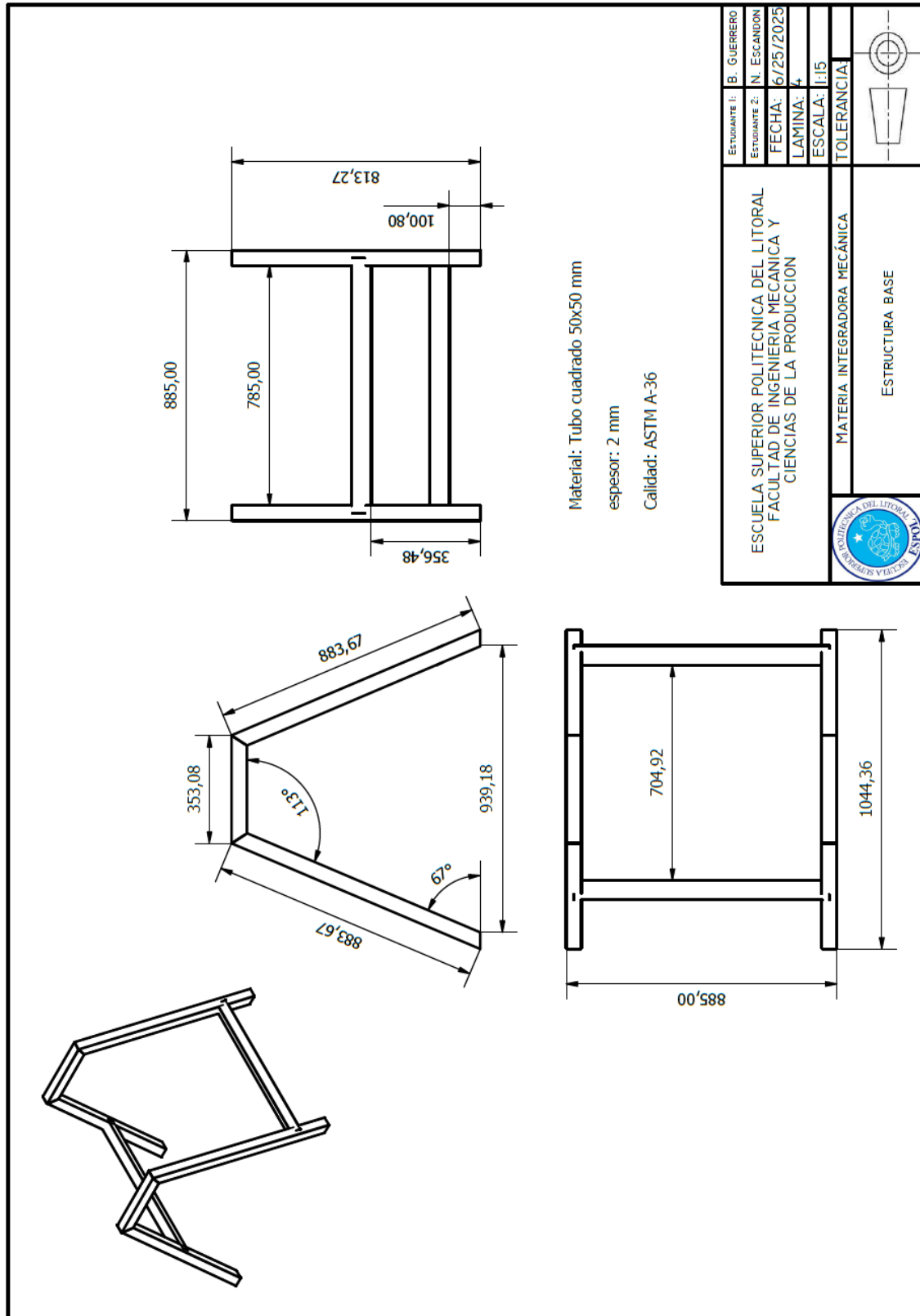


Plano 3 Recipiente de acero inoxidable

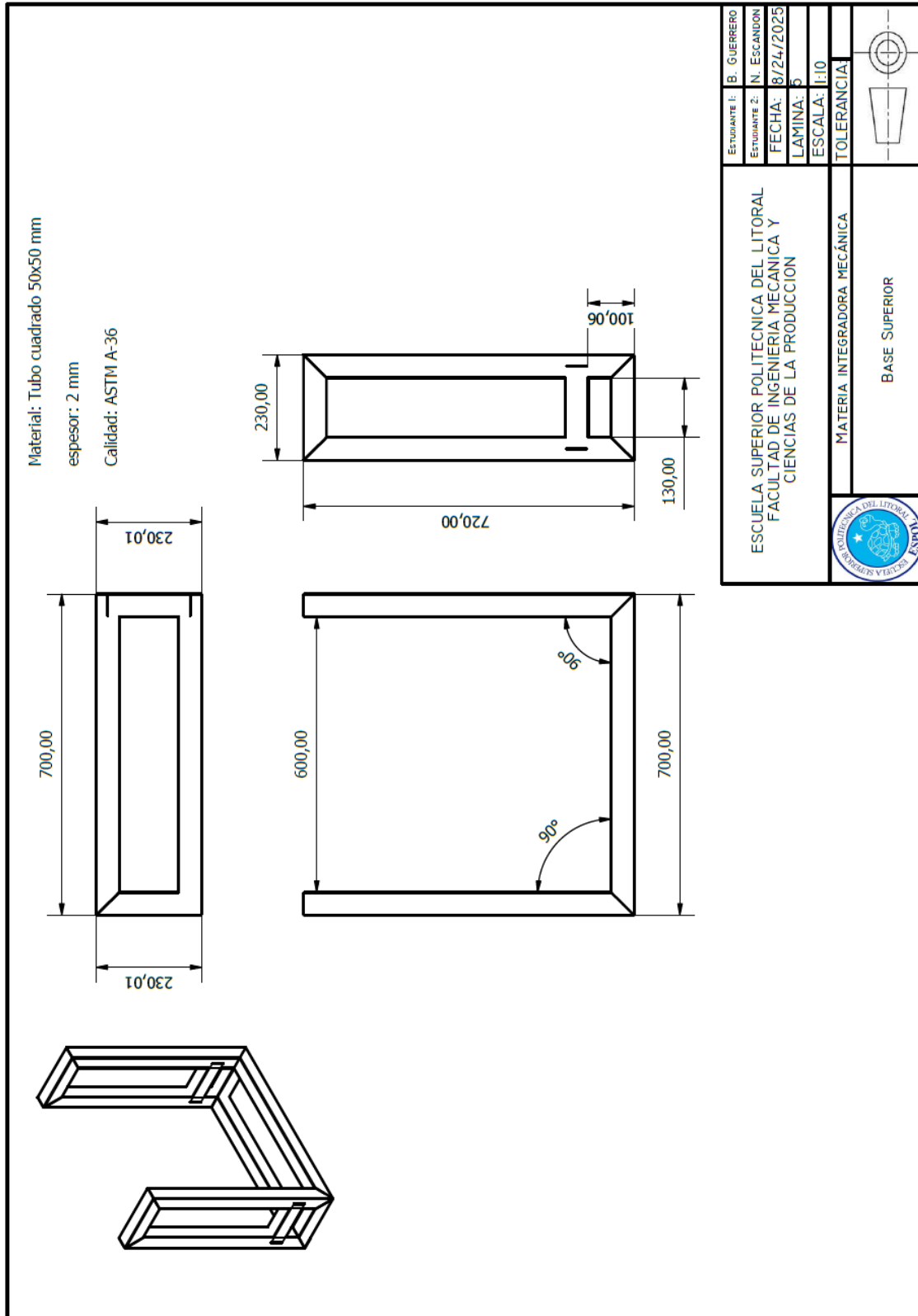


ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	ESTUDIANTE 1:	B. GUERRERO
	ESTUDIANTE 2:	N. ESCANDON
	FECHA:	7/1/2025
	LÁMINA:	5
	ESCALA:	1:10
	TOLERANCIA:	
	MATERIA INTEGRADORA MECÁNICA	
	RECIPIENTE DE ACERO INOXIDABLE	

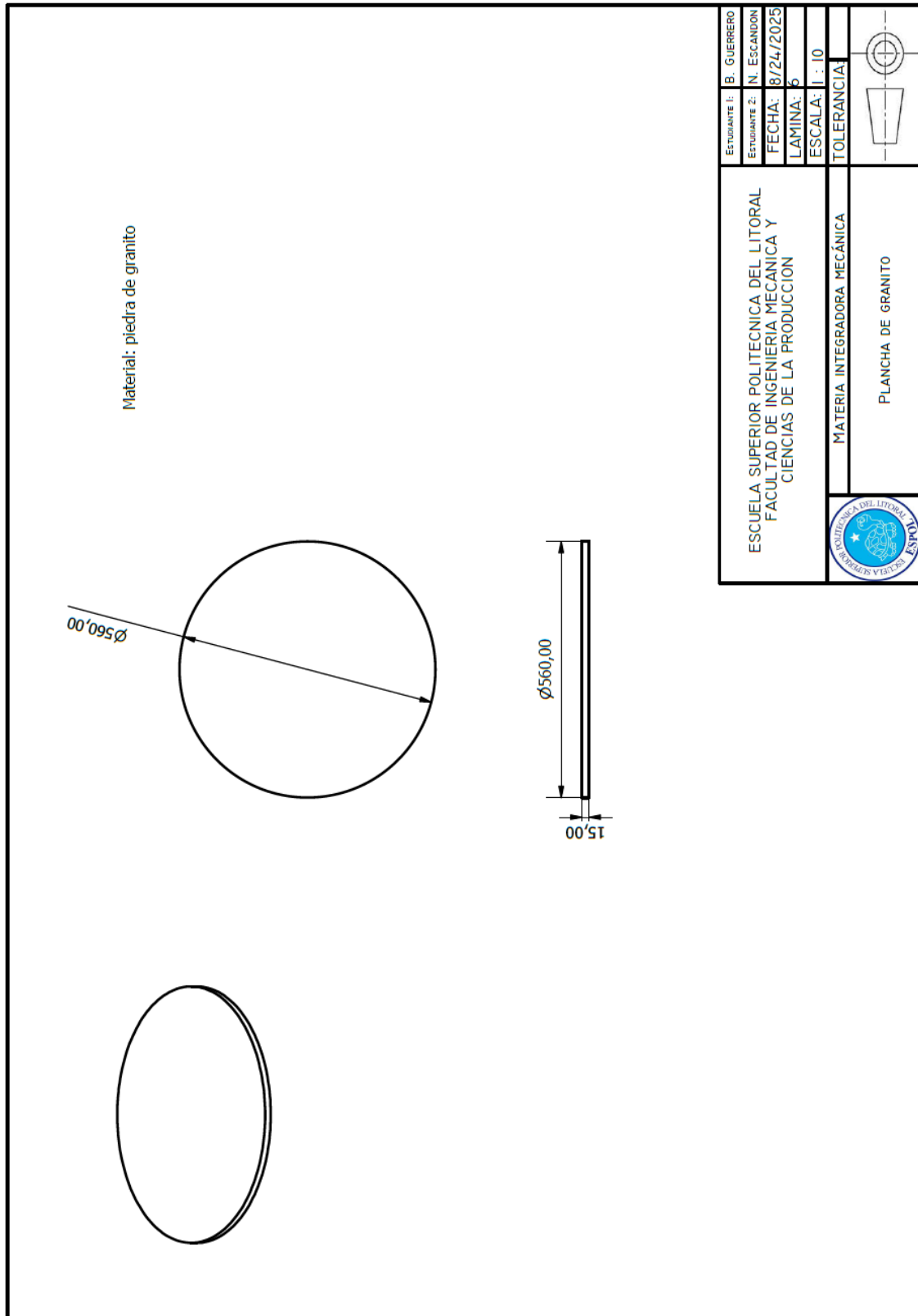
Plano 4 Estructura base/bastidor



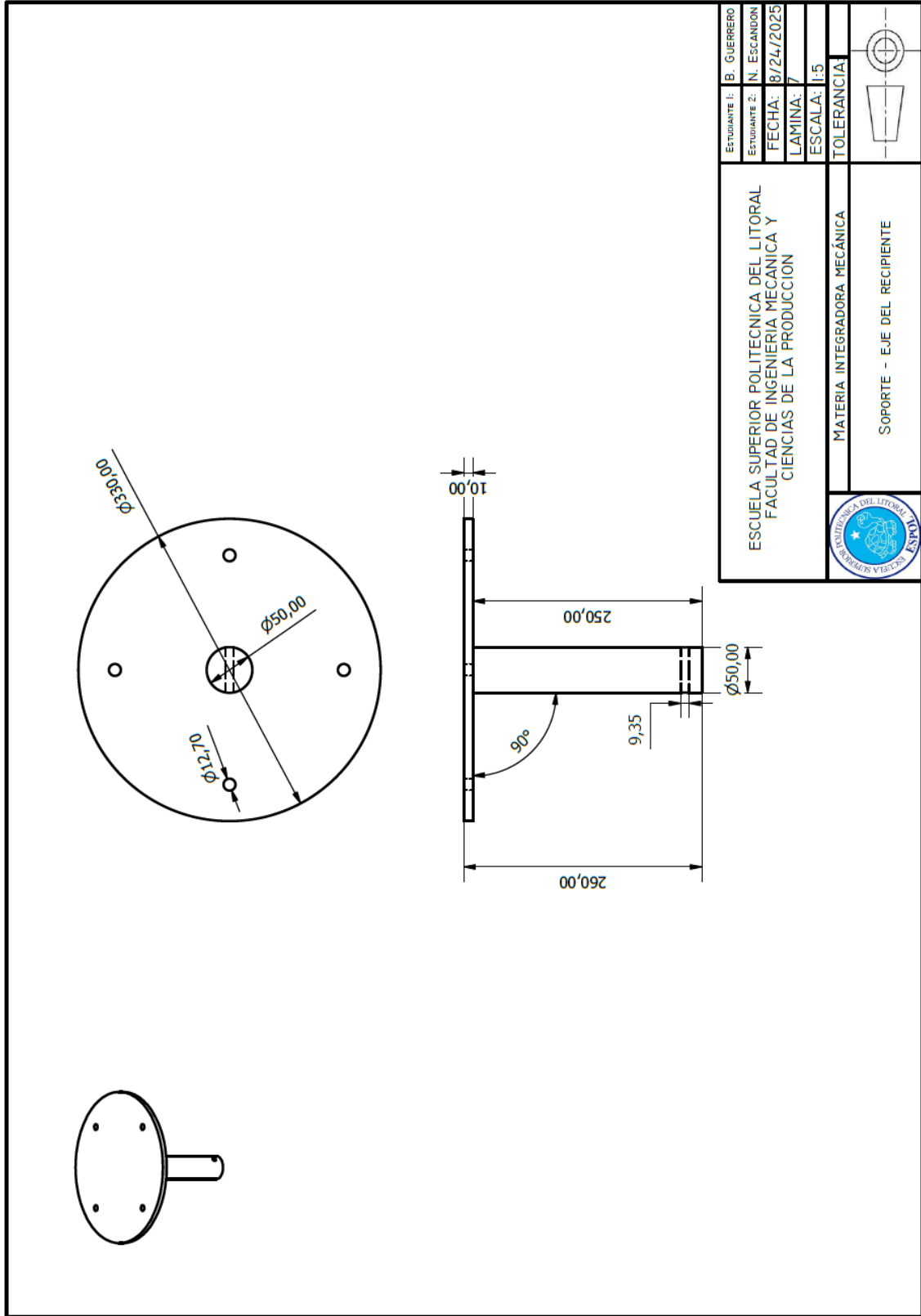
Plano 5 Base superior



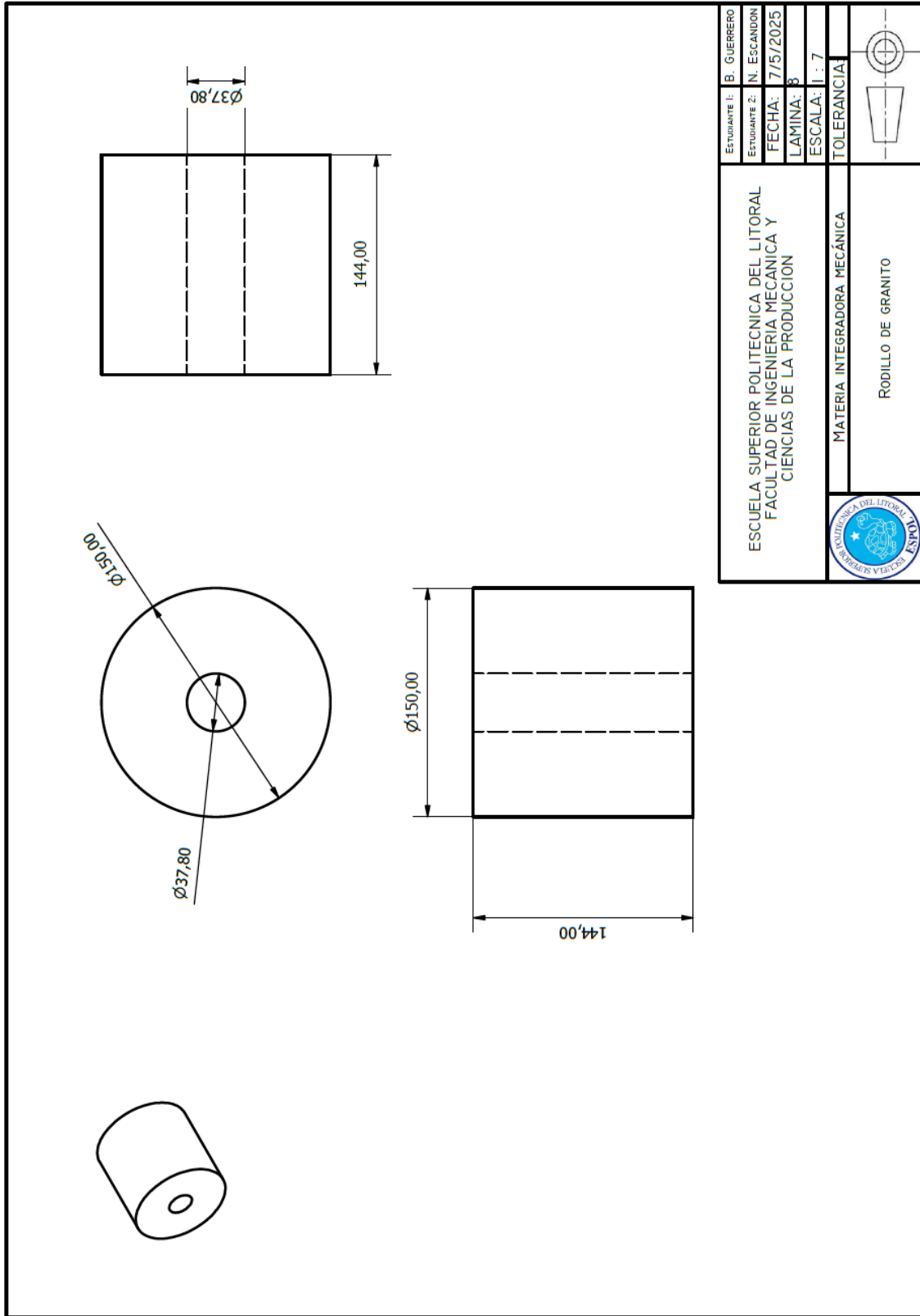
Plano 6 Plancha de granito



Plano 7 Soporte-Eje del recipiente

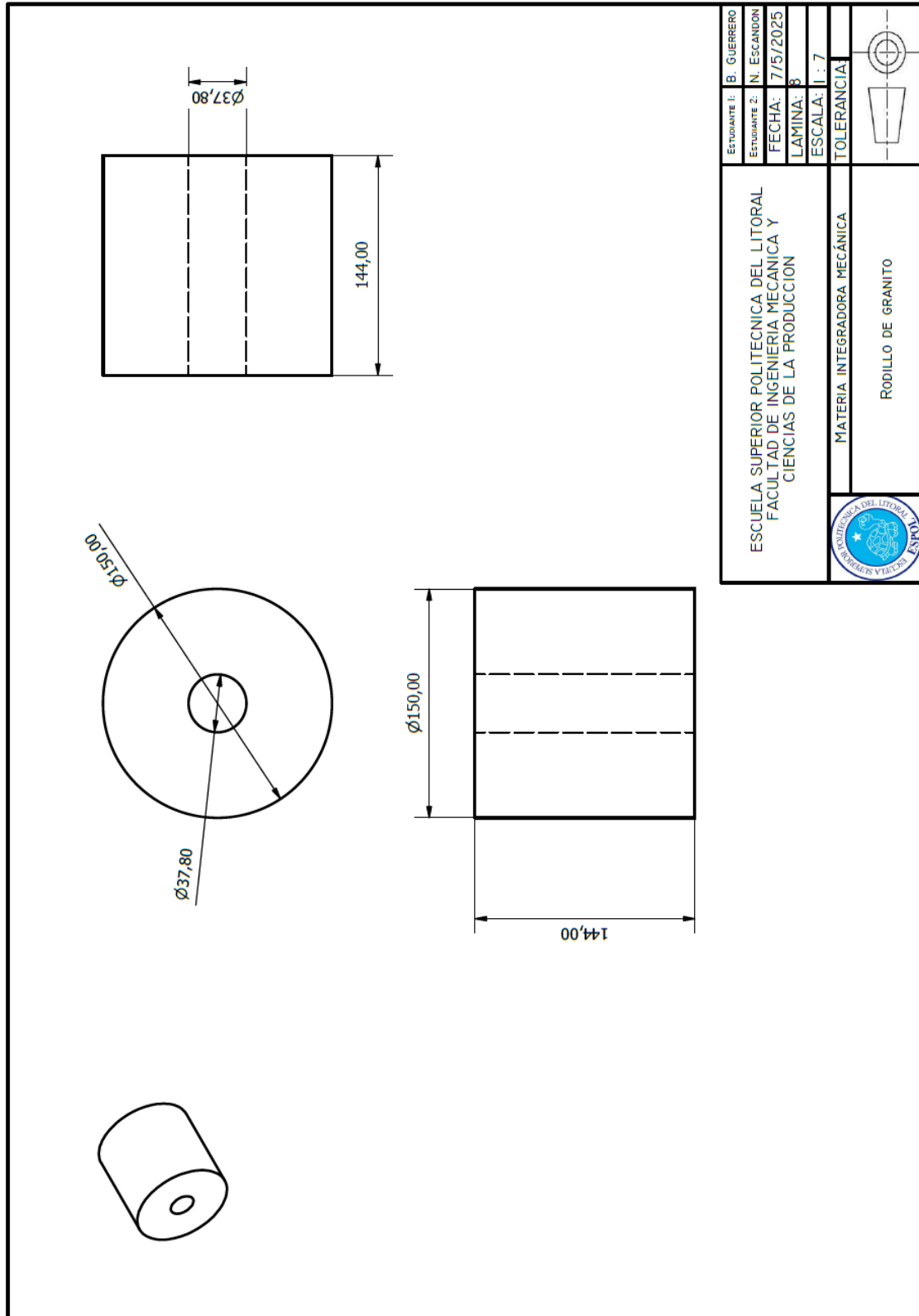


Plano 8 Rodillo de granito

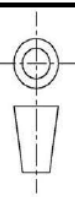


ESTUDIANTE 1:	B. GUERRERO
ESTUDIANTE 2:	N. ESCANDON
FECHA:	7/5/2025
LAMINA:	8
ESCALA:	1: 7
TOLERANCIA:	
 ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION	
MATERIA INTEGRADORA MECÁNICA	
RODILLO DE GRANITO	
	

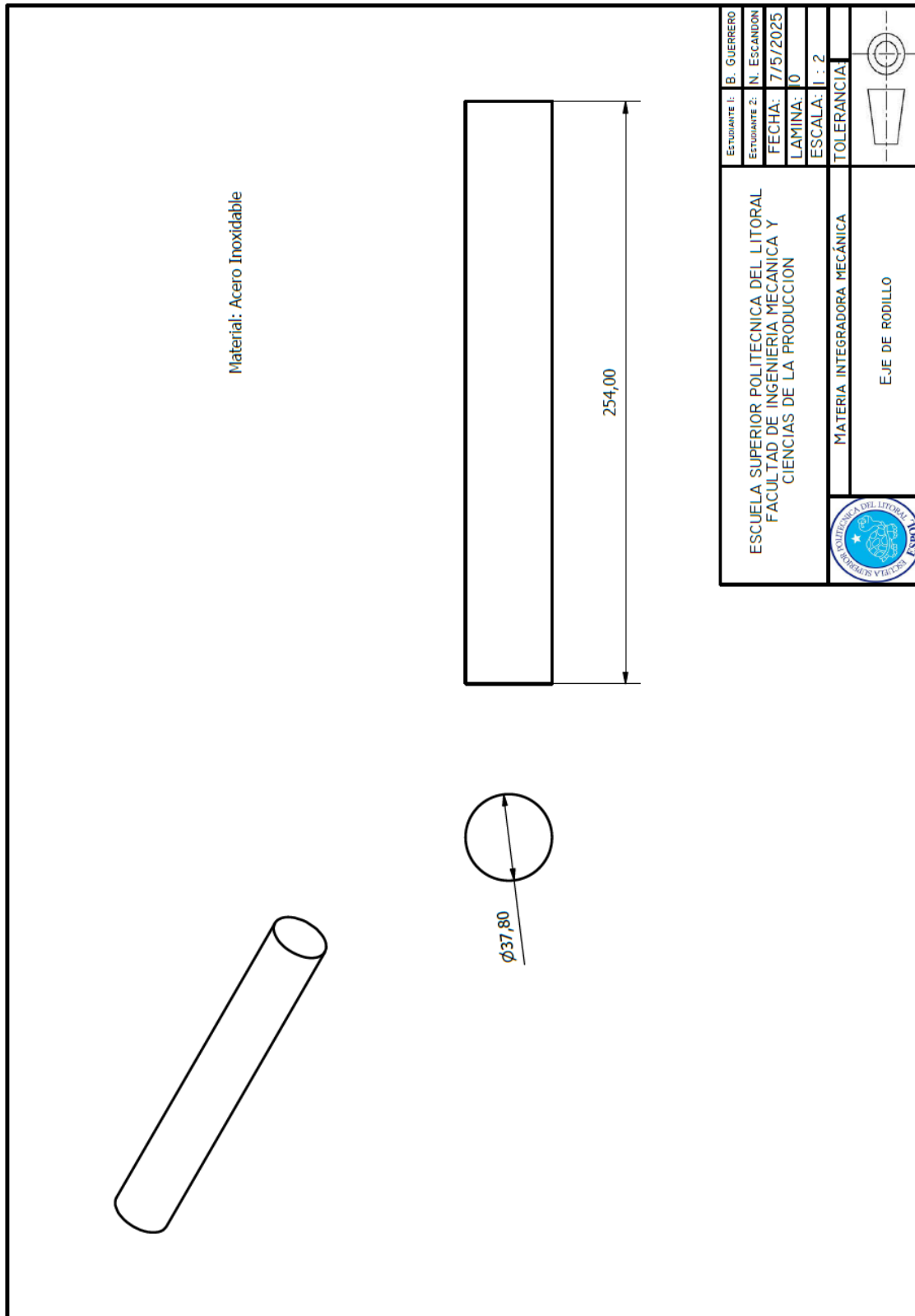
Plano 9 Bocín de teflón



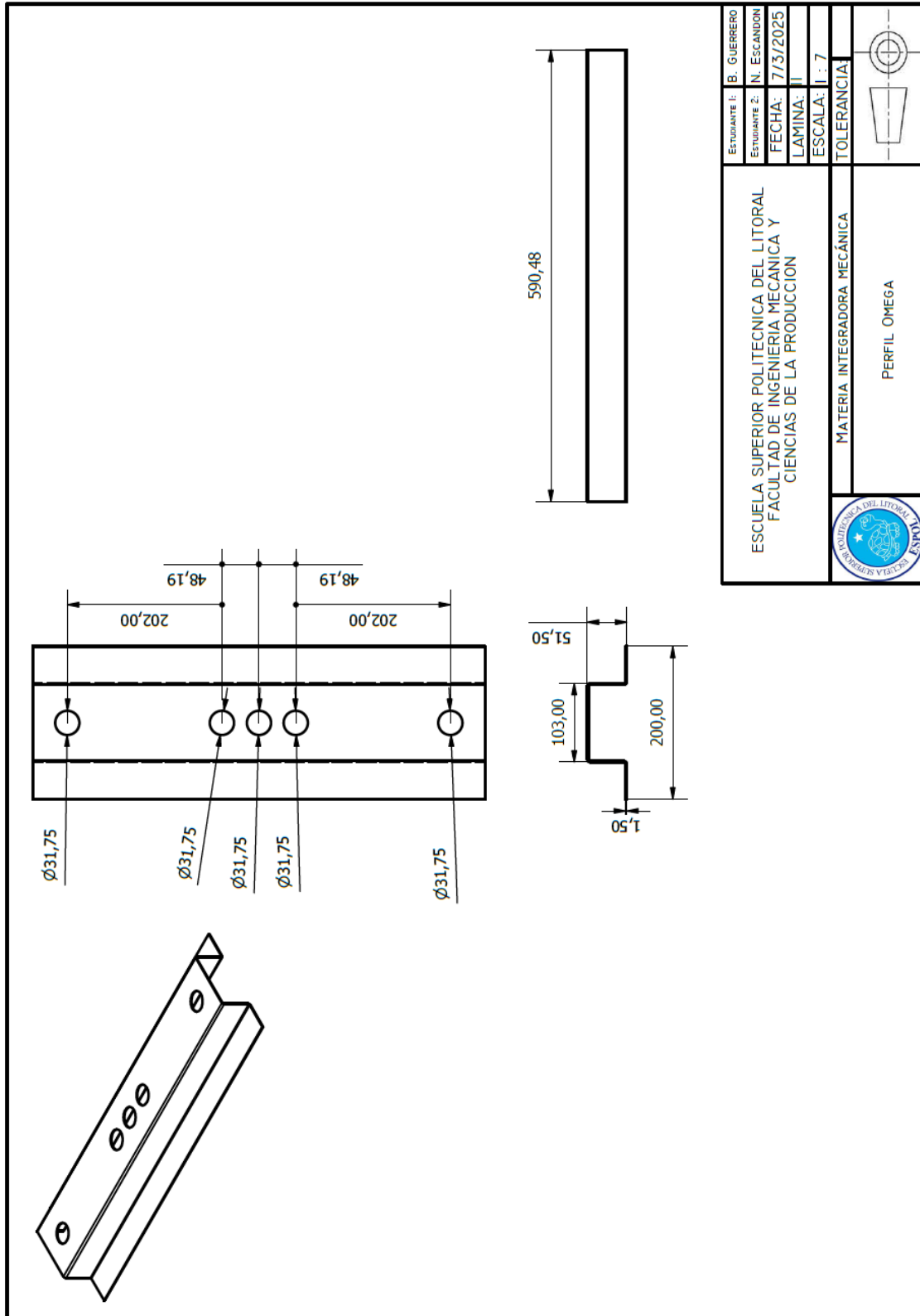
ESTUDIANTE 1:	B. GUERRERO
ESTUDIANTE 2:	N. ESCANDON
FECHA:	7/5/2025
LAMINA:	8
ESCALA:	1 : 7
TOLERANCIA:	
MATERIA INTEGRADORA MECÁNICA	
RODILLO DE GRANITO	



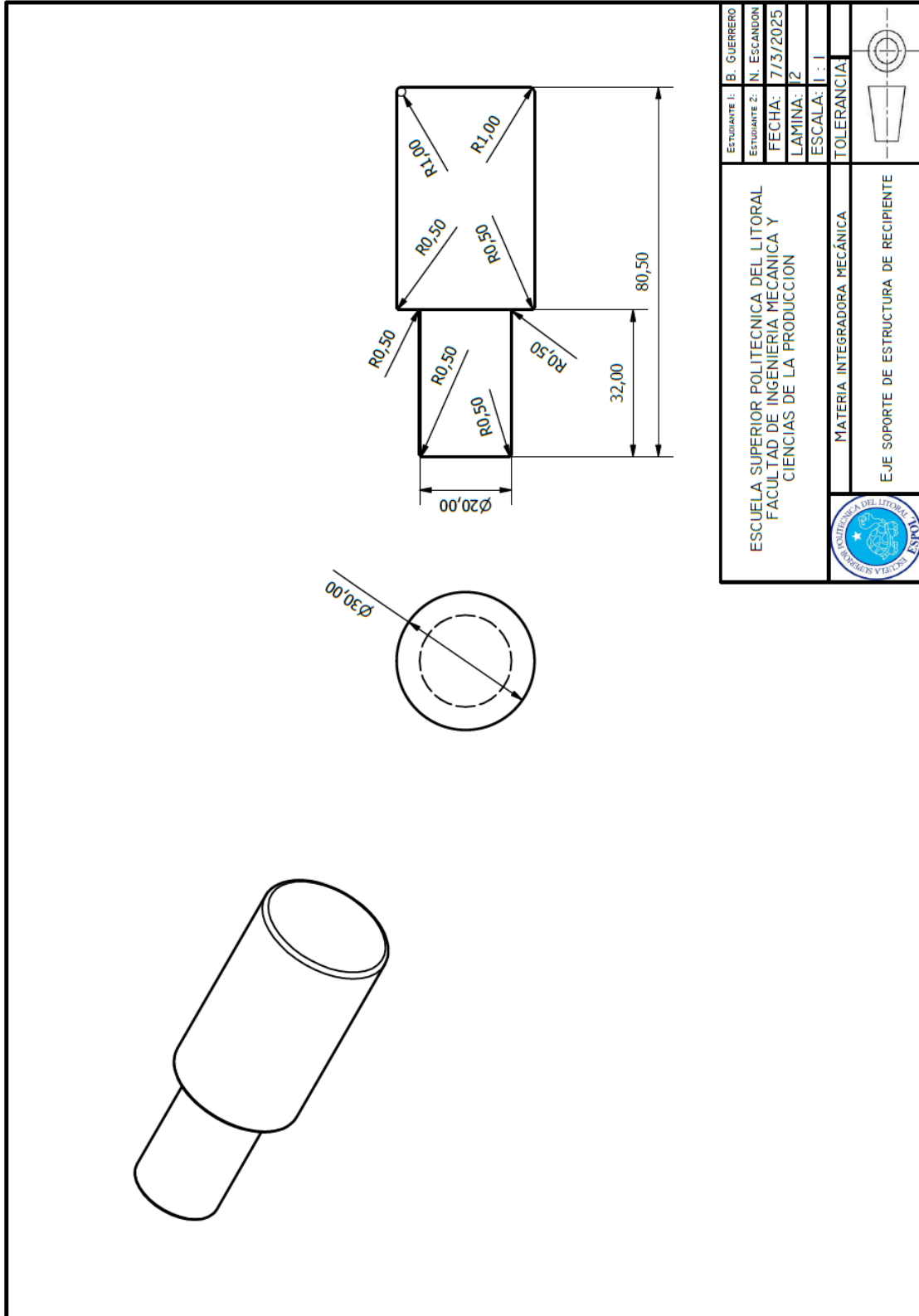
Plano 10 Eje de rodillo



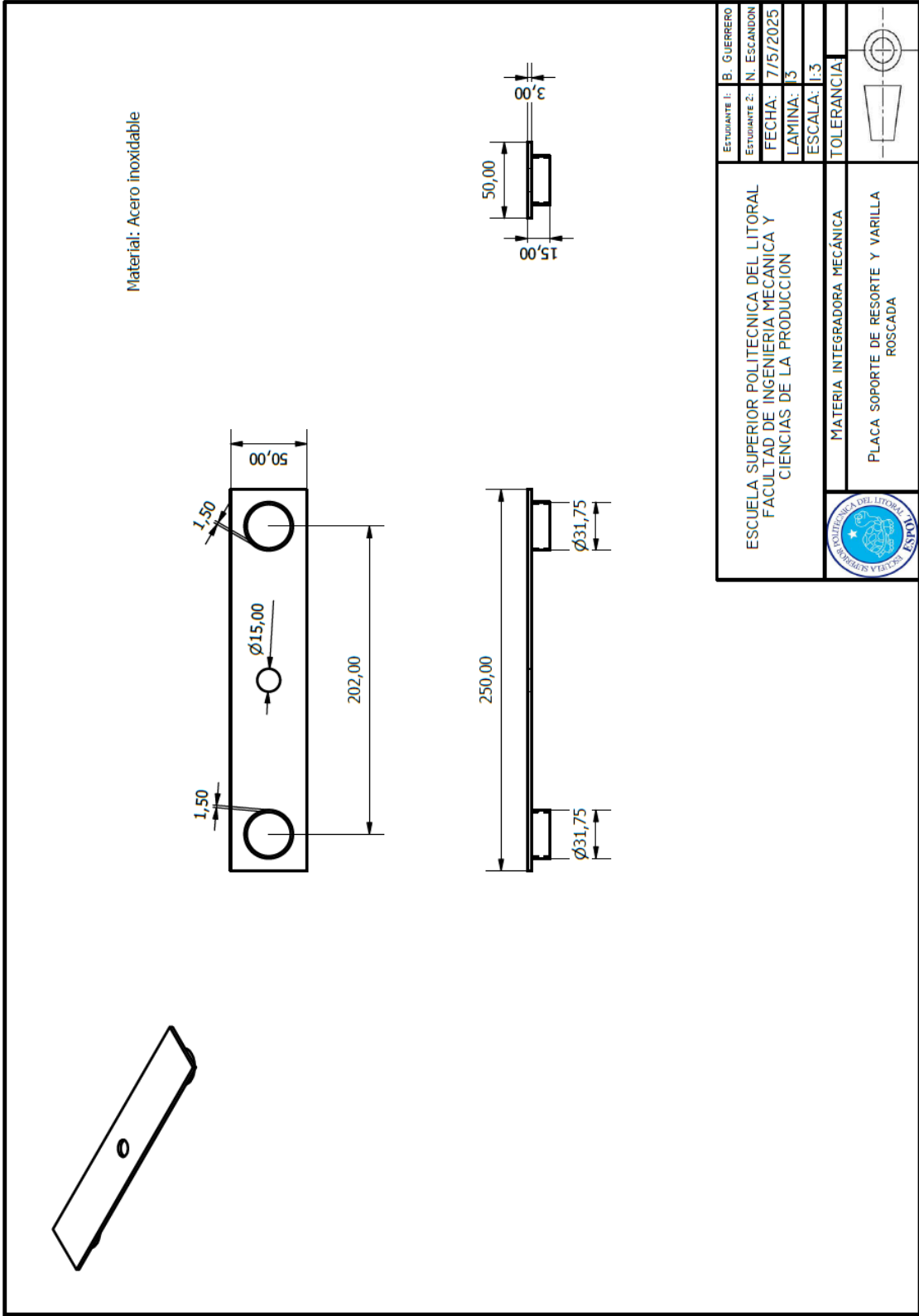
Plano 11 Perfil Omega para tapa



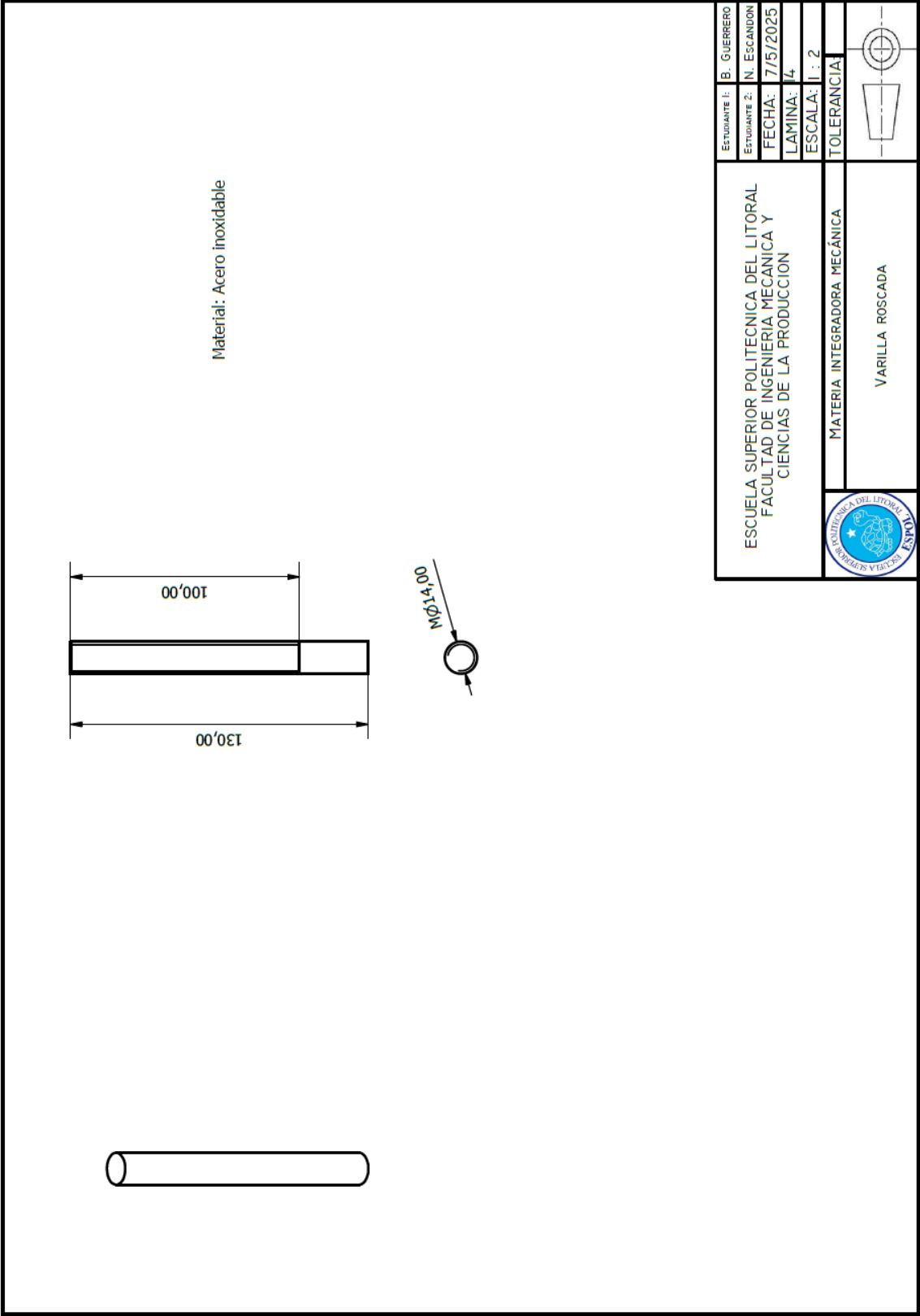
Plano 12 Eje soporte de estructura de recipiente



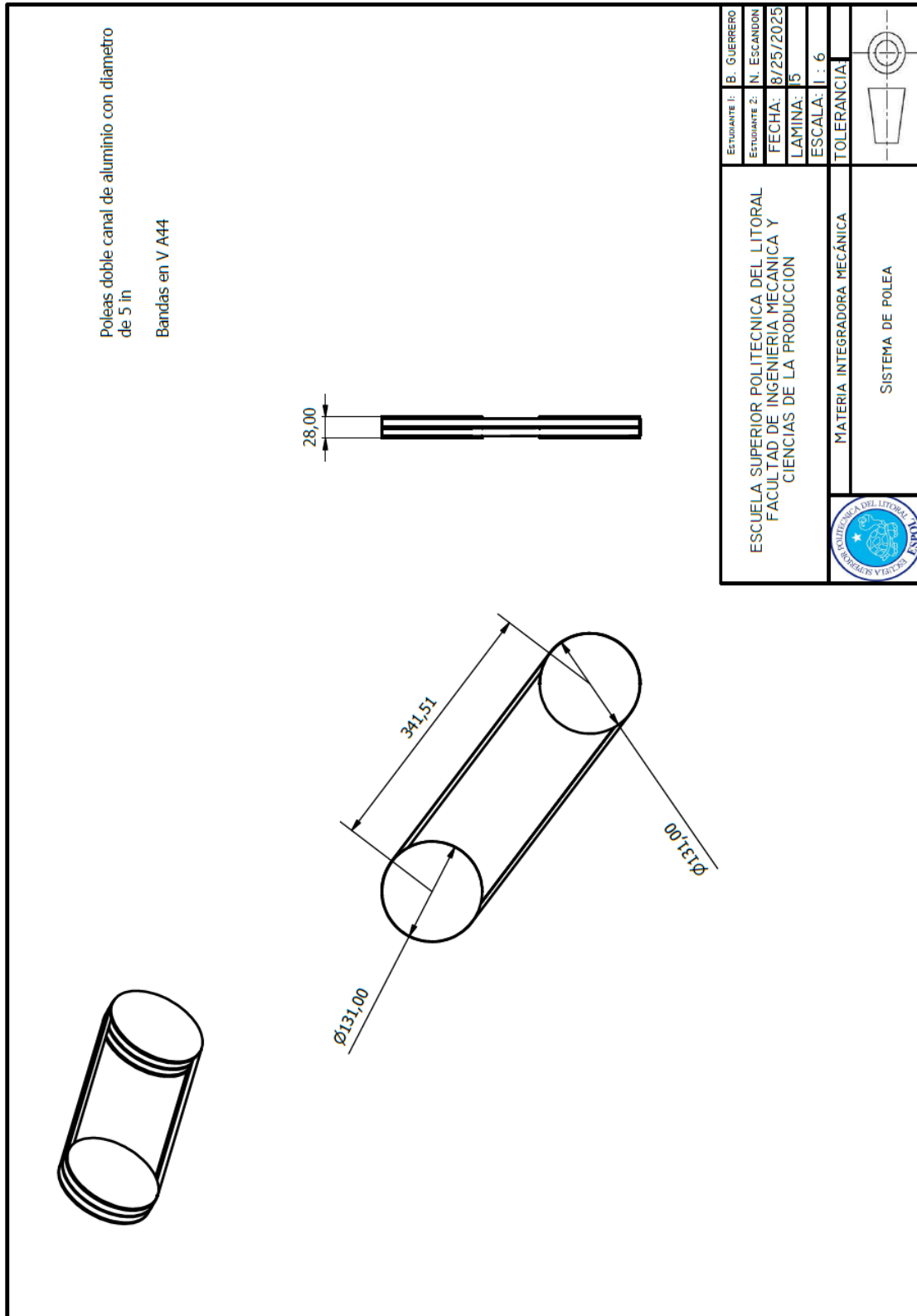
Plano 13 Placa soporte



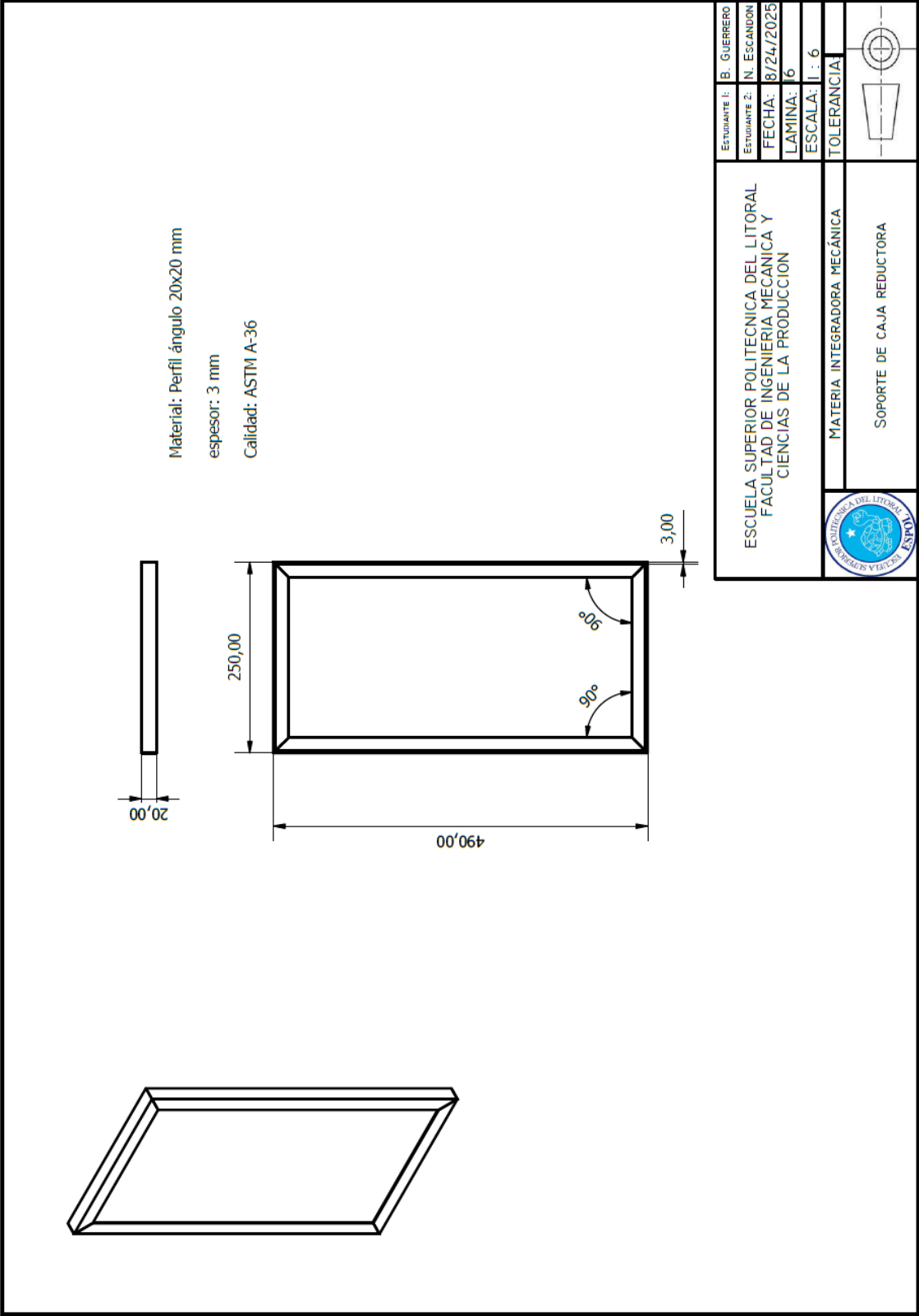
Plano 14 varilla roscada



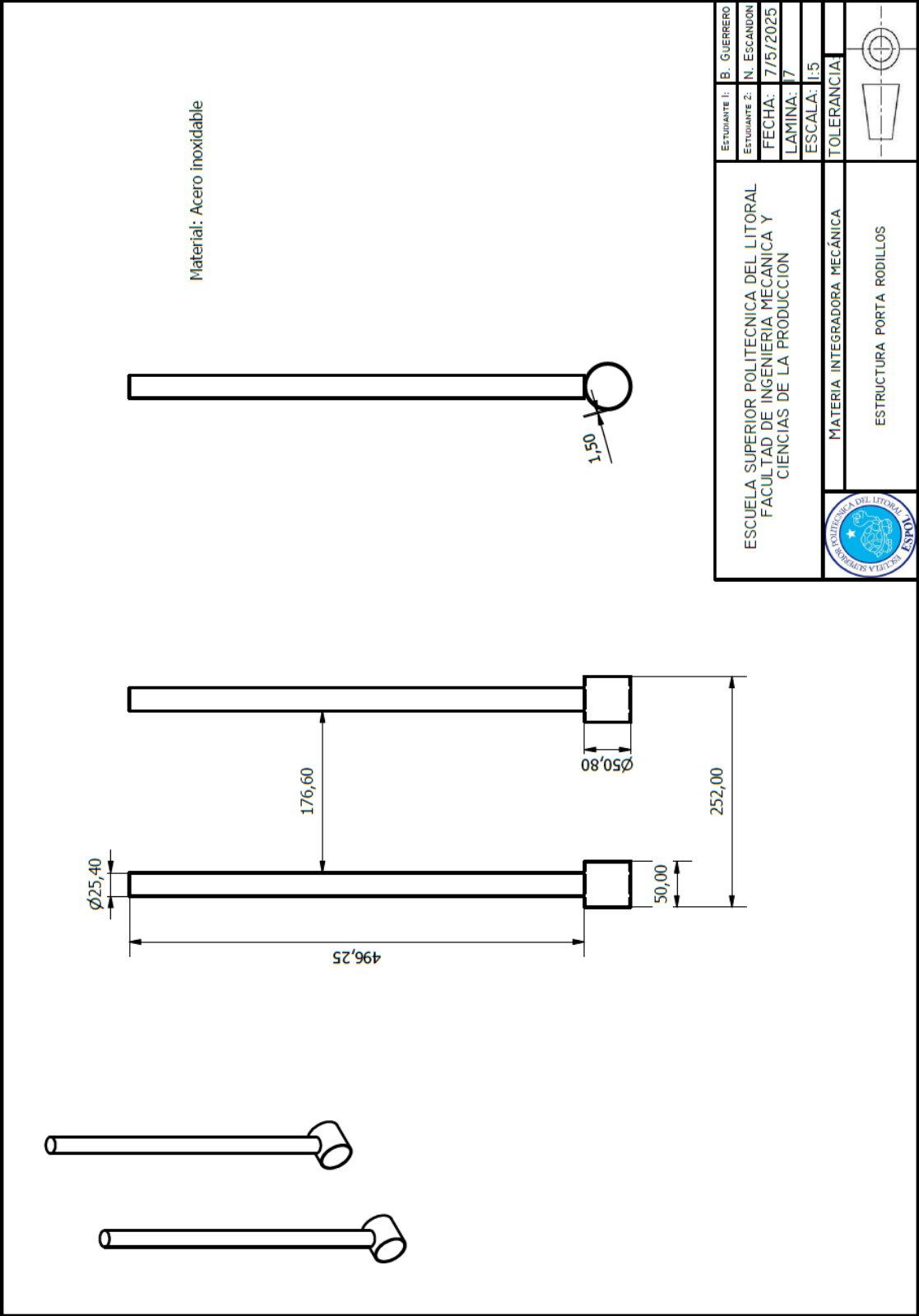
Plano 15 Sistema de poleas



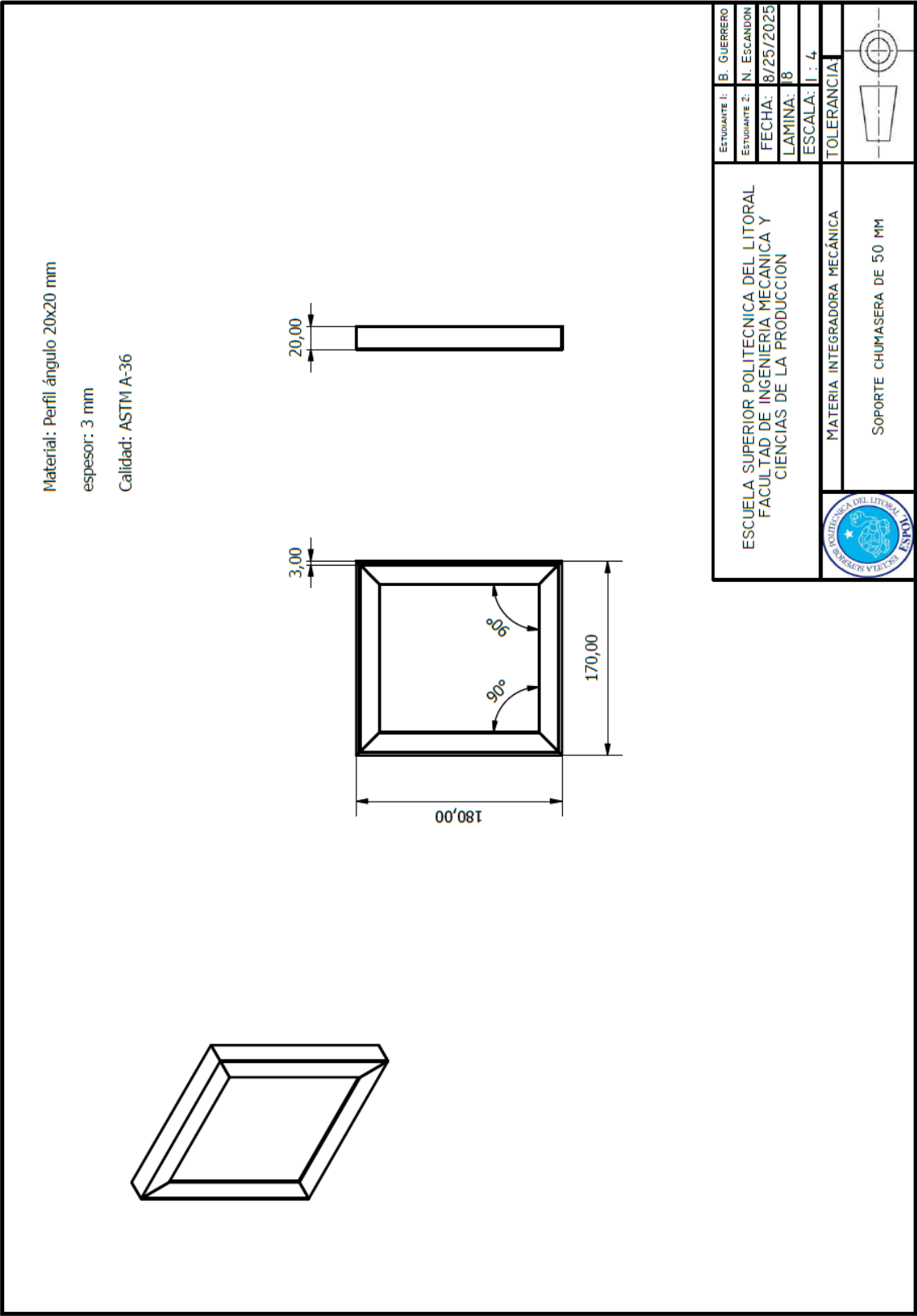
Plano 16 Soporte de caja reductora



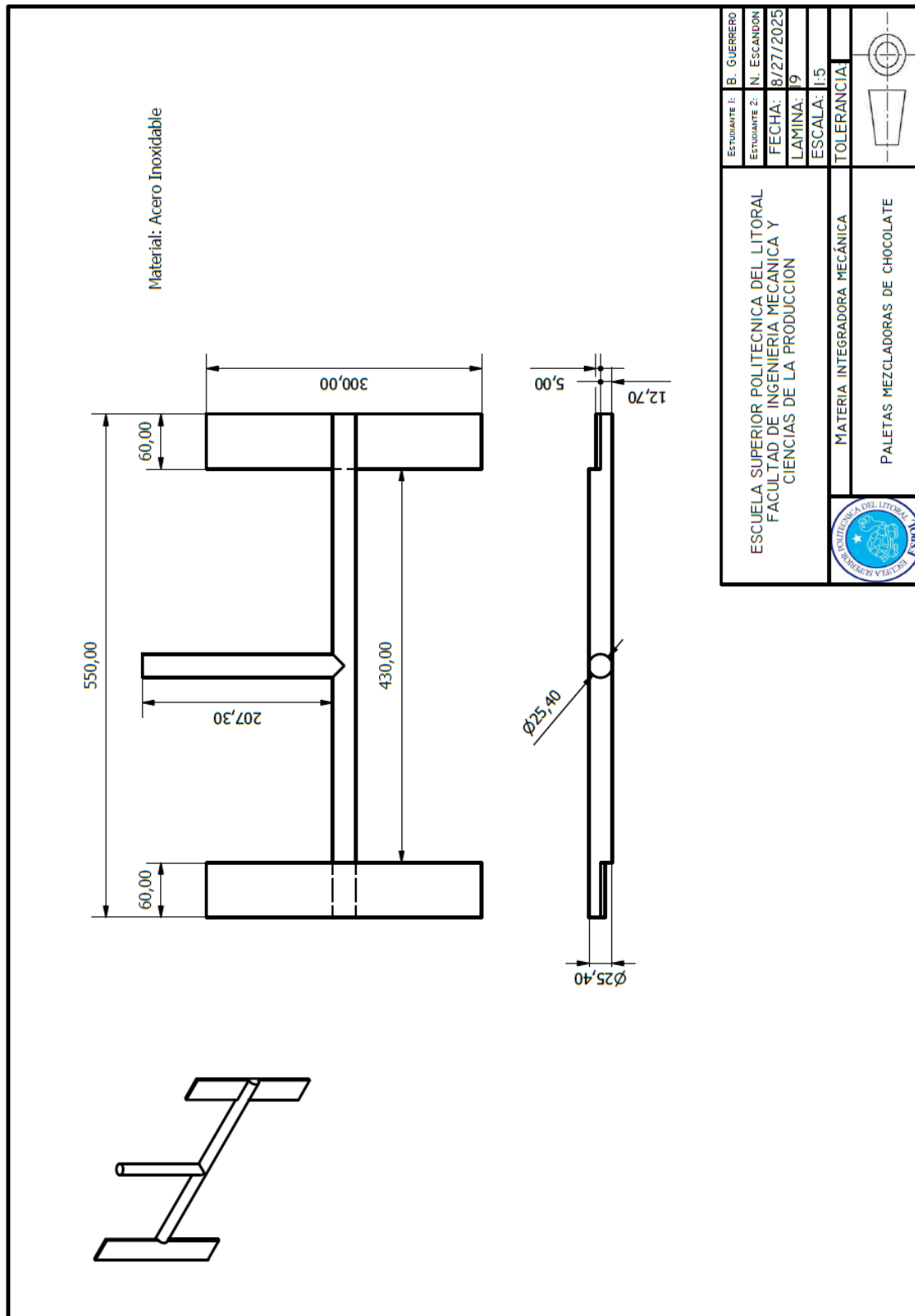
Plano 17 Estructura porta rodillos



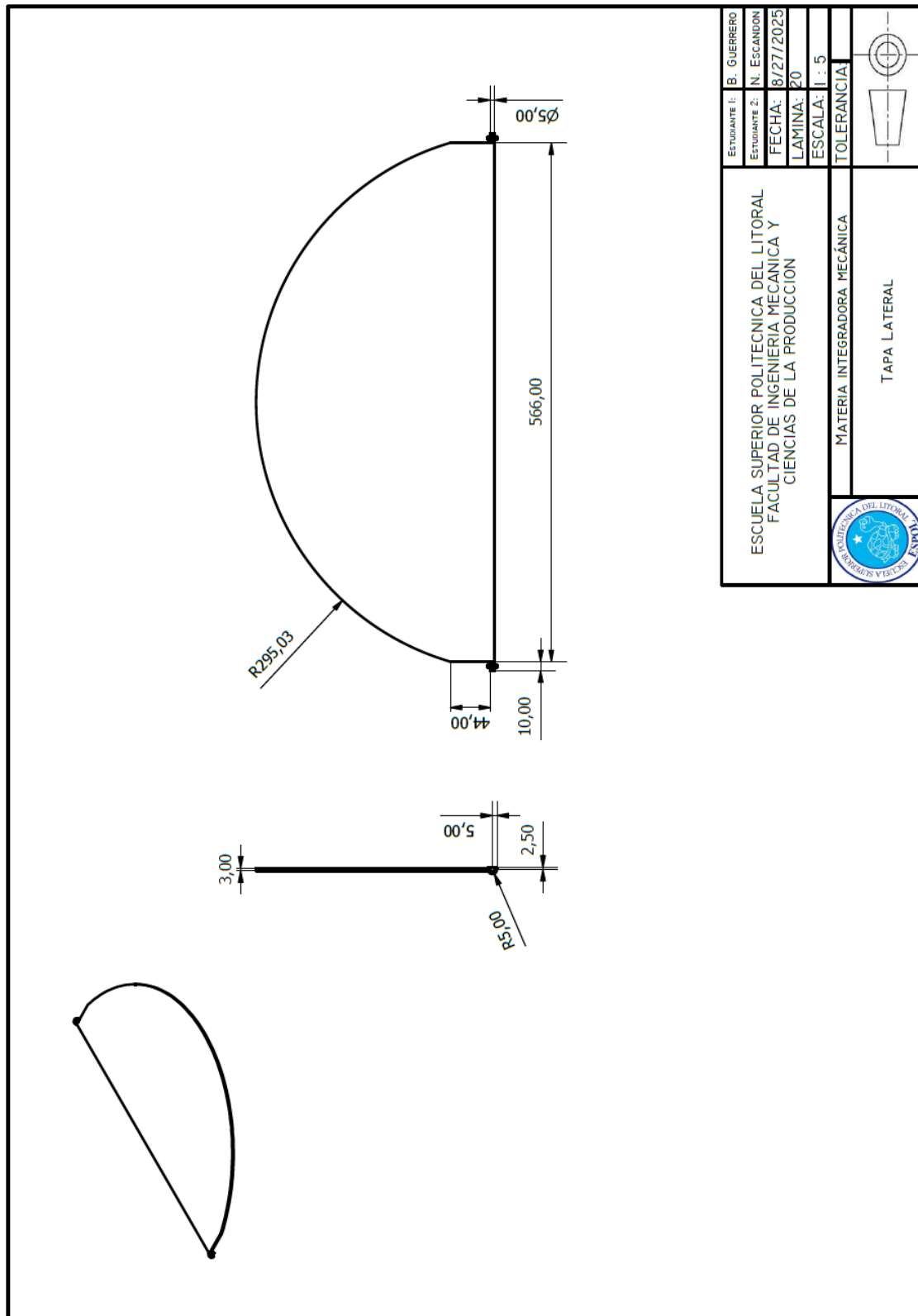
Plano 18 Soporte chumaceras



Plano 19 Paletas mezcladoras de chocolate



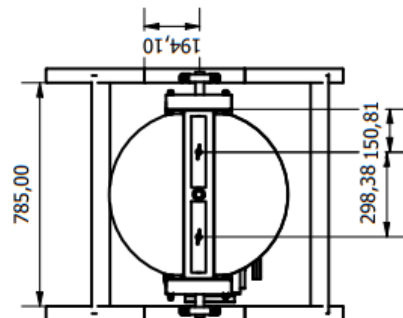
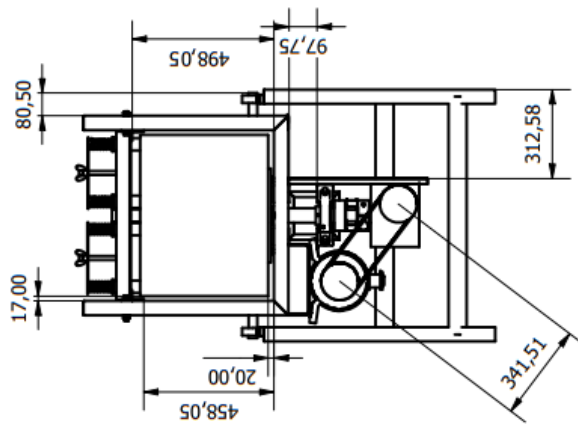
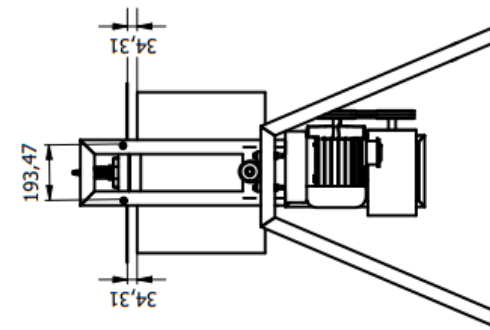
Plano 20 Tapa lateral



ESTUDIANTE 1:	B. GUERRERO
ESTUDIANTE 2:	N. ESCANDON
FECHA:	8/27/2025
LAMINA:	20
ESCALA:	1 : 5
TOLERANCIA:	
ESCUOLA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION	
MATERIA INTEGRADORA MECÁNICA	
TAPA LATERAL	

Plano 21 Distancia de piezas en la estructura

Distancia entre piezas



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	ESTUDIANTE 1:	B. GUERRERO
	ESTUDIANTE 2:	N. ESCANDON
	FECHA:	7/5/2025
	LÁMINA:	21
	ESCALA:	1: 20
MATERIA INTEGRADORA MECÁNICA		TOLERANCIA:
CONCHADORA DE CHOCOLATE PARA PRODUCTORES CACAOEROS EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS		