



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE MECÁNICA

TEMA:

“Diseño y construcción de una máquina peletizadora de aserrín para la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.”

Trabajo de Titulación, Modalidad Proyecto técnico previo a la obtención del título de ingeniero mecánico

AUTOR: Kevin Daniel Tintin Sánchez

TUTOR: Ing. Alex Santiago Mayorga Pardo, Mg.

AMBATO – ECUADOR

2026

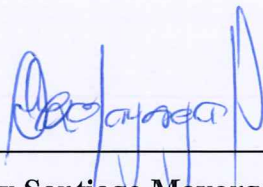
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Proyecto Técnico, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PELETIZADORA DE ASERRÍN PARA LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA”**, elaborado por el Sr. Kevin Daniel Tintin Sánchez, portador de la cedula de ciudadanía **C.C. 1850298959**, estudiante de la Carrera de Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente proyecto técnico es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, enero 2026



Ing. Alex Santiago Mayorga Pardo, Mg.

C.C.: 1802165785

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Kevin Daniel Tintin Sánchez** con C.C. 1850298959, declaro que las actividades y contenidos expuestos en el presente proyecto técnico con el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PELETIZADORA DE ASERRÍN PARA LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA”**, así como también los gráficos, tablas, cuestionarios conclusiones y recomendaciones son de exclusiva responsabilidad como autor del proyecto a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, enero 2026

Kevin Tintin

Kevin Daniel Tintin Sánchez

C.C.: 1850298959

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que se haga este Proyecto Técnico o parte de él, un documento para su lectura consulta y proceso de investigación, según las normas de la institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto Técnico, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Kevin Tintin

Kevin Daniel Tintin Sánchez

C.C.: 1850298959

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico, realizado por el estudiante Kevin Daniel Tintin Sánchez de la carrera de Mecánica, bajo el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PELETIZADORA DE ASERRÍN PARA LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA”**

Ambato, enero 2026

Para constancia firman:

Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa, Mg.

C.C.: 18020339485

MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO

Ing. Oscar Ivan Analuiza Maiza, PhD.

C.C.: 1803828266

MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo

A la memoria de mi padre, Julio Tintin, cuyo ejemplo de esfuerzo y valores permanece como guía constante en mi vida y en cada logro alcanzado.

A mi madre, Matilde Sánchez, por su apoyo incondicional, su paciencia y por enseñarme la importancia de la perseverancia en los momentos más desafiantes.

A mi esposa, Johanna Paucar, por su compañía, comprensión y aliento permanente, que fueron fundamentales para culminar este proyecto.

A mi hijo, Kendrick Daniel Tintin Paucar, quien nació en el transcurso de mis estudios y, antes de iniciar esta tesis, se convirtió en la mayor motivación para concluirla con dedicación y compromiso.

A mis hermanos y hermanas, por el apoyo moral y las palabras de ánimo que me brindaron, fortaleciendo mi espíritu y acompañándome en este camino académico.

A todos ellos, mi gratitud eterna, pues este logro no habría sido posible sin su apoyo y confianza.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mis padres, Julio Tintin y Matilde Sánchez, por el apoyo moral y económico que me brindaron a lo largo de este proceso, siendo pilares fundamentales para alcanzar este objetivo.

A mi esposa, Johanna Paucar, y a mi hijo, Kendrick Daniel Tintin Paucar, por su compañía, comprensión y aliento constante, que me motivaron a continuar con firmeza en los momentos más exigentes.

A mi hermano, Saúl Tintin, por su ayuda desinteresada y por compartir sus conocimientos, lo cual fue esencial para la construcción y puesta en marcha de la máquina peletizadora.

A los padres de mi esposa, por su apoyo constante y por acompañarme con generosidad y confianza durante el desarrollo de este proyecto.

A mis docentes, por compartir sus conocimientos y experiencias, que enriquecieron mi aprendizaje y fortalecieron mi compromiso con la ingeniería.

A mis compañeros y amigos, por su apoyo, colaboración y ánimo en los momentos más desafiantes de este proceso académico.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

Tabla de contenido

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xx
RESUMEN.....	xxii
ABSTRACT.....	xxiii
CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO	22
1.1 Antecedentes Investigativo	22
1.2 Marco Teórico	25
1.2.1 Pellets	25
1.2.2 Peletización	26
1.2.3 Proceso de Fabricación del Pellet	26
1.2.4 Pasos para la fabricación del pellet	27
1.2.5 Abastecimiento.....	28
1.2.6 Secado	28
1.2.7 Humectación de la materia prima	28
1.2.8 Proceso de Prensado.....	29
1.2.9 Proceso de Tamizado.....	29
1.2.10 Envasado	29

1.2.11	Almacenamiento	29
1.2.12	Usos del pellet.....	29
1.2.13	Ventajas del uso de los pellets.....	30
1.2.14	Poder calorífico	30
1.2.15	Parámetros a considerar en la fabricación.....	31
	Humedad del material/biomasa.....	31
	Homogenización	32
	Alimentación secuencial	33
1.2.16	Descripción de los tipos de peletizadoras	33
	Peletizadora de matriz plana	34
	Peletizadora de matriz anular	34
	Características generales de la peletizadora con matriz giratoria	35
1.2.17	Sistema de transmisión de Potencia	35
1.2.18	Sistema de compresión y extrusión del material.....	35
1.2.19	Sistema de corte del pellet.....	36
1.2.20	Sistema de alimentación de materia prima.....	36
1.2.21	Esquema general de la peletizadora	37
1.2.22	Normativa internacional para la calidad de pellets de madera.....	39
1.3	Objetivos	40
1.3.1	Objetivo General	40
1.3.2	Objetivos específicos	40
CAPITULO II.- METODOLOGIA		41
2.1	Enfoque metodológico	42
2.2	Modalidad de investigación	42
2.3	Población y muestra	42
2.4	Ubicación	42
2.5	Equipos y materiales utilizados para la elaboración del equipo	43

2.5.1	Herramientas de fabricación y mecanizado	43
2.5.2	Equipos de medición y control.....	46
2.5.3	Materiales para construcción.....	48
2.6	Tratamiento estándar para Acero aleado cementante AISI/SAE 8620:	51
2.7	Software y modelado.....	52
2.8	Recursos económicos	52
2.9	Métodos.....	53
2.9.1	Alternativas para la selección de la matriz.....	53
2.9.2	Selección de la matriz para la peletizadora	54
2.9.3	Normativa para pellets de calidad	54
2.9.4	Diagrama de flujo para el diseño y la construcción de la máquina....	57
CAPITULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN		58
3.	Análisis y discusión de resultados.....	58
3.1	Determinación de los componentes estructurales y funcionales de la máquina peletizadora.	58
3.2	Sistema y ecuaciones de alimentación	58
3.2.1	Humedad	59
3.2.2	Densidad.....	59
3.2.3	Volumen de aserrín requerido por hora	60
3.2.4	Volumen real de la tolva	61
3.3	Dimensiones para lograr	61
3.3.1	Presión lateral estática.....	62
3.3.2	Rozamiento movilizado μ_h	62
3.4	Sistema y ecuaciones de compresión	64
3.4.1	Sección del pellet	65
3.4.2	Volumen del pellet.....	65
3.4.3	Densidad el pellet.....	66

3.5	Número de orificios en la matriz.....	66
3.6	Dimensiones de los rodillos	67
3.6.1	Radio del rodillo.....	67
3.6.2	Longitud del rodillo	69
3.6.3	Masa del rodillo.....	70
3.7	Dimensiones de la matriz	70
3.7.1	Número de anillos	71
3.7.2	Número de anillos	71
3.7.3	Diámetro de la matriz.....	71
3.8	Fuerzas de compresión del sistema de extrusión del pellet.....	72
3.8.1	Presión de compactación del aserrín	74
3.8.2	Relación de compresión del aserrín	75
3.8.3	Fuerza de compactación del rodillo F_c	76
3.8.4	Fuerza de fricción en la compactación.....	79
3.9	Sistema y ecuaciones de transmisión de potencia.....	80
3.9.1	Velocidad y Aceleración de los rodillos	80
3.9.2	Perímetro de desplazamiento	80
3.9.3	Velocidades del rodillo.....	81
3.9.4	Velocidad angular de los rodillos	81
3.9.5	Velocidad tangencial de los rodillos.....	81
3.9.6	Aceleración normal del rodillo.....	82
3.9.7	Longitud horizontal del área de trabajo	82
3.9.8	Distancia del centro del eje a la mitad del rodillo	83
3.9.9	Ángulo del área de trabajo	83
3.9.10	Torque transmitido al eje principal	84
3.9.11	Potencia mecánica transmitida.....	84
3.9.12	Fuerza tangencial aplicada por el rodillo	85

3.9.13	Torque originado por los rodillos	85
3.9.14	Torque por fricción total.....	86
3.10	Sistema y ecuaciones de corte.....	86
3.10.1	Fuerza sobre la placa en zona activa	88
3.10.2	Área del orificio de extrusión.....	88
3.10.3	Área activa	88
3.10.4	Esfuerzo normal en la placa de corte	89
3.10.5	Fuerza activa	89
3.10.6	Esfuerzo cortante sobre la placa de corte.....	89
3.10.7	Corrección por simultaneidad realista.....	89
3.10.8	Fuerza cortante de la placa de corte	90
3.10.9	Fuerza de fricción de la placa cortante.....	90
3.10.10	Fuerza total de la placa cortante.....	91
3.10.11	Torque de la placa cortante	91
3.11	Sistema de soporte estructural.....	91
3.12	Diseño del eje principal.....	94
3.12.1	Fuerza producida por la Transmisión.....	95
3.13	Selección de rodamientos.....	109
3.13.1	Rodamientos del eje principal.....	109
3.13.2	Características del rodamiento SKF 33108.....	110
3.13.3	Características del rodamiento SKF 6008-2Z.....	113
3.14	Selección de Chavetas.....	116
3.15	Diseño de la máquina en el software especializado	119
3.16	Construcción de la máquina	120
3.16.1	Preparación del cubo	121
3.16.2	Mecanizado de la matriz plana.....	121
3.16.3	Mecanizado de bocines	123

3.16.4	Mecanizado de rodillos	123
3.16.5	Mecanizado del eje principal	124
3.16.6	Mecanizado tapas de los rodillos internos y externos.....	125
3.16.7	Mecanizado eje secundario (eje de rodillos).....	126
3.16.8	Mecanizado de chavetas.....	127
3.16.9	Elaboración del canal de expulsión.....	127
3.16.10	Ensamble del motorreductor con el motor	128
3.16.11	Ensamble final.....	128
3.17	Costo total de peletizadora	129
3.17.1	Sistema de Alimentación (Tolva)	129
3.17.2	Sistema de Extrusión.....	130
3.17.3	Estructura	130
3.17.4	Sistema de corte	131
3.17.5	Sistema de transmisión de Potencia	131
3.17.6	Pernos y Tornillos de fijación.....	131
3.17.7	Costo estimado para el uso de máquinas y herramientas.....	132
3.17.8	Costo de mano de obra	133
3.17.9	Costo total de la Peletizadora.....	133
3.18	Determinación de la capacidad de producción.....	134
3.19	Evaluación de la calidad del pellet obtenido.....	136
3.20	Comparación con equipos similares existentes.....	139
3.21	Identificación de limitaciones del prototipo.....	140
3.22	Propuestas de mejora para futuras versiones	140
3.23	Contribución del diseño a la sostenibilidad y aprovechamiento del aserrín	140
CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		141
4.1	Conclusiones	141

4.2	Recomendaciones.....	141
	Referencias.....	142
	ANEXOS	146
	Anexo 2	147
	Propiedades de los materiales empleados	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pellets.....	25
Figura 2. Etapas del proceso de peletizado.	26
Figura 3. Esquema de producción del pellet.	27
Figura 4. Hidrómetro profesional.....	32
Figura 5. Mezclador de ciclo continuo con humificador.....	33
Figura 6. Funcionamiento de una peletizadora de matriz plana.....	34
Figura 7. Peletizadora de matriz anular.....	34
Figura 8. Esquema de funcionamiento del sistema de transmisión.	35
Figura 9. Esquema del sistema de compresión y extrusión.	36
Figura 10. Esquema del sistema de corte.....	36
Figura 11. Esquema del sistema de alimentacion tipo tolva.	37
Figura 12. Partes de una peletizadora a escala.	37
Figura 13. Flujograma del proceso de diseño de la máquina.	41
Figura 14. Torno convencional.....	43
Figura 15. Fresadora convencional.	44
Figura 16. Taladro de pedestal.	44
Figura 17. Amoladora o esmeriladora circular,.....	44
Figura 18. Discos de corte y de Pulido.	45
Figura 19. Suelta eléctrica.....	45
Figura 20. Prensa manual hidráulica.....	45
Figura 21. Calibrador y micrómetro.	46
Figura 22. Multímetro.....	46
Figura 23. Tacómetro.	46
Figura 24. Pistola medidora de temperatura.	47
Figura 25. Hidrómetro.....	47
Figura 26. Balanza digital electrónica.....	47
Figura 27. Perfiles A36.	48
Figura 28. Acero aleado AISI 8620.....	48
Figura 29. Rodamientos cónicos y de bolas.....	48

Figura 30. Ejes de transmisión.	49
Figura 31. Plancha de acero.	49
Figura 32. Motor trifásico.	49
Figura 33. Caja reductora.	50
Figura 34. Acoples de ejes.	50
Figura 35. Chapa de tol.	50
Figura 36. Resumen de las especificaciones estándar del pellet.	55
Figura 37. Resumen orientativo de clases y especificaciones de pellets clasificados para uso industrial.	56
Figura 38. Vista isométrica de la tolva. Elaborado por: Kevin Tintin.	59
Figura 39. Vista isométrica con las medidas de la tolva. Elaborado por: Kevin Tintin	62
Figura 40. Tabla estimada de μh para materiales granulares en tolvas.	63
Figura 41. Grafica de factor K.	63
Figura 42. Simulación de la tolva en Solidworks. Elaborado por: Kevin Tintin	64
Figura 43. Esquema de un pellet.	65
Figura 44. Esquema de radio del rodillo de compactación.	68
Figura 45. Esquema de la configuración de la matriz.	72
Figura 46. Esquema de fuerzas de compresión del aserrín.	72
Figura 47. Propiedades de materiales.	74
Figura 48. Constantes empíricas para definir los ángulos de entrada en las cavidades de la matriz	74
Figura 49. Esquema del ángulo de entrada al dado o agujero.	75
Figura 50. Fuerza de compactación del rodillo.	76
Figura 51. Zona de compresión del aserrín.	76
Figura 52. Diagrama de presión en las paredes de la matriz.	78
Figura 53. Diagrama de fuerza de fricción en las paredes internas de la matriz.	78
Figura 54. Diagrama de la fuerza de fricción entre el material particulado y los componentes de compactación.	79
Figura 55. Velocidad angular y tangencial del rodillo.	81

Figura 56. Longitud horizontal del área de trabajo.	82
Figura 57. Ángulo del área de trabajo vista superior.	83
Figura 58. Esquema de Fuerza tangencial de los rodillos.....	85
Figura 59. Esquema del sistema de corte de pellets.....	86
Figura 60. Matriz de extrusión.	87
Figura 61. Placa de corte.	87
Figura 62. Esquema de las placas de corte vista superior.	88
Figura 63. Esquema de la Fuerza y Área activa.	88
Figura 64. Propiedades de materiales.....	90
Figura 65. Diagrama 3D de la Estructura base y las fuerzas aplicadas.....	92
Figura 66. Simulación de cargas sobre la Estructura base.	92
Figura 67. Análisis del desplazamiento en la Estructura base.	93
Figura 68. Análisis del factor de seguridad en la Estructura base.	93
Figura 69. Esquema mecanismos de transmisión de potencia, compactación y corte.	94
Figura 70. Diagrama de cuerpo libre del eje principal.....	95
Figura 71. Diagrama de engranaje helicoidal.	95
Figura 72. Diagrama de cuerpo libre del eje principal plano xyz.....	97
Figura 73. Diagrama de cuerpo libre de la sección ABC plano xy.....	97
Figura 74. Diagrama de Fuerza cortante plano xy.	99
Figura 75. Diagrama de Momento flector en plano xy.	100
Figura 76. Diagrama de cuerpo libre de la sección ABC plano xz.	100
Figura 77. Diagrama de Fuerza cortante plano xz.	101
Figura 78. Diagrama de momento flector plano xz.....	102
Figura 79. Diagrama de momento torsor.	103
Figura 80. Factor de acabo superficial.	106
Figura 81. Factor de confiabilidad.	107
Figura 82. Simulación eje principal.	108
Figura 83. Resultados del análisis del eje principal.	109
Figura 84. Rodamientos cónicos.	110

Figura 85. Rodamientos de bolas.	110
Figura 86. Datos geométricos dimensiones y de carga del rodamiento 33108.	110
Figura 87. Datos geométricos dimensiones de resalte y de carga del rodamiento 33108.	111
Figura 88. Datos de cálculo del rodamiento 33108.	111
Figura 89. Condiciones de servicio del rodamiento 33108.	112
Figura 90. Resultados de servicio del rodamiento 33108.	112
Figura 91. Datos geométricos dimensiones y de carga del rodamiento 6008-2Z.	113
Figura 92. Datos geométricos dimensiones del rodamiento 6008-2Z.	114
Figura 93. Datos de cálculo del rodamiento 6008-2Z.	114
Figura 94. Condiciones de servicio del rodamiento 6008-2Z.	114
Figura 95. Resultados de servicio del rodamiento 6008-2Z.	115
Figura 96. Selección de la chaveta paralela DIN 6885 para eje $\varnothing$ 45 mm.	116
Figura 97. Selección de la chaveta paralela DIN 6885 para eje $\varnothing$ 35 mm.	118
Figura 98. Vista posterior del ensamble de la máquina.	119
Figura 99. Vista lateral de la máquina.	120
Figura 100. Vista superior del modelado de la peletizadora	120
Figura 101. Vista superior del cubo.	121
Figura 102. Vista inferior del cubo.	121
Figura 103. Mecanizado de la matriz.	122
Figura 104. Rectificado de la matriz.	122
Figura 105. Mecanizado de orificios de la matriz.	122
Figura 106. Matriz terminada.	123
Figura 107. Torneado de la superficie.	123
Figura 108. Rodillos mecanizados.	124
Figura 109. Mecanizado final del rodillo.	124
Figura 110. Eje para mecanizar.	125
Figura 111. Mecanizado de la pieza en el torno.	125
Figura 112. Piezas mecanizadas.	126
Figura 113. Eje secundario.	126

Figura 114. Chavetas para los ejes.	127
Figura 115. Canal de expulsión.	127
Figura 116. Acoplamiento del motorreductor.	128
Figura 117. Ensamble de la matriz.	128
Figura 118. Ensamble final.	129
Figura 119. Resultado de producción pellets de aserrín.	136
Figura 120. Resultado de la prueba de durabilidad mecánica de los pellets de aserrín.	137
Figura 121. Resultado de la medida del diámetro de los pellets de aserrín.	138
Figura 122. Resultado de la medida de longitud mínima de los pellets de aserrín. .	138
Figura 123. Resultado de la medida de longitud máxima de los pellets de aserrín.	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I Energía calorífica para diferentes materiales de biomasa	30
Tabla II. Descripción de las partes de una peletizadora.	38
Tabla III. Materiales sugeridos para la fabricación de la peletizadora.	39
Tabla IV. Principales requisitos definidos por la normativa ISO 17225-2:2014.	39
Tabla IV. Principales requisitos definidos por la normativa ISO 17225-2:2014. (continuación)	40
Tabla VI. Descripción de recursos económicos iniciales.	52
Tabla VII. Alternativas para la selección de la matriz.	53
Tabla VIII. Selección de la matriz por ponderación.	54
Tabla IX. Coeficientes de fricción de materiales y combinación de materiales.	69
Tabla X. Datos iniciales para los cálculos de las fuerzas del eje.	95
Tabla XI. Resumen de datos para el diagrama.	98
Tabla XII. Resumen de momentos para el diagrama.	99
Tabla XIII. Resumen de datos para las fuerzas cortantes.	101
Tabla XIV. Momentos en el plano xz.	102
Tabla XV. Resumen de datos para el momento torsor.	102
Tabla XVI. Costo de materiales del sistema de alimentación	129
Tabla XVII. Costo de materiales del sistema de extrusión	130
Tabla XVIII. Costo de materiales de la estructura	130
Tabla XIX. Costo de materiales del sistema de corte.	131
Tabla XX. Costo de materiales del sistema de transmisión de potencia	131
Tabla XXI. Costo de materiales de pernos y tornillos de fijación	131
Tabla XXI. Costo de materiales de pernos y tornillos de fijación (Continuación) .	132
Tabla XXIII. Costo de uso de máquinas y herramientas.	132
Tabla XXIV. Costo de mecanizado.	133
Tabla XXV. Costo total.	133
Tabla XXV. Costo total (Continuación)	134
Tabla XXVII. Coeficiente de variación.	135
Tabla XXVII. Coeficiente de variación (Continuación)	136

Tabla XXIX. Evaluación del pellet.	137
Tabla XXX. Existencia de equipo similares.	139
Tabla XXXI. Limitaciones de la máquina.....	140

RESUMEN

El proyecto técnico aborda el diseño y construcción de una máquina peletizadora de aserrín destinada a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. La investigación se fundamenta en la creciente necesidad de alternativas energéticas sostenibles frente a la escasez de combustibles fósiles y el impacto ambiental generado por residuos de biomasa mal gestionados. Se plantea la transformación del aserrín en pellets como una solución eficiente, económica y ambientalmente responsable.

El marco teórico expone la importancia de la biomasa como recurso energético, los parámetros críticos para la calidad del pellet (humedad, granulometría, presión de compactación y aditivos), así como los procesos de dosificación, mezcla, prensado, secado y almacenamiento. Se analizan además los tipos de peletizadoras existentes (matriz plana y matriz anular), justificando la elección de una máquina con rodillos giratorios y matriz estática por su eficiencia y adaptabilidad a entornos académicos.

El diseño de la máquina se fundamentó en criterios de eficiencia, ergonomía, seguridad y sostenibilidad. Se optó por una configuración con rodillos giratorios y matriz estática, lo que garantiza una mejor disipación del calor y una compactación uniforme del pellet. El sistema se estructuró en cuatro subsistemas: transmisión de potencia mediante engranajes cónicos, compresión y extrusión del material con rodillos y matriz, corte controlado para definir la longitud del pellet, y mecanismos auxiliares de dosificación y tamizado. Estos elementos aseguran un funcionamiento confiable, facilidad de mantenimiento y adaptabilidad a entornos académicos.

En conclusión, el proyecto logró la obtención de una máquina peletizadora funcional, capaz de transformar residuos de aserrín en pellets de alta densidad energética. Además de su aporte ambiental y económico, la máquina constituye una herramienta pedagógica que fortalece la formación práctica de los estudiantes en diseño mecánico, transferencia de calor y eficiencia energética.

PALABRAS CLAVE: DISEÑO MECÁNICO, ELEMENTOS FINITOS, MODELACIÓN 3D, PELLETS, PELETIZADORA

ABSTRACT

This technical project addresses the design and construction of a sawdust pelletizing machine for the Faculty of Civil and Mechanical Engineering at the Technical University of Ambato. The research is based on the growing need for sustainable energy alternatives in the face of fossil fuel scarcity and the environmental impact of poorly managed biomass waste. The transformation of sawdust into pellets is proposed as an efficient, economical, and environmentally responsible solution.

The theoretical framework outlines the importance of biomass as an energy resource, the critical parameters for pellet quality (moisture content, particle size, compaction pressure, and additives), as well as the processes of dosing, mixing, pressing, drying, and storage. The existing types of pelletizers (flat die and ring die) are also analyzed, justifying the choice of a machine with rotating rollers and a static die due to its efficiency and adaptability to academic environments.

The machine's design was based on criteria of efficiency, ergonomics, safety, and sustainability. A configuration with rotating rollers and a static die was chosen, ensuring better heat dissipation and uniform pellet compaction. The system is structured into four subsystems: power transmission via bevel gears, material compression and extrusion with rollers and a die, controlled cutting to define the pellet length, and auxiliary dosing and sieving mechanisms. These elements ensure reliable operation, ease of maintenance, and adaptability to academic environments.

In conclusion, the project successfully developed a functional pellet mill capable of transforming sawdust waste into high-energy-density pellets. In addition to its environmental and economic benefits, the machine serves as a pedagogical tool, strengthening students' practical training in mechanical design, heat transfer, and energy efficiency.

KEYWORDS: MECHANICAL DESIGN, FINITE ELEMENT ANALYSIS, 3D MODELING, PELLETS, PELLETIZING MACHINE

CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Investigativo

La escasez de combustibles fósiles ha aumentado la motivación de la investigación por la biomasa y otras fuentes de energías renovables. En estos años se ha visto un crecimiento acelerado del mercado de pellets. En la actualidad, los pellets de madera son uno de los productos de biomasa sólida más comercializadas internacionalmente y utilizados específicamente con fines energéticos [1].

Después de fuentes energéticas primarias como el carbón, petróleo y gas natural, la biomasa es el recurso de energía calórica más grande del planeta; hasta cierto punto hasta pudiera reemplazar a la energía tradicional. La gasificación es una conversión termoquímica método que utiliza los pellets de biomasa. Entonces muchos investigadores han encontrado que la calidad de la resistencia de los pellets es afectada por las características que posee la materia prima y el proceso de densificación. Por lo tanto, incluyen tamaño de partícula y contenido de humedad mientras que para la densificación incluye la temperatura, presión de densificación y tiempo de permanecía. Además, la biomasa de la madera produce gránulos más duraderos que la biomasa de diferentes residuos a base de paja [2].

Los residuos industriales son residuos sólidos generados en la producción industrial estas incluyen cenizas volantes, escorias, relaves y boro (lodos). Por lo tanto, muchas universidades, empresas y otras instituciones de investigación científica han realizado un amplio estudio sobre residuos sólidos industriales. Entonces los aditivos para pellets es un componente importante en la elaboración pellets a partir del procesamiento mixto de materia prima que puede unir partículas de minerales metálicas que mejoran la tasa de formación de pellets con un rendimiento térmico alto [3].

La alta demanda mundial de pellets continúa aumentando, por lo que los productores de pellets presentan una escasez de biomasa de desechos leñosos. En la actualidad, los residuos agrícolas, como los de cultivos (paja) y las gramíneas están infravalorados; una limitación importante es la baja calidad e inconsistencia de las propiedades fisicoquímicas en la fabricación de pellets que incluyen densidad aparente, contenido de humedad, contenido de carbono, contenido de cenizas e hidrofobicidad [4].

La producción de pellets a través de restos de biomasa, como el aserrín, se ha convertido en una alternativa sostenible ampliamente adoptada. Este tipo de biocombustible permite reducir la contaminación y aprovechar materiales que antes eran descartadas como desechos. Según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), los pellets se han consolidado como una fuente energética eficiente y menos contaminante que los combustibles fósiles [5].

El Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) advierte que la acumulación de aserrín sin un manejo adecuado constituye un problema ambiental relevante, ya que puede derivar en incendios, dispersión de polvo y desaprovechamiento de un recurso con potencial energético. La conversión de este residuo en pellets permite mitigar dichos riesgos, al tiempo que se obtiene un biocombustible de alta utilidad tanto en aplicaciones domésticas como en procesos industriales, integrando sostenibilidad y eficiencia en la gestión de la biomasa [6].

La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) enfatiza que la calidad del pellet depende de condiciones específicas del material de origen. Factores como el contenido de humedad, el tamaño de las partículas, la composición de la biomasa y la presión de compactación son rotundamente determinantes [7]. Establecer estos parámetros desde la etapa de diseño de la peletizadora es fundamental para lograr pellets duraderos, densos y con bajo impacto ambiental.

Investigaciones de la Universidad de Valladolid concluyen que el contenido de humedad del aserrín debe mantenerse entre el 8% y el 12% para evitar la desintegración del pellet. Una humedad superior a ese rango impide una buena compactación y afecta la estabilidad del producto [8]. Así mismo, la uniformidad en la granulometría es crucial para garantizar un correcto prensado en la matriz de la máquina.

El informe de la empresa Meelco evidencia que las peletizadoras, además de su papel en la producción energética posee un potencial formativo en el ámbito educativo. Su utilización permite abordar de manera práctica nociones de diseño mecánico, además, transferencia térmica y eficiencia en el uso de recursos energéticos, fortaleciendo el aprendizaje aplicado. No obstante, el estudio también evidencia que la mayoría de los equipos disponibles están concebidos para fines industriales, lo que dificulta su incorporación en programas académicos y limita su aprovechamiento pedagógico [9].

Durante el diseño de una máquina peletizadora, no basta enfocarse solo en su capacidad de producción. Es fundamental que el equipo cumpla principios de sostenibilidad, seguridad y funcionalidad. Por ello, este proyecto se justificará en la necesidad de desarrollar una alternativa tecnología capaz de transformar residuos de biomasa, como el aserrín, en un recurso útil [10]. Además, se busca que el diseño contemple una estructura ergonómica, facilidad de mantenimiento, eficiencia energética y condiciones seguras de operación. Estos factores son esenciales para garantizar un funcionamiento prolongado del equipo, reducir costos operativos y permitir su implementación en talleres universitarios, proyectos académicos o comunidades rurales.

1.1.1 Investigaciones Previas

Dao et al. [11] realizaron un estudio donde la materia de aserrín eran residuos de pino derivados del proceso de fabricación de muebles y se suministraba desde un taller de carpintería local. Estos se secaron a 105°C hasta un peso constante y se almacenaron en bolsas con cierre hermético antes del acondicionamiento. Entonces, la eficiencia del proceso de peletización con respecto a la densidad aumentó con respecto a los pellets de madera con un valor de 1500 kg/m³.

Zribi et al. [12] compararon distintos procesos de gasificación para evaluar el impacto en la calidad de los pellets, aplicando temperaturas 750°C, 800°C, 820°C y 900°C bajo atmósferas compuestas de nitrógeno y vapor de agua en proporciones de 10%, 20% y 30%. Los resultados mostraron que los perfiles de pérdida de masa durante la descomposición térmica son similares a los del proceso de gasificación tradicional de la lignocelulosa. Por lo tanto, el agregar aserrín de pino en la fabricación de pellets favorece al proceso de gasificación.

En Chile se realizó un estudio donde el aserrín prevalece como uno de los recursos más demandados para la producción de pellets, por lo que analizaron una nueva fuente de energía la cual fue el polvo de maíz de la cual se obtuvo propiedades físico-mecánicas y energéticas para finalmente ver la calidad de los pellets creados con diferentes porcentajes de este. Los pellets obtenidos tenían forma cilíndrica con un diámetro de 6mm en promedio y 38mm de longitud, la influencia del tamaño es importante al momento de secar el material; y para que el poder calorífico sea lo más

parecido a 23.9 MJ kg^{-1} que es la combinación de 50% de carbón vegetal y 50% de aserrín en pellets [13].

Los métodos de pretratamiento como la torrefacción seca y torrefacción húmeda son esenciales para la obtención de gránulos de aserrín de gran calidad en la biomasa. Se investigó estos métodos obteniendo la reducción en el rendimiento de la masa de 92.67 a 84.33% para la torrefacción seca y del 93.42 a 90.39% para la torrefacción húmeda y el rendimiento de energía se redujo de 94.78-90.78% para el primer caso y del 93.42-92.20% para el segundo caso, además el poder calorífico aumentó de 17.79-18.73 MJ/kg para la torrefacción seca y de 17.44 -17.79 MJ/kg para la torrefacción húmeda [14].

Dorokhov et. al [15] compararon propiedades mecánicas entre los pellets de aserrín de pino y pellets de aserrín con la adicción de aditivos derivados de residuos. Demostrando de la adicción de aditivos como el cartón, plástico aumentaba la durabilidad a la vibración y la resistencia a la humedad de 3.7-45.6% en comparación con las muestras sin aditivos. Además, los aditivos aumentaron la densidad de los pellets de 2.7-5.8% en comparación con los pellets de madera.

1.2 Marco Teórico

1.2.1 Pellets

Son biocombustibles sólidos, homogéneos, de bajo contenido de humedad y con una alta densidad energética, tienen formas cilíndricas con diámetros normalmente comprendidos entre 6 mm y 22 mm, además, con longitudes de 3.5 cm a 6.5 cm, cuya fabricación se realiza a alta presión, sin necesidad de utilizar algún tipo de adhesivo. En la Figura 1 se representan los pellets [16].



Figura 1. Pellets [16].

Generalmente se utilizan como fuente de calor en sistemas de calefacción, así como en estufas individuales, chimeneas, hornos y equipos destinados al calentamiento de

agua. Los pellets pueden fabricarse de distintos tipos de biomasa, no solo de la madera también de residuos agrícolas y forestales y cultivos energéticos [9], [17].

1.2.2 Peletización

Es un proceso mecánico que aumenta la densidad aparente de la biomasa lo que reduce sustancialmente los costos asociados con el almacenamiento, manipulación y el transporte [18]. Otra definición dice es un proceso donde se transforma la materia en otra mediante la mezcla homogénea de componentes y parámetros como la humedad, calor, y presión la cual resulta en una mezcla de tamaño y forma deseado. La peletización no solo se utiliza en la industria del reciclaje energético sino también en la industria alimenticia [19].

1.2.3 Proceso de Fabricación del Pellet

El proceso está compuesto de 3 etapas, en las cuales se procesa la materia proveniente de los centros de acopio para formar adecuadamente los pellets. Estas fases incluyen: la dosificación, el acondicionamiento y prensado de la materia. Además, se le suma un proceso externo 1 proceso llamado secado y enfriamiento el cual reduce la humedad y garantiza la integridad del pellet [20]. La producción del pellet requiere la utilización de máquinas adecuadas con esto se garantiza la calidad final del producto [21]. En la Figura 2 se describen las Etapas de peletización:

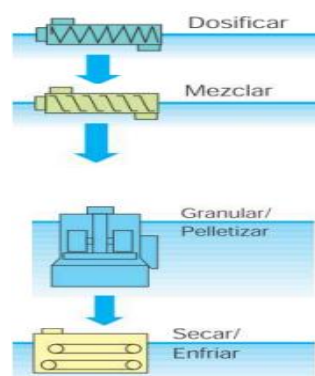


Figura 2. Etapas del proceso de peletizado [20].

- Dosificación: es la alimentación de materia prima en cantidades apropiadas con sus respectivas componentes aditivos

- Mezcla: proceso donde se le añade vapor de agua y aditivos al producto base conforme se mezcla en el tambor así logrando homogenizar la mezcla.
- Peletización/Granulación: etapa donde se realiza la preforma y forma del pellet mediante el prensado.
- Secado/enfriamiento: en esta etapa se reduce el contenido de humedad mediante la aplicación de calor/ventilación así se logra la resistencia y durabilidad necesaria.

1.2.4 Pasos para la fabricación del pellet

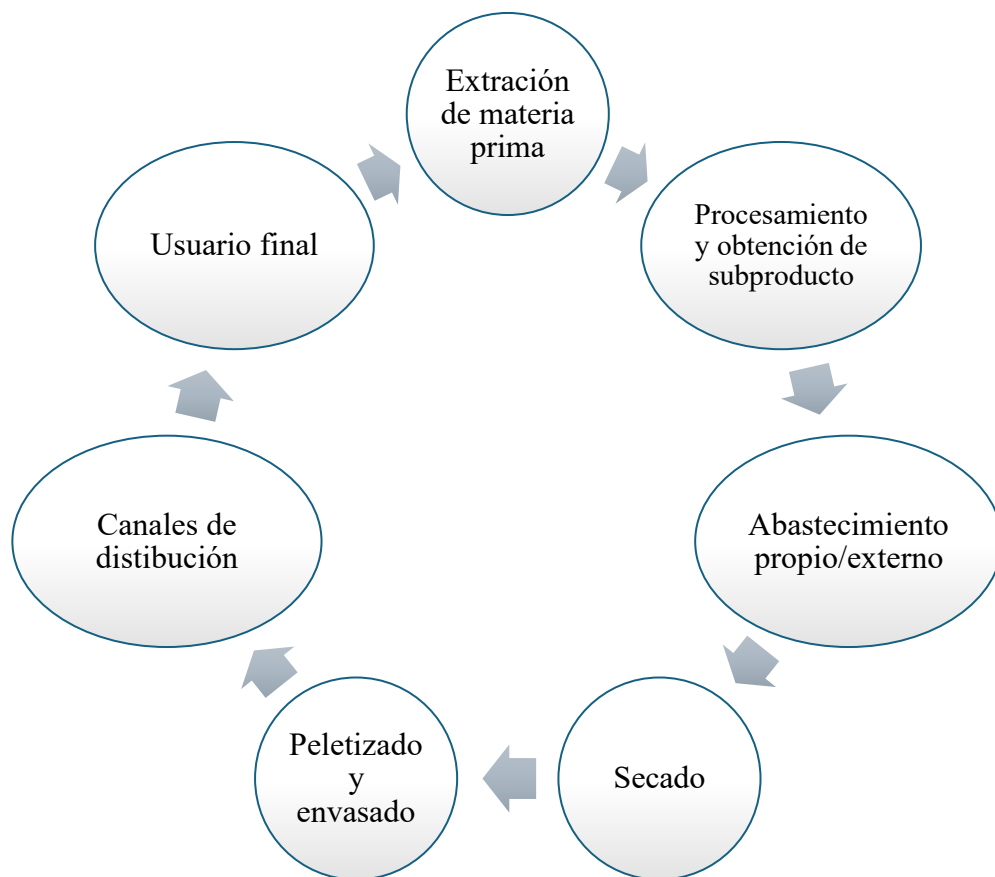


Figura 3. Esquema de producción del pellet [21].

La Figura 3 muestra el proceso completo de fabricación del pellet en un esquema circular que refleja la continuidad del ciclo productivo. El diagrama inicia con la extracción de la materia prima, que corresponde a la biomasa forestal utilizada como insumo principal. Posteriormente, se realiza el procesamiento y obtención de subproductos, donde la biomasa es acondicionada para garantizar uniformidad en tamaño y composición.

El siguiente paso es el abastecimiento, que puede ser propio o externo, asegurando la disponibilidad constante de material para el sistema. Una vez abastecida, la biomasa pasa por la etapa de secado, fundamental para reducir el contenido de humedad y asegurar la calidad del pellet final. Esta fase es crítica porque la humedad influye directamente en la densidad y durabilidad del producto.

Luego se ejecuta el proceso de peletizado y envasado, donde la biomasa es compactada en forma de pellets y posteriormente embalada para su almacenamiento y transporte. El producto terminado se distribuye a través de diversos canales de distribución, hasta llegar al usuario final, quien aprovecha el pellet como fuente energética renovable. Este esquema evidencia la integración de operaciones técnicas y logísticas necesarias para transformar biomasa en un biocombustible sólido eficiente.

1.2.5 Abastecimiento

Se abastece de aserrín o viruta seleccionada específicamente para la fabricación de pellets, la biomasa seleccionada es abastecida por asociaciones externas o la empresa tiene su propio flujo de materia prima, así se garantiza un flujo continuo de la principal fuente de biomasa manteniendo la producción continua en la planta productora de pellet. Para su correcto uso, la biomasa debe cumplir las dimensiones determinadas para el proceso de producción, preferiblemente en estado seco y limpia o exceso de suciedades.

1.2.6 Secado

El secado es importante y la baja humedad garantiza la eficiencia del pellet, si se utiliza biomasa con gran cantidad de humedad se debe tomar en cuenta el proceso previo de secado. La biomasa no debe exceder el 20% de humedad, por lo tanto, se debe regular la temperatura adecuado en el proceso de secado.

1.2.7 Humectación de la materia prima

Resulta fundamental controlar la humectación en el proceso de mezcla con ello se garantiza la correcta compactación y adherencia entre las fibras.

1.2.8 Proceso de Prensado

Es el proceso principal en la cual se le da la forma al pellet, en el cual se trabaja a altas presiones y temperaturas controladas generando una conformación de calidad lo cual asegura que el pellet sea duradero y sólido, con una superficie fina y homogénea. Si el pellet no cumple con el estándar de calidad pueden romperse con facilidad generando residuos de polvo lo que conlleva a un aumento de polvo residual al finalizar el proceso de combustión. Esto equivale a una menor capacidad de contenido valor calorífico y eficiencia energética.

1.2.9 Proceso de Tamizado

Después de proceso de prensado, el pellet es clasificado por tamaños; los pellets que no cumplan con los requisitos de tamaño y que tengan defectos se desechan y vuelven al ciclo inicial de producción. Por lo tanto, el tamizado es la clasificación y selección de pellets de tamaño estándar.

1.2.10 Envasado

En este proceso se utiliza diferentes recipientes tales como fundas o sacos de diferente capacidad, maxi sacos, a granel, entre otros. Dependiendo del uso que se le vaya a dar al pellet se puede almacenar en una gran cantidad de recipientes, la recomendación es que no se exponga a la humedad por tiempo prolongado ya que puede deteriorar las propiedades del pellet.

1.2.11 Almacenamiento

El almacenamiento se realiza sitios controlados de la humedad en bodegas internas o externas. Además, los sacos de pellets se deben recubrir con fundas plásticas para mantener las propiedades intactas.

1.2.12 Usos del pellet

En general se usa para generación de agua caliente y la calefacción, pero se tiene algunas aplicaciones:

- Estufas y calderas para calefacción

- Calderas de agua caliente
- Calderas de vapor
- Procesos industriales (hornos de secado de frutas, cocción de arcillas, panificadores, entre otros)

1.2.13 Ventajas del uso de los pellets

- Calefacción eficiente y fácil de operar
- Alta densidad energética
- Material sencillo de almacenar y fácil de transporte
- Se produce menos monóxido de carbono
- Se reduce el tamaño de las estufas
- Fácil apilamiento de sacos
- Suelen ser más baratos comparados con otros combustibles

1.2.14 Poder calorífico

La biomasa posee un poder calorífico potencial estimado de $100 \frac{EJ}{año}$, lo que evidencia su relevancia como fuente energética renovable. De este total, aproximadamente $416 \frac{EJ}{año}$ corresponden a la madera, lo que representa más del 30% del consumo global de energía primaria [22]. En la Tabla 1 se presentan los valores energéticos de diferentes materiales de biomasa, expresados en $\frac{MJ}{kg}$, lo que permite comparar su rendimiento calórico y comprender mejor su aporte dentro del contexto global.

TABLA I

ENERGÍA CALORÍFICA PARA DIFERENTES MATERIALES DE BIOMASA
[22].

Tipo de Biomasa	Valor (MJ/kg)
Carbón coquizado	25 a 32
Madera	10 a 20
Cascara de coco	18 a 19

TABLA II

ENERGÍA CALORÍFICA PARA DIFERENTES MATERIALES DE BIOMASA
[22].(Continuación)

Paja	14 a 16
Cascara de café	16
Tallos de algodón	16
Cascara de cacao	13 a 16
Cuesco de palma de aceite	15
Cascara de arroz	13 a 14
Tallos de maíz	13 a 15
Aserrín	11
Pellet de aserrín	20.5
Pellet de madera	20.3

Muchos residuos agrícolas tienen un poder calorífico entre 13-19 MJ/kg, sin embargo, los pellets ofrecen valores que superan los 20 MJ/kg.

1.2.15 Parámetros a considerar en la fabricación

Hay 3 aspectos a considerar, para que el rendimiento del material a ser peletizado sea de buena calidad. Las cuales son: humedad relativa del material, homogenización de la materia prima, dosificación/ frecuencia.

Humedad del material/biomasa

Según [23] el aserrín suele tener entre 11-18% de humedad, esto depende del tipo de madera de donde se obtiene el aserrín. El aserrín de pino se peletiza con una humedad aproximada del 14%, la paja de cereales con un 18% de humedad y el aserrín de encina con una humedad que ronda entre 11-12%. Por lo tanto, si la humedad se mantiene por debajo del 10% la biomasa se machacará y no podrá realizar el pellet, además, si la humedad sobrepasa el 18% el pellet resultante no se compacta de forma idónea y tiende a resquebrajarse.

En la Figura 4 se muestra un higrómetro profesional, herramienta indispensable para medir la humedad de la biomasa con exactitud. Su uso permite mantener los niveles óptimos de humedad, garantizando la calidad y durabilidad del pellet final. Esta etapa de control es clave para cumplir con los estándares técnicos establecidos en la producción de biocombustibles sólidos.



Figura 4. Hidrómetro profesional [23].

Homogenización

Es la estandarización de los gránulos de la biomasa, este proceso es importante ya que se mide la longitud de la partícula el cual es ideal de 4-5 mm para un troquel de con matriz de 6 mm. Sin embargo, la biomasa como la paja, la viruta y materiales similares contienen poca densidad y mucho volumen son difíciles de tratar debido a que tiene poco peso, entonces alimentar a los sistemas de peletización son dificultosos porque generan atascos y túneles [23].

Para resolver el inconveniente de la dosificación es necesario moler la viruta o aserrín en las trituradoras de martillo para que este se convierta en aserrín, por lo tanto, de esta forma se logra darle más densidad a la biomasa. En el caso de utilizar diferentes tipos aserrín, la mezcla debe estar bien homogenizada para que la máquina no haga cambios en la granulometría del material.

La adicción de aditivos en la mezcla puede facilitar la compactación de los pellets, generalmente se utiliza el almidón de maíz. Entonces la utilización de aditivos ayuda prolongar la vida útil de los componentes de la máquina tales como: rodillos, matrices y otras partes móviles; siempre que no se exceda el 5% de una mezcla.

En la Figura 5 se muestra un mezclador de ciclo continuo con humificador, herramienta esencial para lograr una mezcla uniforme y con humedad controlada. Este equipo

permite integrar distintos tipos de biomasa y aditivos de forma homogénea, optimizando el proceso de peletizado y asegurando la calidad del producto final.



Figura 5. Mezclador de ciclo continuo con humificador [23].

Alimentación secuencial

Es un proceso importante ya que este determina la cantidad de material que se dosifica a la máquina peletizadora; porque la máquina solo es capaz de procesar el material suficiente cada segundo. Dependiendo de la máquina se debe tener cuidado en la alimentación de la biomasa ya que los rodillos trabajan con un peso encima, sobrecargar la tolva puede afectar al rendimiento de este y como consecuencia se produzca un túnel debajo del material haciendo que la máquina trabaje en vacío y generando el paro de la máquina. Para evitar los túneles en la alimentación se debe implementar un sistema de dosificación con moto reductor con la finalidad de regular la dosis de material que se le da a la máquina.

1.2.16 Descripción de los tipos de peletizadoras

Hoy en la actualidad, existe una amplia gama peletizadoras en el mercado que se acoplan de acuerdo con la necesidad y la producción de diferentes pellets provenientes de diferentes materiales como la madera, polímeros o alimentos balanceados. Sin embargo, la clasificación principal se realiza según la tecnología que utilizan destacando entre ellas:

- Peletizadora de matriz plana
- Peletizadora de matriz anular

Peletizadora de matriz plana

Esta máquina cuenta con una matriz cilíndrica y plana que posee numerosas perforaciones por la cual atraviesa la biomasa para ser reforzada y comprimida por dos rodillos que giran sobre la matriz en dirección de las manecillas del reloj. Esta peletizadora se emplea para producciones bajas y medias. El costo de la máquina es relativamente bajo y permite fabricar gran variedad de productos. En la Figura 6 se muestra el funcionamiento de una peletizadora de matriz plana, destacando la disposición de los rodillos sobre la matriz y el recorrido del material durante la compresión, lo que permite visualizar claramente el principio operativo de este tipo de equipo [24].



Figura 6. Funcionamiento de una peletizadora de matriz plana [24].

Peletizadora de matriz anular

Este tipo de máquina está formado por un cilindro hueco perforado a lo largo de todo el cuerpo cilíndrico, generalmente el material es empujado mediante cilindros giratorios incorporados en el interior del cilindro hueco como se muestra en la Figura 7. Esta peletizadora es utilizada para manejar cantidades grandes por lo que requieren una gran cantidad de energía por lo que se utiliza a escala industrial [25].



Figura 7. Peletizadora de matriz anular [25].

Características generales de la peletizadora con matriz giratoria

Tras evaluar distintas configuraciones, se optó por fabricar una peletizadora con rodillos giratorios y matriz estática, debido a su alta eficiencia en la transformación de materia prima en pellets. La máquina se estructura en cuatro sistemas funcionales, descritos a continuación. Esta configuración también permite una mejor disipación del calor generado durante la compresión, lo que contribuye a la estabilidad dimensional del pellet final.

1.2.17 Sistema de transmisión de Potencia

El sistema de transmisión de potencia tiene como propósito asegurar el envío de energía mecánica hacia el mecanismo de compresión. Está compuesto por un motor que genera torque, el cual se transfiere a través de un eje hasta un engranaje cónico que modifica la dirección del movimiento en un ángulo de 90° , permitiendo que la fuerza se dirija adecuadamente hacia la matriz encargada de la extrusión. En la Figura 8 se presenta el esquema de funcionamiento de este sistema, donde se observa la disposición de los componentes principales como el motor, los engranajes, los rodillos y la matriz, lo que permite comprender la lógica mecánica detrás del proceso de peletizado [24].

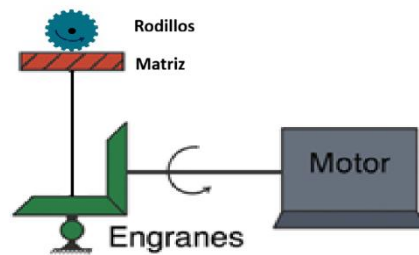


Figura 8. Esquema de funcionamiento del sistema de transmisión [24].

1.2.18 Sistema de compresión y extrusión del material

En esta sección de la máquina se lleva a cabo la transformación del material granulado en pellets compactos mediante la aplicación de presión. El proceso se basa en el principio de extrusión, donde una matriz giratoria define la forma cilíndrica del pellet y los rodillos fijos aplican la fuerza necesaria para compactar la mezcla. Además, el sistema aprovecha el calor generado por fricción para favorecer la cohesión entre

partículas, logrando una estructura sólida al finalizar el proceso. En la Figura 9 se presenta el esquema del sistema de compresión y extrusión, donde se observa cómo la fuerza de compresión actúa sobre la matriz para moldear el material, representando gráficamente el funcionamiento interno de esta etapa [24].



Figura 9. Esquema del sistema de compresión y extrusión [24].

1.2.19 Sistema de corte del pellet

Una vez completada la extrusión, el pellet debe ser seccionado para controlar su longitud. Para ello, se incorpora una cuchilla ubicada justo debajo de la matriz, cuya posición puede ajustarse según el tamaño deseado. Dado que los ingredientes del pellet suelen ser abrasivos, la cuchilla debe conservar su filo bajo condiciones de desgaste, garantizando así la calidad del producto final. En la Figura 10 se muestra el esquema del sistema de corte, donde se observa la interacción entre el rodillo y la cuchilla, elementos clave para lograr un corte preciso y eficiente del pellet extruido [24].



Figura 10. Esquema del sistema de corte [24].

1.2.20 Sistema de alimentación de materia prima

Este sistema regula la cantidad de material que ingresa a la cámara de compresión, optimizando el rendimiento del proceso. Está conformado por una tolva de geometría cónica, equipada con un mecanismo de apertura mecánica que permite el flujo controlado del aserrín hacia el sistema de extrusión. En la Figura 11 se presenta el

esquema del sistema de alimentación tipo tolva, donde se observa cómo el diseño facilita la dosificación del material y su conducción eficiente hacia la cámara de compresión [24].

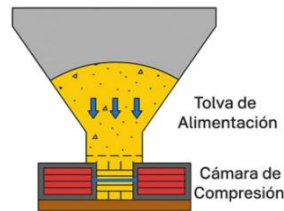


Figura 11. Esquema del sistema de alimentacion tipo tolva [24].

1.2.21 Esquema general de la peletizadora

El esquema general de la peletizadora permite visualizar la disposición estructural y funcional de los componentes que integran el sistema de peletizado. Se incluyen vistas laterales y cortes transversales que detallan elementos clave como la tolva de alimentación, el sistema de transmisión, la cámara de compresión, los engranajes, los rodillos, la matriz y el mecanismo de corte. En la Figura 12 se presenta este esquema integral, donde se identifican claramente las partes internas y externas del prototipo, facilitando la comprensión del flujo operativo desde la entrada de la biomasa hasta la obtención del pellet final [24].

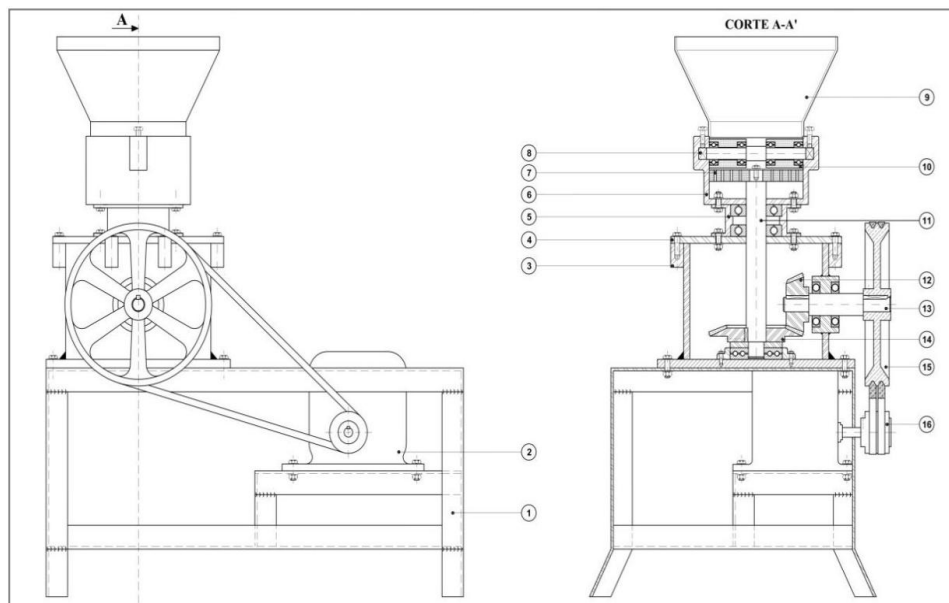


Figura 12. Partes de una peletizadora a escala [24].

En la Tabla II se enumera las partes de la peletizadora presentada en la Figura 12 detallando así:

TABLA III.
DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DE UNA PELETIZADORA.

Numeración	Parte
1	Estructura
2	Motor estático
3	Cámara de engranajes
4	Tapa de cámara de engranaje
5	Cámara de soporte del eje central
6	Cámara de compresión
7	Matriz plana
8	Eje de rodillo de compresión
9	Tolva
10	Rodillos de compresión
11	Eje de transmisión
12	Piñón cónico
13	Eje de transmisión horizontal
14	Rueda cónica
15	Polea conducida
16	Polea conductora

Para garantizar la durabilidad del equipo y la calidad del producto final, se seleccionaron materiales con propiedades anticorrosivas para los principales componentes de la máquina. Cada elemento fue asociado a un tipo de acero específico y, en algunos casos, a tratamientos térmicos o acabados superficiales que mejoran su resistencia al desgaste y a la corrosión. En la Tabla 3 se detallan los materiales sugeridos para la fabricación de la peletizadora, incluyendo el tipo de acero utilizado en partes como la tolva, la matriz, los rodillos, los ejes de transmisión y la estructura general, así como los acabados aplicados para prolongar su vida útil [24].

Tabla IV.
MATERIALES SUGERIDOS PARA LA FABRICACIÓN DE LA
PELETIZADORA.

Elemento de máquina	Tipo de Material	Tipo de Acabado superficial
Tolva para alimentación	Acero galvanizado	Sin tratar
Cuerpo de la peletizadora	Acero al carbono ASTM A106 GR. B	Pintura por pulverización
Matriz y rodillos para la compresión	Acero de aleación AISI 8620	Tratamiento de Cementado, Templado y Revenido.
Ejes de transmisión	Acero al carbono AISI 4340	Sin tratar
Estructura general	Acero ASTM A36	Pintura por pulverización

1.2.22 Normativa internacional para la calidad de pellets de madera

La norma internacional ISO 17225-2:2014 regula la calidad de los pellets de madera mediante parámetros técnicos como diámetro, longitud, humedad, densidad y durabilidad mecánica. Esta normativa asegura estándares de desempeño y seguridad, favoreciendo su comercialización y uso en sistemas de combustión. En la Tabla 4 se presentan los principales requisitos que sirven como referencia para evaluar la calidad de los pellets [26].

TABLA V.
PRINCIPALES REQUISITOS DEFINIDOS POR LA NORMATIVA ISO 17225-
2:2014. [26]

Parámetro técnico	Requisito según norma ISO 17225-2:2014
Diámetro del pellet	± 6 mm
Longitud	31.15 – 40 mm

TABLA VI.
PRINCIPALES REQUISITOS DEFINIDOS POR LA NORMATIVA ISO 17225-
2:2014. (continuación) [26]

Contenido de humedad	$\leq 10\%$
Densidad aparente	$\geq 600 \text{ kg/m}^3$
Durabilidad mecánica	$\geq 97.5\%$

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y construir una máquina peletizadora de aserrín para la Facultad de ingeniería Civil y Mecánica

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar lo parámetro de diseño de la máquina peletizadora de aserrín, con el fin de establecer los requisitos técnicos que aseguren su funcionalidad.

Diseñar la máquina peletizadora de aserrín para que cumpla con los requisitos establecidos y se capaz de realizar el proceso de paletización de manera efectiva

Construir la máquina peletizadora de aserrín para evaluar su rendimiento y capacidad de producción.

CAPITULO II.- METODOLOGIA

Esta investigación adopta un enfoque aplicado, experimental y cuantitativo. La parte aplicada se centra en diseñar y construir una máquina funcional para transformar biomasa en pellets, resolviendo un problema técnico real [1]. La parte experimental permite obtener datos físicos del producto y evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones reales [2]. Por lo tanto, el enfoque combinado asegura que el diseño del prototipo cumpla con criterios teóricos como con exigencias prácticas.

Entonces la metodología aplicada para este estudio de este proyecto técnico se basa en un enfoque sistemático orientado al diseño y construcción de una máquina peletizadora de aserrín para la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. Este enfoque abarca principios de ingeniería mecánica combinando técnicas de investigación documental, experimental y de validación funcional.

El desarrollo del proyecto se fundamentó en el uso de herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), complementadas con cálculos técnicos ajustados a las normativas vigentes, lo que aseguró la seguridad, eficiencia y viabilidad del equipo. Como parámetro rector se estableció una capacidad de producción de 50 kg/h, a partir de la cual se definieron las dimensiones constructivas, los esfuerzos admisibles y las condiciones de operación. La metodología aplicada comprendió la revisión bibliográfica, la selección de materiales, el modelado en CAD, la simulación estructural, la fabricación del prototipo y la ejecución de pruebas funcionales. En la Figura 13 se presenta el flujograma que resume este proceso de diseño, evidenciando la secuencia lógica y validada que permitió el desarrollo integral del equipo.

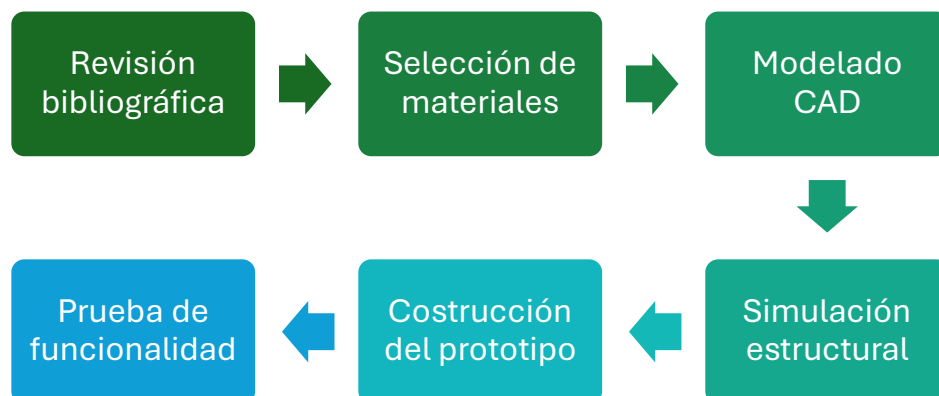


Figura 13. Flujograma del proceso de diseño de la máquina [2].

2.1 Enfoque metodológico

Enfoque cuantitativo: este método permite medir los parámetros físicos, químicos y mecánicos del aserrín tales como la humedad granulometría, densidad y poder calorífico a través de mediciones controladas, por lo tanto, el diseño de la máquina depende del tipo de aserrín a recibir y la calidad de pellet a fabricar, entonces el diseño incluye normas internacionales como la ISO 17831-1:2015 para los pellets de biomasa sólida y los consejos de la IRENA para la eficiencia energética.

Enfoque cualitativo: este método se utiliza para evaluar la funcionalidad, ergonomía y aplicabilidad de la máquina en ámbitos educativos mediante la observación. Por lo que, las dimensiones, accesorios y accesibilidad para poder utilizarlo son características importantes que se deben tomar en cuenta para que sean incluidas en el diseño de la máquina.

2.2 Modalidad de investigación

Para este estudio se revisaron fuentes científicas, normativas técnicas y estudios anteriores realizados sobre la peletización, biomasa y diseño mecánico. En la parte experimental se desarrolló un prototipo funcional de una máquina peletizadora para garantizar la calidad del pellet producido.

2.3 Población y muestra

La población objetivo para este estudio son los talleres de carpinterías locales que generan los residuos de aserrín de madera (pino y eucalipto) en Ambato. Las muestras se recolectan de fuentes locales las cuales se realizaron análisis de humedad usando hidrómetro además de la granulometría homogénea de las muestras en cantidades suficientes para las pruebas de diseño y operación.

2.4 Ubicación

El desarrollo del prototipo se llevará a cabo en el taller Metal Mecánica LOCOTIN, situado en la ciudad de Baños de Agua Santa. En este sitio se elaborarán las piezas necesarias y se ensamblará el equipo, siguiendo los planos definidos durante la fase de diseño. El taller dispone de las herramientas y maquinaria apropiadas para realizar cada pieza en todo el proceso de formación de la peletizadora.

2.5 Equipos y materiales utilizados para la elaboración del equipo

Para la ejecución del proyecto se requiere la disponibilidad de un conjunto integral de herramientas, equipos y materiales que garanticen el adecuado desarrollo de las fases de diseño, fabricación y ensamblaje del prototipo de peletizadora. Estos recursos constituyen la base operativa para transformar los planos y cálculos en un dispositivo funcional, asegurando precisión en la manufactura y confiabilidad en las pruebas experimentales. Asimismo, su correcta selección y uso permiten optimizar tiempos de trabajo, reducir errores en la construcción y garantizar la seguridad durante las operaciones. A continuación, se presentan los elementos más relevantes, organizados según su función dentro del proceso constructivo:

2.5.1 Herramientas de fabricación y mecanizado

- Torno mecánico: fundamental para el mecanizado de piezas cilíndricas como ejes, rodillos y bujes. Permite realizar cortes precisos y acabados mediante el giro controlado de la pieza. En la Figura 14 se muestra un torno convencional, herramienta clave en la elaboración de componentes metálicos del prototipo peletizador [2].



Figura 14. Torno convencional [2].

- Fresadora universal: utilizada para realizar ranuras, superficies planas y cavidades en componentes estructurales. Su versatilidad permite trabajar distintos tipos de materiales con precisión, siendo fundamental en procesos de fabricación mecánica. En la Figura 15 se muestra una fresadora convencional, empleada en el mecanizado de piezas clave para el ensamblaje del prototipo [2].



Figura 15. Fresadora convencional [2].

- Taladro de banco: herramienta utilizada para realizar perforaciones precisas en placas, soportes y piezas de ensamblaje. Su diseño permite mantener estabilidad y exactitud durante el proceso de perforación. En la Figura 16 se muestra un taladro de pedestal, empleado en la fabricación de componentes del prototipo [2].



Figura 16. Taladro de pedestal [2].

- Esmeriladora angular (amoladora): Para cortes rápidos en perfiles metálicos y limpieza de cordones de soldadura. Su disco giratorio permite trabajar con precisión en zonas de difícil acceso. En la Figura 17 se muestra una amoladora convencional, empleada en tareas de preparación y acabado durante la fabricación del prototipo [2].



Figura 17. Amoladora o esmeriladora circular [2].

- Discos de corte y pulido: utilizado para obtener acabados superficiales, eliminar rebabas y preparar zonas de unión en piezas metálicas. Su aplicación mejora la calidad del ensamblaje y la estética del componente final. En la

Figura 18 se muestran los discos utilizados durante el proceso de fabricación del prototipo [2].



Figura 18. Discos de corte y de Pulido [2].

- Máquina de soldar eléctrica (SMAW/GMAW): se se emplea para unir componentes metálicos mediante soldadura por arco. Su uso depende del tipo de material y del espesor de las piezas a ensamblar. En la Figura 19 se muestra el equipo utilizado para realizar las uniones estructurales del prototipo.



Figura 19. Suelda eléctrica [2].

- Prensa hidráulica: utilizado para realizar pruebas de compactación y verificar la resistencia estructural en componentes críticos. Su aplicación permite evaluar el comportamiento de las piezas bajo carga, asegurando su fiabilidad en condiciones operativas. En la Figura 20 se muestra la prensa manual empleada durante el proceso de validación del prototipo [2].



Figura 20. Prensa manual hidráulica [2].

- Calibradores y micrómetros: utilizados para verificar tolerancias dimensionales con alta precisión. Su empleo es fundamental durante el proceso de fabricación, especialmente en piezas que requieren ajustes exactos. En la

Figura 21 se presentan los equipos utilizados para el control dimensional del prototipo [2].



Figura 21. Calibrador y micrómetro [2].

2.5.2 Equipos de medición y control

- Multímetro digital: Para verificar conexiones eléctricas, continuidad y parámetros del sistema motriz. Su precisión permite detectar fallos y asegurar el correcto funcionamiento de los componentes eléctricos. En la Figura 22 se muestra el equipo empleado durante la validación eléctrica del prototipo [3].



Figura 22. Multímetro [3]

- Tacómetro: Para medir la velocidad de rotación del motor y del sistema de transmisión. Su lectura permite verificar el comportamiento dinámico del equipo durante las pruebas funcionales. En la Figura 23 se muestra el dispositivo empleado para el control de velocidad del prototipo [3].



Figura 23. Tacómetro [3].

- Termómetro infrarrojo: Para controlar la temperatura durante el proceso de peletizado sin contacto directo. Este instrumento permite verificar que las

condiciones térmicas se mantengan dentro de los rangos adecuados. En la Figura 24 se muestra la pistola medidora de temperatura empleada en la etapa de validación térmica del prototipo [3].



Figura 24. Pistola medidora de temperatura [3].

- Hidrómetro digital: Para medir la humedad del aserrín antes y después del proceso de peletizado. Esta medición es clave para garantizar condiciones óptimas de compactación y calidad del pellet. En la Figura 25 se muestra el instrumento utilizado para el control de humedad durante la etapa experimental [3].



Figura 25. Hidrómetro [3].

- Balanza electrónica: Para cuantificar la producción de pellets por hora y evaluar el rendimiento del prototipo. Este instrumento permite verificar la eficiencia del sistema en condiciones reales de operación. En la Figura 26 se muestra la balanza digital empleada durante las pruebas de productividad [3].



Figura 26. Balanza digital electrónica [3].

2.5.3 Materiales para construcción

- Acero estructural ASTM A36: Se emplea en la fabricación del chasis, soportes y bastidores del prototipo. Su resistencia mecánica y facilidad de soldadura lo hacen adecuado para aplicaciones estructurales. En la Figura 27 se presentan los perfiles utilizados como base del ensamblaje metálico [4].



Figura 27. Perfiles A36 [4].

- Acero aleado AISI/SAE 8620: Se utiliza en componentes que están en contacto directo con el aserrín, debido a su alta resistencia a la corrosión y al desgaste. Esta propiedad lo hace ideal para zonas expuestas a fricción y humedad durante el proceso de peletizado. En la Figura 28 se muestra el material seleccionado para garantizar durabilidad en partes críticas del prototipo [4].



Figura 28. Acero aleado AISI 8620 [4].

- Rodamientos de bolas y de rodillos: Se utilizan para soportar cargas radiales y axiales en el sistema de transmisión. Estos componentes permiten un movimiento rotativo eficiente y reducen el desgaste en partes móviles. En la Figura 29 se muestran los rodamientos seleccionados para garantizar la estabilidad mecánica del prototipo [4].



Figura 29. Rodamientos cónicos y de bolas [4].

- Ejes de acero templado: Se utilizan para transmitir potencia mecánica entre componentes del sistema. Su alta resistencia permite soportar esfuerzos torsionales y garantizar la integridad estructural del conjunto. En la Figura 30 se presentan los ejes empleados en las uniones de transmisión del prototipo [4].



Figura 30. Ejes de transmisión [4].

- Placas de acero para la matriz: Se utiliza como base para realizar perforaciones calibradas. Estas perforaciones permiten definir el diámetro de los pellets durante el proceso de compactación. En la Figura 31 se muestra la plancha de acero empleada en la fabricación del sistema de peletizado [4].



Figura 31. Plancha de acero [4].

- Motor trifásico de 7 HP o superior: Para proporcionar la potencia necesaria al sistema de compactación. Su diseño robusto y eficiencia energética lo hacen adecuado para aplicaciones industriales de alta demanda. En la Figura 32 se muestra el equipo motriz principal del prototipo [4].



Figura 32. Motor trifásico [4].

- Caja reductora tipo helicoidal: Se utiliza para ajustar la velocidad de giro y aumentar el torque del motor. Este componente permite adaptar la potencia entregada al sistema de compactación, optimizando su rendimiento. En la Figura 33 se muestra el mecanismo de reducción empleado en el prototipo [4].



Figura 33. Caja reductora [4].

- Acoplamientos: Se utilizan para unir el motor con el eje de transmisión, permitiendo una transferencia eficiente de potencia. Además, estos componentes absorben vibraciones y compensan desalineaciones, lo que mejora la estabilidad del sistema. En la Figura 34 se muestran los acoples empleados en el ensamble del prototipo [4].



Figura 34. Acoples de ejes [4].

- Chapa de Tol: Es una lámina metálica utilizada para fabricar componentes que permiten introducir el aserrín de forma controlada. Su geometría facilita el direccionamiento del material hacia el sistema de compactación sin obstrucciones. En la Figura 35 se muestra el material empleado en la estructura de alimentación del prototipo [4].



Figura 35. Chapa de tol [4].

2.6 Tratamiento estándar para Acero aleado cementante AISI/SAE 8620:

El acero aleado de bajo contenido de carbono, formulado para procesos de cementación, presenta una composición aproximada de 0,16% de C, 1% de Mn y 1% de Cr. Esta configuración química le otorga una elevada capacidad para generar una capa superficial endurecida mediante el enriquecimiento de carbono, mientras conserva un núcleo dúctil y resistente a impactos. La combinación de dureza externa y tenacidad interna lo convierte en un material idóneo para la fabricación de piezas expuestas a fricción, cargas cíclicas y condiciones de desgaste, tales como rodillos compactadores, engranajes, ejes y platos de extrusión. [27].

El tratamiento térmico aplicado consta de tres etapas fundamentales:

- **Carburizado:** Se realiza a temperaturas entre 900 °C y 950 °C en atmósfera controlada, con el objetivo de difundir carbono hacia la superficie del acero. Esto genera una capa endurecible de aproximadamente 0.8 a 1.2 mm de profundidad, cuya dureza puede superar los 58 HRC tras el temple. La profundidad efectiva depende del tiempo de exposición, la temperatura y la composición del acero base [28].
- **Temple:** Luego del carburizado, se realiza un enfriamiento rápido (generalmente en aceite) para transformar la austenita superficial en martensita. Este proceso fija la dureza superficial y mejora la resistencia al desgaste. La dureza obtenida típicamente se encuentra en el rango de 58 a 62 HRC, mientras que el núcleo conserva una dureza más baja (~30–35 HRC), lo que garantiza tenacidad y resistencia a la fractura [27].
- **Revenido:** En la fase final del tratamiento térmico se realiza un revenido a temperaturas comprendidas entre 150 °C y 200 °C, cuyo propósito es reducir las tensiones internas originadas durante el proceso de temple. Esta operación resulta esencial para prevenir la fragilidad del material y garantizar la estabilidad dimensional de las piezas. Además, el revenido posibilita regular la dureza alcanzada, adaptándola a las exigencias funcionales específicas de cada componente [28].

2.7 Software y modelado

SolidWorks 2023: Para el diseño tridimensional de todas las piezas, simulaciones de esfuerzo, análisis de interferencias y generación de planos técnicos. Durante esta etapa se definirán las dimensiones, tolerancias y materiales específicos de cada pieza. Además, se realizará simulaciones básicas para analizar el comportamiento del equipo y asegurar el montaje de todas las partes antes de su fabricación. Este proceso permite anticipar posibles fallos estructurales y optimizar el uso de materiales. La precisión del modelado facilita la comunicación técnica entre diseño, manufactura y validación experimental.

2.8 Recursos económicos

Los recursos económicos iniciales contemplan gastos en materiales de oficina, materia prima, piezas mecánicas, logística y servicios de ingeniería. Esta inversión permitió cubrir los requerimientos básicos para el diseño, construcción y validación del prototipo. El costo total estimado asciende a \$1200, según se detalla en la Tabla 5. Además, esta planificación financiera asegura un uso eficiente de los recursos disponibles y garantiza la continuidad del proyecto en todas sus fases.

TABLA VII.
DESCRIPCIÓN DE RECURSOS ECONÓMICOS INICIALES.

Descripción	Valor (\$)
Materiales de oficina y suministros	50
Materia prima	150
Piezas y partes	750
Logísticas	50
Costo de ingeniería	200
Costo total	1200

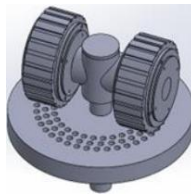
2.9 Métodos

2.9.1 Alternativas para la selección de la matriz

Existe 2 tipos principales de peletizadoras las cuales son: de matriz anular y matriz plana, en esta última se subdivide en matriz plana giratoria y matriz estática. En la siguiente tabla se muestra las alternativas planteadas.

TABLA VIII.
ALTERNATIVAS PARA LA SELECCIÓN DE LA MATRIZ.

Opción 1	Opción 2	Opción 3
Máquina peletizadora de matriz plana giratoria con rodillos estáticos	Máquina peletizadora de matriz plana estática con rodillos giratorios	Máquina peletizadora de matriz anular
En esta peletizadora la matriz es la que realiza el giro mientras que los rodillos se mantienen en la misma por medio de un eje empotrado en la tolva. Por lo tanto, esto permite que los rodillos giren con el movimiento de la matriz.	En esta peletizadora la matriz se mantiene estática y los rodillos son lo que giran, este tipo de matriz permite que los rodillos giren con el movimiento del todo el sistema que está conectado a un eje.	Esta peletizadora contiene un diseño donde la matriz tiene una forma circular o en forma de anillo que alberga en su interior los rodillos los cuales realizan la compresión del material. En este caso los rodillos giran en sintonía con la matriz.



Con las opciones de matriz presentadas se procede a la calificación de estas mediante una escala donde la característica de excelente tendrá una calificación de 10, la regular tendrá 5 y la mala una calificación de 1. Por lo tanto, en la tabla 6 se muestra la calificación de la máquina y su matriz, además de las diferentes características que se detallan.

2.9.2 Selección de la matriz para la peletizadora

La Tabla 7 presenta la evaluación comparativa de tres alternativas de matriz para la peletizadora, considerando cinco criterios técnicos: capacidad de producción, facilidad de construcción, facilidad de peletizado, tiempo de fabricación y costo. Cada opción fue calificada según su desempeño en cada aspecto, permitiendo seleccionar la más adecuada para el prototipo. Esta metodología de ponderación facilita una decisión objetiva basada en prioridades funcionales.

TABLA IX.
SELECCIÓN DE LA MATRIZ POR PONDERACIÓN.

Características	Alternativas		
	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Capacidad de producción	5	5	10
Facilidad de construcción	10	10	5
Facilidad de peletizado	5	10	1
Tiempo de construcción	10	10	1
Costo de fabricación	10	10	5
Total	40	45	22

Entonces, después de haber realizado la calificación a las alternativas se eligió la opción más optima y la que se ajusta al proyecto, el cual es la opción 2 que es la peletizadora con matriz plana estática con rodillos giratorios.

2.9.3 Normativa para pellets de calidad

El estándar vigente para pellets ISO 17225-2:2014 (5) define las clases de pellets A1, A2 y B para aplicaciones comerciales y residenciales mientras que las clases I1, I2 e I3 para uso industrial.

Las clases A1, A2, I1 e I2 se distinguen por utilizar únicamente madera virgen sin tratamientos químicos. En cambio, las categorías B e I3 permiten residuos tratados, siempre bajo restricciones que eviten metales pesados o compuestos halogenados. En la Figura 36 se presentan las especificaciones técnicas que establecen los estándares de calidad de cada tipo de pellet. Estas clasificaciones garantizan la seguridad ambiental y la eficiencia energética en su uso como biocombustible. Así mismo, proporcionan una referencia clara para productores y consumidores, facilitando la trazabilidad y el cumplimiento de normativas internacionales [26].

Clase/ propiedad	A1	A2	B
Origen y fuente	Fuste y residuos de madera no tratada químicamente	Los mismos que A1 más árboles enteros sin raíces y restos de corta	Bosque, plantaciones y otra madera virgen; subproductos y residuos de la industria del procesamiento de la madera; y madera usada no tratada químicamente
Diámetro y longitud (mm)	D06, 6 ± 1 ; $3,15 < L \leq 40$ D08, 8 ± 1 ; $3,15 < L \leq 40$ 		
Humedad (M, %)	M10 ≤ 10		
Cenizas (%)	A0.7 $\leq 0,7$	A1.2 $\leq 1,2$	A2.0 $\leq 2,0$
Durabilidad mecánica (DU, %)	DU97.5 $\geq 97,5$		DU96.5 $\geq 96,5$
Finos (%)	F1.0 $\leq 1,0$		
Aditivos (%)	≤ 2 ; a declarar tipo y cantidad		
Poder cal. neto (MJ/kg o kWh/kg)	Q16.5 $\geq 16,5$ o Q4.6 $\geq 4,6$		
Densidad a granel (BD, kg/m³)	BD600 ≥ 600		
Composición (%)	N0.3 $\leq 0,3$ S0.04 $\leq 0,04$ Cl0.02 $\leq 0,02$ As ≤ 1 Cd $\leq 0,5$ Cr ≤ 10 Cu ≤ 10 Pb ≤ 10 Hg $\leq 0,1$ Ni ≤ 10 Zn ≤ 100	N0.5 $\leq 0,5$ S0.05 $\leq 0,05$ Cl0.02 $\leq 0,02$ As ≤ 1 Cd $\leq 0,5$ Cr ≤ 10 Cu ≤ 10 Pb ≤ 10 Hg $\leq 0,1$ Ni ≤ 10 Zn ≤ 100	N1.0 $\leq 1,0$ S0.05 $\leq 0,05$ Cl0.03 $\leq 0,03$ As ≤ 1 Cd $\leq 0,5$ Cr ≤ 10 Cu ≤ 10 Pb ≤ 10 Hg $\leq 0,1$ Ni ≤ 10 Zn ≤ 100

Figura 36. Resumen de las especificaciones estándar del pellet [26].

Las clases I1, I2 e I3 están destinadas al uso industrial y se diferencian de las categorías residenciales por admitir mayores diámetros, contenido de cenizas y porcentaje de finos. También presentan mayor tolerancia en la composición química y en la distribución del tamaño de partícula. En la Figura 37 se resumen las especificaciones técnicas que definen los estándares de calidad para pellets industriales. Estas características permiten su utilización en calderas y sistemas de gran potencia, donde la exigencia energética es más elevada. Así mismo, su clasificación asegura un control

adecuado de emisiones y un desempeño confiable en procesos industriales continuos [29].

Las clases para uso industrial (I1-I3) se diferencian de las clases para uso comercial y residencial en:

- Diámetros hasta 10-12 mm
- Contenido en cenizas hasta 3%
- Finos hasta 4-6%
- Aditivos hasta 3%
- Más margen para los elementos de la composición
- Distribución de tamaño de partícula de pellets desintegrados

Clase/ propiedad	I1	I2	I3
Origen y fuente	Bosque, plantaciones y otra madera virgen. Residuos de madera no tratada químicamente.	Los mismos que I1.	Bosque, plantaciones y otra madera virgen; subproductos y residuos de la industria del procesamiento de la madera; y madera usada no tratada químicamente
Diámetro y longitud (mm)	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D10, 10 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D10, 10 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D12, 12 ± 1; 3,15 < L ≤ 40
Humedad (M, %)	M10 ≤ 10		
Cenizas (%)	A1.0 ≤ 1,0	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
Durabilidad mecánica (DU, %)	97,5 ≥ DU ≥ 99,0		96,5 ≥ DU ≥ 99,0
Finos (%)	F4.0 ≤ 4,0	F5.0 ≤ 5,0	F6.0 ≤ 6,0
Aditivos (%)	≤ 3; a declarar tipo y cantidad		
Poder calorífico neto (Q, MJ/kg o kWh/kg)	Q16.5 ≥ 16,5		
Densidad a granel (BD, kg/m³)	BD600 ≥ 600		
Composición (%)	N0.3 ≤ 0,3 S0.05 ≤ 0,05 Cl0.03 ≤ 0,03 As ≤ 2 Cd ≤ 1,0 Cr ≤ 15 Cu ≤ 20 Pb ≤ 20 Hg ≤ 0,1 Zn ≤ 200	N0.3 ≤ 0,3 S0.05 ≤ 0,05 Cl0.05 ≤ 0,05 As ≤ 2 Cd ≤ 1,0 Cr ≤ 15 Cu ≤ 20 Pb ≤ 20 Hg ≤ 0,1 Zn ≤ 200	N0.6 ≤ 0,6 S0.05 ≤ 0,05 Cl0.1 ≤ 0,1 As ≤ 2 Cd ≤ 1,0 Cr ≤ 15 Cu ≤ 20 Pb ≤ 20 Hg ≤ 0,1 Zn ≤ 200
Distribución del tamaño de partícula	≥ 99 % (<3,15 mm) ≥ 95 % (<2,0 mm) ≥ 60 % (<1,0 mm)	≥ 98 % (<3,15 mm) ≥ 90 % (<2,0 mm) ≥ 50 % (<1,0 mm)	≥ 97 % (<3,15 mm) ≥ 85 % (<2,0 mm) ≥ 40 % (<1,0 mm)

Figura 37. Resumen orientativo de clases y especificaciones de pellets clasificados para uso industrial [29].

2.9.4 Diagrama de flujo para el diseño y la construcción de la máquina



CAPITULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. Análisis y discusión de resultados

3.1 Determinación de los componentes estructurales y funcionales de la máquina peletizadora.

En el diseño de la máquina peletizadora se estableció como parámetro fundamental la capacidad de producción que se fijó en 50 kg/h bajo condiciones operativas estándar. Este valor funciona como punto de referencia para determinar las dimensiones de los componentes, los esfuerzos admisibles y las condiciones de operación de los mecanismos involucrados. Con base en este criterio se definieron las relaciones geométricas, se aplicaron las ecuaciones correspondientes al diseño y se especificaron los requerimientos de transmisión mecánica, junto con las condiciones estructurales necesarias para asegurar la estabilidad y la continuidad del equipo. La determinación de estos parámetros se realizó mediante análisis técnico, simulación computacional y comparación con estándares internacionales:

- Sistema y ecuaciones de alimentación
- Sistema y ecuaciones de compresión
- Sistema y ecuaciones de transmisión de potencia
- Sistema y ecuaciones de corte
- Ecuaciones de la estructura

3.2 Sistema y ecuaciones de alimentación

La unidad de alimentación está compuesta por una tolva de geometría cónica invertida, diseñada para contener el material particulado. El suministro hacia la cámara de compactación se realiza mediante un mecanismo de dosificación por caída libre, aprovechando la gravedad para mantener un flujo constante y controlado. En la Figura 38 se muestra el diseño isométrico de la tolva que forma parte del sistema de alimentación del prototipo.



Figura 38. Vista isométrica de la tolva.

Para definir la capacidad de la tolva y caracterizar el insumo, se aplicaron fórmulas que permiten estimar el volumen de almacenamiento y la densidad del producto, considerando su geometría y propiedades físicas. Este análisis es fundamental para garantizar un flujo adecuado hacia la cámara de compactación. Además, se determinan las características físicas de la biomasa, ya que influyen directamente en la calidad final de los pellets, así que se tiene la:

3.2.1 Humedad

Los residuos de madera como aserrín que están expuestas a cualquier clima contienen una determinada cantidad de agua y esta se la conoce como la humedad. Esta relación se expresa en porcentaje y se determina así:

$$H_m = \frac{m_h - m_o}{m_o} * 100\% \quad (1)$$

Donde:

H_m es la humedad en (%)

m_h es la masa de la madera húmeda (gr)

m_o es la masa de la madera seca (gr) es decir 0% de humedad

3.2.2 Densidad

La densidad del aserrín depende de su porosidad y su origen, por lo tanto, su densidad se calcula con la siguiente formula:

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad (2)$$

Donde:

ρ_H es la densidad en $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

m_H es la masa de la madera (kg)

V_H es el volumen de la madera (m^3)

Valor típico $\rho_{aserrin} = 150 - 250 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$ [10].

Tomamos $\rho_{aserrin} = 200 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$ (valor medio recomendado por FAO [31]).

3.2.3 Volumen de aserrín requerido por hora

$$V_{aserrin} = \frac{\dot{m}}{\rho_{aserrin}} \quad (3)$$

Donde:

$\dot{m}$ = capacidad de producción. $\left[\frac{kg}{h}\right]$

$\rho_{aserrin}$ = densidad promedio del aserrín. $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$$V_{aserrin} = \frac{50 \frac{kg}{h}}{200 \frac{kg}{m^3}}$$

$$V_{aserrin} = 0.25 \frac{m^3}{h}$$

Aunque el volumen requerido para una autonomía completa de una hora de operación es de $0.25 \frac{m^3}{h}$, ello implicaría una tolva troncocónica con dimensiones desproporcionadas respecto al diseño compacto y funcional previsto para la máquina. Esto generaría desafíos en términos de estabilidad e integración estructural. Además, dicha configuración presenta limitaciones prácticas relacionadas con el espacio y facilidad de conexión con el sistema de alimentación. Por lo tanto, se optó por una versión más compacta y funcional, que proporciona un volumen útil equivalente al 25 % de la carga total (12.5 kg de aserrín). Esto implica que, para alcanzar la producción objetivo de $50 \frac{kg}{h}$, la tolva debe ser alimentada aproximadamente cuatro veces por hora, lo cual es viable gracias a la incorporación de un sistema de alimentación constante o por recarga manual sincronizada.

3.2.4 Volumen real de la tolva

$$V = \frac{1}{3}\pi h(R^2 + r^2 + R * r) \quad (4)$$

Dónde:

V = volumen de la tolva. [m^3]

h = altura de la tolva. [m]

R = radio superior. [m]

r = radio inferior. [m]

$$V_{tolva} = 12.5 \text{ kg} = 0.0625 \text{ m}^3$$

3.3 Dimensiones para lograr

Tomando en cuenta criterios de diseño estético y funcional, se han definido las dimensiones de la tolva como: altura total $h=0.48$ m, radio superior $R = 0.30$ m y radio inferior $r = 0.090$. Esta configuración genera una geometría cónica equilibrada, visualmente armoniosa y proporcional al volumen de alimentación requerido como se indica en la Figura 39. La relación entre radios (R/r) y la altura permite una transición suave del material hacia la cámara de compactación, evitando acumulaciones y favoreciendo el flujo gravitacional. Según Vera y Córdova, “el diseño de tolvas debe considerar tanto la estética como la funcionalidad, buscando proporciones que faciliten el flujo del material y armonicen con el conjunto estructural” [32]

$h = 0.48$ m

$R = 0.30$ m

$r = 0.090$ m

$$V = \frac{1}{3}\pi(0.40)((0.30)^2 + (0.090)^2 + (0.30 \times 0.090))$$

$$V = 0,0625 \text{ m}^3$$

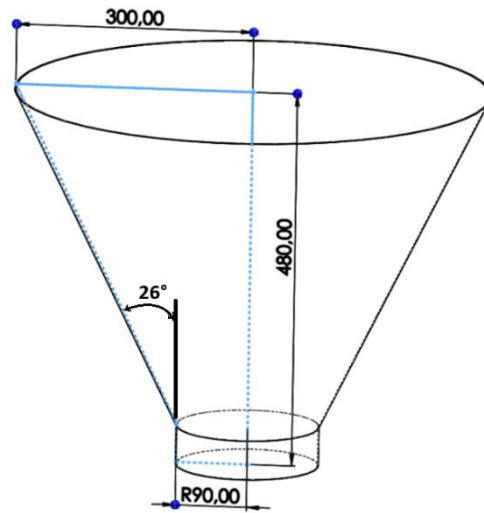


Figura 39. Vista isométrica con las medidas de la tolva

El suministro de la mezcla de aserrín hacia el sistema de compresión se realiza mediante una abertura dosificadora situada en la base de la tolva. Este canal permite el paso controlado del material por gravedad.

3.3.1 Presión lateral estática

La presión lateral estática está dada por la ecuación:

$$P = K \times \rho \times g \times h \quad (5)$$

Donde:

P = presión lateral en pascuales. [Pa]

K = coeficiente de presión lateral.

ρ = densidad aparente del aserrín. $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

g = aceleración gravitacional. $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

h = altura de la columna de aserrín en la tolva. [m]

3.3.2 Rozamiento movilizado μ_h

El rozamiento movilizado μ_h es la fricción entre el material granular y las paredes de la tolva durante su flujo, y varía según el tipo de insumo y la inclinación. La Figura 40 muestra valores estimados de μ_h para distintos materiales, lo que permite prever su

comportamiento en operación. Estos datos son clave para diseñar la tolva y asegurar un flujo eficiente y sin obstrucciones [33].

Material granular	Estado del material	Rango de inclinación de tolva (°)	μ_h estimado
Aserrín seco	Suelto	28 – 30	0.30
Arena seca	Suelto	28 – 35	0.34
Arena húmeda	Compactada	30 – 38	0.28
Granos (maíz, trigo)	Limpios y secos	32 – 40	0.32
Harina de trigo	Pulverizado	35 – 45	0.30
Cáscara de arroz	Fibroso	30 – 36	0.31
Astillas de madera	Irregulares	22 – 28	0.29
Polvo de carbón vegetal	Fino y seco	36 – 42	0.35
Bagazo de caña seco	Fibroso	28 – 34	0.31

Figura 40. Tabla estimada de μ_h para materiales granulares en tolvas [33].

La Figura 41 presenta la relación entre el semiángulo de la tolva (β) y el coeficiente de rozamiento movilizado (μ_h), considerando diferentes valores del factor K . Se observa que, al aumentar el ángulo de inclinación, el rozamiento disminuye, favoreciendo el flujo del material granular. Esta información permite optimizar el diseño geométrico de la tolva según el material y las condiciones de operación.

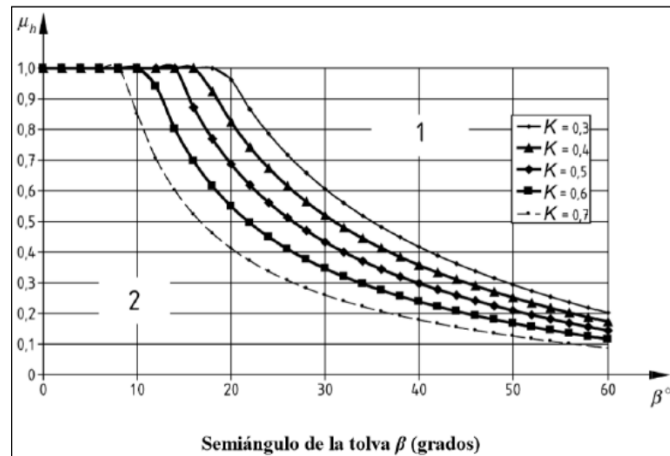


Figura 41. Grafica de factor K [32].

$$P = K \times \rho \times g \times h$$

$$P = 0.7 \times 200 \frac{kg}{m^3} \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times 0.48 m$$

$$P = 659.23 Pa$$

La tolva fue construida con lámina de tol galvanizado de 1 mm de espesor, cuyo límite de fluencia es de aproximadamente 140 MPa, según especificaciones ASTM A653. Su geometría corresponde a un tronco de cono invertido de 48 cm de altura, con radios de 30 cm y 9 cm, lo que arroja un volumen útil de $0.0625m^3$. Considerando una masa de carga de 12.5 kg, se obtiene una densidad aparente del aserrín de $200 \frac{kg}{m^3}$ y una presión lateral estática estimada de 659.23 Pa. La simulación realizada en SolidWorks bajo condiciones de carga uniforme arrojó un esfuerzo máximo de 0.3889 Pa, valor muy inferior al límite de fluencia del material, lo que confirma la resistencia estructural del componente frente a las condiciones operativas previstas. En la Figura 42 se presenta la distribución de esfuerzos obtenida en el análisis computacional.

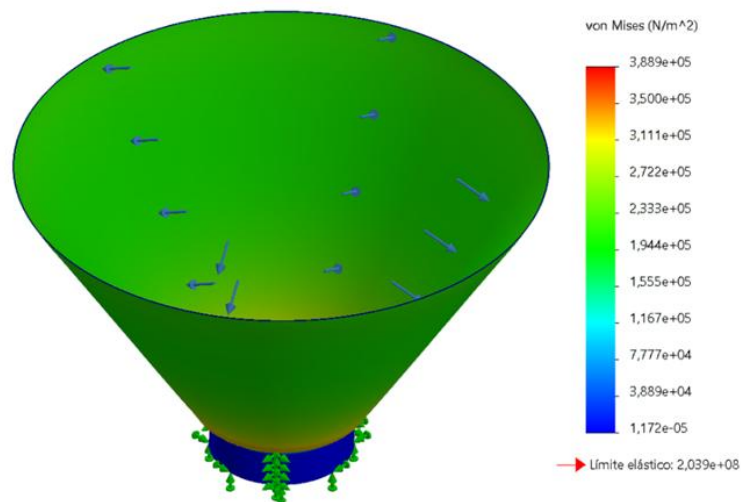


Figura 42. Simulación de la tolva en Solidworks

3.4 Sistema y ecuaciones de compresión

El conjunto de compactación tiene como función transformar el aserrín cernido en pellets mediante presión mecánica controlada. Está compuesto por una matriz de compresión con orificios distribuidos radialmente y dos rodillos que giran sobre su superficie. La matriz actúa como molde de extrusión, mientras que los rodillos aplican fuerza directa sobre el material, impulsándolo hacia las cavidades.

Según la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 15287:2013, basada en la ISO 17225-2:2014 para biocombustibles sólidos, se seleccionó un pellet de diámetro 6 mm. Esta elección responde a criterios de resistencia mecánica, ya que dicho formato

presenta menor susceptibilidad al desmenuzamiento durante el manejo, transporte y almacenamiento a granel. Además, el diámetro de 6 mm cumple con los requisitos de calidad establecidos para aplicaciones energéticas no industriales, garantizando una combustión eficiente y una densidad energética adecuada. En la Figura 43 se presenta el esquema dimensional del pellet adoptado como referencia [34].

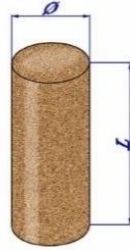


Figura 43. Esquema de un pellet [34].

Para un diámetro de $\varnothing = 6 \text{ mm}$ [34], sugiere la siguiente ecuación:

$$L \leq 5 \times \varnothing \quad (6)$$

$$L = 5 \times 6 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$$

3.4.1 Sección del pellet

Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$A = \pi \times \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2 \quad (7)$$

Donde:

$\varnothing$ = diámetro del pellet. [m]

$$A = \frac{\pi \times (0.006 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 2.83 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

3.4.2 Volumen del pellet

$$V_{\text{pellet}} = A \times L \quad (8)$$

$$V_{\text{pellet}} = 2.83 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \times 0.030 \text{ m}$$

$$V_{pellet} = 8.48 \times 10^{-7} m^3$$

3.4.3 Densidad el pellet

La masa de un pellet de biomasa forestal, de $\varnothing = 0.006 m$ y longitud de $l = 0.030 m$, se determina experimentalmente como $m = 0.00060 kg$. Este valor se encuentra dentro del rango establecido por la norma ISO 17225-2:2014 para pellets de uso no industrial, que especifica dimensiones y propiedades físicas estandarizadas para garantizar la calidad del biocombustible [34].

$$\rho_{pellet} = \frac{m_{pellet}}{V_{pellet}} \quad (9)$$

$$\rho_{pellet} = \frac{0.00060 kg}{8.48 \times 10^{-7} m^3}$$

$$\rho_{pellet} = 707.5 \frac{kg}{m^3}$$

La velocidad de extrusión del material a través de la matriz perforada se considera como $v = 0.01 \frac{m}{s}$, valor típico en peletizadoras de matriz plana para biomasa forestal. Este parámetro se encuentra dentro del rango operativo reportado por el Centro Tecnológico Forestal de Cataluña (CTFC), donde se describe el proceso de compactación mediante rodillos que aplican presión sobre una matriz, forzando el paso del material a través de los orificios [35].

3.5 Número de orificios en la matriz

$$n = 2 \times \frac{\dot{m}}{A_{pellets} \times v \times \rho_{pellet}} \quad (10)$$

Donde:

$\dot{m}$ = capacidad de producción. $\left[\frac{kg}{s} \right]$

A = área de cada orificio. $[m^2]$

v = velocidad de extrusión. $\left[\frac{m}{s} \right]$

$$n = 2 \left(\frac{0,01389 \frac{kg}{s}}{(2.83 \times 10^{-5} m^2) \times (0.01 \frac{m}{s}) \times (707.5 \frac{kg}{m^3})} \right)$$

$$n = 139$$

$$Q = n \times A \times v \times \rho \quad (11)$$

Donde:

n = número de orificios activos.

A = área de cada orificio. $[m^2]$

v = velocidad de extrusión. $[\frac{m}{s}]$

ρ_{pellet} = densidad del pellet. $[\frac{kg}{m^3}]$

$$Q = 46 \times (2.83 \times 10^{-5} m^2) \times \left(0.1 \frac{m}{s}\right) \times \left(1061 \frac{kg}{m^3}\right)$$

$$Q = 0.0138 \frac{kg}{s} = 49.7 \frac{kg}{h}$$

3.6 Dimensiones de los rodillos

3.6.1 Radio del rodillo

Este se determina con la altura de la materia prima antes y después de que este pase por el área de trabajo de los rodillos de compactación. En la Figura 44 se presenta el esquema técnico que ilustra la interacción entre el rodillo y el material en las zonas de carga y compactación:

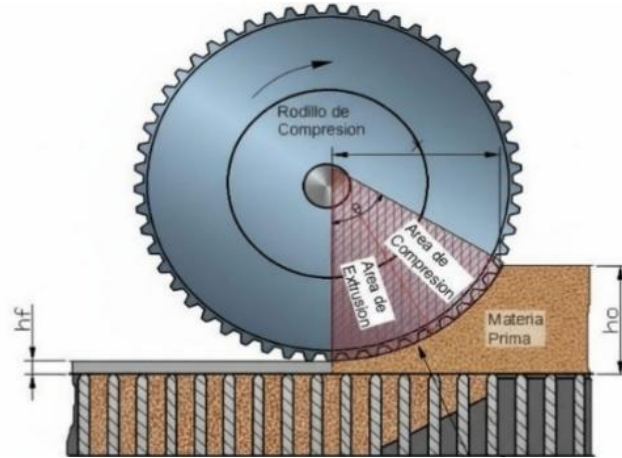


Figura 44. Esquema de radio del rodillo de compactación.

El aserrín utilizado en el proceso de peletizado ha sido previamente cernido, lo que garantiza una distribución granulométrica uniforme y mejora la repetibilidad del proceso. Con una humedad del 15%, el material se encuentra en condiciones óptimas para la compactación, ya que dicha humedad actúa como lubricante interparticular y favorece la cohesión durante la densificación. Según los criterios de compactación descritos por Kalpakjian y Schmid [36], estos factores permiten estimar una altura inicial de carga h_o de 15 mm antes del rodillo, coherente con el asentamiento natural de la biomasa y útil para calcular el volumen de alimentación en función de la capacidad de la tolva (12.5 kg). En la Tabla 8 se presenta los Coeficientes de fricción de materiales y combinación de materiales:

$$h_o - h_f = \mu^2 \times r \quad (12)$$

Donde:

h_o = Altura inicial de la materia prima. [m]

h_f = Altura final de la materia prima. [m]

μ = coeficiente de fricción madera – acero. Ver Tabla 4 [37] .

$r_{rodillo}$ = Radio del rodillo. [m]

TABLA X.
COEFICIENTES DE FRICCIÓN DE MATERIALES Y COMBINACIÓN DE
MATERIALES [37].

Materiales y combinaciones de materiales		Condiciones de la superficie	Coefficiente de fricción Estático – μ
Madera	Madera limpia	Limpio y seco	0,25 – 0,5
Madera	Madera mojada	Limpio y seco	0,2
Madera	Metal limpio	Limpio y seco	0,2 – 0,6
Madera	Metal húmedo	Limpio y seco	0,2
Madera	Piedra	Limpio y seco	0,2 - 0,4
Madera	Concreto	Limpio y seco	0,62
Madera	Ladrillo	Limpio y seco	0,6

$$h_o - h_f = (\mu)^2 \times r$$

$$r = \frac{0.015 - 0.0003}{(0.6)^2}$$

$$r = 0.040 \text{ m}$$

3.6.2 Longitud del rodillo

Aunque algunos autores proponen definir la longitud del rodillo como el 75% del diámetro para reducir el volumen ocupado [38], en este diseño se opta por un ancho de 50% del diámetro. La recomendación se orienta principalmente a la reducción de la masa rotante y a la prevención de interferencias periféricas en configuraciones de diseño compacto. Este criterio busca asegurar una compactación homogénea del material y mantener la continuidad en la producción de pellets.

$$l_{rodillo} = \phi_{rodillo} \times 50 \% \quad (13)$$

Donde:

$l_{rodillo}$ = longitud del rodillo. [m]

$$l_{rodillo} = 0.080 \times 0.50$$

$$l_{rodillo} = 0.040 \text{ m}$$

3.6.3 Masa del rodillo

Para estimar la masa del rodillo, se considera que está fabricado en acero AISI 8620, material ampliamente utilizado en componentes mecánicos sometidos a desgaste y carga dinámica. Según Budynas y Nisbett [33], la densidad típica del acero es de $\rho_{acero} = 7850 \frac{kg}{m^3}$, valor que se emplea en el cálculo de masa mediante la expresión:

$$m_{rodillo} = \pi \times r^2 \times l_{rodillo} \times \rho_{acero} \quad (14)$$

Donde:

$m_{rodillo}$ = Masa del rodillo. [kg]

$r_{rodillo}$ = Radio del rodillo. [m]

$l_{rodillo}$ = longitud del rodillo. [m]

ρ_{acero} = Densidad del acero. $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$$m_{rodillo} = \pi \times (0.04 \text{ m})^2 \times 0.04 \text{ m} \times 7850 \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{rodillo} = 1.57 \text{ kg}$$

3.7 Dimensiones de la matriz

La siguiente formula permite dimensionar la matriz en función de la zona útil de extrusión, considerando el radio del rodillo, la separación entre anillos, el número de anillos, el diámetro de los orificios y un margen estructural adicional. Esta expresión asegura que los orificios se distribuyan de forma concéntrica. Según Morales Araujo, “el diseño de la matriz debe contemplar márgenes estructurales y espaciamiento entre orificios para evitar fisuras y garantizar la durabilidad del componente” [39].

$$D_{matriz} = 2 \times \left(r + i \times (n_{anillos} - 1) + \frac{D_{dado}}{2} + m \right) \quad (15)$$

Donde:

$r_{rodillo}$ = Radio del rodillo. [m]

i = distancia entre anillos concéntricos. [m]

$n_{anillos}$ = número de anillos.

D_{dado} = diámetro de orificios. [m]

$m_{estructural}$ = márgenes estructurales típico entre 5 mm -10 mm. [19]

3.7.1 Número de anillos

$$n_{anillos} = \frac{l_{rodillo}}{S_{min}} \quad (16)$$

Donde:

$l_{rodillo}$ = longitud del rodillo. [m]

S_{min} = distancia mínima centro a centro de los agujeros. [20]

$$S_{min} \geq 1.3 \times D_{dado} \quad (17)$$

$$S_{min} \geq 1.3 \times 6 \text{ mm}$$

$$S_{min} \geq 7.8 \text{ mm} = 8 \text{ mm}$$

3.7.2 Número de anillos

$$n_{anillos} = \frac{0.040}{0.008} = 5$$

3.7.3 Diámetro de la matriz

$$D_{matriz} = 2 \times \left(0.040 \text{ m} + 0.00866 \text{ m} \times (5 - 1) + \left(\frac{0.006 \text{ m}}{2} \right) + 0.010 \text{ m} \right)$$

$$D_{matriz} = 0.1622 \text{ m} = 0.16 \text{ m}$$

Para una producción de 50 kg/h, se han dispuesto 139 orificios en la zona perimetral de una matriz de 160 mm de diámetro, aprovechando el área de contacto directo con el rodillo, donde se concentra la presión de compactación. Tipanluisa y De la Torre Ojeda destacan que “la zona de contacto entre el rodillo y la matriz es crítica para

garantizar una buena extrusión, por lo que se recomienda ubicar los orificios en la periferia activa” [40], lo que permite maximizar el área útil y mejorar la transferencia de esfuerzo. Además, Chilán Villafuerte y Pazmiño Moreira señalan que “la distribución hexagonal permite una compactación más uniforme y reduce el esfuerzo por orificio, facilitando el mantenimiento y la escalabilidad del sistema” [41]. Por ello, se ha adoptado una disposición tipo panal que optimiza la densidad de perforaciones, mejora la disipación térmica y permite ampliar la capacidad sin rediseñar la matriz. En la Figura 45 se presenta el Esquema de la configuración de la matriz.

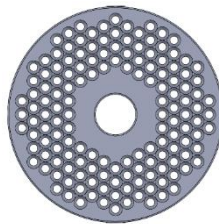


Figura 45. Esquema de la configuración de la matriz.

3.8 Fuerzas de compresión del sistema de extrusión del pellet.

La Figura 46 ilustra el proceso de compresión de la materia prima mediante un rodillo de presión y una matriz. En este mecanismo, el material es forzado a través de los orificios de la matriz, generando pellets compactos con forma cilíndrica. Este principio de funcionamiento es fundamental para garantizar la densidad, cohesión y estabilidad del producto final:

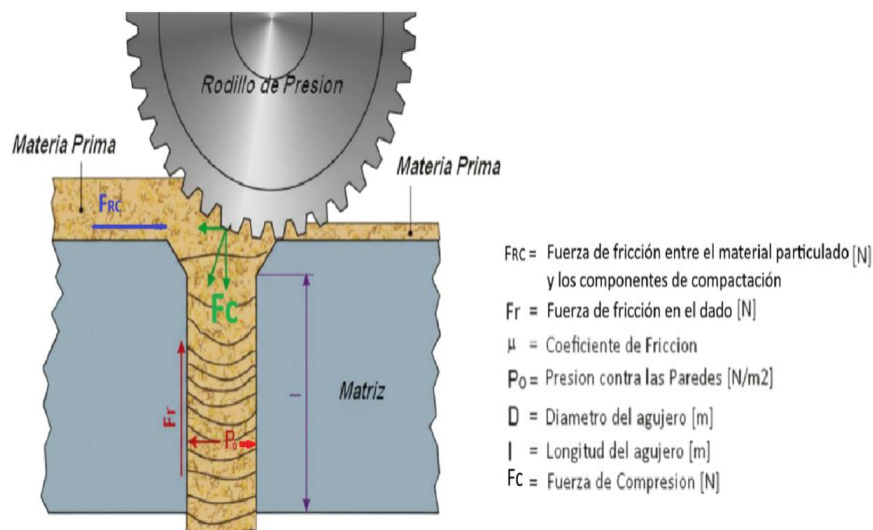


Figura 46. Esquema de fuerzas de compresión del aserrín.

- F_c (Fuerza de Compresión): Es la fuerza principal aplicada por el rodillo, responsable de impulsar la materia prima hacia el interior de la matriz. Su magnitud determina la capacidad de densificación del pellet y la eficiencia del proceso de compactación. Sin esta fuerza, el material no lograría atravesar los orificios de la matriz ni adquirir la forma deseada.
- F_r (Fuerza de fricción en el dado): Corresponde a la resistencia generada entre el material y las paredes internas de la matriz. Esta fricción contribuye a la cohesión del pellet, permitiendo que las partículas se unan firmemente. Sin embargo, también implica un consumo adicional de energía durante la operación, lo que debe considerarse en el diseño del sistema.
- FRC (Fuerza de fricción con los componentes de compactación): Se refiere a la interacción de fricción entre el material particulado y los elementos mecánicos del sistema, como rodillos y superficies de contacto. Esta fuerza influye directamente en el desgaste de los componentes, reduciendo su vida útil. Además, afecta la calidad final del pellet, ya que un exceso de fricción puede alterar su consistencia.
- P_0 (Presión contra las paredes): Es la presión ejercida por el material comprimido sobre las paredes internas de la matriz. Este parámetro es clave para garantizar la estabilidad estructural del pellet durante su formación. Una presión adecuada evita deformaciones y asegura que el pellet mantenga su forma y resistencia.
- μ (Coeficiente de fricción): Representa la relación que mide la resistencia al deslizamiento entre el material y la matriz. Un valor adecuado de μ asegura un equilibrio entre la compactación y el flujo del material. De esta manera, se evitan bloqueos en la matriz y pérdidas de eficiencia en el proceso.
- D (Diámetro del agujero): Es la dimensión transversal del orificio de la matriz por donde se forma el pellet. El diámetro influye directamente en el tamaño final del pellet y en su aplicación específica como biocombustible. Un diámetro mayor produce pellets más grandes, mientras que uno menor genera pellets más compactos y densos.
- l (Longitud del agujero): Es la extensión del orificio de la matriz, que afecta la densidad, cohesión y resistencia mecánica del pellet. Una mayor longitud favorece la compactación, ya que el material permanece más tiempo bajo

presión. Sin embargo, también incrementa la fricción y el esfuerzo requerido para expulsar el pellet, lo que puede demandar más energía.

La Figura 47 presenta una tabla de las propiedades de algunos materiales:

Material	Módulo de Young E [GPa]	Tensión de Fluencia σ_f [Mpa]	Módulo de Corte G [Gpa]	Módulo de Volumen K [Gpa]	$\alpha \times 10^6$ Coef. Exp. [1/°C]	μ Coef. Poiss.
Hierro Colado	100		40	90		
Hierro	150-170	180	60	120	11.7	
Acero Inox.	195	550			17.3	0.24 0.28
Acero	200		80	140		0.25 0.30
Latón	100		35	80		0.32 0.42
Aluminio	70		25	70	21.0	0.32 0.36
Cobre	110-120	300	38	120	16.5	0.33
Níquel	204	460			13.3	
Bronce	90					
Plata	82.7					0.37
Concreto	20 (compresión)	5-35 (compresión)			11.7	0.1 0.15
Vidrio	48-78					0.2 0.3
Mármol	50			70		0.10 0.15
Granito	52	5-145 (tracc-comp)				
Madera, pino	1 a 10	40 – 80				

Figura 47. Propiedades de materiales [42].

3.8.1 Presión de compactación del aserrín

$$P_{rodillo} = \bar{\sigma}_f \times \varepsilon_x \quad (18)$$

Donde:

$\bar{\sigma}_f$ = Esfuerzo de fluencia promedio de la madera durante la deformación. [MPa]

ε_x = Deformación de extrusión.

$$\varepsilon_x = a + b \times \ln(Rc) \quad (19)$$

Donde a – b son constantes empíricas para establecer el ángulo de entrada a las cavidades o agujeros de la matriz.

Para un ángulo (50°- 60°)		Para un ángulo (30°-45°)	
a	0,8 - 0,9	a	0,7 - 0,78
b	1,2 - 1,5	b	1 - 1,1

Figura 48. Constantes empíricas para definir los ángulos de entrada en las cavidades de la matriz [42].

3.8.2 Relación de compresión del aserrín

Es la proporción entre el espesor efectivo de compresión y el diámetro del orificio, la cual define el nivel de compactación alcanzado por el aserrín dentro de la matriz. En la Figura 49 se presenta un Esquema del ángulo de entrada al dado.

$$Rc = \frac{1}{\frac{d}{l}} \quad (20)$$

$$Rc = \frac{1}{\frac{6 \text{ mm}}{30 \text{ mm}}} = 5$$

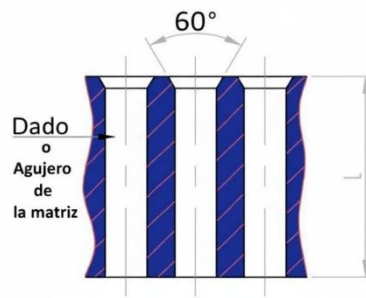


Figura 49. Esquema del ángulo de entrada al dado o agujero [42].

$$\varepsilon_x = a + b \times \ln(Rc)$$

$$\varepsilon_x = 0.9 + 1.5 \times \ln(5)$$

$$\varepsilon_x = 3.314$$

$$P_{rodillo} = \bar{\sigma}_f \times \varepsilon_x$$

$$P_{rodillo} = 60 \text{ MPa} \times 3,314$$

$$P_{rodillo} = 198.84 \text{ MPa}$$

3.8.3 Fuerza de compactación del rodillo F_c

La fuerza de compactación del rodillo (F_c) es la presión que ejerce el rodillo sobre la materia prima para formar pellets, aplicándola perpendicularmente a la matriz para lograr una adecuada densificación del material. En la Figura 50 se representa la Fuerza de compactación del rodillo.

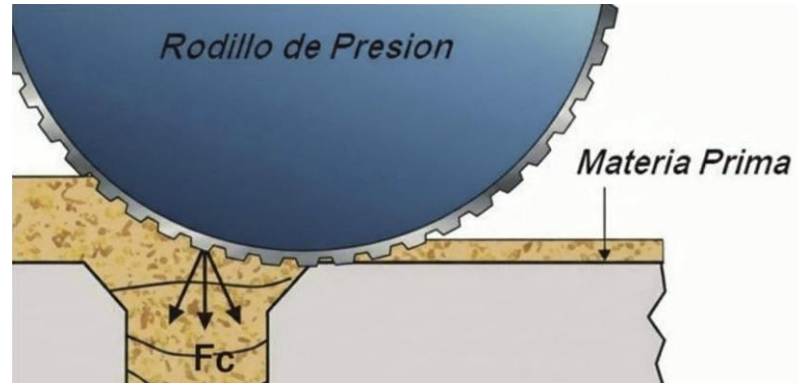


Figura 50. Fuerza de compactación del rodillo.

$$F_c = P_{\text{rodillo}} \times A_{\text{agujero}} \quad (21)$$

$$F_c = 198.84 \text{ MPa} \times \pi(0.003 \text{ m})^2$$

$$F_c = 5619.6 \text{ N}$$

Una vez que el material ingresa a la cámara de peletización este va formando una capa con una altura inicial h_0 sobre la matriz, luego de este pasar por el área de trabajo del rodillo se reducirá en una altura final h_f como se representa en la Figura 51.

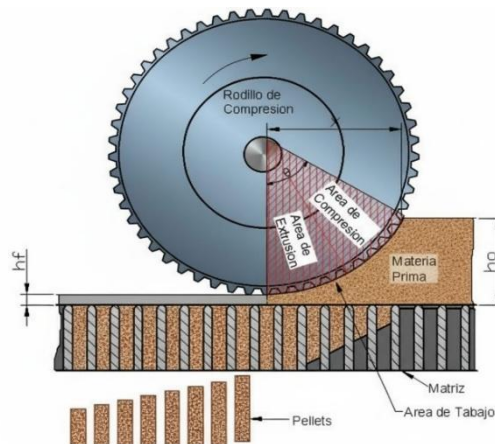


Figura 51. Zona de compresión del aserrín.

El contacto que ejerce la matriz con el material genera una fuerza que es opuesta a la producida por el rodillo. Por lo tanto, los rodillos deben generar una mayor presión para poder superar la fuerza de fricción y que salgan los pellets.

$$P_f = \frac{\bar{\sigma}_f \times 2h_f}{D_{pellet}} \quad (22)$$

Donde:

P_f = es la presión adicional requerida para superar la fricción. [MPa]

h_f = es la altura final del material, la distancia mínima entra la matriz y los rodillos debe ser de 0,2 – 0,3 mm. [39]

$\bar{\sigma}_f$ = es el esfuerzo de fluencia promedio de la madera durante la deformación [MPa].

D_{pellet} = Diámetro del pellet [m].

$$P_f = \frac{60 \times 2(0.0002m)}{0.006m}$$

$$P_f = 4 MPa$$

La presión que ejerce el material al ser extruido en el interior de las paredes de la matriz, generada por la fricción entre los materiales como se indica en la Figura 52 se la puede determinar con la siguiente ecuación:

$$P_o = \frac{P_f \times D_{pellet}}{4 \times \mu \times h_o} \quad (23)$$

Donde:

P_o = Presión del material comprimido contra las paredes del contenedor [MPa].

D = Diámetro del pellet [m].

μ = Coeficiente de fricción entre la madera – acero. Ver Figura 42.

h_o = Altura inicial del material antes de pasar por el área de trabajo del rodillo [m].

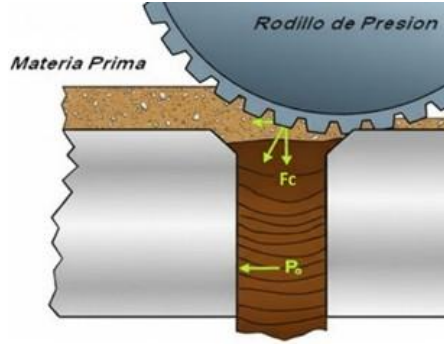


Figura 52. Diagrama de presión en las paredes de la matriz.

$$P_o = \frac{4 \text{ MPa} \times 0.006 \text{ m}}{4 \times 0.6 \times 0.015 \text{ m}}$$

$$P_o = 0.667 \text{ MPa}$$

La fuerza de fricción entre el dado y el aserrín debe permitir la compactación del material en su interior, pero mantenerse por debajo de la fuerza aplicada por el rodillo para que el pellet pueda ser expulsado sin obstrucción. En la Figura 53 se representa un Diagrama de fuerza de fricción en las paredes internas de la matriz.

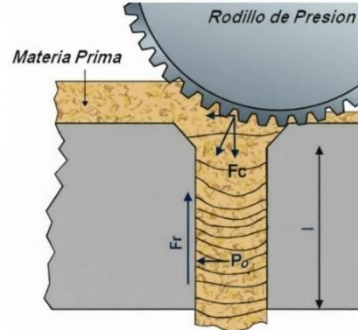


Figura 53. Diagrama de fuerza de fricción en las paredes internas de la matriz.

$$F_r = \mu \times P_o \times D_{\text{pellet}} \times l \quad (24)$$

Donde:

μ = Coeficiente de fricción madera - acero. Tabla 7 [9].

P_o = Presión del material comprimido contra las paredes del contenedor [MPa].

D_{pellet} = Diámetro del pellet [m].

l = longitud del pellet [m].

$$F_r = 0.6 \times 0.667 \text{ MPa} \times 0.006 \text{ m} \times 0.03 \text{ m}$$

$$F_r = 72.04 \text{ N}$$

Se compara los valores de F_r con F_c y comprobamos que la condición se cumple, debido a que la fuerza de compactación supera a la fuerza de fricción en el dado.

$$F_r < F_c$$

$$72.04 \text{ N} < 5619.6 \text{ N}$$

3.8.4 Fuerza de fricción en la compactación

La aplicación de la fuerza de compactación F_c genera una interacción friccional F_{RC} entre el material particulado (aserrín) y los componentes mecánicos involucrados, específicamente los rodillos y la matriz, durante el proceso de conformado. La fuerza de fricción debe permitir la compactación del material y mantenerse por debajo de la fuerza tangencial F_t aplicada por el rodillo para que la compactación sea constante y sin obstrucciones. En la Figura 54 se presenta un Diagrama de la fuerza de fricción entre el material particulado y los componentes de compactación.

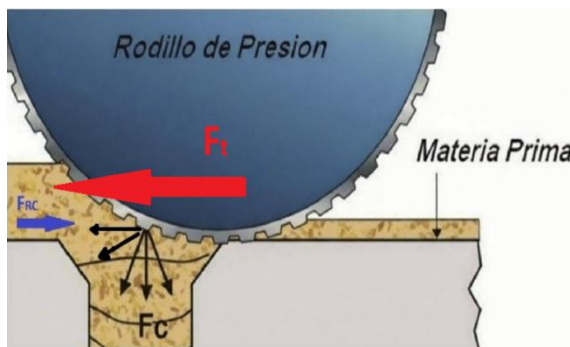


Figura 54. Diagrama de la fuerza de fricción entre el material particulado y los componentes de compactación.

$$F_{RC} = F_c \times \mu$$

$$F_{RC} = 5619.6 \text{ N} \times 0.6$$

$$F_{RC} = 3371.8 \text{ N}$$

Fuerza de fricción Total

$$F_{FrT} = F_{RC} + F_r$$

$$F_{FrT} = 3371.8 N + 72.04 N$$

$$F_{FrT} = 3443.8 N$$

Fuerza total en los rodillos

$$FT_{rodillos} = F_C + F_{FrT} \quad (25)$$

$$FT_{rodillos} = 5619.6 N + 3443.8 N$$

$$FT_{rodillos} = 9063.4 N$$

3.9 Sistema y ecuaciones de transmisión de potencia

El sistema de transmisión de la máquina peletizadora está diseñado para canalizar la energía del motor hacia los componentes de extrusión mediante una caja reductora, que ajusta la velocidad y el torque necesarios para compactar el aserrín en forma de pellets. La elección de un motor de 7.5 HP responde a criterios de potencia, eficiencia energética y capacidad de compactación, siendo adecuada para sistemas con producciones entre 30 y 150 $\frac{kg}{h}$, según experiencias industriales y literatura técnica [43]. Con una relación de transmisión de 25:1, se reduce la velocidad nominal del motor de 1740 RPM a 70 RPM en el eje principal, lo que incrementa el torque disponible y favorece la presión constante sobre la matriz [44]. Este rango de velocidad ha sido validado en estudios como la Guía Técnica para la Elaboración de Pellet de Biomasa [45], que recomienda evitar fricción excesiva para preservar la calidad del pellet, y en la tesis de Chilán y Pazmiño [41], donde se establece un valor óptimo de 60 a 120 RPM para la compactación de aserrín. Estas referencias respaldan la configuración seleccionada, asegurando una operación estable, eficiente y técnicamente viable.

3.9.1 Velocidad y Aceleración de los rodillos

$$\omega = 70 RPM$$

3.9.2 Perímetro de desplazamiento

$$P = \pi \times D \quad (26)$$

Donde:

$D_{rodillo}$ = diámetro del rodillo. [m]

$$P = \pi \times 0.080 \text{ m}$$

$$P = 0.251 \text{ m}$$

3.9.3 Velocidades del rodillo

La Figura 55 representa las velocidades angular y tangencial del rodillo en funcionamiento. El rodillo gira con una velocidad angular ω , mientras que en su borde se genera una velocidad tangencial V_t dirigida hacia la izquierda. Esta relación entre rotación y desplazamiento tangencial explica cómo el rodillo transmite movimiento a la superficie de contacto.

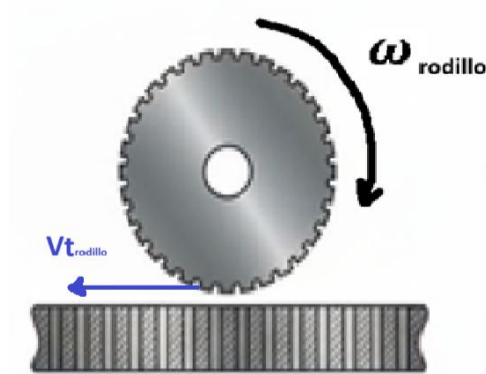


Figura 55. Velocidad angular y tangencial del rodillo.

3.9.4 Velocidad angular de los rodillos

$$\omega_{rodillo} = \frac{2\pi \times 70 \text{ RPM}}{60} \quad (27)$$

$$\omega_{rodillo} = 7.33 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

3.9.5 Velocidad tangencial de los rodillos

$$v_{t.rodillos} = \omega_{rodillo} \times r \quad (28)$$

Donde:

$\omega_{rodillo}$ = velocidad angular de los rodillos. $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$

r = radio del rodillo. [m]

$$v_{t.rodillos} = 7.33 \frac{rad}{s} \times 0.040 m$$

$$v_{t.rodillos} = 0.293 \frac{m}{s}$$

3.9.6 Aceleración normal del rodillo

$$an_{rodillo} = r \times \omega_{rodillo}^2 \quad (29)$$

Donde:

$an_{rodillo}$ = aceleración normal del rodillo. $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$\omega_{rodillo}$ = velocidad angular de los rodillos. $\left[\frac{rad}{s}\right]$

r = radio del rodillo. [m]

$$an_{rodillo} = 0.040 m \times \left(7.33 \frac{rad}{s}\right)^2$$

$$an_{rodillo} = 2.15 \frac{m}{s^2}$$

3.9.7 Longitud horizontal del área de trabajo

Se identifica un tramo de desplazamiento denominado “X”, el cual corresponde a la distancia recorrida por la materia prima desde el instante en que entra en contacto con el rodillo hasta que abandona la zona activa de compactación. Este intervalo define el sector funcional donde se produce la interacción mecánica entre el rodillo y el material, tal como se muestra en la Figura 56.

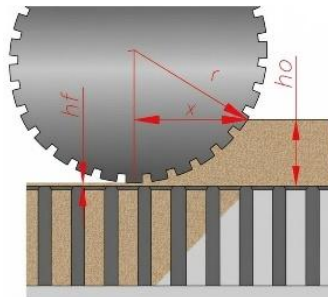


Figura 56. Longitud horizontal del área de trabajo.

$$X = \sqrt{2 \times r \times (h_o - h_f) - (h_o - h_f)^2} \quad (30)$$

$$X = \sqrt{2 \times 0.04 \text{ m} \times (0.015 \text{ m} - 0.0002 \text{ m}) - (0.015 \text{ m} - 0.0002 \text{ m})^2}$$

$$X = 0.03106 \text{ m}$$

3.9.8 Distancia del centro del eje a la mitad del rodillo

$$R' = 2 \times m_{\text{estructurales}} + \frac{l_{\text{rodillo}}}{2} + \frac{D_{\text{eje}}}{2} \quad (31)$$

Donde:

$m_{\text{estructurales}}$ = márgenes estructurales [m].

l_{rodillo} = longitud del rodillo [m].

D_{eje} = diámetro del eje debe ser igual o superior al espesor de la matriz [18] y [23].

$$R' = 2 \times 0.010 \text{ m} + \frac{0.040 \text{ m}}{2} + \frac{0.030 \text{ m}}{2}$$

$$R' = 0.055 \text{ m}$$

3.9.9 Ángulo del área de trabajo

El ángulo del área de trabajo es el sector angular que delimita la zona efectiva donde el rodillo interactúa con la materia prima sobre la superficie de la matriz. Este ángulo, representado como θ , depende de parámetros geométricos como el radio de contacto R' y la distancia x , y define el tramo en el que se realiza la compactación o el transporte del material. En la Figura 57 se muestra una vista superior de esta área, permitiendo visualizar cómo se distribuye espacialmente el esfuerzo aplicado por el rodillo dentro del proceso de peletización.

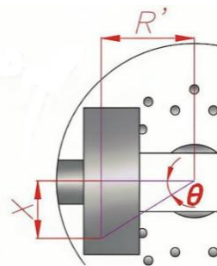


Figura 57. Ángulo del área de trabajo vista superior.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x}{R} \right) \quad (32)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{0.02423 \text{ m}}{0.055 \text{ m}} \right)$$

$$\theta = 23.77^\circ = 0.41 \text{ rad}$$

3.9.10 Torque transmitido al eje principal

$$\tau = \frac{P_{motor}}{\omega} \quad (33)$$

Donde:

P_{motor} = Potencia del motor [W].

ω = Velocidad angular del motor $\left[\frac{rad}{s} \right]$

$$\tau_{motor} = \frac{5592.75 \text{ W}}{182.02 \frac{rad}{s}}$$

$$\tau_{motor} = 30.7 \text{ Nm}$$

$$\tau_{eje \text{ principal}} = \tau_{motor} \times i \times \eta \quad (34)$$

Donde:

i = Relación de transmisión del reductor

η = Eficiencia del reductor (un valor típico es 0.9)

$$\tau_{eje \text{ principal}} = 30.7 \text{ Nm} \times 25 \times 0.9$$

$$\tau_{eje \text{ principal}} = 691.33 \text{ Nm}$$

3.9.11 Potencia mecánica transmitida

$$P_{mecanica} = \tau \times \omega \quad (35)$$

$$P_{mecanica} = 691.33 \text{ Nm} \times 7.33 \frac{rad}{s}$$

$$P_{mecanica} = 5067.5 \text{ W}$$

3.9.12 Fuerza tangencial aplicada por el rodillo

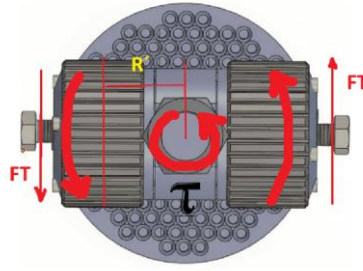


Figura 58. Esquema de Fuerza tangencial de los rodillos

$$F_t = \frac{\tau}{r} \quad (36)$$

Donde:

τ = Torque transmitido [$N \cdot m$].

r = radio del rodillo [m].

$$F_t = \frac{691.33 Nm}{0.040 m}$$

$$F_t = 17283.25 N$$

Se compara los valores de F_{Rc} con F_t y comprobamos que la condición se cumple, dado que la fuerza tangencial supera la fuerza de fricción en la compactación.

$$F_{Rc} < F_t$$

$$3371.8 N < 17283.25 N$$

3.9.13 Torque originado por los rodillos

$$\tau_{rodillos} = F_{FT} \times R' \quad (37)$$

Donde:

F_{FT} = Fuerza total en los rodillos [N].

R' = distancia del centro del eje a la mitad del rodillo [m].

$$\tau_{rodillos} = 9063.4 N \times 0.055 m$$

$$\tau_{rodillos} = 498.5 \text{ Nm}$$

3.9.14 Torque por fricción total

$$\tau_{fricción} = F_{FrT} \times r_{rodillos} \quad (38)$$

$$\tau_{fricción} = 3443.8 \text{ N} \times 0.040 \text{ m}$$

$$\tau_{fricción} = 137.7 \text{ Nm}$$

3.10 Sistema y ecuaciones de corte

El sistema de corte de la peletizadora cumple la función de seccionar los pellets conforme atraviesan la matriz, garantizando una longitud constante cercana a los 35 mm. Este mecanismo está constituido por una placa de acero inoxidable AISI 304, instalada de manera fija en la zona inferior interna de la cámara de compresión, lo que asegura resistencia al desgaste y estabilidad durante el proceso de separación. Para su elaboración se empleó una lámina de 5 mm de espesor y 30 mm de ancho, seleccionada por su resistencia y facilidad de integración estructural.

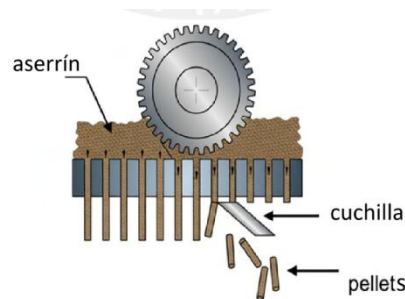


Figura 59. Esquema del sistema de corte de pellets.

La placa de corte actúa solo en la zona de contacto entre la matriz y el borde de corte, donde concentra el esfuerzo de separación. Esto asegura que los pellets tengan una longitud uniforme y que el proceso sea continuo y estable. El área activa corresponde a una fracción de los orificios, determinada por el ancho de la placa y la velocidad de rotación.

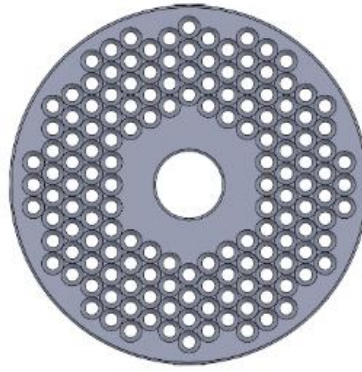


Figura 60. Matriz de extrusión.

Hay 139 orificios distribuidos en 5 líneas concéntricas, cada orificio tiene 6 mm de diámetro con 2 mm de separación entre orificios y son 2 placas de corte tiene 5.5 cm de largo, entonces:

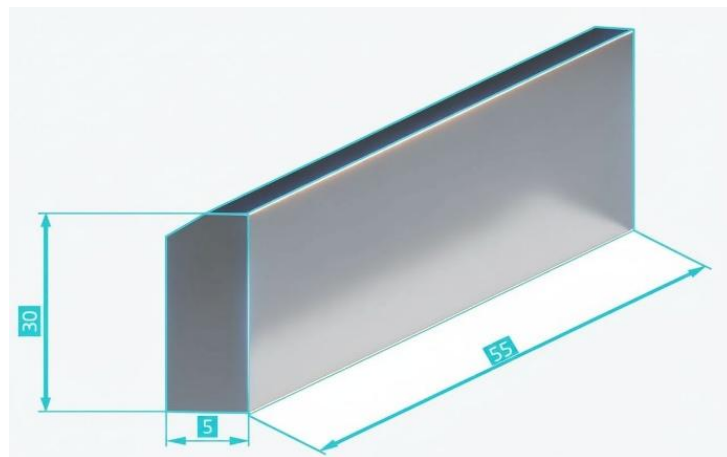


Figura 61. Placa de corte.

Solo los orificios que coinciden espacialmente con esa franja de 5.5 cm están activos en cada instante entonces calculamos cuántos orificios caben en esos 5.5 cm:

$$n_{\text{activos}} = \frac{L_{\text{placa}}}{S_{\text{centro a centro}} + D_{\text{orificio}}} \quad (39)$$

$$n_{\text{activos}} = \frac{55}{8 + 6} = 3.93 = 4$$

$$n_{\text{activos}} = 4 \times 2 \text{ placas} = 8$$

3.10.1 Fuerza sobre la placa en zona activa

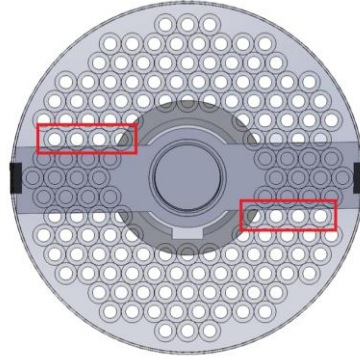


Figura 62. Esquema de las placas de corte vista superior.

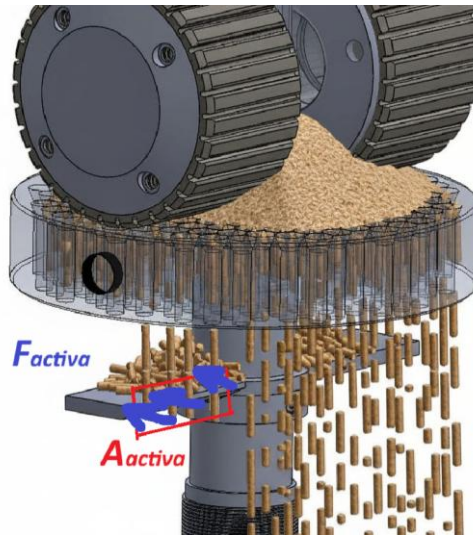


Figura 63. Esquema de la Fuerza y Área activa.

3.10.2 Área del orificio de extrusión

$$A_{orificios} = \frac{\pi \times D_{orificios}^2}{4}$$

$$A_{orificios} = \frac{\pi \times (0.006 \text{ m})^2}{4}$$

$$A_{orificios} = 2.87 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

3.10.3 Área activa

$$A_{activa} = n_{activos} \times A_{orificios} \quad (40)$$

$$A_{activa} = 8 \times 2.87 \times 10^{-5} m^2$$

$$A_{activa} = 2.296 \times 10^{-4} m^2$$

3.10.4 Esfuerzo normal en la placa de corte

$$\sigma_{placa corte} = \frac{F_c}{A_{activa}} \quad (41)$$

$$\sigma_{placa corte} = \frac{5619.6 N}{2.296 \times 10^{-5} m^2}$$

$$\sigma_{placa corte} = 24.48 MPa$$

3.10.5 Fuerza activa

$$F_{activa} = \mu \times \sigma_{placa corte} \times A_{activa} \quad (42)$$

Donde:

μ = Coeficiente de fricción madera - acero. Tabla 7 [9].

$$F_{activa} = 0.6 \times 24.48 MPa \times 2.296 \times 10^{-4} m^2$$

$$F_{activa} = 3374 N$$

3.10.6 Esfuerzo cortante sobre la placa de corte

$$\tau = \frac{F_{activa}}{A_{placa}} \quad (43)$$

$$\tau = \frac{3374 N}{0.00165 m^2}$$

$$\tau = 2.04 MPa$$

3.10.7 Corrección por simultaneidad realista

Se aplica un coeficiente de simultaneidad del 40 % para reflejar la naturaleza secuencial de la descarga de pellets en la matriz rotativa. Este valor se adopta como una estimación conservadora, coherente con prácticas de diseño mecánico para sistemas con múltiples puntos de contacto no simultáneos, como se discute en [30] y [36].

$$\tau_{real} = 2.04 \text{ MPa} \times 40\%$$

$$\tau_{real} = 2.04 \times 0.4$$

$$\tau_{real} = 0.816 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante efectivo sobre la placa de corte es de 0.816 MPa.

El acero inoxidable AISI 304 tiene un límite elástico de 215 MPa, por lo tanto, el diseño es mecánicamente seguro.

3.10.8 Fuerza cortante de la placa de corte

La fuerza cortante de la cuchilla se calcula mediante la función de esfuerzo de corte de la madera τ_{madera} obtenido de la tabla 8.

$$\tau_{madera} = \frac{F_{corte}}{A_{corte}} \quad (44)$$

unidades en (kg/cm ²)	Flexion	Traccion		Compresion		Cortante	Modulo de Elasticidad
		Paralela	Perpend.	Paralela	Perpend.		
Madera	120	120	1,5	110	28	12	110000
Hormigon	80	6		80		6	200000
Acero	1700	1700		1700		1000	2100000

Figura 64. Propiedades de materiales [42].

$$F_{corte} = \tau_{madera} \times A_{corte}$$

$$F_{corte} = 1.176 \text{ MPa} \times 2.83 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \times 8$$

$$F_{corte} = 266.3 \text{ N}$$

3.10.9 Fuerza de fricción de la placa cortante

Esta fuerza se origina del roce entre la placa cortante y los pellets al ser seccionados.

$$F_{fricción} = A_{activa} \times \delta_y \times \mu \quad (45)$$

Donde:

A_{activa} = Total de agujeros en contactos con la placa cortante. [m^2]

δ_y = Esfuerzo de tendencia a la tensión de la madera. [MPa]

μ = Coeficiente de fricción madera - acero.

$$F_{fricción} = 2.296 \times 10^{-4} m^2 \times 1.179 MPa \times 0.6$$

$$F_{fricción} = 162.6 N$$

3.10.10 Fuerza total de la placa cortante

$$F_{Tplaca} = F_{fricción} + F_{corte} \quad (46)$$

$$F_{Tplaca} = 162.6 N + 266.3 N$$

$$F_{Tplaca} = 428.9 N$$

3.10.11 Torque de la placa cortante

$$\tau_o = F_{total} \times r_{pc} \quad (47)$$

Donde:

r_{pc} = radio del centro del hasta el punto máximo de la placa de corte. [m]

$$\tau_o = 428.9 N \times 0.08 m$$

$$\tau_o = 34.31 Nm$$

3.11 Sistema de soporte estructural

La base estructural que sostiene tanto el motor como el cuerpo de la máquina ha sido diseñada para asegurar la inmovilidad de todos los componentes durante el funcionamiento del sistema de peletizado, incluyendo la capacidad de absorber las vibraciones generadas por el accionamiento mecánico. Para su construcción se utilizó perfil angular de acero conforme a la norma ASTM A36, seleccionado por su resistencia y facilidad de fabricación. Las principales solicitaciones que enfrenta esta estructura corresponden al peso del motor y al peso total del equipo. En las siguientes secciones se presenta el análisis de esfuerzos realizado mediante el software SOLIDWORKS, con el fin de verificar la integridad mecánica del conjunto.

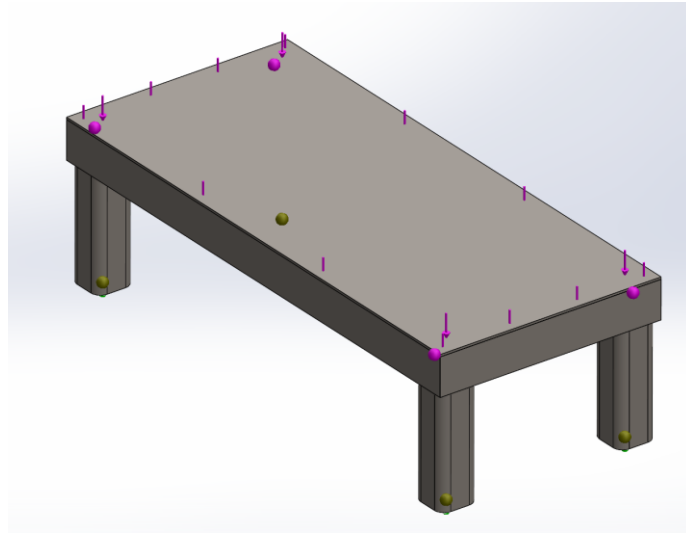


Figura 65. Diagrama 3D de la Estructura base y las fuerzas aplicadas.

La estructura está sometida principalmente al peso del conjunto peletizador, estimado en 50 kg, y al peso adicional del motor y caja reductora, equivalente a 100 kg. En la Figura 66 se ilustran los resultados obtenidos mediante simulación, incluyendo los valores máximos de esfuerzo inducidos en la estructura. Para el análisis se definieron condiciones de restricción que simulan una fijación rígida al suelo, asumiendo que la base opera como un sistema empotrado.

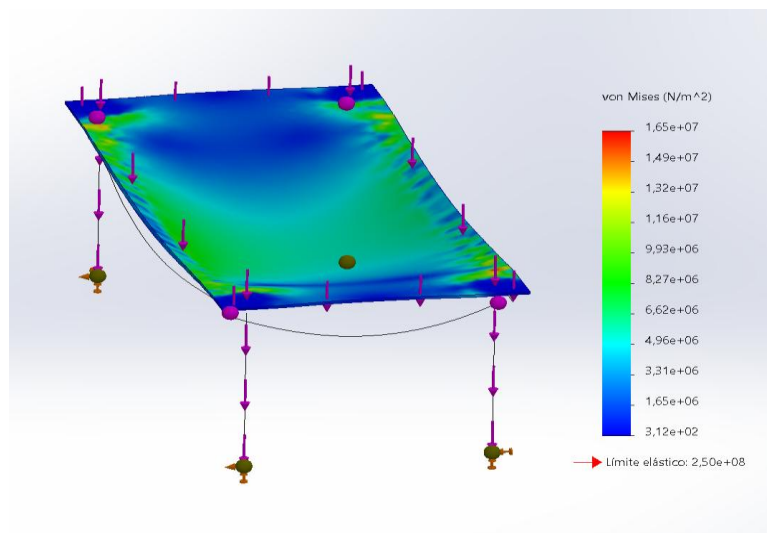


Figura 66. Simulación de cargas sobre la Estructura base.

A través del procesamiento de nodos en el entorno de simulación, se llevó a cabo el análisis de distribución de esfuerzos en la estructura. El estudio permitió identificar los valores extremos de tensión presentes en el sistema, siendo el esfuerzo más elevado de

16.5 MPa, asociado a una condición de flexión localizada en la viga con mayor sollicitación. Así mismo, se evaluó el comportamiento deformacional del conjunto, determinándose un desplazamiento máximo de 0.252 mm, el cual se visualiza en la Figura 67.

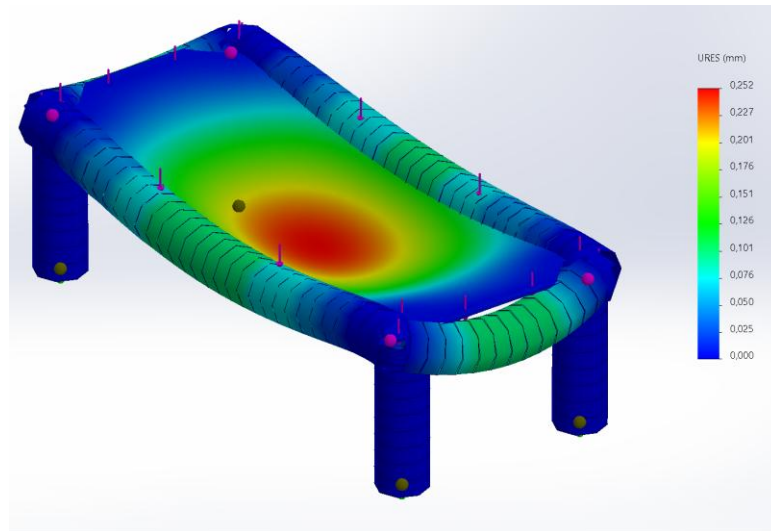


Figura 67. Análisis del desplazamiento en la Estructura base.

Finalmente se determinó el factor de seguridad más crítico estimado en 5.79 como de indica en la Figura 68.

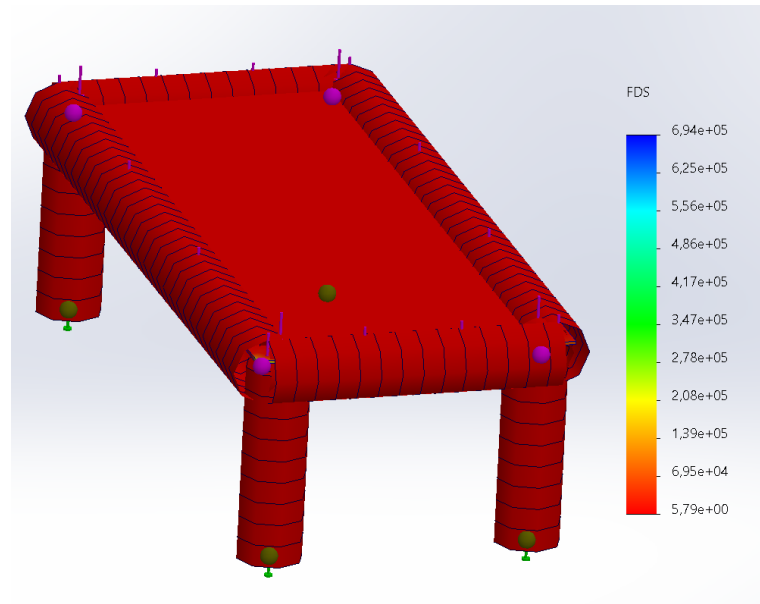


Figura 68. Análisis del factor de seguridad en la Estructura base.

3.12 Diseño del eje principal

El conjunto de fuerzas producidas por la transmisión, la placa cortante y los rodillos inducen momentos torsionales sobre el eje central. La Figura 69 presenta una vista general de los componentes involucrados en la transferencia de potencia, proceso de compactación y corte a partir de los cual se identifican las cargas y torques relevantes para el dimensionamiento estructural del eje. Estos esfuerzos generan condiciones críticas de trabajo que deben ser cuidadosamente evaluadas para evitar deformaciones permanentes o fallas por fatiga. Así mismo, el análisis de los momentos torsionales permite establecer los factores de seguridad adecuados y seleccionar materiales con propiedades mecánicas óptimas. La correcta interpretación de estas cargas asegura que el eje mantenga su integridad durante operaciones continuas y bajo diferentes regímenes de producción. En consecuencia, el diseño estructural del eje se convierte en un elemento clave para garantizar la confiabilidad y la durabilidad del prototipo de peletizadora.

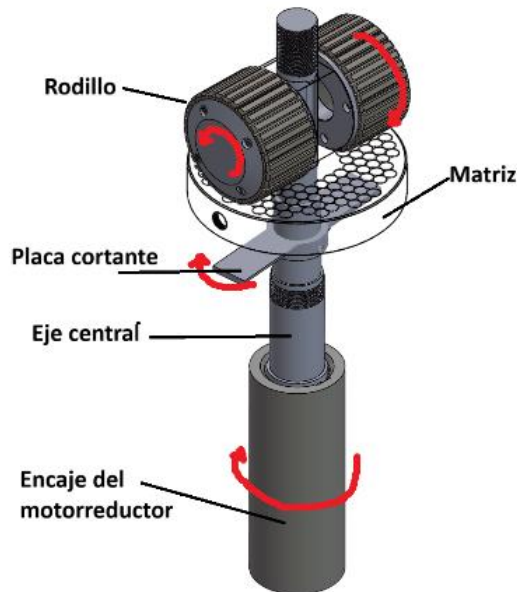


Figura 69. Esquema mecanismos de transmisión de potencia, compactación y corte.

3.12.1 Fuerza producida por la Transmisión

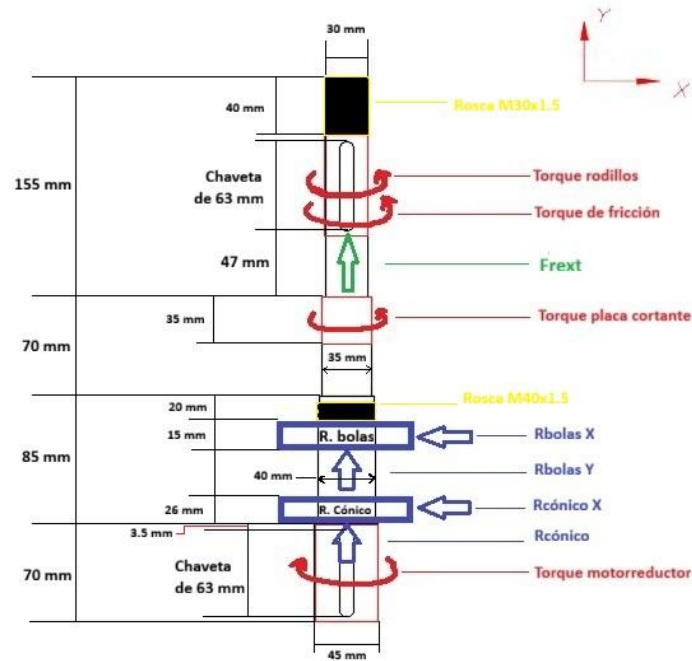


Figura 70. Diagrama de cuerpo libre del eje principal.

TABLA XI.

DATOS INICIALES PARA LOS CÁLCULOS DE LAS FUERZAS DEL EJE.

$\tau_{motorreductor}$	691.33 Nm	0,0006913 kN · mm
$\tau_{rodillos}$	498.5 Nm	0,0004985 kN · mm
$\tau_{fricción}$	137.7 Nm	0,000137 kN · mm
$\tau_{placacortante}$	34.31 Nm	0,00003431 kN · mm
F_{rext}	3443.8 N	3.444 kN

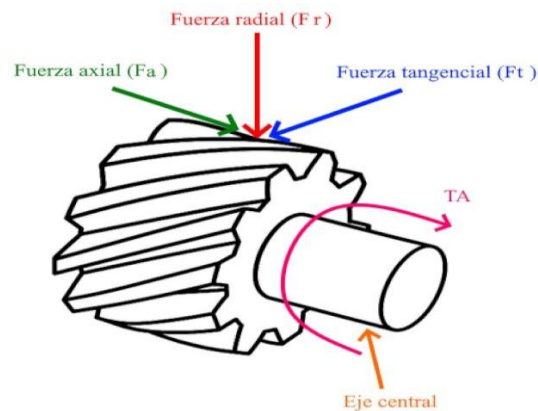


Figura 71. Diagrama de engranaje helicoidal.

Como se observa en la imagen adjunta, es un engranaje helicoidal, el cual está conectado al extremo del eje central, se generan tres fuerzas, las cuales serán determinadas a continuación:

Datos del engranaje helicoidal:

$d = 200 \text{ mm}$ (Diámetro primitivo)

$\beta = 20^\circ$ (Ángulo de hélice)

$\varphi_n = 20^\circ$ (Ángulo de presión normal)

Solución:

En primer lugar, es menester determinar el ángulo de presión transversal:

$$\varphi_t = \tan^{-1} \left[\frac{\tan(\varphi_n)}{\cos(\beta)} \right] = 21.173^\circ$$

Ahora, se determinará el valor de la fuerza tangencial generada en el engranaje, para lo cual será de gran utilidad hacer uso del torque suministrado del motor reductor hacia el eje:

$$F_t = 2 \left(\frac{\tau_{motorreductor}}{d} \right) = 6.913 \text{ kN} \quad (\text{Fuerza tangencial})$$

$$F_{tA} = F_t$$

A partir de la fuerza tangencial calculada se determinará el resto de las fuerzas ejercidas sobre el engranaje:

$$F_r = F_t \times \tan(\varphi_t) = 2.678 \text{ kN} \quad (\text{Fuerza radial})$$

$$F_{rA} = F_r$$

$$F_a = F_t \times \tan(\beta) = 2.516 \text{ kN} \quad (\text{Fuerza axial})$$

$$F_{aA} = F_a$$

Una vez determinadas las fuerzas sobre el engrane, estas se transmitirán al eje. Además, es importante mencionar que en el eje central existen dos rodamientos (un rodamiento de una hilera de rodillos cónicos ubicado en el punto B y un rodamiento rígido de bolas ubicado en el punto C y momentos torsores inducidos, como se verá en la imagen siguiente:

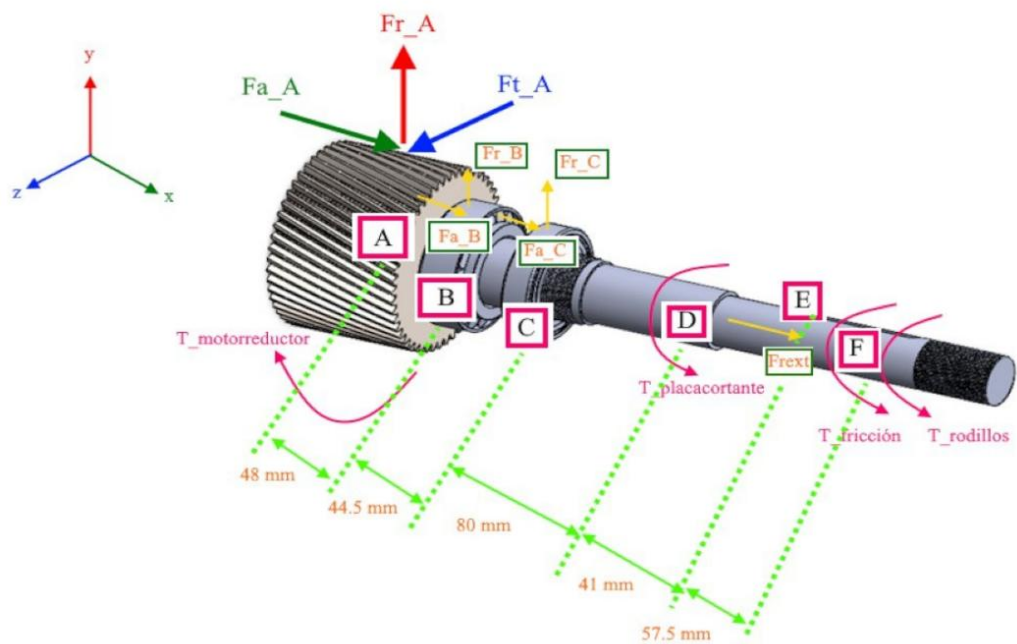


Figura 72. Diagrama de cuerpo libre del eje principal plano xyz

Una vez especificadas las cargas existentes en los planos de interés se procederá a determinar el valor de cada una de ellas mediante un equilibrio estático:

Análisis en el plano x-y

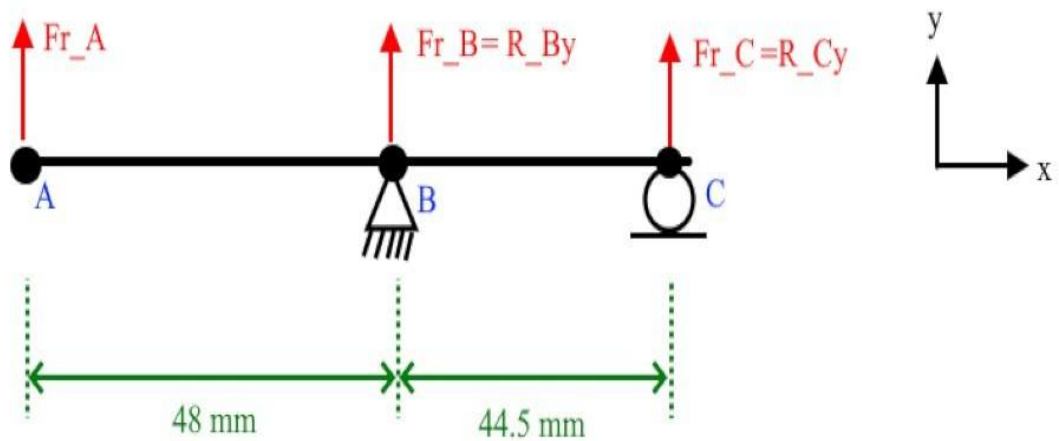


Figura 73. Diagrama de cuerpo libre de la sección ABC plano xy.

$$\sum M_B = 0 + \odot$$

$$F_{rC} = -F_{rA} \times (48 \text{ mm}) + F_{rC} \times (44.5 \text{ mm}) = 2.88 \text{ kN}$$

$$F_{rC} = 2.888 \text{ kN}$$

$$\sum F_y = 0 + \uparrow$$

$$F_{rB} = F_{rA} + F_{rB} + F_{rC} = -5.56$$

$$F_{rB} = -5.56 \text{ kN}$$

$$\sum F_x = 0 + \rightarrow$$

Se debe aclarar que el rodamiento de bolas ubicado en el punto C cumple la función de ser una guía radial y permite dilatación, en consecuencia, la fuerza axial en dicho rodamiento es inexistente.

Es decir que:

$$F_{aC} = 0 \text{ kN}$$

Por lo tanto:

$$F_{aB} = F_{aA} + F_{aB} + F_{aC} + F_{ext} = -5.96 \text{ kN}$$

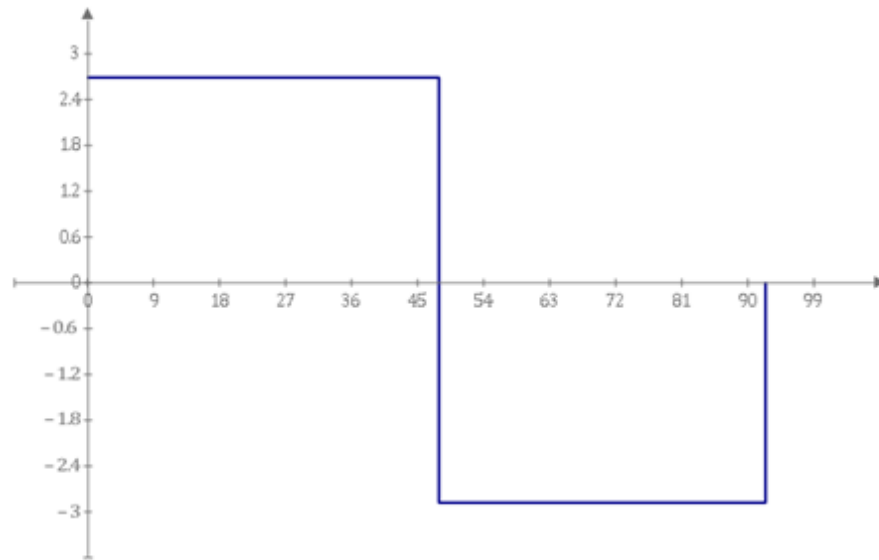
$$F_{aB} = -5.96 \text{ kN}$$

Diagrama de fuerza cortante:

TABLA XII.
RESUMEN DE DATOS PARA EL DIAGRAMA.

Distancia (mm)	Fuerza cortante
0	F_{rA}
48	F_{rA}
48	$F_{rA} + F_{rB}$
92.5	$F_{rA} + F_{rB}$
92.5	$F_{rA} + F_{rB} + F_{rC}$

Fuerza cortante (kN)



Distancia (mm)

Figura 74. Diagrama de Fuerza cortante plano xy.

Diagrama de momento flector:

Momento en el punto A

$$M_{Axy} = F_{rA} \times (48 \text{ mm}) = 128.53 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

Momento en el punto B

$$M_{Bxy} = (F_{rA} + F_{rB}) \times (44.5 \text{ mm}) = -128.53 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

TABLA XIII.

Resumen de momentos para el diagrama.

Distancia (mm)	Momento flector en plano xy
0	0
48	M_{Axy}
92.5	$M_{Axy} + M_{Bxy}$

Momento flector en plano xy (kN · mm)

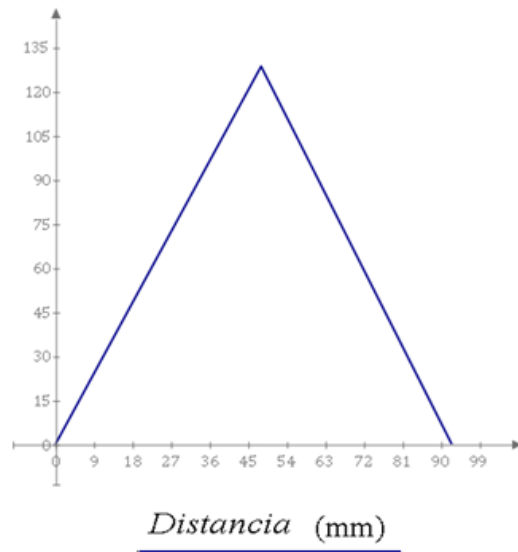


Figura 75. Diagrama de Momento flector en plano xy.

Análisis en el plano x-z

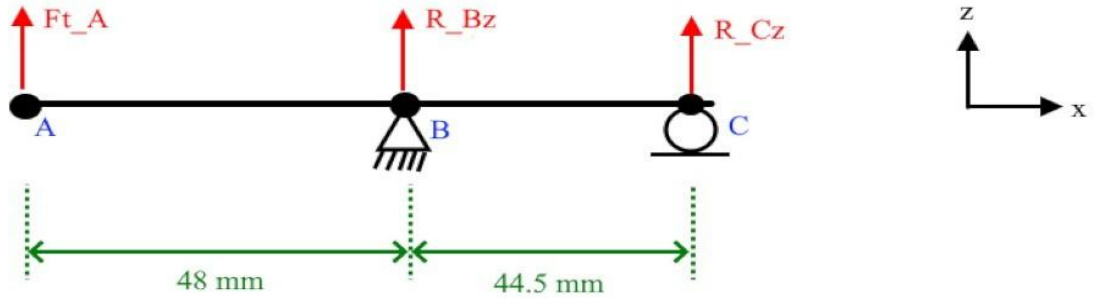


Figura 76. Diagrama de cuerpo libre de la sección ABC plano xz.

$$\sum M_B = 0 + \odot$$

$$R_{Cz} = -F_{tA} \times (48 \text{ mm}) + R_{Cz} \times (44.5 \text{ mm}) = 7.45 \text{ kN}$$

$$R_{Cz} = 7.45 \text{ kN}$$

$$\sum F_z = 0 + \uparrow$$

$$R_{Bz} = F_{tA} + R_{Bz} + R_{Cz} = -14.37 \text{ kN}$$

$$R_{Cz} = -14.37 \text{ kN}$$

Diagrama de fuerza cortante:

TABLA XIV.
RESUMEN DE DATOS PARA LAS FUERZAS CORTANTES.

Distancia (mm)	Fuerza cortante
0	F_{tA}
48	F_{tA}
48	$F_{tA} + R_{Bz}$
92.5	$F_{tA} + R_{Bz}$
92.5	$F_{tA} + R_{Bz} + R_{Cz}$

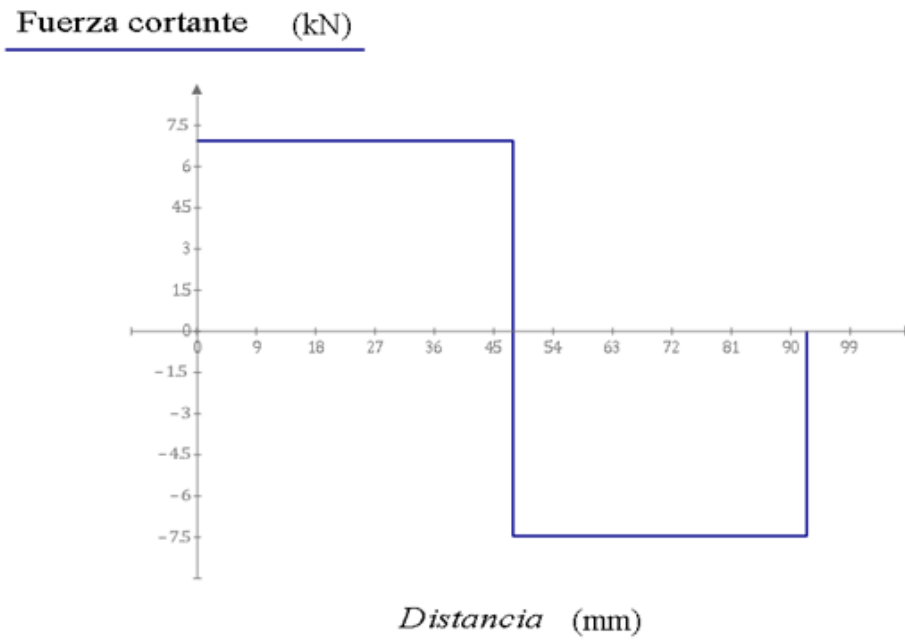


Figura 77. Diagrama de Fuerza cortante plano xz.

Diagrama de momento flector:

Momento en el punto A

$$M_{Axz} = F_{tA} \times (48 \text{ mm}) = 331.83 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

Momento en el punto B

$$M_{Bxz} = (F_{tA} + R_{Bz}) \times (44.5 \text{ mm}) = -331.83 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

TABLA XV.
MOMENTOS EN EL PLANO XZ.

Distancia (mm)	Momento flector en plano xz
0	0
48	M_{Axz}
92.5	$M_{Axz} + M_{Bxz}$

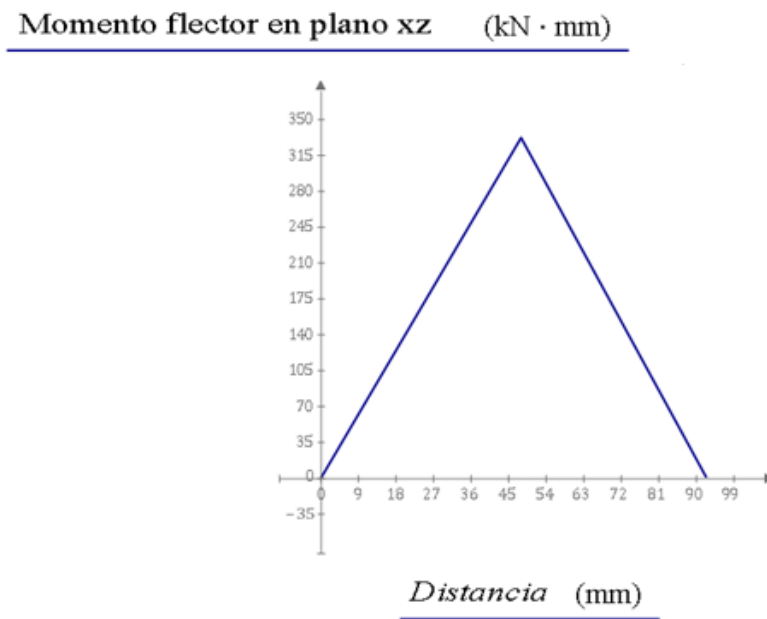


Figura 78. Diagrama de momento flector plano xz.

Diagrama de momento torsor:

TABLA XVI.
RESUMEN DE DATOS PARA EL MOMENTO TORSOR.

Distancia (mm)	Momento torsor
0	$\tau_{motorreductor}$
172.5	$\tau_{motorreductor}$
172.5	$\tau_{motorreductor} - \tau_{placacortante}$
271	$\tau_{motorreductor} - \tau_{placacortante}$
271	$\tau_{motorreductor} - \tau_{placacortante} - \tau_{fricción} - \tau_{rodillos}$

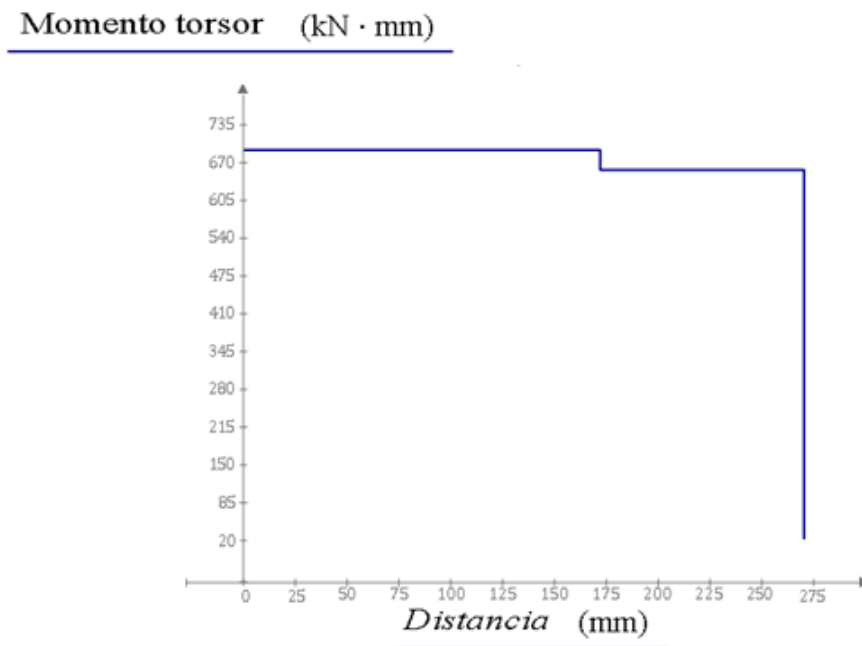


Figura 79. Diagrama de momento torsor.

Resumen de resultados:

Reacciones en el rodamiento de hilera de rodillos cónicos ubicado en B

$$F_{rB} = -5.56 \text{ kN} \quad (\text{Fuerza radial del rodamiento ubicado en B})$$

$$F_{aB} = -5.96 \text{ kN} \quad (\text{Fuerza axial del rodamiento ubicado en B})$$

Reacciones generadas por el apoyo ubicado en B

$$R_{By} = F_{rB} = -5.56 \text{ kN} \quad (\text{Reacción en el eje "y" generada por el apoyo ubicado en B})$$

$$R_{Bz} = -14.37 \text{ kN} \quad (\text{Reacción en el eje "z" generada por el apoyo ubicado en B})$$

Reacciones en el rodamiento rígido de bolas ubicado en el punto C

$$F_{rC} = 2.888 \text{ kN} \quad (\text{Fuerza radial del rodamiento ubicado en C})$$

$$F_{aC} = 0 \text{ kN} \quad (\text{Fuerza axial del rodamiento ubicado en C})$$

Reacciones generadas por el apoyo ubicado en C

$$R_{Cy} = F_{rC} = 2.888 \text{ kN} \quad (\text{Reacción en el eje "y" generada por el apoyo ubicado en C})$$

$$R_{Cz} = 7.457 \text{ kN} \quad (\text{Reacción en el eje "z" generada por el apoyo ubicado en C})$$

Momentos flectores en el punto A

$$M_{Axy} = 128.531 \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (\text{Momento generado en el plano "xy" ubicado en A})$$

$$M_{Axz} = 331.838 \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (\text{Momento generado en el plano "xz" ubicado en A})$$

Momentos flectores en el punto B

$$M_{Bxz} = -331.838 \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (\text{Momento generado en el plano "xy" ubicado en B})$$

$$M_{Bxy} = -128.531 \text{ kN} \cdot \text{mm} \quad (\text{Momento generado en el plano "xz" ubicado en B})$$

Determinamos el esfuerzo admisible del material, conociendo que el límite de fluencia del acero AISI 4340 es $F_y = 470 \text{ MPa}$ y su límite de fractura es de $F_{ut} = 745 \text{ MPa}$ se puede determinar el esfuerzo con la siguiente formula:

$$[\sigma] = 0.5 \times F_y \quad (48)$$

$$[\sigma] = 0.5 \times (470 \text{ MPa})$$

$$[\sigma] = 235 \text{ MPa}$$

Determinamos el esfuerzo cortante aplicando la siguiente formula:

$$\tau = \frac{T \times r}{J} \quad (49)$$

Donde:

T = Torque máximo. [Nm]

r = radio mínimo del eje. [m]

J = Inercia del elemento. [mm^4]

$$\tau = \frac{498.5 \text{ Nm} \times 0.015 \text{ m}}{1.47 \times 10^{-7} \text{ m}^4}$$

$$\tau = 50.76 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de flexión se determina mediante la siguiente formula y se considera el momento máximo que se ejerce en el elemento:

$$\sigma = \frac{Mc}{J} \quad (50)$$

Donde:

σ = Esfuerzo flector máximo. [MPa]

M = Momento máximo. [Nm]

c = radio del eje. [m]

J = Inercia del elemento. [m^4]

$$\sigma = \frac{691.7 \text{ Nm} \times 0.015 \text{ m}}{1.47 \times 10^{-7} \text{ m}^4}$$

$$\sigma = 70.44 \text{ MPa}$$

Aplicando la fórmula del criterio de falla para ejes según Von Mises, se obtiene el esfuerzo equivalente.

$$\sigma_{Eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (51)$$

Donde:

σ_{Eq} = Esfuerzo equivalente. [MPa]

$$\sigma_{Eq} = \sqrt{(70.44 \text{ MPa})^2 + 3(50.76 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{Eq} = 112.6 \text{ MPa}$$

Realizamos una comparación entre el esfuerzo equivalente y el esfuerzo admisible.

$$\sigma_{Eq} \leq [\sigma]$$

$$112.6 \text{ MPa} \leq 235 \text{ MPa}$$

La evaluación dinámica del eje considera las características geométricas y el estado superficial del componente, con el fin de estimar su comportamiento frente a cargas cíclicas. Como paso inicial, se calcula la resistencia a la fatiga aparente en función del límite de ruptura del acero, aplicando la expresión correspondiente:

$$S_e' = \frac{S_{ut}}{2} \quad (52)$$

Donde:

S_e' = Resistencia a la fatiga aparente. [MPa]

S_{ut} = Límite de rotura del material. [MPa]

$$S_e' = \frac{745 \text{ MPa}}{2}$$

$$S_e' = 372.5 \text{ MPa}$$

Aplicando la fórmula de resistencia a la fatiga en un elemento la cual considera distintos factores se obtiene el siguiente resultado.

$$S_e = S_e' \times k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \quad (53)$$

Donde:

S_e = Resistencia a la fatiga. [MPa]

k_a = Factor superficial.

k_b = Factor de tamaño.

k_c = Factor de carga.

k_e = Factor de confiabilidad.

k_d = Factor de temperatura.

El coeficiente k_a está asociado a las condiciones de rugosidad superficial del componente, y su valor se establece en función de la resistencia última del material. A continuación, se presenta la expresión utilizada y la tabla de referencia correspondiente.

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (54)$$

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ur} MPa	S_{ur} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	15.5	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Figura 80. Factor de acabo superficial [10].

$$ka = 4.51 \times (745 \text{ MPa})^{-0.265}$$

$$ka = 0.782$$

La estimación del factor de escala se realiza mediante la expresión:

$$kb = 1.24 \times d^{-0.107} \quad (55)$$

$$\text{si: } (2.79 \leq d \leq 51) \text{ mm}$$

$$kb = 1.24 \times (20 \text{ mm})^{-0.107}$$

$$kb = 0.936$$

La selección del factor k_c responde al tipo de carga que prevalece en el elemento analizado. Dado que el eje de transmisión vertical está sometido principalmente a torsión, se ha considerado el valor asociado a ese régimen de carga.

$$k_c = 0.59$$

El parámetro k_d refleja la influencia de la temperatura en el comportamiento del elemento. Dado que se prevé una operación por debajo de los 450°C , se selecciona el factor adecuado para ese intervalo térmico.

$$k_d = 1 \quad \text{si: } T^\circ \leq 450^\circ\text{C}$$

La determinación del factor de confiabilidad se realiza mediante consulta tabular. Para una confiabilidad del 99.9 %, se considera un valor de $k_e = 0.753$.

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_α	Factor de confiabilidad k_α
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Figura 81. Factor de confiabilidad [10].

Reemplazamos todos los factores en la ecuación (53)

$$S_e = S_e' \times ka \times kb \times kc \times kd \times ke$$

$$S_e = 372.5 \text{ MPa} \times 0.782 \times 0.936 \times 0.59 \times 1 \times 0.753$$

$$S_e = 121.13 \text{ MPa}$$

La aplicación de la teoría de falla en el análisis dinámico permite verificar la integridad del elemento. Al comprobar que el esfuerzo equivalente no supera la resistencia a la fatiga, se valida la seguridad del diseño.

$$\sigma_{Eq} \leq S_e$$

$$112.6 \text{ MPa} \leq 121.13 \text{ MPa}$$

Como parte complementaria del análisis, se calcula el coeficiente de seguridad asociado al funcionamiento del componente, empleando la fórmula que se presenta a continuación.

$$n = \frac{S_y}{S_e} \quad (56)$$

$$n = \frac{470 \text{ MPa}}{121.13 \text{ MPa}}$$

$$n = 3.8$$

Simulación de esfuerzos de Von Mises bajo carga torsional

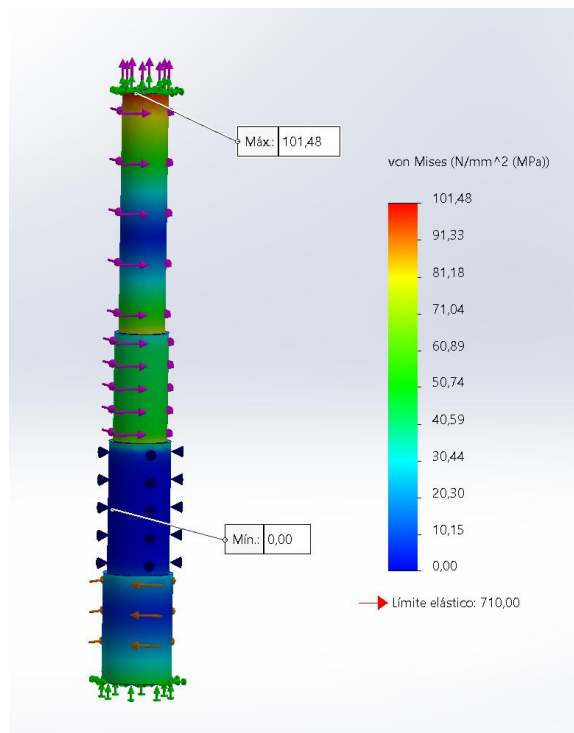


Figura 82. Simulación eje principal.

La simulación de esfuerzos de Von Mises bajo carga torsional muestra un valor máximo de 101.48 MPa, el cual es significativamente inferior al límite de resistencia a la fatiga corregido (121.13 MPa). Esto confirma que el eje opera dentro de condiciones seguras, sin riesgo de falla por fatiga bajo las solicitaciones previstas.

Resultados

Longitud	L	380,000 mm
Masa	Masa	3,105 kg
Tensión de plegado máxima	σ_B	0,339 MPa
Tensión de corte máxima	τ_S	0,016 MPa
Tensión de torsión máxima	τ	130,474 MPa
Tensión máxima	σ_T	4,871 MPa
Tensión reducida máxima	σ_{red}	226,046 MPa
Flexión máxima	f_{max}	27,257 μm
Ángulo de torsión	ϕ	0,93 gr

Figura 83. Resultados del análisis del eje principal.

Los resultados del análisis muestran que los esfuerzos máximos generados en el eje (flexión, corte y torsión) no superan los límites admisibles del acero AISI 4340. En particular, la tensión reducida de 226.05 MPa está por debajo del límite elástico mínimo del material 745 MPa, lo que garantiza la integridad estructural del eje bajo las condiciones de carga previstas.

3.13 Selección de rodamientos

3.13.1 Rodamientos del eje principal

El eje principal está apoyado sobre los rodamientos de rodillos cónicos y rodamiento de bolas rígido, los cuales soportan una carga axial proveniente de las fuerzas de compactación en el proceso de peletizado. En base al diámetro del eje y a la fuerza de compactación, se escoge el rodamiento de rodillos cónicos 33108 y rodamiento de bolas rígido 6008-2Z de marca SKF.

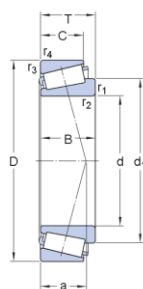
Designación	Diámetro del agujero	Diámetro exterior	Capacidad de carga dinámica básica	Velocidad límite	Ancho total	Ancho
	[mm]	$\uparrow$ [mm]	[kN]	[r/min]	[mm]	[mm]
HM 801346 X/CL7A	38,1		106		28,575	
PER.2788	38,1				25,654	
PER.2789A	39,688				25,654	
NN 3008 KTN/UPVR521	40	68	42,9			21
NN 3008 KTN/SP	40	68	42,9			21
NN 3008 KTN/UP	40	68	42,9			21
32008 X/VA983	40	68	49,5	9 500	19	
32008 X/QVB458	40	68	52,8	9 500	19	
32008 X	40	68	64,7	9 500	19	
32008T41.5 X/DB11G10	40	68	111	9 500	41,5	
33108	40	75	97,5	9 000	26	
1208 EKTN9	40	80	19,9	11 000		18
1208 EKTN9/C3	40	80	19,9	11 000		18
2208 E-2RS1KTN9	40	80	19,9	5 600		23
2208 E-2RS1KTN9/C3	40	80	19,9	5 600		23

Figura 84. Rodamientos cónicos [46].

Designación	Diámetro del agujero	Diámetro exterior	Ancho	Capacidad de carga dinámica básica	Velocidad límite
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[r/min]
6008-2Z	40	68	15	17,8	11 000
6008-2Z/C3GJN	40	68	15	17,8	11 000
W 6008-2Z	40	68	15	14,6	11 000
6008-2Z/C3	40	68	15	17,8	11 000
6008-2Z/VA208	40	68	15		80
PER.6008-ZZDV2	40	68	15	17	
6008	40	68	15	17,8	14 000
6008 2ZJEM	40	68	15	17,8	11 000
6008 2ZNRJEM	40	68	15	17,8	11 000
6008-2RZTN9/HCS3WT	40	68	15	16,8	13 000

Figura 85. Rodamientos de bolas [46].

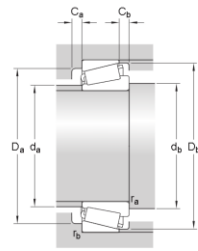
3.13.2 Características del rodamiento SKF 33108



Dimensiones

d	40 mm	Diámetro del agujero
D	75 mm	Diámetro exterior
T	26 mm	Ancho total
d ₁	≈ 57,5 mm	Diámetro del resalte del aro interior
B	26 mm	Ancho del aro interior
C	20,5 mm	Ancho del aro exterior
r _{1,2}	min. 1,5 mm	Dimensión del chaflán del aro interior
r _{3,4}	min. 1,5 mm	Dimensión del chaflán del aro exterior
a	17,9 mm	Distancia de la cara lateral al punto de presión

Figura 86. Datos geométricos dimensiones y de carga del rodamiento 33108 [46].



Dimensiones de los resaltes

d_a	max. 47 mm	Diámetro del resalte del eje
d_b	min. 48.5 mm	Diámetro del resalte del eje
D_a	min. 65 mm	Diámetro del resalte del soporte
D_b	max. 67.5 mm	Diámetro del resalte del soporte
C_a	min. 4 mm	Ancho mínimo de espacio requerido en el soporte en la cara lateral grande
C_b	min. 5.5 mm	Ancho mínimo del espacio requerido en el soporte en la cara lateral pequeña
r_a	max. 1.5 mm	Radio de acuerdo del eje
r_b	max. 1.5 mm	Radio de acuerdo del soporte

Figura 87. Datos geométricos dimensiones de resalte y de carga del rodamiento 33108 [46].

Datos del cálculo

Clase de rendimiento SKF		SKF Explorer
Capacidad de carga dinámica básica	C	97.5 kN
Capacidad de carga estática básica	C_0	104 kN
Carga límite de fatiga	P_u	114 kN
Velocidad de referencia		7 000 r/min
Velocidad límite		9 000 r/min
Valor límite	e	0.35
Factor de cálculo	Y	1.7
Factor de cálculo	Y_0	0.9

Figura 88. Datos de cálculo del rodamiento 33108. [46].

Dado que cada rodillo participa activamente en la compactación del aserrín, la fuerza axial que se transfiere al rodamiento cónico equivale al doble de la fuerza de compresión aplicada, es decir, $P = 2Fc$. Para simplificar el análisis, se omite el efecto del peso propio del eje y de los rodillos giratorios. En cuanto a la componente radial, se considera que representa aproximadamente el 50 % de la carga axial, criterio respaldado por SKF en sus principios de selección de rodamientos, donde se establece que las cargas axiales inducen reacciones internas de tipo radial debido a la geometría inclinada del contacto entre rodillos y pistas [46]. Con una velocidad de rotación estimada de 70 RPM, estos parámetros permiten calcular tanto el factor de seguridad en condiciones estáticas como la vida útil nominal del rodamiento, según se muestra en la Figura 81.

Condiciones de funcionamiento

Fuerza radial, F_r Fuerza axial, F_a Velocidad de rotación Temperatura de funcionamiento

2.889 kN 5.619 kN 100 r/min 70 °C



Figura 89. Condiciones de servicio del rodamiento 33108 [46].

Resultados de cálculos para el rodamiento 33108 obtenidos con la herramienta Evaluar componentes de la misma página SKF.

Ajustes		
Cojinete	33108	...
Ajustes de lubricación	LGMT 2	✎
Configuración de emisiones de CO2	1 año, 100 %	✎
Período de interés, Tiempo operativo		
Resultados		
Nivel de carga	[-]	9.11
Reflexión de carga, C/P		
Vida útil nominal del rodamiento	[h] ◆	34000
L_{10mh}		
Seguridad estática de los cojinetes	[-]	16
Seguridad estática del cojinete, s_0		
Lubricación	[h] ◆	6420
Intervalo de relubricación, t_r		
Fricción y pérdida de potencia	[EN]	11
Pérdida de potencia, pérdida P		
Estimación de las emisiones de CO2	[kilogramos]	43.7
Suma de CO2 durante las operaciones		
Nivel de velocidad	[mm/min]	5760
Factor de velocidad, nd_m		
Frecuencias		
✓ Seleccionado		

Figura 90. Resultados de servicio del rodamiento 33108 [46].

El análisis realizado sobre el rodamiento cónico del eje principal arroja un factor de seguridad estática de 16.0, correspondiente a una carga equivalente de 5.62 kN. Así mismo, con los factores de corrección establecidos por SKF, la vida nominal ajustada es $L_{10mh} = 34000$, lo que permite evaluar con mayor precisión el desempeño real del componente en condiciones operativas específicas.

Vida nominal del rodamiento 33108

La vida útil de un rodamiento se establece en función de la carga dinámica que este soporta durante su operación.

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (59)$$

Donde:

L = Vida nominal

C = Capacidad de carga dinámica.

P = Carga dinámica equivalente del rodamiento.

P = Exponente de la ecuación de la vida (10/3 para rodamientos cónico).

$$L = \left(\frac{97.5 \text{ kN}}{11.238 \text{ kN}}\right)^{\frac{10}{3}} = 1341.9 \text{ millones de revoluciones}$$

Vida nominal del rodamiento 33108 en horas

$$L_h = \frac{1000000}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (60)$$

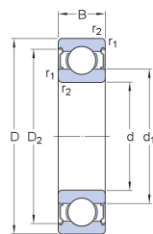
Donde:

L_h = Vida nominal

n = velocidad de giro en rpm.

$$L_h = \frac{1000000}{60 \times 70} \left(\frac{97.5 \text{ kN}}{11.238 \text{ kN}}\right)^{\frac{10}{3}} = 3.68 \times 10^5 \text{ horas de funcionamiento}$$

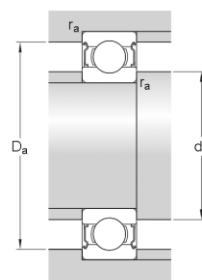
3.13.3 Características del rodamiento SKF 6008-2Z



Dimensiones

d	40 mm	Diámetro del agujero
t_{dDmp}	-0.01 – 0 mm	Deviation limits of mid-range bore diameter
D	68 mm	Diámetro exterior
t_{dDmp}	-0.011 – 0 mm	Deviation limits of mid-range outside diameter
B	15 mm	Ancho
t_{DDe}	-0.06 – 0 mm	Deviation limits of ring width
d ₁	≈ 49.25 mm	Diámetro del resalte
D ₂	≈ 61.1 mm	Diámetro del rebaje
r _{1,2}	min. 1 mm	Dimensión del chaflán
P6 and tighter width tolerance		ISO tolerance class for dimensions

Figura 91. Datos geométricos dimensiones y de carga del rodamiento 6008-2Z [46].



Dimensiones de los resaltes

d_a	min. 44.6 mm	Diámetro del resalte del eje
d_a	max. 49.2 mm	Diámetro del resalte del eje
D_a	max. 63.4 mm	Diámetro del resalte del soporte
r_a	max. 1 mm	Radio del eje o acuerdo del soporte

Figura 92. Datos geométricos dimensiones del rodamiento 6008-2Z [46].

Datos del cálculo

Clase de rendimiento SKF		SKF Explorer
Capacidad de carga dinámica básica	C	17.8 kN
Capacidad de carga estática básica	C_0	11 kN
Carga límite de fatiga	P_U	0.49 kN
Velocidad de referencia		22 000 r/min
Velocidad límite		11 000 r/min
Factor de carga mínima	k_f	0.03
Factor de cálculo	f_0	14.7

Figura 93. Datos de cálculo del rodamiento 6008-2Z [46].

En el cálculo del rodamiento de bolas correspondiente al eje principal, se adopta como hipótesis que la carga radial equivale al 30 % de la fuerza axial soportada por el rodamiento de rodillos cónicos.

Condiciones de funcionamiento

Fuerza radial, F_r	Fuerza axial, F_a	Velocidad de rotación	Temperatura de funcionamiento
1.685 kN	0 kN	100 r/min	70 °C

Predeterminado. Haga clic para cambiar.



Figura 94. Condiciones de servicio del rodamiento 6008-2Z [46].

Resultados de cálculos para el rodamiento 6008-2Z obtenidos con la herramienta evaluar de la misma SKF.

Ajustes	
Cojinete	6008-2Z
Juego radial de funcionamiento Por defecto	Normal
Ajustes de lubricación Designación de grasa SKF predeterminada	MT33
Configuración de emisiones de CO2 Periodo de interés, Tiempo operativo	1 año, 100 %

Resultados	
Nivel de carga Relación de carga, C/P	10.56
Vida útil nominal del rodamiento L_{10mh}	34800
Seguridad estática de los cojinetes Seguridad estática del cojinete, s₀	6.53
Lubricación Vida útil de la grasa, L₁₀	26600
Fricción y pérdida de potencia Pérdida de potencia, pérdida P	0,44
Estimación de las emisiones de CO2 Suma de CO2 durante las operaciones	1.8
Nivel de velocidad Factor de velocidad, rid_m	5400
Frecuencias	

Seleccionar

Figura 95. Resultados de servicio del rodamiento 6008-2Z [46].

El análisis realizado sobre el rodamiento bolas del eje principal arroja un factor de seguridad estática de 6.53, correspondiente a una carga equivalente de 1.69 kN. Así mismo, con los factores de corrección establecidos por SKF, la vida nominal ajustada es $L_{10mh} = 34800$, lo que permite evaluar con mayor precisión el desempeño real del componente en condiciones operativas específicas.

Vida nominal del rodamiento 6008-2Z

La estimación de la vida útil de un rodamiento se realiza en función de la carga dinámica que este soporta durante su operación

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Donde:

L = Vida nominal.

C = Capacidad de carga dinámica.

P = Carga dinámica equivalente del rodamiento.

P = Exponente de la ecuación de la vida (3 para rodamientos de bolas).

$$L = \left(\frac{17.8 \text{ kN}}{3.371 \text{ kN}} \right)^3 = 147.2 \text{ millones de revoluciones}$$

Vida nominal del rodamiento 6008-2Z en horas

$$L_h = \frac{1000000}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Donde:

L_h = Vida nominal

n = velocidad de giro en rpm.

$$L_h = \frac{1000000}{60 \times 70} \left(\frac{17.8 \text{ kN}}{3.371 \text{ kN}} \right)^3 = 3.50 \times 10^4 \text{ horas de funcionamiento}$$

3.14 Selección de Chavetas

La selección de la chaveta se determinó en función del diámetro del eje principal, cuya primera sección presenta 45 mm en la zona de acoplamiento con la matriz giratoria. De acuerdo con lo indicado en la Tabla 11, se eligió una chaveta de 14×6×63 mm, especificada bajo la norma DIN 6885-A, lo que asegura una transmisión confiable del par en dicha unión. La chaveta se fabricó con acero AISI 1045 material recomendado por la norma, ya que actúa como un elemento fusible frente a sobrecargas torsionales.

The figure shows two views of a parallel key. The side view (left) shows a cylindrical shaft of diameter d_1 with a key of width b and height t_2 seated in a keyway of depth t_1 . The cross-sectional view (right) shows the key's profile with width b , height t_2 , and the shaft diameter d_1 . The keyway depth is t_1 , and the remaining shaft diameter is $d_1 - t_1$. The key's height is t_2 , and the shaft's total diameter is d_1 .

	b	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16									
	h	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16									
Chaveta del eje	d1	>	6	8	10	12	17	17	22	22	30	30	38	38	44	44	50	50	58	58
		≤	8	10	12	17	17	22	22	30	30	38	38	44	44	50	50	58	58	
	b*	asiento fijo	P9	2	3	4	5	5	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16
		asiento ligero	N9	2	3	4	5	5	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16
	t1	con juego en el lomo o aprieto		1,2	1,8	2,5	1,9	3	2,5	3,5	3,1	4	3,7	5	3,9	5	4	5,5	4,7	6
	dif. adm.		+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	
Chaveta del cubo	b*	asiento fijo	P9	2	3	4	5	5	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16
		asiento ligero	JS9	2	3	4	5	5	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16
	t2	con juego en el lomo		1	1,4	1,8	1,2	2,3	1,6	2,8	2	3,3	2,4	3,3	2,2	3,3	2,1	3,8	2,4	4,3
		dif. adm.		+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2
		con aprieto		0,5	0,9	1,2	0,8	1,7	1,1	2,2	1,4	2,4	1,8	2,4	1,6	2,4	1,4	2,9	1,7	3,4
	dif. adm.		+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	
a	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	3	-	3	-	3	-	3,5	-	4	
d2 min.	d1 +	2,5	3,5	4	3	5	4	6	5	8	6	8	6	8	6	8	6	9	7	11
r1	min.	0,16	0,16	0,16	0,20	0,25	0,40	0,25	0,40	0,25	0,40	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	
	max.	0,25	0,25	0,25	0,30	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,60	0,70	0,60	0,70	0,60	0,70	0,60	0,70	
r2	max.	0,16	0,16	0,16	0,20	0,25	0,40	0,25	0,40	0,25	0,40	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	
	min.	0,08	0,08	0,08	0,10	0,16	0,20	0,16	0,20	0,16	0,20	0,16	0,20	0,25	0,30	0,25	0,30	0,25	0,30	

Figura 96. Selección de la chaveta paralela DIN 6885 para eje Ø 45 mm [46].

Procedemos a verificar la fuerza tangencial y la presión de aplastamiento

$$Ft = \frac{M}{\frac{d}{2}} \quad (61)$$

Donde:

Ft = Fuerza tangencial al eje.

M = Momento torsor.

d = diámetro del eje en el canal del chavetero.

$$Ft = \frac{691.7 \text{ Nm}}{\frac{45 \text{ mm}}{2}}$$

$$Ft = 30742.2 \text{ N}$$

$$p = \frac{Ft}{t \times Lef} \leq P_{adm} \quad (62)$$

Donde:

P = Presión de aplastamiento.

t = Profundidad que penetra la chaveta en el eje.

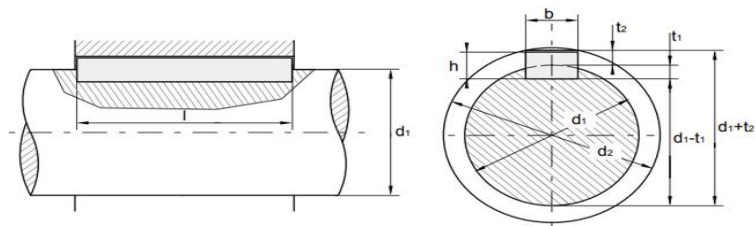
Lef = Longitud de contacto efectiva entre la chaveta y el canal del eje.

P_{adm} = Presión admisible de aplastamiento (90 a 100 MPa). [49]

$$p = \frac{30742.2 \text{ N}}{5 \text{ mm} \times 63 \text{ mm}} \leq P_{adm}$$

$$p = 97.6 \text{ MPa} \leq P_{adm} \text{ CUMPLE}$$

En este diseño, el eje principal también tiene una sección que presenta un diámetro de 35 mm en la zona destinada al canal chavetero. Conforme a los criterios de selección establecidos en la Tabla 12, se optó por una chaveta de dimensiones 10×6×63, especificada bajo la norma DIN 6885-A, adecuada para garantizar una transmisión segura del par en esa sección del sistema. La chaveta se fabricó con acero AISI 1045 material recomendado por la norma, ya que actúa como un elemento fusible frente a sobrecargas torsionales.



b	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
h	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
d1	>	6	8	10	12	17	22	30	38	50
	≤	8	10	12	17	22	30	38	44	58
Chavetero del eje	b*	asiento fijo	P9	2	3	4	5	6	8	10
	b*	asiento ligero	N9	2	3	4	5	6	8	10
	t1	con juego en el lomo o aprieto		1,2	1,8	2,5	3,1	3,7	5	6
	dif. adm.			+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,2	+0,2
Chavetero del cubo	b*	asiento fijo	P9	2	3	4	5	6	8	10
	b*	asiento ligero	JS9	2	3	4	5	6	8	10
	t2	con juego en el lomo		1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,3
	dif. adm.			+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,2
Chavetero del cubo	b*	asiento fijo	P9	2	3	4	5	6	8	10
	b*	asiento ligero	JS9	2	3	4	5	6	8	10
	t2	con juego en el lomo		1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3	4,3
	dif. adm.			+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,2
a				-	-	-	-	3	-	4
d2 min.	d1 +	2,5	3,5	4	5	6	8	10	12	16
r1	min.	0,16	0,16	0,16	0,20	0,25	0,40	0,25	0,40	0,50
	max.	0,25	0,25	0,25	0,30	0,40	0,50	0,40	0,50	0,60
r2	max.	0,16	0,16	0,16	0,20	0,25	0,40	0,25	0,40	0,50
	min.	0,08	0,08	0,08	0,10	0,16	0,20	0,16	0,20	0,25

Figura 97. Selección de la chaveta paralela DIN 6885 para eje Ø 35 mm [46].

Procedemos a verificar la fuerza tangencial y la presión de aplastamiento

$$F_t = \frac{M}{\frac{d}{2}}$$

Donde:

Ft = Fuerza tangencial al eje.

M = Momento torsor.

d = diámetro del eje en el canal del chavetero.

$$F_t = \frac{498.5 \text{ Nm}}{\frac{35 \text{ mm}}{2}}$$

$$F_t = 28486 \text{ N}$$

$$p = \frac{F_t}{t \times L_{ef}} \leq P_{adm}$$

Donde:

P = Presión de aplastamiento.

t = Profundidad que penetra la chaveta en el eje.

Lef = Longitud de contacto efectiva entre la chaveta y el canal del eje.

P_{adm} = Presión admisible de aplastamiento (90 a 100 MPa). [49]

$$p = \frac{28486 \text{ N}}{5 \text{ mm} \times 63 \text{ mm}} \leq P_{adm}$$

$$p = 90.6 \text{ MPa} \leq P_{adm} \text{ CUMPLE}$$

3.15 Diseño de la máquina en el software especializado

El diseño y el ensamble de la peletizadora se realizó en el software SolidWorks 2023, este software permite realizar cambios en el diseño final para que cumpla con las normativas de resistencia y de construcción de la máquina según los requerimientos necesarios.

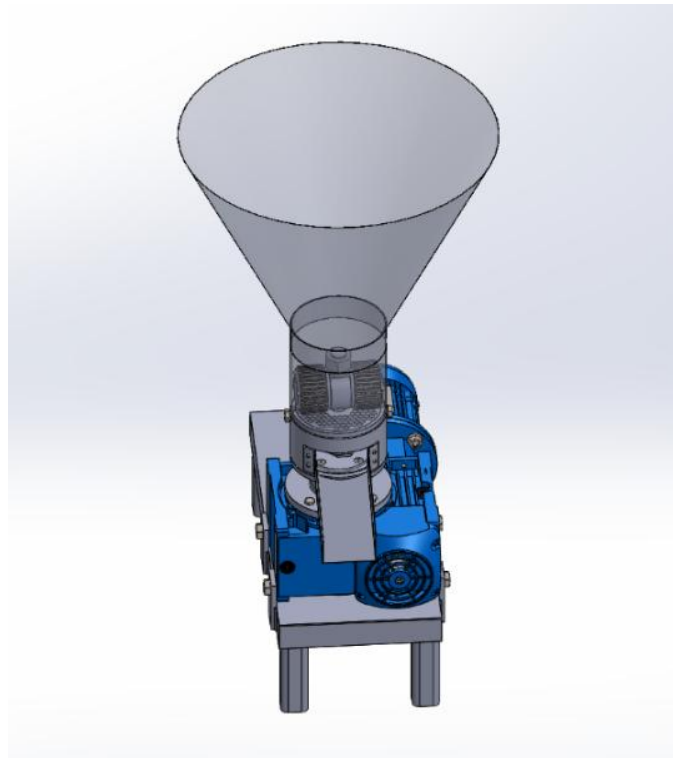


Figura 98. Vista posterior del ensamble de la máquina.

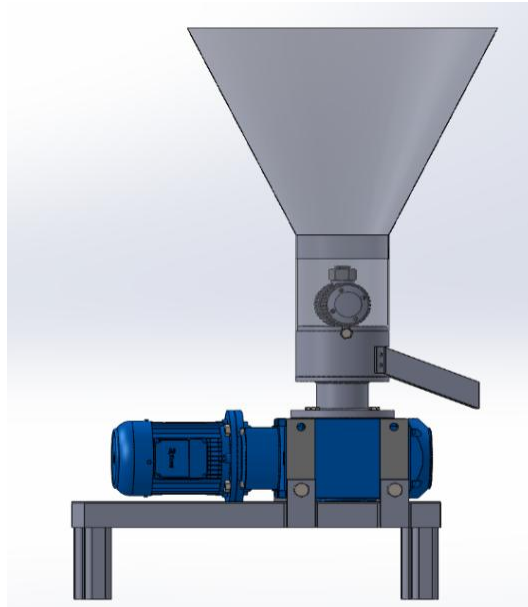


Figura 99. Vista lateral de la máquina.

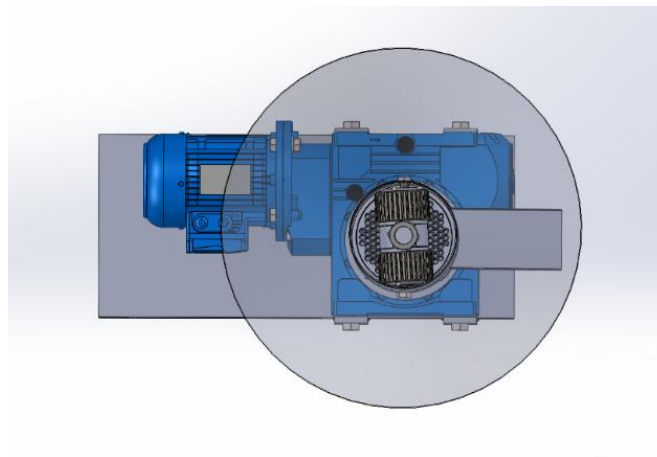


Figura 100. Vista superior del modelado de la peletizadora

3.16 Construcción de la máquina

Mediante otros diseños de peletizadoras realizadas que se utilizan para balanceados y otros para el procesamiento del aserrín de madera el modelo se dimensionó por cálculos y modelado mediante software especializado. Esta máquina tiene como finalidad la producción de pellets de madera estandarizados por medio de la norma UNE-EN ISO 17225-2:2021. La mayoría de las partes fabricadas fueron mecanizados por máquinas convencionales como torno y fresadora, seguido de soldadura para la unión de las piezas.

3.16.1 Preparación del cubo

Las partes importantes del mecanismo interno de la peletizadora está albergado en el cubo, por ende, se debe fabricar en un material que soporte altas presiones. Entonces se utilizó un Tubo Negro 6" Ced 80 (Diámetro Ext 6.625") espesor 10.97 mm como se muestra en la Figura 101 y Figura 102.



Figura 101. Vista superior del cubo.



Figura 102. Vista inferior del cubo.

3.16.2 Mecanizado de la matriz plana

Para la matriz plana se rectifica la superficie en la cual se van a realizar los orificios previamente calculados que son 151 los cuales formaran los pellets de madera, en la Figura 103 y 104 se muestra el proceso de mecanizado en el torno convencional, mientras que en el Figura 105 se muestra el proceso para hacer los orificios en la matriz mediante un taladro pedestal para finalmente obtener la matriz terminado como se indica en la Figura 106.



Figura 103. Mecanizado de la matriz.



Figura 104. Rectificado de la matriz.



Figura 105. Mecanizado de orificios de la matriz.



Figura 106. Matriz terminada.

3.16.3 Mecanizado de bocines

Los bocines tienen como finalidad brindar soporte al eje principal, es decir sirven de topes. La fabricación de estos se hizo en un torno convencional. Como se muestra en la Figura 107.



Figura 107. Torneado de la superficie.

3.16.4 Mecanizado de rodillos

El mecanizado de rodillos es el conjunto de operaciones que implica el torneado, rectificado y fresado de las ranuras, además, se realizan agujeros para alojar el eje y sistemas de fijación. En la Figura 109 se muestra el rodillo terminado.



Figura 108. Rodillos mecanizados.



Figura 109. Mecanizado final del rodillo.

Como se indica en [49], las ranuras en los rodillos cumplen la función de capturar y transportar el material hacia la matriz, garantizando una alimentación estable. Cabe señalar que no existe un número específico de ranuras, ni una profundidad o ancho de canal universalmente definidos, ya que estos parámetros dependen de factores como la granulometría del material, el contenido de humedad y la geometría de la matriz. En consecuencia, el diseño de las ranuras se ajusta de manera experimental y tribológica, buscando un equilibrio entre tracción suficiente para evitar deslizamientos y una compactación que no genere exceso de finos ni fractura de fibras.

3.16.5 Mecanizado del eje principal

Para la fabricación del eje el material utilizado fue AISI 4340 Ø 2" a 500 mm. En la Figura 110 se muestra en eje adquirido para el mecanizado.



Figura 110. Eje para mecanizar.

3.16.6 Mecanizado tapas de los rodillos internos y externos

Se elabora las tapas de los rodillos que sirven para cubrir los rodamiento, ejes y elementos de transmisión dentro del rodillo como se muestra en la Figura 111 y 112. Además, los cubren de polvos o residuos.



Figura 111. Mecanizado de la pieza en el torno.



Figura 112. Piezas mecanizadas.

3.16.7 Mecanizado eje secundario (eje de rodillos)

Para la elaboración del eje secundario se usa el mismo material usado para el eje principal, este es el elemento que transmite el movimiento desde el eje principal hacia los rodillos. En la Figura 113 se presenta el eje secundario terminado.



Figura 113. Eje secundario.

3.16.8 Mecanizado de chavetas

Se mecaniza las chavetas que van junto a los ejes principal y secundario, estos sirven para transmitir par de torsión entre los ejes, además evitan que los ejes giren libremente. En la Figura 114 se presentan las chavetas.



Figura 114. Chavetas para los ejes.

3.16.9 Elaboración del canal de expulsión

Se elaboró un canal para facilitar la expulsión del producto terminado con las dimensiones adecuadas para que encaje en la salida del cono de compactamiento del pellet. En la Figura 115 se presenta el canal de expulsión de pellets terminado.



Figura 115. Canal de expulsión.

3.16.10 Ensamble del motorreductor con el motor

Para que el equipo funcione se acopla un motorreductor, en otras investigaciones utilizan poleas de transmisión de potencia. En este caso se optó por un motorreductor porque ofrece mejor transmisión de potencia hacia los rodillos. En la Figura 116 se aprecia el motorreductor adquirido.

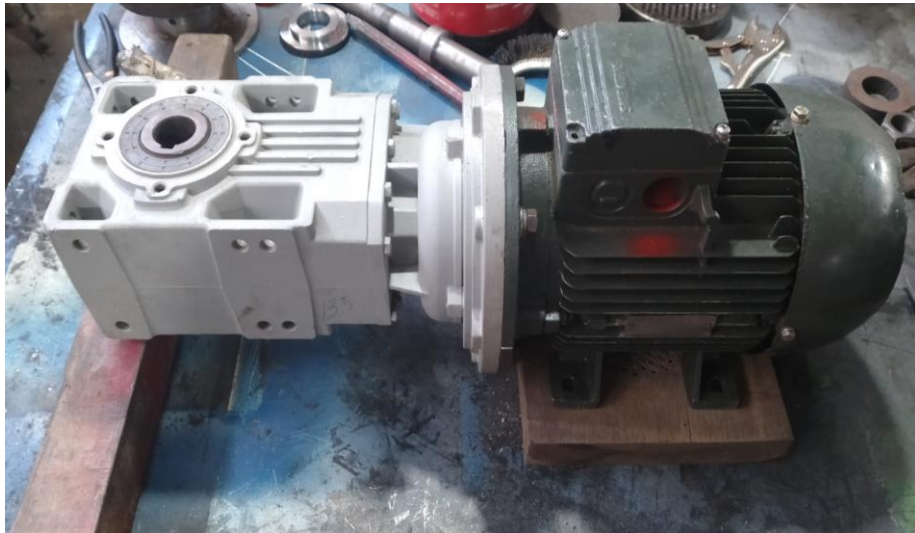


Figura 116. Acoplamiento del motorreductor.

3.16.11 Ensamble final

Finalmente, posterior al mecanizado de las piezas que conforman cada una de las partes de la máquina se procede al armado y ensamble final del equipo como se muestra en las Figuras 109 y 110.



Figura 117. Ensamble de la matriz.



Figura 118. Ensamble final.

3.17 Costo total de peletizadora

Los costos directos en la realización de la peletizadora se detallan en las siguientes tablas separadas para cada sistema y sus elementos.

3.17.1 Sistema de Alimentación (Tolva)

TABLA XVII.

COSTO DE MATERIALES DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Descripción	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
Plancha de Tool Galvanizado 1 mm	1	12	12
Total			12

3.17.2 Sistema de Extrusión

TABLA XVIII.
COSTO DE MATERIALES DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN

Descripción	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
Tubo Negro 6" Ced 80 a 50 cm (Diámetro Ext 6.625") espesor 10.97 mm	1	40.00	40.00
Platina ½" a Ø 180 mm Acero ASTM A36	1	12.00	12.00
Bloque circular de acero AISI 8620 de Ø160 mm	1	60.00	60.00
Eje de acero AISI 8620 de Ø 90 mm a 10 cm	1	30.00	30.00
Eje de transmisión acero AISI 4340 Ø 2" a 500 mm	1	35.00	35.00
Eje de transmisión acero AISI 4340 Ø 3" a 160 mm	1	25.00	25.00
Total			202

3.17.3 Estructura

TABLA XIX.
COSTO DE MATERIALES DE LA ESTRUCTURA

Descripción	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
Perfil Estructural 2.5" × 2.5" × 6 mm a 6 m, Acero ASTM A36	1	12.00	12.00
Lámina de acero lisa de 4' × 8' × 3 mm" de espesor	1	15.00	15.00
Total			27.00

3.17.4 Sistema de corte

TABLA XX.
COSTO DE MATERIALES DEL SISTEMA DE CORTE

Descripción	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
Segmento de plancha de acero inoxidable AISI 304 20 cm × 5cm × 0.5cm	1	5.00	5.00
Total			5.00

3.17.5 Sistema de transmisión de Potencia

TABLA XXI.
COSTO DE MATERIALES DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Descripción	Especificación técnica	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
Motorreductor	5.5 kW, relación 17:1, eficiencia 85%	1	980.00	980.00
Rodamientos cónicos	SKF 33108	5	20	100.00
Rodamiento de bolas rígidas	SKF 6206 ZZ	1	12.00	12.00
Total				1092

3.17.6 Pernos y Tornillos de fijación

TABLA XXII.
COSTO DE MATERIALES DE PERNOS Y TORNILLOS DE FIJACIÓN

Sistema	Elemento de fijación	Dimensiones / Tipo	Cantidad estimada	Valor c/u (\$)	Valor total (\$)
Estructura	Perno hexagonal	1/2"-13 × 2"	4	0.85	3.40

TABLA XXIII.
COSTO DE MATERIALES DE PERNOS Y TORNILLOS DE FIJACIÓN
(Continuación)

Extrusión	Tornillo de cabeza hueca hexagonal	3/8"-16 × 2"	20	0.60	12.00
	Tornillo hexagonal	1/2"	8	0.65	5.20
Corte	Tornillo de fijación cabeza hueca hexagonal	M6 × 20 mm (ISO 4762 / DIN 912)	6	0.35	2.10
Alimentación (Tolva)	Remache de aluminio	3/16" × 1/2"	3	0.06	0.18
Total					22.70

3.17.7 Costo estimado para el uso de máquinas y herramientas

TABLA XXIV.
COSTO DE USO DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS

Máquina/Herramientas	Horas	Costo/Hora (USD)	Precio Total (USD)
Torno	12.0	10.0	120.0
Taladro	4.0	10.0	40.0
Fresadora	6.0	10.0	60.0
Soldadora	2.0	3.0	6.0
Plegadora	2.0	3.0	6.0
Sierra de metal	2.0	2.0	4.0
Esmeriladora	2.0	2.0	4.0
Oxicorte	2.0	9.0	18.0
Total			258

3.17.8 Costo de mano de obra

TABLA XXV.
COSTO DE MECANIZADO.

Descripción	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
Construcción de Tolva	1	20.00	20.00
Construcción de sistema de Extrusión	1	20.00	20.00
Maquinado de eje	1	30.00	30.00
Chaveta de eje	2	15.00	30.00
Maquinado de rosca en eje	2	30.00	60.00
Construcción de la estructura	1	35.00	35.00
Construcción de sistema de corte y resbaladera	1	18.00	18.00
Total			213

3.17.9 Costo total de la Peletizadora

Los gastos totales generados en la construcción de la peletizadora se muestran en la siguiente tabla, con un total de 1834.88 se llevó a cabo la finalización del proyecto.

TABLA XXVI.
COSTO TOTAL.

Sistema	Valor total (\$)
Sistema de Alimentación (Tolva)	12.00
Sistema de Extrusión	202.00
Estructura	30.00

TABLA XXVII.
COSTO TOTAL (Continuación)

Sistema de Corte	5.00
Sistema de Transmisión de Potencia	1092.00
Pernos y Tornillos de Fijación	22.88
Máquinas y Herramientas	258
Mano de obra	213
Total	1834.88

3.18 Determinación de la capacidad de producción

Se realizaron pruebas experimentales con tres niveles de humedad del aserrín: seco (8%), semihúmedo (15%) y húmedo (28%). En cada caso, se registró la masa de pellets producida en intervalos de 10 minutos durante sesiones de 1 hora.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2}$$

Desviación estándar por condición de humedad

- Seco (8%)

Con un contenido de humedad tan bajo, el aserrín presenta alta fricción contra la matriz y los rodillos. La lignina no se activa ni se plastifica adecuadamente, lo que impide la cohesión interna del pellet. Esto provoca atascos en los canales, aumento del torque y consumo energético, además de una producción irregular con alto porcentaje de finos.

- Semihúmedo (15%)

Datos: [8.55, 8.8, 8.95, 8.45, 8.35, 8.45]

Promedio: 8.59

Desviación estándar:

$$s = \frac{8.55 + 8.8 + 8.95 + 8.45 + 8.35 + 8.45}{6} = 8.59$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma = (8.55 - 8.59)^2 + (8.8 - 8.59)^2 \dots \dots (8.45 - 8.59)^2}{6}} = 0.213$$

- Húmedo (28%)

Un contenido excesivo de humedad en el aserrín facilita su paso a través de la matriz, pero provoca que los pellets obtenidos presenten una consistencia blanda y deformable. Durante el secado, estas piezas tienden a agrietarse, perder su geometría original y generar partículas finas. La sobrehidratación, además, disminuye la densidad aparente y la resistencia mecánica, de modo que, aunque el equipo no sufra atascos en la operación, el producto final carece de la calidad requerida y no alcanza los estándares de durabilidad establecidos

Multiplica cada desviación por $\sqrt{6} = 2.45$ para convertirla a kg/h:

Condición de humedad	Producción por intervalo (kg/10min)	Producción promedio (kg/h)	Desviación estándar (kg/h)	% respecto al objetivo (50 kg/h)
Semihúmedo (15%)	[8.55, 8.8, 8.95, 8.45, 8.35, 8.45]	51.3	0.52	102.6%

Calculamos el coeficiente de variación (CV)

$$CV = \frac{\sigma}{x} \times 100$$

$$CV = \frac{0.213}{8.59} \times 100 = 2.48$$

Condición	Promedio (kg/h)	σ (kg/h)	CV (%)
Semihúmedo	51.3	8.59	2.48

TABLA XXVIII.
COEFICIENTE DE VARIACIÓN.

Condición	Promedio (kg/h)	σ (kg/h)	CV (%)
-----------	-----------------	-----------------	--------

TABLA XXIX.
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (Continuación)

Seco	Na	Na	Na
Semihúmedo	51.3	8.59	2.48
Húmedo	Na	Na	Na



Figura 119. Resultado de producción pellets de aserrín.

La desviación estándar calculada en función del contenido de humedad constituye un indicador clave para evaluar la estabilidad del proceso de peletización. En este análisis se determinó que la mayor capacidad de producción se alcanzó con aserrín al 15 % de humedad, valor considerado como óptimo para el sistema. En dicha condición, el coeficiente de variación resultó inferior al 3 %, lo que evidencia un adecuado equilibrio entre la estabilidad operativa y el rendimiento del equipo.

3.19 Evaluación de la calidad del pellet obtenido

Se analizaron muestras de pellets para determinar su densidad aparente, contenido de humedad y durabilidad mecánica, conforme a las normas ISO 16559:2014 e ISO 17225-4:2014 (4).

TABLA XXX.
EVALUACIÓN DEL PELLET.

Parámetro	Valor promedio	Norma ISO 17225-2:2014 (Clase A2)	Cumplimiento
Densidad aparente	645 kg/m ³	$\geq 600 \text{ kg/m}^3$	Sí
Humedad	9.8 %	$\leq 10 \%$	Sí
Durabilidad	98 %	$\geq 97.5 \%$	Sí
Diámetro	6 mm	6 ± 1	Si
Longitud	3,5 cm	$3,15 \text{ cm} < L < 4 \text{ cm}$	Si

Los pellets obtenidos cumplen con los requisitos de calidad para biocombustibles sólidos de clase A2. Las muestras fueron fotografiadas y los resultados se presentan en gráficos comparativos.



Figura 120. Resultado de la prueba de durabilidad mecánica de los pellets de aserrín.



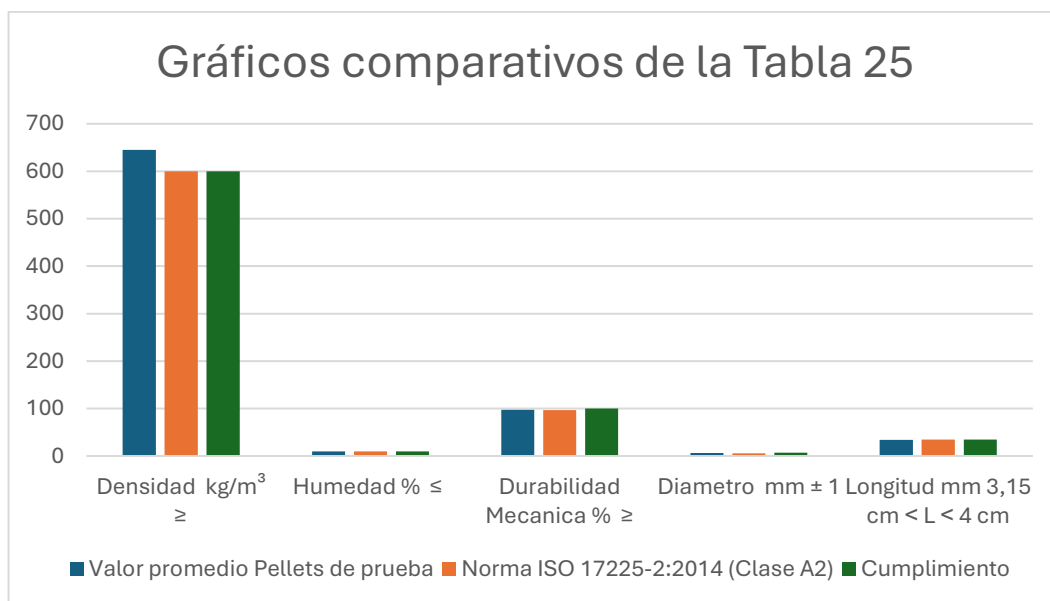
Figura 121. Resultado de la medida del diámetro de los pellets de aserrín.



Figura 122. Resultado de la medida de longitud mínima de los pellets de aserrín.



Figura 123. Resultado de la medida de longitud máxima de los pellets de aserrín.



Los resultados muestran que los pellets producidos cumplen con todos los parámetros de la norma ISO 17225-2:2014 (Clase A2). Esto valida la calidad del proceso de peletizado y confirma que el prototipo diseñado es técnicamente viable para aplicaciones energéticas, garantizando un producto competitivo y estandarizado.

3.20 Comparación con equipos similares existentes

Se recopilaron los datos técnicos relevantes de dos peletizadoras comerciales:

TABLA XXXI.
EXISTENCIA DE EQUIPO SIMILARES.

Modelo	Potencia (kW)	Capacidad (kg/h)	Costo estimado (USD)
Pellets Master	5.5	50	2500
EcoPellets	7.5	100	3500
Prototipo desarrollado	5.5	50	1835

El prototipo ofrece una relación costo-beneficio favorable, con rendimiento comparable a modelos comerciales de mayor precio. Además, su diseño incorpora materiales accesibles y procesos de fabricación simplificados, lo que reduce significativamente los costos de producción.

3.21 Identificación de limitaciones del prototipo

Durante las pruebas se observaron las siguientes limitaciones:

TABLA XXXII.
LIMITACIONES DE LA MÁQUINA.

Observación	Frecuencia	Impacto
Atascos con aserrín seco	Baja	Reducción de producción
Vibraciones en el eje	Baja	Riesgo de desgaste

3.22 Propuestas de mejora para futuras versiones

Con base en los resultados obtenidos, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Incorporar un sistema de presecado del aserrín.
- Rediseñar el soporte del eje para reducir vibraciones.
- Optimizar el sistema de alimentación para evitar atascos.

3.23 Contribución del diseño a la sostenibilidad y aprovechamiento del aserrín

El sistema diseñado posibilita la conversión del aserrín en pellets de elevada calidad, favoreciendo la valorización de los residuos forestales. Esta práctica impulsa la economía circular, disminuye la quema indiscriminada de desechos y proporciona una alternativa energética sostenible, especialmente beneficiosa para comunidades rurales que requieren soluciones accesibles y ambientalmente responsables.

CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se establecieron como requisitos técnicos críticos: humedad del aserrín entre 15–18%, granulometría uniforme ≤ 3 mm, presión de compactación de 180–220 MPa, y velocidad angular de rodillos de 70 rpm. Estos parámetros permitieron garantizar la funcionalidad del equipo y la obtención de pellets con densidad promedio de 645 kg/m³, cumpliendo estándares internacionales de calidad (ISO 17225-2).

El diseño de la máquina peletizadora se fundamentó en cuatro subsistemas: transmisión de potencia mediante un reductor helicoidal de engranes cónicos, compresión y extrusión con rodillos de 40 mm de radio y 50 mm de longitud, matriz estática con 139 orificios de 6 mm, y sistema de corte controlado. El torque transmitido de 691.7 N·m y una potencia efectiva de 5 kW fueron determinados mediante una combinación de cálculos teóricos y la revisión de las especificaciones técnicas de los componentes, estos valores aseguran una operación estable del proceso de peletización.

El prototipo desarrollado alcanzó una capacidad de producción de 51,3 kg/h, lo que representa un incremento del 2,6 % respecto a la estimación teórica inicial de 50 kg/h. Los pellets obtenidos evidenciaron una resistencia superior al 97.5 % en las pruebas de durabilidad mecánica, confirmando tanto la confiabilidad del diseño como la funcionalidad del equipo. El costo total de construcción ascendió a 1.835 USD, el valor que implica un ahorro cercano al 40 % en comparación con equipos equivalentes disponibles en el mercado, consolidando así su viabilidad económica y su aporte pedagógico.

4.2 Recomendaciones

Incorporar sistemas de control de humedad y granulometría para asegurar la calidad constante del pellet.

Rediseñar el soporte del eje con la finalidad de reducir las vibraciones en la caja que contiene el rodillo y la matriz.

Optimizar el sistema de alimentación incorporando un dosificador de aserrín para que no haya obstrucción al momento de recargar el mismo de forma abrupta.

Referencias

- [1] T. Wang, Y. Li, J. Zhao, Y. Liu, L. Sun, B. Liu y H. Mao, «Evaluation of the potential of pelletized biomass from different municipal solid wastes for use as solid fuel,» *Waste Management*, vol. 74, pp. 260-266, 2018.
- [2] T. Wang, D. Meng, J. Zhu y X. Chen, «Effects of pelletizing conditions on the structure of rice straw-pellet pyrolysis char,» *Fuel*, vol. 264, 2020.
- [3] H.-X. Zhao, F.-S. Zhou, A. E. L.M, J.-L. Liu y Y. Zhou, «A review on the industrial solid waste application in pelletizing additives: Composition, mechanism and process characteristics,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 423, 2022.
- [4] Y. Yu, A. Lau y S. Sokhansanj, «Improvement of the pellet quality and fuel characteristics of agricultural residues through mild hydrothermal treatment,» *Industrial Crops and Products*, vol. 169, 2021.
- [5] A. Morales, «Valorización de residuos lignocelulósicos para producción de pellets de biomasa,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, nº 2, pp. 45-58, 2019.
- [6] M. Hernández, «Factores de calidad en la producción de pellets de biomasa,» Tesis de Maestría, Universidad Tecnológica, 2018.
- [7] M. Ledesma, «Implementación de peletizadoras didácticas en institutos técnicos,» *Revista de Innovación Educativa*, vol. 5, nº 1, pp. 101-115, 2021.
- [8] J. Herrera y D. Moreno, «Metología TRIZ para el rediseño de una peletizadora de diferentes tipos de biomasa,» vol. 2, nº 2, 2018.
- [9] N. R. Gómez Rojas, «Diseño de una máquina peletizadora de residuos del cacao,» 2019.
- [10] J. Pérez, «Diseño y construcción de una peletizadora de biomasa para zonas rurales,» Tesis de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional, 2020.

- [11] C. N. Dao, A. Salam, N. T. Kim Oanh y L. G. Tabil, «Effects of length-to-diameter ratio, pinewood sawdust, and sodium lignosulfonate on quality of rice straw pellets produced via a flat die pellet mill,» *Renewable Energy*, vol. 181, pp. 1140-1154, 2022.
- [12] M. Zribi, M. Lajili y F. Escudero-Sanz, «Hydrogen enriched syngas production via gasification of biofuels pellets/powders blended from olive mill solid wastes and pine sawdust under different water steam/nitrogen atmospheres,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, nº 22, pp. 11280-11288, 2019.
- [13] H. Fernández-Puratich, D. Hernández y V. Lerma Arce, «Characterization and cost savings of pellets fabricated from Zea mays waste from corn mills combined with Pinus radiata,» *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 448-454, 2017.
- [14] K. Wang, X. Hu, Q. Zhang, X. Liu, J. Shang y S. Yun, «Effect of temperature on sawdust and sawdust pellets during dry and wet torrefaction,» *Green Materials*, 2024.
- [15] V. Dorokhov, G. Nyashina, D. Shvedov y P. Strizhak, «Physical characteristics and combustion behavior of pellets from sawdust and refuse-derived fuel,» *Fuel*, vol. 377, 2024.
- [16] H. Fernández-Puratich, J. V. Oliver-Villanueva, M. Valiente , S. Verdú y N. Albert, «Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas,» *Maderas y Bosques*, 2014.
- [17] Z. Xiao, Yuan X., L. Jiang, X. Chen, H. Li, G. Zeng, L. Leng, H. Wang y H. Huang, «Energy recovery and secondary pollutant emission from the combustion of co-pelletized fuel from municipal sewage sludge and wood sawdust,» *Energy*, vol. 91, pp. 441-450, 2015.
- [18] P. Pradhan, S. M. Mahajani y A. Arora, «Pilot scale production of fuel pellets from waste biomass leaves: Effect of milling size on pelletization process and pellet quality,» *Fuel*, 2021.
- [19] R. A. Morales Araujo, «DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA MÁQUINA PELETIZADORA PARA LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTO

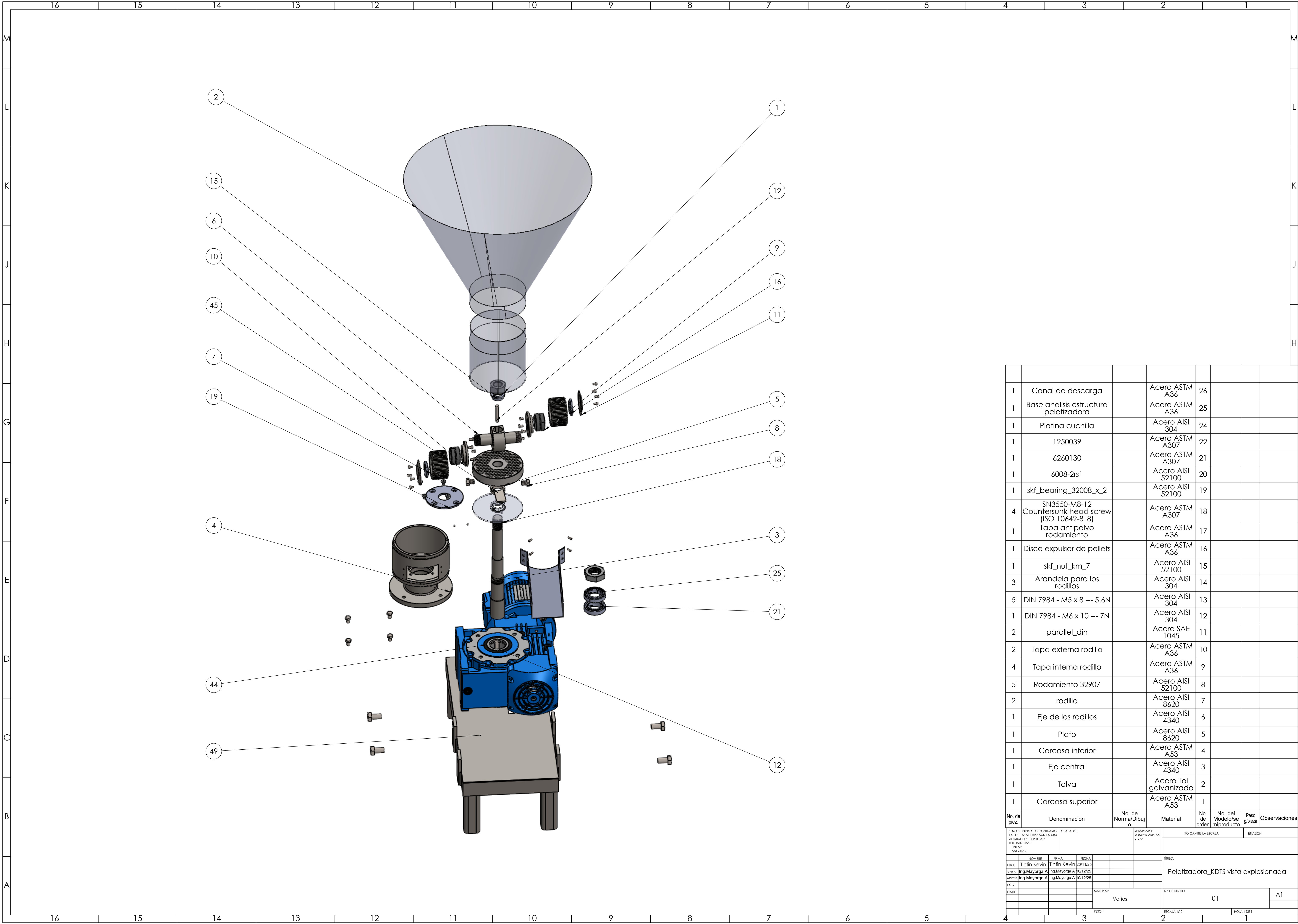
- ANIMAL,» PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA PEREIRA RISARALDA, 2019.
- [20] D. A. Flórez, W. A. Ramírez y L. B. Varela, «DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA MAQUINA PELETIZADORA DE ALIMENTOS PARA AVES DE CORRAL,» UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2010.
- [21] J. C. Pinilla, K. Luengo, M. Navarrete y F. Navarrete, «EL PELLET DE MADERA EN CHILE,» INSTITUTO FORESTAL, 2020.
- [22] C. A. Forero Núñez, C. A. Guerrero Fajardo y F. E. Sierra Vargas, «Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación,» vol. 9, 2012.
- [23] pelletsolucion, «pelletsolucion,» 17 09 2015. [En línea]. Available: www.pelletsolucion.com.
- [24] E. F. Albán Yépez y Á. S. Arias Romo, «DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA PELETIZADORA DE ALIMENTOS BALANCEADOS PARA EL SECTOR PECUARIO CON CAPACIDAD DE 100KG/H,» UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2019.
- [25] T. Hansen, «English Handbook for Wood Pellet Combustion,» European Biomass Industry Association, 2009.
- [26] J. Rodriguez, «Biomasa forestal: Requisitos de calidad,» Centro Tecnológico Forestal de Cataluña, 2019.
- [27] G. Totten y M. Howes, Steel Heat Treatment Handbook, 2nd ED ed., FL, USA: CRC Press, 2006.
- [28] A. Nijman, «Wear and surface treatments of stainless and tool steels in biomass compaction dies,» Wear, n° 102918, pp. 432-433, 2019.
- [29] R. Van Den Brink, «Pellet quality and die specifications for biomass densification,» Bioenergy Research, vol. 11, n° 3, pp. 643-655, 2018.
- [30] J. E. Shigley y C. R. Mischke, Diseño en ingeniería mecánica, México: McGraw-Hill, 2012.
- [31] Food and Agriculture Organization of the United Nations, «Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview Mapping,» FAO, 2017.

- [32] M. Vera, «Diseño y construcción de una máquina peletizadora de aserrín, Proyecto de titulación, Escuela Superior Politécnica del Litoral(ESPOL),» Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, 2023.
- [33] A. W. Jenike , «Storage and Flow of Solids,» University of Utah Engineering Experiment Station, nº 123, 1964.
- [34] International Organization for Standardization, «ISO 17225-2:2014 Solid Biofuels-Fuel specifications and classes-Part 2 Wood pellets for non-industrial use,» 2014.
- [35] CTFC, «Centro Tecnológico Forestal de Cataluña,» 2014. [En línea]. Available: https://eforown.ctfc.cat/pdf/44b_3_Biomasa%20forestal%20-%20Produccion%20de%20%20Pelets.pdf.
- [36] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Msnufactura, ingeniería y tecnoligía, México: Pearson Educación, 2010.
- [37] MiSUMi, «MiSUMi Mech Lab,» [En línea]. Available: <https://us.misumi-ec.com/blog/coefficient-of-friction/>. [Último acceso: 07 10 2025].
- [38] M. Sotelo, «Diseño del sistem de extrusión de euna peletizadora de matriz plana goratoria para procesar 10kg/h de aserrin,» Facultas de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2024.
- [39] R. Morales Araujo, «Diseño y cálculo de una máquina peletizadora para la producción de aliemnto animal,» Universidad Tecnológica de Pereira, 2019.
- [40] L. Tipanluisa y R. De la Torre Ojeda, «Diseño de una Peletizadora para biomasa de matriz plana de capacidad de 80kg/hora,» Universidad Internacional SEK, 2015.
- [41] J. Chilán Villafuerte y J. Pazmiño Moreira, «Elaboración de una máquiima peletizadora de escla laboratorio de mariz plana,» Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2023.
- [42] A. Trujillo y E. J., «Diseño de una máquina pelletizadora en base a la disponibilidad de residuos madereros en la ciudad de Cuenca para su aprovechamiento energético,» 2010. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/832/13/UPS-CT001696.pdf>.

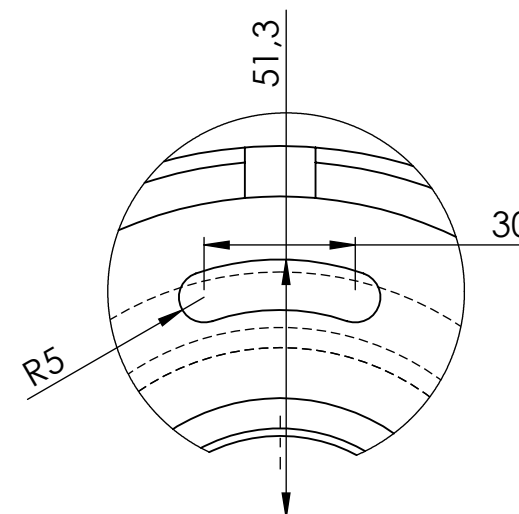
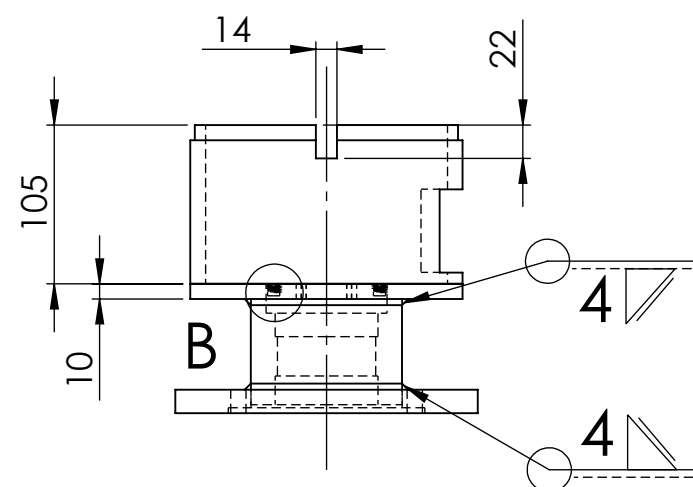
- [43] Microm Inc, «Microm,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.microm-inc.com/works/enfriador-de-pellets-125>.
- [44] «Calculatorconversion,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.calculatorsconversion.com/es/calculo-de-motorreductores-para-sistemas-de-transmision/>.
- [45] PelletSolución, 2016. [En línea]. Available: https://www.pelletsolucion.com/wpcontent/uploads/2016/01/GUIA_T%C3%89CNICA_PARA_LA_ELABORACI%C3%93N_DE_PELLET_DE_BIOMASA.pdf.
- [46] SKF Group, «SKG,» 2025. [En línea]. Available: https://www.skf.com/co/search-results?q=rodamiento%20conico&searcher=products&site=334&system=metric&tridion_target=live&search_bar=Search%20Page&language_preset=Espa%C3%B1ol&language=es&taxonomy=Rodamientos&locale=es-co&tridion_version=3&sort=PIM001%7CF1.
- [47] C. Ramirez, «Análisis técnico-económico de máquinas pelletizadoras de pequeña escala,» Congreso Latinoamericano de Energías Renovables, 2017.

ANEXOS

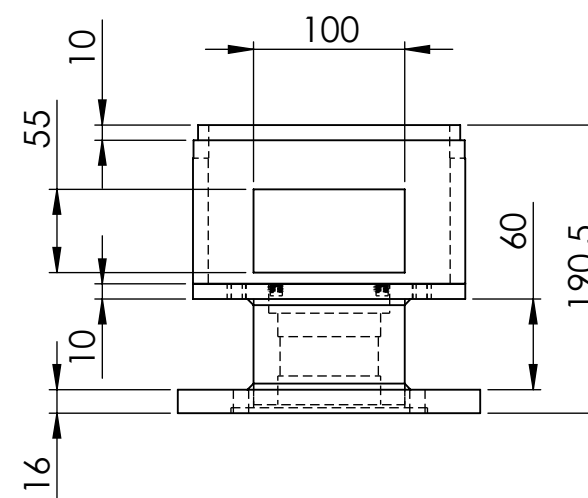
PLANOS DE LAS PIEZAS DEL EQUIPO



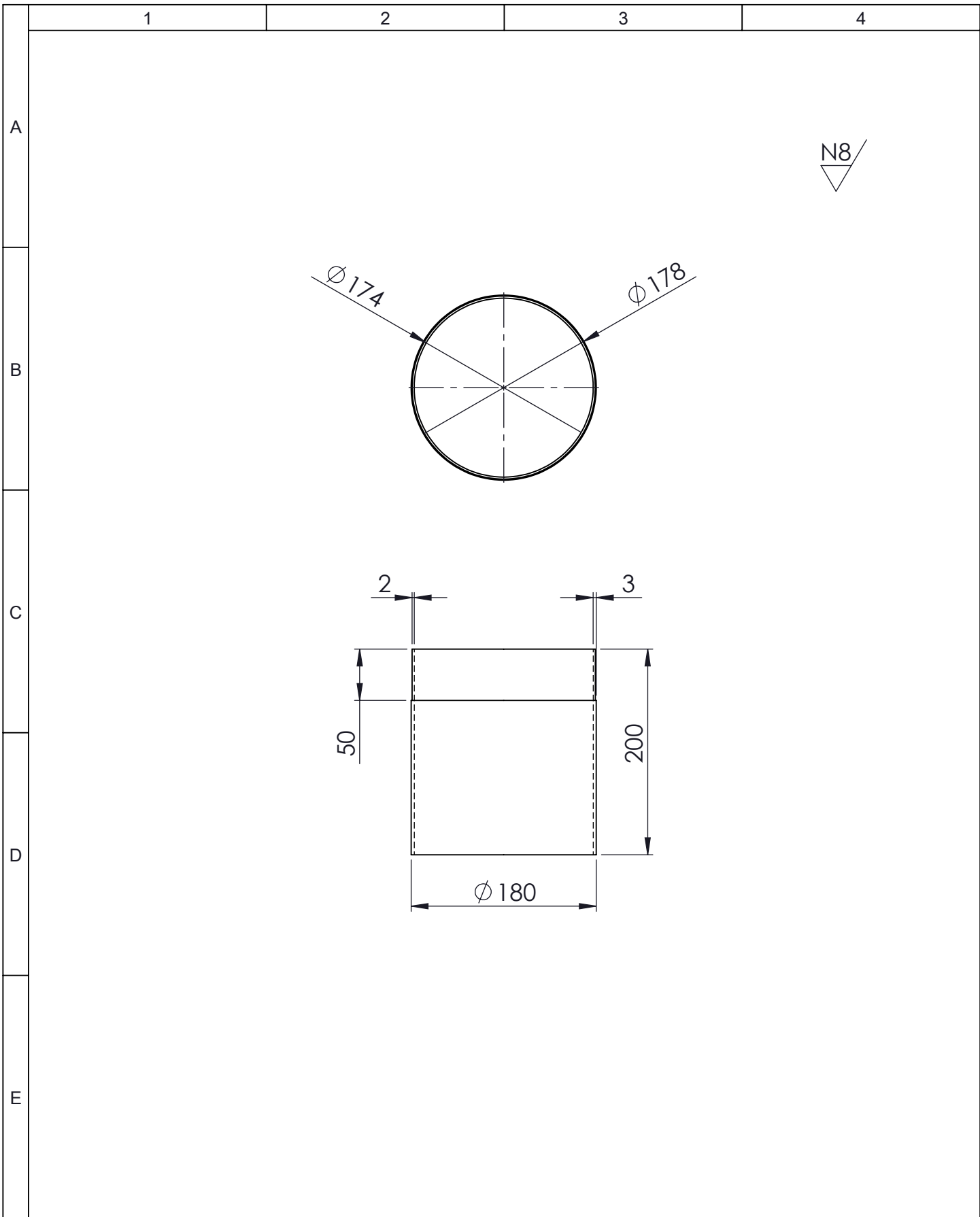
1	Canal de descarga		Acero ASTM A36	26				
1	Base analisis estructura peletizadora		Acero ASTM A36	25				
1	Platina cuchilla		Acero AISI 304	24				
1	1250039		Acero ASTM A307	22				
1	6260130		Acero ASTM A307	21				
1	6008-2rs1		Acero AISI 52100	20				
1	skf_bearing_32008_x_2		Acero AISI 52100	19				
4	SN3550-M8-12 Countersunk head screw (ISO 10642-8_8)		Acero ASTM A307	18				
1	Tapa antipolvo rodamiento		Acero ASTM A36	17				
1	Disco expulsor de pellets		Acero ASTM A36	16				
1	skf_nut_km_7		Acero AISI 52100	15				
3	Arandela para los rodillos		Acero AISI 304	14				
5	DIN 7984 - M5 x 8 --- 5.6N		Acero AISI 304	13				
1	DIN 7984 - M6 x 10 --- 7N		Acero AISI 304	12				
2	parallel_din		Acero SAE 1045	11				
2	Tapa externa rodillo		Acero ASTM A36	10				
4	Tapa interna rodillo		Acero ASTM A36	9				
5	Rodamiento 32907		Acero AISI 52100	8				
2	rodillo		Acero AISI 8620	7				
1	Eje de los rodillos		Acero AISI 4340	6				
1	Plato		Acero AISI 8620	5				
1	Carcasa inferior		Acero ASTM A53	4				
1	Eje central		Acero AISI 4340	3				
1	Tolva		Acero Tol galvanizado	2				
1	Carcasa superior		Acero ASTM A53	1				
No. de pieza.	Denominación	No. de Norma/Dibuj o	Material	No. de orden	No. del Modelo/se miproducto	Peso g/pieza	Observaciones	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO: REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBRE LA ESCALA		REVISIÓN		
DIBUJ.	Tintin Kevin	FIRMA	Tintin Kevin	FECHA	20/11/25	TÍTULO:		
VERIF.	Ing. Mayorga A		Ing. Mayorga A		10/12/25	Peletizadora_KDTS vista explosionada		
APROB.	Ing. Mayorga A		Ing. Mayorga A		10/12/25			
FABR.								
CALIB.						Nº DE DIBUJO	01	A1
						Varios		
						PESO:	ESCALA: 1:10	HOJA 1 DE 1



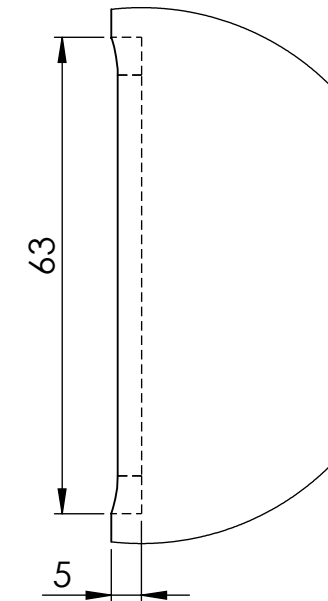
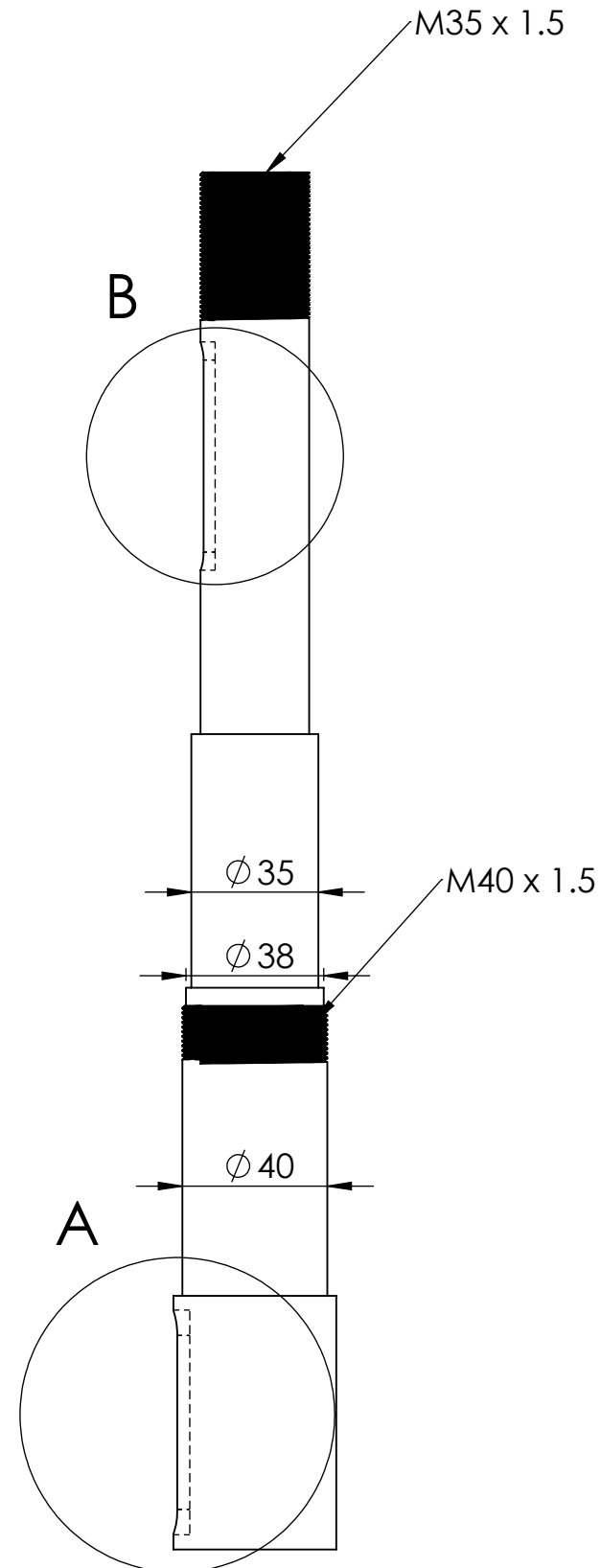
DETALLE A
ESCALA 2:3



				Tolerancia	Peso	Materiales	
				Na	10298 g	Acero ASTM A53	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	20/11/2025	Tintin Kevin	Carcasa Inferior
				Rev.	10/12/2025	Ing.Mayorga A	
				Apr.	10/12/2025	Ing.Mayorga A	
				UTA		Numero de dibujo	Registro
						02	
Edic.	Modif.	Fecha	Nom.	Organización		Sustitución	

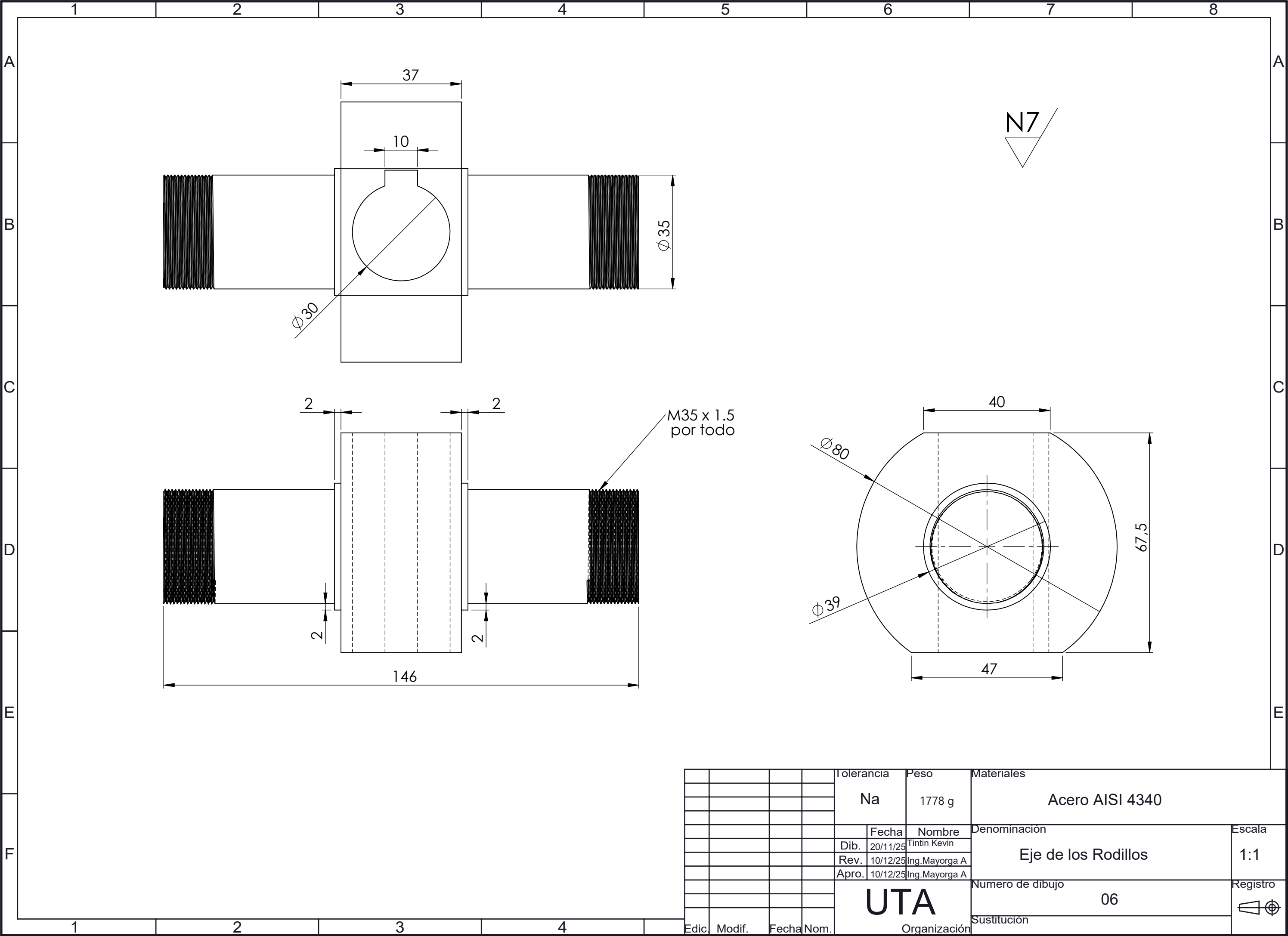


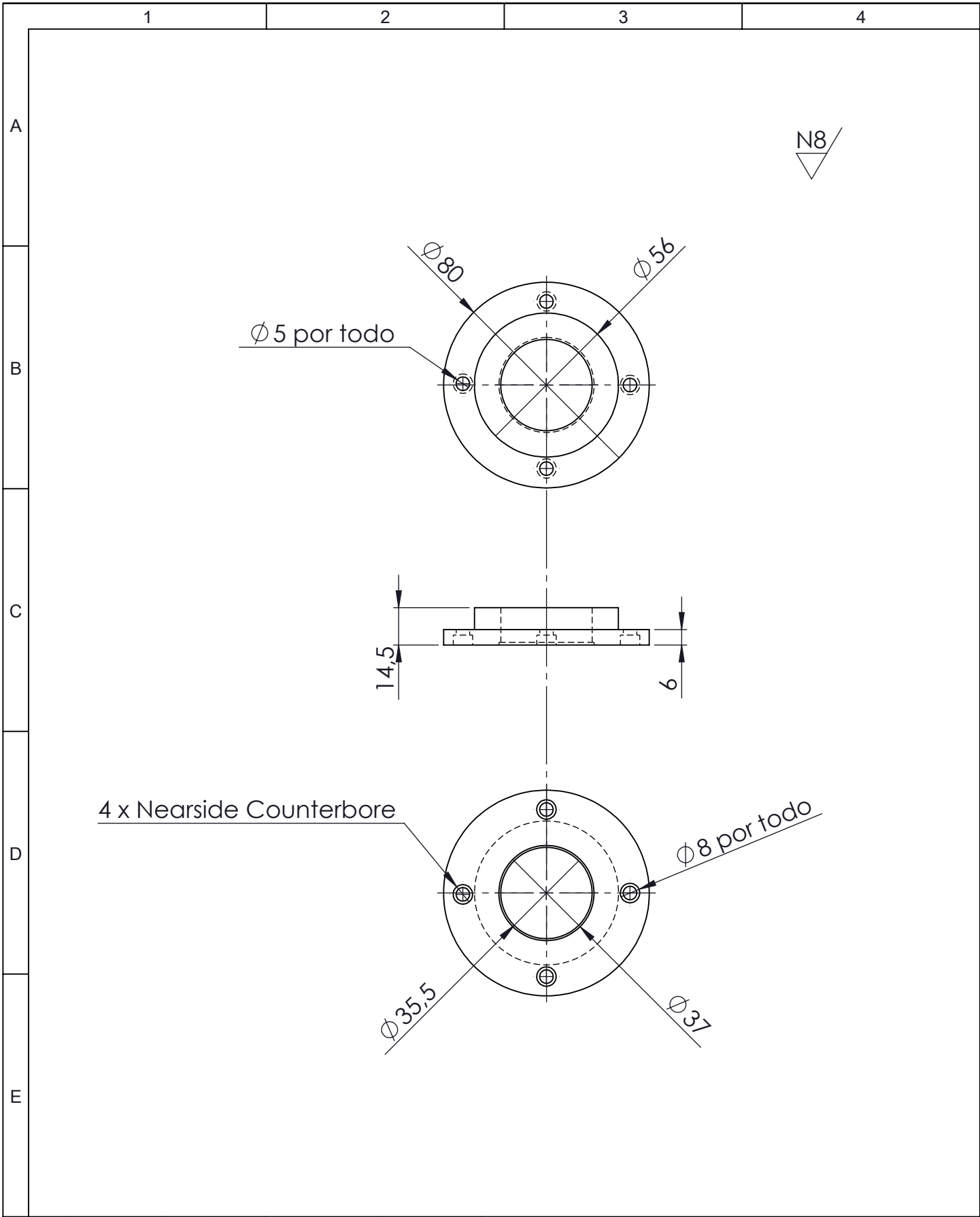
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

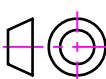


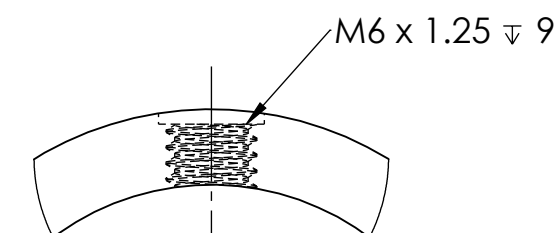
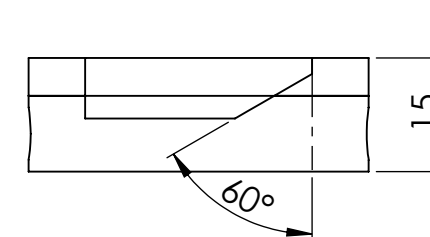
DETALLE B
ESCALA 1 : 1

				Tolerancia	Peso	Materiales		
				Na	3040 g	Acero AISI 4340		
					Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Dib.	20/11/25	Tintin Kevin	Eje principal	1:2
				Rev.	10/12/25	Ing.Mayorga A		
				Apro.	10/12/25	Ing.Mayorga A		
						Numero de dibujo	04	Registro
				UTA				
Edic.	Modif.	Fecha	Nom.	Organización		Sustitución		



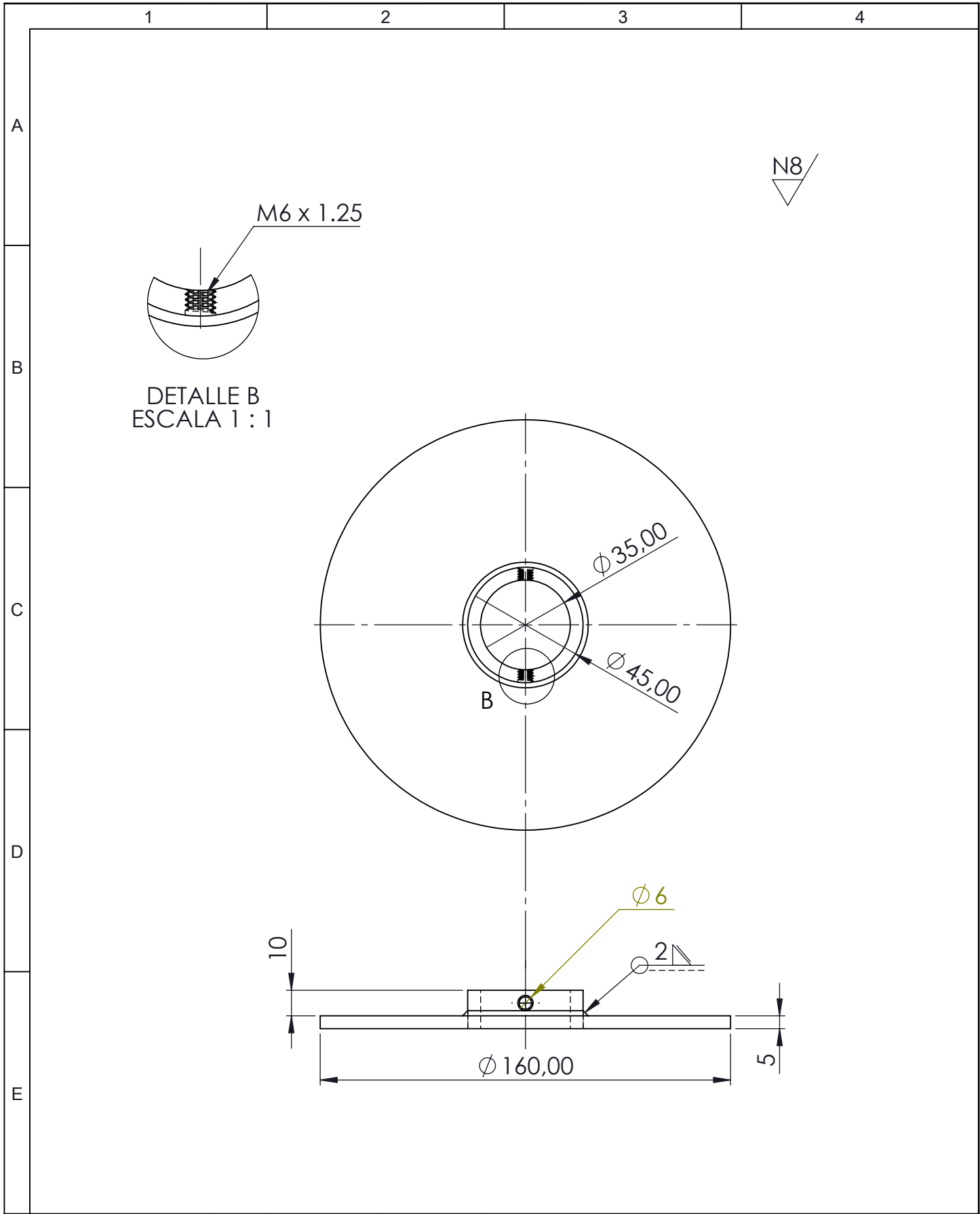


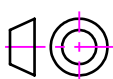
						Tolerancia	(Peso)	Materiales:		
						Na	281 g	Acero ASTM A36		
							Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
					Dibujó:	20/11/25	Tintin Kevin			
					Revisó:	10/12/25	Ing.Mayorga A			
					Aprobó:	10/12/25	Ing.Mayorga A			
						UTA			Número del dibujo: 09	
					Ingeniería Mecánica					
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						(Sustitución)	

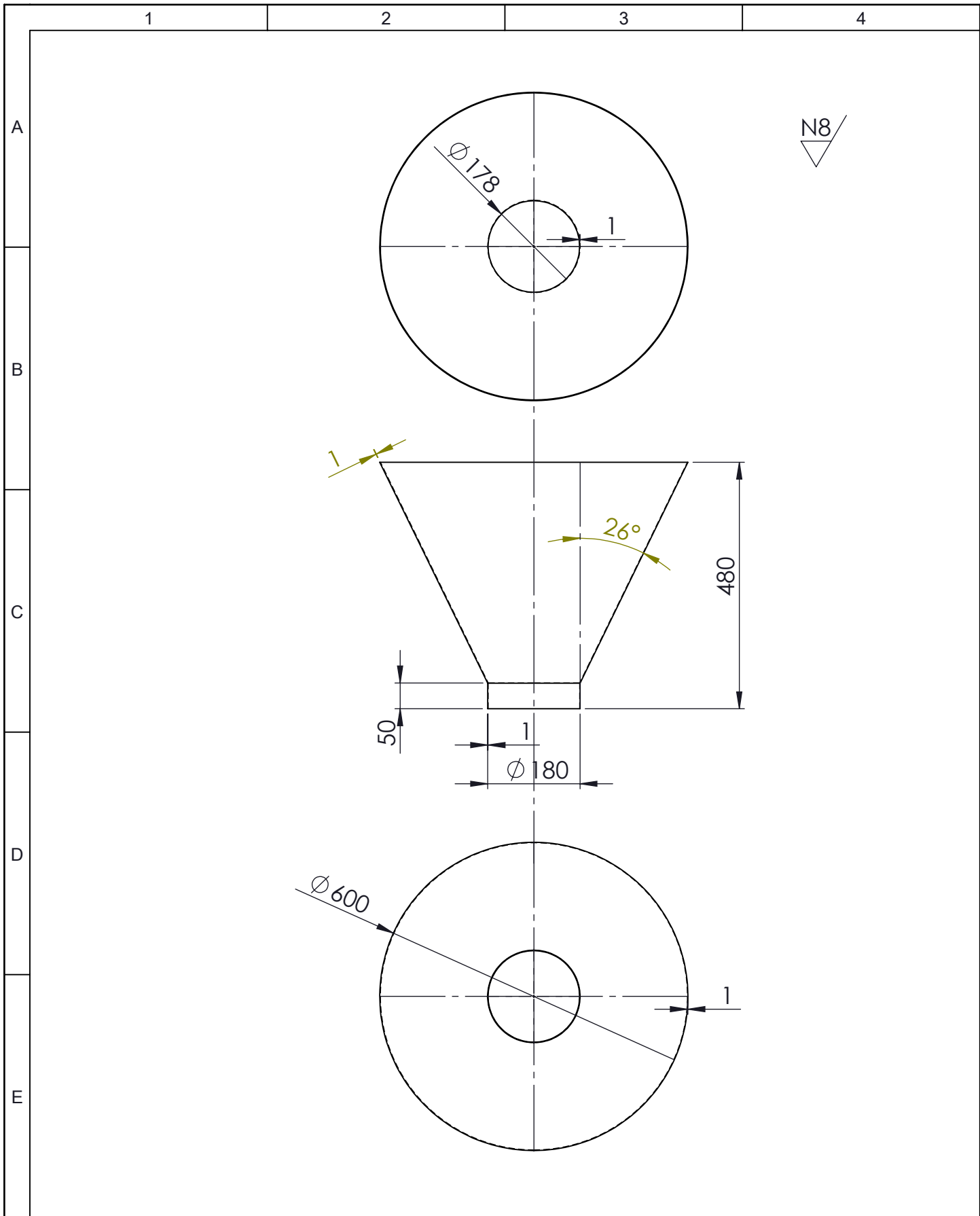


DETALLE B
ESCALA 2 : 1

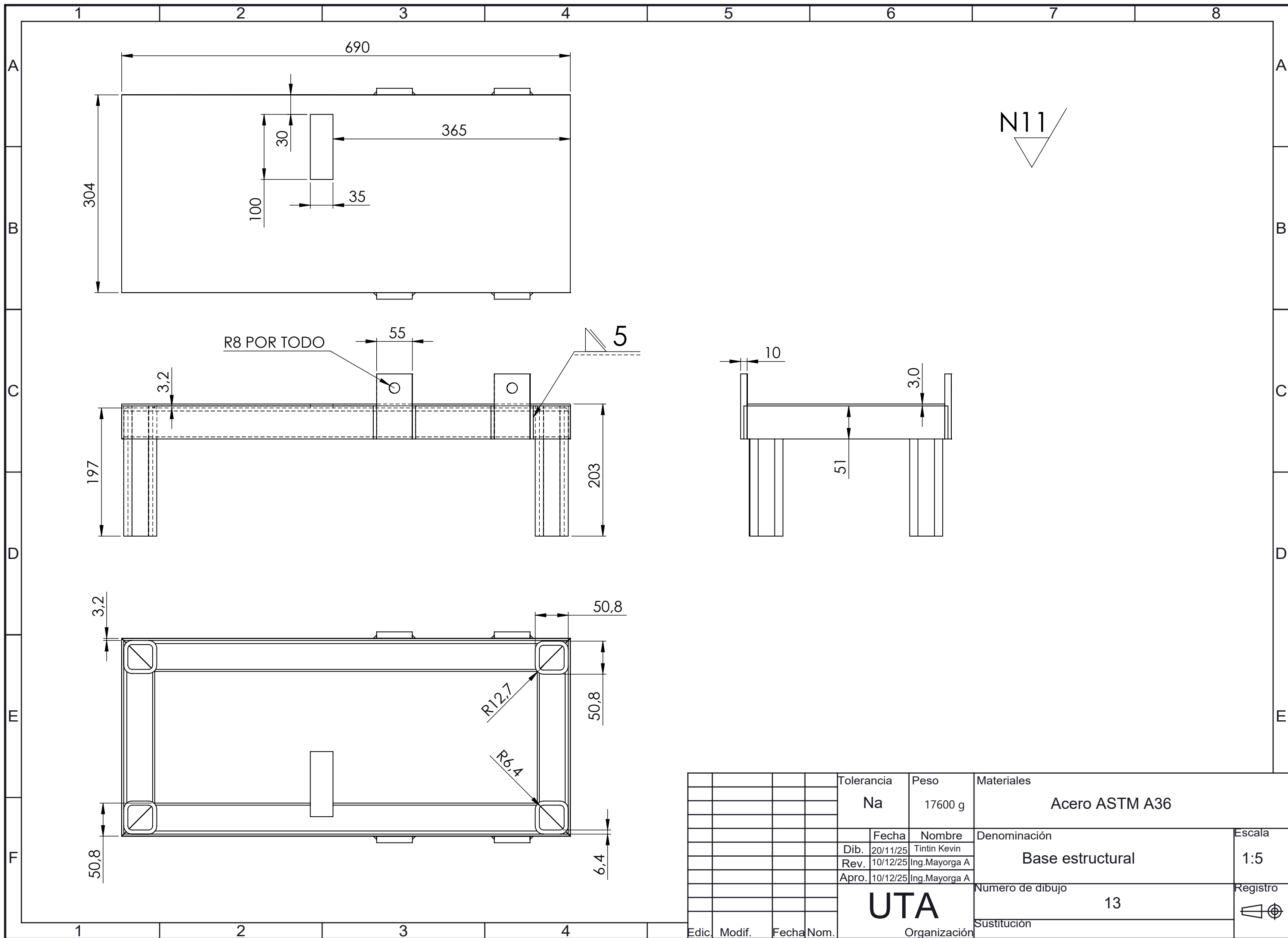
				Tolerancia	Peso	Materiales	
				Na	204 g	Acero A304	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	20/11/25	Tintin Kevin	Platina cuchilla
				Rev.	10/12/25	Ing.Mayorga A	
				Apro.	10/12/25	Ing.Mayorga A	
				UTA		Numero de dibujo	Registro
						10	
Edic.	Modif.	Fecha	Nom.	Organización		Sustitución	



						Tolerancia	(Peso)	Materiales:			
						Na	801 g	Acero ASTM A36			
							Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:	
						Dibujó:	20/11/25	Tintin Kevin			
						Revisó:	10/12/25	Ing.Alex Mayorga			
						Aprobó:	10/12/25	Ing.Alex Mayorga			
						UTA			Número del dibujo:	11	
						Ingeniería Mecánica			(Sustitución)		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre								



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				Na	4822 g		
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 20/11/25	Tintin Kevin		
				Revisó: 10/12/25	Ing.Mayorga A		
				Aprobó: 10/12/25	Ing.Mayorga A		
				UTA Ingeniería Mecánica		Número del dibujo: 12	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



Anexo 2

Propiedades de los materiales empleados

ASTM A53 Grade A & B Steel Pipe
Chemical Composition and Mechanical Properties



Chemical Composition									
Grade	Max, %								
	Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulfur	Copper	Nickel	Chromium	Molybdenum	Vanadium
Type S (seamless pipe)									
Grade A	0.25	0.95	0.05	0.045	0.4	0.4	0.4	0.15	0.08
Grade B	0.3	1.2	0.05	0.045	0.4	0.4	0.4	0.15	0.08
Type E (electric-resistance-welded)									
Grade A	0.25	0.95	0.05	0.045	0.4	0.4	0.4	0.15	0.08
Grade B	0.3	1.2	0.05	0.045	0.4	0.4	0.4	0.15	0.08
Type F (furnace-welded pipe)									
Grade A	0.3	1.2	0.05	0.045	0.4	0.4	0.4	0.15	0.08

Mechanical Properties		
Strength	Grade A	Grade B
Tensile strength, min, psi [MPa]	48 000 [330]	60 000 [415]
Yield strength, min, psi [MPa]	30 000 [205]	35 000 [240]
Elongation in 2 in. or 50 mm	$e = 625\,000 [1940] A^{0.2}/U^{0.9}$	

Ficha Técnica Acero Galvanizado

Propiedades Mecánicas

Norma : NTC 4011 – ASTM A653

Calidad Comercial CS*		Fluencia YP Mínima	Resistencia Máxima-Mínima	Elongación Mínima
		MPa	MPa	%
		205/380	----	≥ 20

Calidad Estructural SS	GRADO	Fluencia YP Mínima	Resistencia Máxima-Mínima	Elongación Mínima
		MPa	MPa	%
	33	230	310	20
	37	255	360	18
	40	275	380	16
	50	340	450	12



Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del acero de aleación AISI 4340 recocido se muestran en la siguiente tabla.

Propiedades	Métrico	Imperial
Resistencia a la tracción	745 MPa	108000 psi
Fuerza de fluencia	470 MPa	68200 psi
Módulo volumétrico (típico del acero)	140 GPa	20300 ksi
Módulo de corte (típico del acero)	80 GPa	11600 ksi
Módulo elástico	190-210 GPa	27557-30458 ksi
coeficiente de Poisson	0,27-0,30	0,27-0,30
Alargamiento de rotura	22%	22%
Reducción de área	50%	50%
Dureza, Brinell	217	217
Dureza Knoop (convertida de dureza Brinell)	240	240
Dureza Rockwell B (convertida de dureza Brinell)	95	95
Dureza Rockwell C (convertida de dureza Brinell. Valor por debajo del rango normal de HRC, solo para fines comparativos)	17	17
Dureza Vickers (convertida de dureza Brinell)	228	228
Maquinabilidad (recocido y estirado en frío. Basado en una maquinabilidad del 100% para acero AISI 1212).	50	50



Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del acero de aleación AISI 8620 recocido se describen en la siguiente tabla.

Propiedades	Métrico	Imperial
Resistencia a la tracción	530 MPa	76900 psi
Fuerza de fluencia	385 MPa	55800 psi
Módulo elástico	190-210 GPa	27557-30458 ksi
Módulo volumétrico (típico del acero)	140 GPa	20300 ksi
Módulo de corte (típico del acero)	80 GPa	11600 ksi
coeficiente de Poisson	0,27-0,30	0,27-0,30
Impacto de Izod	115 J	84,8 pies-libra
Dureza, Brinell	149	149
Dureza Knoop (convertida de dureza Brinell)	169	169
Dureza Rockwell B (convertida de dureza Brinell)	80	80
Dureza Vickers (convertida de dureza Brinell)	155	155
Maquinabilidad (laminado en caliente y estirado en frío, basado en una maquinabilidad del 100 % para acero AISI 1212)	65	65



Propiedades mecánicas **Acero SAE 1045**

Propiedades mecánicas	Métrico	Imperial
Dureza, Brinell	163	163
Dureza Knoop (convertida de dureza Brinell)	184	184
Dureza Rockwell B (convertida de dureza Brinell)	84	84
Dureza Vickers (convertida de dureza Brinell)	170	170
Resistencia a la tracción, máxima	565 MPa	81900 psi
Resistencia a la tracción, límite elástico	310 MPa	45000 psi
Alargamiento de rotura (en 50 mm)	16,0 %	16,0 %
Reducción de área	40,0 %	40,0 %
Módulo de elasticidad (típico del acero)	200 GPa	29000 ksi
Módulo volumétrico (típico del acero)	140 GPa	20300 ksi
Relación de Poisson (típica del acero)	0.290	0.290
Módulo de corte (típico del acero)	80 GPa	11600 ksi



Tabla 2c. Propiedades mecánicas de aleaciones de acero inoxidable 304 : barras y secciones de hasta 160 mm de diámetro/espesor

Calificación	304	304L	304H
Resistencia a la tracción (MPa)	500 - 700	500 - 700	500 - 700
Prueba de tensión (MPa)	190	175 minutos	185 minutos
Alargamiento A50 mm	45 Mín %	45 Mín %	40 Mínimo %
Dureza Brinell	215 máx. HB	215 máx. HB	-